НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ

ПО ФИЗИКЕ

1901 - 1921

1901

Вильгельм Конрад
Рентген
1845-1923

1902

Хендрик Антон Лоренц
1853-1928

Питер Зееман
1865-1943

1904

Лорд Рэлей
(Джон Уильям Стретт)
1842-1919

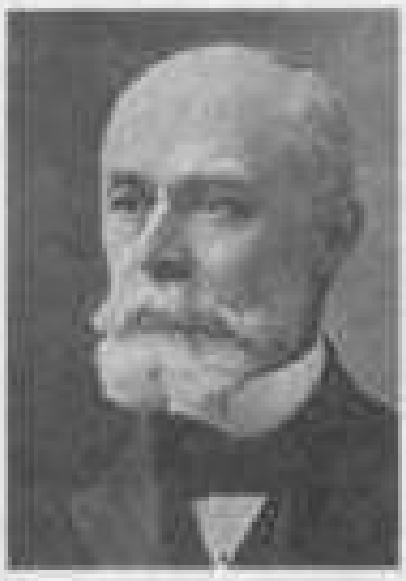
1905

Филипп Эдуард
Антон фон Ленард
1862-1947

1906

Джозеф Джон Томсон
1856-1940

1903



Антуан Анри Беккерель
1852-1908

Пьер Кюри
1859-1906

Мария Склодовская-Кюри
1867-1934

1907

Альберт Абрахам
Майкельсон
1852-1931

1908

Габриэль Липман
1845-1921

1909

Гульельмо
Маркони
1874-1937

Карл Фердинанд
Браун
1850-1918

Институт
Компьютерных
Исследований

NOBEL LECTURES

PHYSICS

1901-1921

NOBELSTIFTELSEN

The Nobel Foundation

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ

ПО ФИЗИКЕ

1901-1921

Перевод с английского Н. А. Зубченко

Под редакцией к. ф.-м. наук С. Г. Новокшонова

МОСКВА
Редакция журнала
"УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК"

Москва ♦ Ижевск

2002

УДК 530

Интернет-магазин

MATHESIS

http://shop.rcd.ru

• физика
• математика
• биология
• техника

Нобелевские лекции по физике. 1901–1921 гг. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; Москва: Редакция журнала «Успехи физических наук», 2002, 416 стр.

Книга представляет собой первый том лекций нобелевских лауреатов по физике за 1901–1921 гг., дополненные статьями, содержащими биографические и исторические сведения. С помощью этих лекций можно проследить внутреннюю динамику развития физики, познакомиться с идеями, приведшими к крупным научным открытиям, ознакомиться с научными биографиями ученых.

Книга будет полезной для широкого круга специалистов, студентов и аспирантов, в том числе для историков науки.

ISBN 5-93972-186-9

© Nobel Foundation, Stockholm, 2002
© Институт компьютерных исследований, 2002
© Редакция журнала «Успехи физических наук», 2002

http://rcd.ru

Оглавление

1901 Вильгельм Конрад Рентген 8
Биография В. К. Рентгена 8

1902 Хендрик Антон Лоренц, Питер Зееман 12
Х. А. Лоренц. Теория электронов и распространения света 12
Биография Х. А. Лоренца 29
П. Зееман. Излучение света в магнитном поле 33
Биография П. Зеемана 41

1903 Антуан Анри Беккерель, Пьер Кюри, Мария Склодовская-Кюри 46
А. А. Беккерель. О радиоактивности, новом свойстве материи 46
Биография А. А. Беккереля 67
П. Кюри. Радиоактивные вещества и, в частности, радий . 69
Биография П. Кюри 75
Биография М. Кюри 76

1904 Лорд Рэлей (Джон Уильям Стретт) 79
Лорд Рэлей. Плотность газов в воздухе и открытие аргона 79
Биография лорда Рэлея 87

1905 Филипп Эдуард Антон фон Ленард 90
Филипп фон Ленард. О катодных лучах 90
Хронология публикаций 119
Биография Ф. фон Ленарда 124

1906 Джозеф Джон Томсон 129
Дж. Дж. Томсон. Носители отрицательного электричества 129
Биография Дж. Дж. Томсона 138

1907 Альберт Абрахам Майкельсон 141
А. А. Майкельсон. Последние достижения в спектроскопии 141
Биография А. А. Майкельсона 154

1908 Габриэль Липман 158
Г. Липман. Цветная фотография 158
Биография Г. Липмана 160

1909 Гульельмо Маркони, Карл Фердинанд Браун 163
Г. Маркони. Беспроволочная телеграфная связь 163
Биография Г. Маркони 193
К. Ф. Браун. Электрические колебания и беспроволочная телеграфия 197
Биография К. Ф. Брауна 219

1910 Йоханнес Дидерик Ван дер Ваальс 221
Й. Д. Ван дер Ваальс. Уравнение состояния газов и жидкостей 221
Биография Й. Д. Ван дер Ваальса 233

1911 Вильгельм Вин 237
В. Вин. О законах теплового излучения 237
Биография В. Вина 250

1912 Нильс Густав Дален 253
Биография Н. Г. Далена 253

1913 Хейке Камерлинг-Оннес 256
Х. Камерлинг-Оннес. Исследования свойств веществ при низких температурах, которые, помимо всего прочего, привели к получению жидкого гелия 256
Добавлено для доказательства 288
Биография Х. Камерлинг-Оннеса 288

1914 Макс фон Лауэ 292
М. фон Лауэ. Об открытии интерференции рентгеновских лучей 292
Биография М. фон Лауэ 302

1915 Уильям Генри Брэгг, Уильям Лоуренс Брэгг 307
Биография У. Г. Брэгга 307
У. Л. Брэгг. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах 309
Биография У. Л. Брэгга 326

1917 Чарлз Гловер Баркла 330
Ч Г. Баркла. Характеристическое рентгеновское излучение 330
Биография Ч. Г. Баркла 338

1918 Макс Планк 341
М. Планк. Возникновение и современное состояние теории квантов 341
Биография М. Планка 352

1919 Йоханнес Штарк 355
Й. Штарк. Структурные и спектральные изменения химических атомов 355
Биография Й. Штарка 364

1920 Шарль Эдуард Гильом 367
Ш. Э. Гильом. Инвар и элинвар 367
Биография Ш. Гильома 400

1921 Альберт Эйнштейн 403
А. Эйнштейн. Основные понятия и проблемы теории относительности 403
Биография А. Эйнштейна 413

Вильгельм Конрад Рентген

«в знак признания выдающихся заслуг перед наукой, выразившихся в открытии замечательных лучей, названных впоследствии его именем»

Вильгельм Конрад Рентген лекции не читал.

Биография

Вильгельм Конрад Рентген родился 27 марта 1845 года в Леннепе в Нижне-Рейнской Провинции Германии. Он был единственным ребенком производителя и продавца ткани. Его матерью была Шарлотта Констанция Фровейн из Амстердама, принадлежавшая к древнему Леннепскому роду, обосновавшемуся в Амстердаме.

Когда Вильгельму было три года, его семья перебралась в Апельдорн, в Нидерландах, где он поступил в Институт Мартинуса Германа ван Дорна — закрытое учебное заведение. Он не обнаружил особых способностей ни к каким предметам, но проявлял любовь к природе и обожал бродить по полям и лесам. Больше всего прочего мальчик был склонен придумывать механические устройства — это качество не покинуло его и в более старшем возрасте. В 1862 году он поступил в техническую школу в Утрехте, из которой его исключили вследствие несправедливого обвинения в том, что он нарисовал на одного из преподавателей карикатуру, автором которой, в действительности, был совсем другой человек.

В 1865 году Вильгельм сделал попытку поступить в Утрехтский университет, чтобы изучать физику. Не имея аттестата, необходимого для обычного студента, и узнав, что, сдав экзамен, он может поступить

в Федеральный технологический институт в Цюрихе, он так и сделал и начал там учиться, готовясь стать инженером. Он посещал лекции Клаузиуса и работал в лаборатории Кундта. И Кундт, и Клаузиус оказали огромное влияние на развитие Рентгена. В 1869 году он получил степень доктора философии в Цюрихском университете и был назначен ассистентом Кундта, после чего вместе со своим профессором он в тот же год уехал в Вюрцбург, а через три года — в Страсбург.

В 1874 году Рентген получил право читать лекции в Страсбургском университете, а в 1875 году его назначили профессором Сельскохозяйственной Академии в Гогенхейме, Вюртемберг. В 1876 году он вновь вернулся в Страсбург в качестве профессора физики, но три года спустя принял руководство кафедрой физики в Гессенском университете.

Отклонив предложения о занятии подобного поста в университетах Йены (1886) и Утрехта (1888), он принял его от Вюрцбургского университета (1888), где стал преемником Кольрауша и работал вместе с Гельмгольцем и Лоренцом. В 1899 году он отказался от руководства кафедрой физики, которую ему предложили в Лейпцигском университете, но в 1900 году он принял кафедру физики, предложенную ему в Мюнхенском университете по специальной просьбе Баварского правительства, сменив на этом посту Э. Ломмеля. Именно там он оставался до конца своей жизни, несмотря на то, что ему предлагали стать президентом Физико-технического института (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) в Берлине, а также принять кафедру в Берлинской академии наук. Оба эти предложения Рентген отклонил.

Первая работа Рентгена, опубликованная в 1870 году, была посвящена исследованию удельной теплоемкости газов; несколько лет спустя за ней последовала работа по теплопроводности кристаллов. Среди других изучавшихся им проблем были: электрические и другие свойства кварца; влияние давления на коэффициент преломления различных жидкостей; изменение плоскости поляризации света под воздействием электромагнитного поля; различия в температурных зависимостях и сжимаемость воды и других жидкостей; явления, сопровождающие растекание масляных капель по поверхности воды.

Однако при всем этом имя Рентгена ассоциируется, главным образом, с открытием лучей, которые он назвал Х-лучами. В 1895 году он изучал явления, сопутствующие прохождению электрического тока через газ, находящийся под чрезвычайно низким давлением. До него исследованиями в этой области занимались И. Плюккер (1801–1868), И. Гитторф (1824–1914), К. Варли (1828–1883), Э. Гольдштейн (1850–1931), сэр Уильям Крукс (1832–1919), Г. Герц (1857–1894) и Ф. фон Ле-

нард (1862–1947). Именно благодаря работе этих ученых были изучены свойства катодных лучей — так Гольдштейн назвал электрический ток, устанавливающийся в сильно разреженных газах под воздействием электричества очень высокого напряжения, генерируемого индукционной катушкой Румкорфа. Однако, работая с катодными лучами, Рентген пришел к открытию нового и совершенного иного вида лучей.

Вечером 8 ноября 1895 года он обнаружил, что если разрядную трубку обернуть плотным черным картоном, чтобы изолировать ее от света, и если работать в темной комнате, то на расположенном на пути лучей бумажном экране, смоченном платино-синеродистым барием, наблюдается флуоресценция даже тогда, когда экран находится на расстоянии двух метров от разрядной трубки. Во время последующих экспериментов он обнаружил, что объекты различной толщины, расположенные на пути лучей, при записи на фотопластинку проявляют по отношению к этим лучам различную степень прозрачности. Когда он на несколько мгновений поднес к фотопластинке, на которую были направлены лучи, руку своей жены, после проявления пластинки он увидел на ней изображение руки, на котором явно виднелись темные тени костей и кольца, окруженные полутенью плоти, которая лучше пропускает лучи, вследствие чего отбрасывает более слабую тень. Это была первая в мире «рентгенограмма».

Во время дальнейших экспериментов Рентген показал, что новые лучи возникают при ударе катодных лучей о материальный объект. Так как в то время их природа была неизвестна, он назвал их Х-лучами. Впоследствии Макс фон Лауэ и его ученики показали, что эти лучи имеют, подобно свету, электромагнитную природу, но отличаются от последнего более высокой частотой колебаний.

Всевозможные почести посыпались на Рентгена как из рога изобилия. В нескольких городах в его честь были названы улицы, а перечисление всех премий, медалей, почетных ученых степеней, назначений почетным членом и членом-корреспондентом научных обществ как в Германии, так и за границей, и всех прочих наград заняло бы целую страницу этой книги. Но, несмотря на все это, Рентген остался поразительно скромным и сдержанным человеком. На протяжении всей своей жизни он продолжал питать любовь к природе и часто бывал на открытом воздухе. Отпуск он чаще всего проводил в своем летнем домике, расположенном в Вейльгейме, у подножия Баварских Альп, где он развлекал своих друзей и нередко отправлялся в горные походы. Он был великим альпинистом и не раз попадал в опасные ситуации. Дружелюбный и учтивый от рождения, он всегда понимал взгляды и трудности других.

Но его всегда смущало присутствие ассистента и он предпочитал работать в одиночку. Большую часть используемых им приборов Рентген создал сам, проявив огромную изобретательность и экспериментальные навыки.

Рентген был женат на Анне Берте Людвиг из Цюриха, с которой он познакомился в кафе ее отца. Она была племянницей поэта Отто Людвига. Они поженились в 1872 году в Апелдорне, в Нидерландах. Своих детей у них не было, но в 1887 году они удочерили шестилетнюю Жозефину Берту Людвиг — дочь единственного брата миссис Рентген. Рентген умер от рака кишечника 10 февраля 1923 года, через четыре года после смерти своей жены.

Хендрик Антон Лоренц
Питер Зееман

«в знак признания выдающегося вклада, который они внесли своими исследованиями влияния магнетизма на явление излучения»

Хендрик Антон Лоренц

Теория электронов и распространения света

Нобелевская лекция, 11 декабря 1902 г.

Когда мы с профессором Зееманом узнали, что удостоились великой чести присвоения нам высокого отличия, мы сразу начали обсуждение, как лучше распределить роли в своих выступлениях. Проф. Зееман должен был выступить первым, чтобы описать открытое им явление, объяснить его и сделать краткий обзор своих последующих экспериментальных работ. Моей задачей должно было стать более глубокое рассмотрение наших современных знаний об электричестве и, в частности, так называемой электронной теории.

Невозможно выразить мое огорчение по поводу того, что болезнь помешала профессору Зееману приехать в Стокгольм, вследствие чего сейчас вы услышите лишь вторую часть нашей программы. Я надеюсь, что вы меня простите, если, учитывая эти обстоятельства, я скажу о главной теме — прекрасном открытии Зеемана — лишь несколько слов. Тем

не менее, краткое описание этого открытия вполне может предварить мои последующие размышления.

Вы прекрасно знаете, что еще Фарадей открыл, что магнитные силы могут влиять на распространение света. Фактически он показал, что в определенных условиях плоскость колебаний луча поляризованного света может вращаться под влиянием этих сил. Много лет спустя Керр обнаружил, что такой луч света испытывает подобные изменения и тогда, когда он просто отражается от полированного полюса магнита. Однако именно Зееман сумел показать, что магнитное поле воздействует не только на распространенне и отражение света, но и на сам процесс его излучения, то есть лучи, испускаемые источником, изменяют свои свойства, если этот источник помещен в промежутке между северным и южным полюсами магнита. Разницу можно увидеть при спектральном разложении света, если работать с источником света, спектр которого состоит из одиночных ярких линий; это может быть например, окрашенное пламя, электрическая искра или трубка Гейсслера. Чтобы иметь перед глазами конкретный пример, представьте, что мои руки, только расположенные гораздо ближе друг к другу, чем вы это сейчас наблюдаете, — это два полюса, а между ними, то есть в пространстве непосредственно передо мной, расположен источник света. Если исследовать спектр света, который попадает в точку, расположенную непосредственно напротив меня, то вместо одной спектральной линии, которая наблюдается в обычных условиях, мы увидим тройную линию, или триплет, компоненты которого, вероятно, расположены на очень маленьком расстоянии друг от друга. Поскольку каждая линия в спектре соответствует конкретной частоте света, мы можем сказать, что под влиянием магнитного поля источник света испускает колебания не одной, а трех различных частот. Если спектр состоит из более чем одной линии, то вы можете представить, что каждая линия расщепляется, образуя триплет. Однако я должен добавить, что эта ситуация не всегда настолько проста и многие спектральные линии расщепляются на бо́льшее число компонент.

Прежде чем перейти к теории, мне хотелось бы отметить, что, благодаря быстрой публикации результатов исследования и последующему оживленному обмену мнениями между учеными, большую часть достижений следует считать результатом огромного количества совместных усилий. В своей лекции, как и предполагалось, я буду говорить, главным образом, о своих собственных идеях, а также о пути, который привел меня к ним. Но при этом я очень прошу вас не забывать о том, что

многие другие физики, все имена которых я просто не смогу назвать за столь короткий промежуток времени, пришли к таким же или очень похожим выводам.

Теория, о которой я собираюсь вкратце вам рассказать, представляет физический мир в виде комбинации трех отдельных составляющих, или трех типов строительного материала. Это, во-первых, обыкновенная весомая материя или вещество, во-вторых, электроны и, в-третьих, эфир. Я очень мало буду говорить о веществе, гораздо больше об эфире и электронах. Я могу только надеяться, что мне удастся не выйти за рамки вашего терпения.

Что касается эфира — носителя света, заполняющего всю Вселенную, — после открытия Фарадея, о котором я уже упоминал, а также независимо от него было сделано множество попыток применить эфир и в теории электричества. К примеру, Эдлунд зашел так далеко, что отождествил электрическую жидкость с эфиром, приписывая положительно заряженному телу избыток эфира, а отрицательно заряженному — его недостаток. Он рассматривал эту среду как жидкость, которая подчиняется закону Архимеда, благодаря чему ему удалось приписать все электростатические эффекты взаимному отталкиванию частиц эфира.

В его теории также нашлось место и для электродинамического притяжения и отталкивания, возникающего между двумя металлическими проволоками, по которым протекает электрический ток. В действительности, он создал самое замечательное представление об этих эффектах, объяснив их тем, что для распространения взаимного отталкивания двух частиц эфира друг от друга необходимо определенное время; на самом деле, он считал аксиомой тот факт, что любое явление, происходящее в природе, занимает определенное время, сколь бы малым оно ни было. Эта идея, получившая столь полное развитие в наших современных взглядах, присутствует также в работах других, еще более старых физиков. Достаточно упомянуть одного Гаусса, который, как нам известно, не стал развивать эту мысль только потому, что ему недоставало ясной картины распространения. Такая картина, как он писал Вильгельму Веберу, могла бы послужить фундаментом электродинамической теории.

Путь, который открыл Эдлунд и на котором между эфиром и электричеством не делалось никакого различия, не мог привести к удовлетворительному синтезу оптических и электрических явлений. Гораздо ближе к поставленной цели подошел Лоренц, работавший в Копенгагене. Однако вам известно, что истинными основоположниками наших современных взглядов на этот предмет были Клерк Макс-

велл и Герц. Так как Максвелл продолжал развивать идеи, выдвинутые Фарадеем, и даже подвел под них общую основу, именно его считают создателем электромагнитной теории света, которая, в общих чертах, несомненно знакома каждому из вас. Максвелл учил нас, что световые колебания — это изменения состояния, имеющие ту же природу, что и электрические токи. Мы также можем сказать, что в каждом луче света присутствуют электрические силы, способные изменять направление чрезвычайно быстро — много миллиардов раз за секунду. Если вы представите на пути солнечного луча крошечную частицу, вроде знакомых нам пылинок, которые нередко можно наблюдать в воздухе, только гораздо меньших размеров, и если вы также представите, что эта частица имеет электрический заряд, тогда вы должны также предположить, что под воздействием световых колебаний она начинает совершать быстрое колебательное движение.

Сразу же после Максвелла я назвал Герца, этого великого немецкого физика, который, не покинь он нас так рано, безусловно оказался бы в числе первых ученых, кандидатуры которых ваша Академия рассматривала бы для выполнения своей ежегодной миссии. Кому не известны блестящие эксперименты, с помощью которых он подтвердил выводы, сделанные Максвеллом из его уравнений? Любой, кто видел эти эксперименты хотя бы однажды и научился понимать их и восхищаться ими, уже никогда не станет сомневаться в том, что электромагнитные волны, наблюдаемые в них, отличаются от световых лучей только большей длиной волны.

Результат этого и других исследований волн, распространяющихся в эфире, достиг кульминации в осознании существования в Природе целого диапазона электромагнитных волн, которые, в сущности, одинаковы по своей природе, сколь бы различны ни были их длины. Начиная с «лучей электрической силы» Герца, мы переходим к самым коротким волнам, создаваемым электромагнитными приборами, а затем, перепрыгнув через некоторый пустой промежуток, — к темным тепловым лучам. Мы движемся по спектру в область ультрафиолетового излучения, затем вновь встречаем пустоту, после которой, в самом конце диапазона, мы можем поставить Х-лучи, которые представляют собой чрезвычайно короткие интенсивные электромагнитные возмущения эфира. В самом начале нашего диапазона, еще перед волнами Герца, находятся волны, которые используются в беспроволочной телеграфии и распространения которых от северо-западной оконечности Англии до самого Финского залива добились прошлым летом.

Несмотря на то, что главным образом эксперименты Герца превратили основную идею теории Максвелла в общее достояние всех ученых, возможность попытки применения этой теории к частным проблемам оптики существовала и ранее. Мы начнем с простого явления преломления света. Со времен Гюйгенса было известно, что это явление связано с неравной скоростью распространения лучей света в различных веществах. Но почему же скорость света в твердых, жидких и газообразных веществах отличается от его скорости в эфире, заполняющем пустое пространство, так что для каждой из этих материальных сред существует собственное значение скорости света; и как можно объяснить, что эти значения, а следовательно, и коэффициент преломления, изменяются в зависимости от цвета световых лучей?

При рассмотрении этих вопросов уже в который раз оказалось, что даже в теории, от которой следует отказаться, можно почерпнуть немало полезного и нужного. В старой волновой теории, которая рассматривала эфир как упругую среду, уже говорилось о содержащихся в веществе крошечных частицах, которые способны двигаться под воздействием световых колебаний. Химическое и тепловое действие света пытались объяснить на основе этой передачи движения, а теория дисперсии света базировалась на гипотезе о том, что прозрачные вещества, вроде стекла и воды, также содержат частицы, которые под воздействием луча света начинают совершать синхронные колебания. Современному последователю Максвелла достаточно лишь перевести эту концепцию частиц, совершающих синхронные колебания, на язык электромагнитной теории света.

Так какими же должны быть эти частицы, если они приходят в движение под действием пульсирующих *электрических* сил луча света? Самый простой и очевидный ответ: они должны иметь электрический заряд. Именно тогда они будут вести себя точно так же, как крошечные заряженные пылинки, о которых мы говорили ранее, за исключением того, что частицы в стекле и воде следует представлять не свободно парящими, а связанными с некоторыми положениями равновесия, относительно которых они совершают колебания.

Во всем остальном эта мысль о крошечных заряженных частицах была ни в коей мере не нова; еще 25 лет назад явления электролиза объясняли, приписывая атомам металла в растворе соли положительный заряд, а другим составляющим молекулы соли — отрицательный заряд. Это заложило основы современной электрохимии, которая просто обязана была получить столь быстрое развитие, как только профессор

Аррениус высказал столь дерзкую идею о прогрессирующем росте диссоциации электролита с уменьшением его концентрации.

Но вернемся к распространению света в материальной среде. Мы пришли к заключению, что синхронно колеблющиеся частицы должны иметь электрический заряд, поэтому для удобства мы будем называть их «электронами», как их впоследствии назвал Джонстон Стоней. Хорошо известные законы электромагнетизма позволяют исследовать, как в точности происходит это синхронное колебание и как оно влияет на процессы, которые имеют место в эфире. В результате этого исследования были получены формулы для скорости распространения и коэффициентов преломления, которые, с одной стороны, зависят от периода колебаний — т.е. от цвета света, — а с другой стороны, от природы и количества электронов.

Вы простите меня, если я не буду приводить достаточно сложные уравнения, а лишь расскажу об их смысле. Во-первых, что касается зависимости коэффициента преломления от периода колебаний, т.е. дисперсии света: в спектре, полученном с помощью призмы, и в радуге мы имеем демонстрацию того, что электроны в стекле и воде имеют некоторую массу, вследствие чего они не одинаково быстро реагируют на колебания света разных цветов.

Во-вторых, если сосредоточить внимание на влиянии большего или меньшего количества частиц в определенном пространстве, то можно найти уравнение, которое дает нам возможность определить приблизительное изменение коэффициента преломления при увеличении или уменьшении плотности тела. Так, к примеру, зная коэффициент преломления воды, можно вычислить коэффициент преломления водяного пара. Это уравнение достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Когда я выводил эти формулы, я не знал, что Лоренц, работавший в Копенгагене, уже пришел к точно такому же результату, несмотря на то, что начал с совершенно иного подхода, который не имел к электромагнитной теории света никакого отношения. Поэтому это уравнение часто называли формулой Лоренц-Лоренца.

Этой формуле сопутствует еще одна, которая дает возможность вывести коэффициент преломления химического сложного вещества из его состава, но, вероятно, это лишь грубое приближение, которое можно было получить и ранее с помощью некоторой эмпирической формулы.

Тот факт, что подобная связь между преломлением света и химическим составом вещества вообще существует, имеет очень важное значение в электромагнитной теории света. Он демонстрирует, что пре-

ломляющая способность не относится к тем свойствам материи, которые полностью изменяются при образовании химического соединения. Относительные положения атомов и тип их связи не имеют первостепенной важности для скорости распространения света в сложном веществе. Важно лишь количество атомов углерода, водорода и т. д.; причем каждый атом играет свою роль в преломлении света и поведение других атомов не оказывает на него никакого влияния. Зная эти факты, трудно представить, что силы, которые удерживают электрон в равновесном положении и от величины которых зависит скорость света, создаются определенным количеством соседних атомов. Мы скорее заключим, что электрон, вместе с тем, к чему он привязан, располагается внутри отдельного атома, а следовательно, электроны меньше атомов.

Позвольте мне теперь привлечь ваше внимание к эфиру. Поскольку мы научились рассматривать последний как носитель не только оптических, но и электромагнитных явлений, проблема его природы становится более острой, чем когда-либо ранее. Должны ли мы представлять эфир как упругую среду, имеющую очень низкую плотность и состоящую из атомов, которые очень малы по сравнению с обычными? Или, может быть, это несжимаемая жидкость, в которой отсутствует трение и которая движется согласно гидродинамическим уравнениям и вследствие этого может содержать различные турбулентные движения? Или мы должны считать эфир разновидностью желе: чем-то полужидким, полузастывшим?

Совершенно ясно, что к ответам на эти вопросы мы подошли бы гораздо ближе, если бы имели возможность экспериментировать с эфиром так же, как мы это делаем с жидкой или газообразной материей. Если бы мы могли заключить определенное количество этой среды в сосуд и сжать его с помощью поршня или дать ему возможность перетечь в другой сосуд, мы бы уже достигли многого. Это означало бы перемещение эфира под действием движущегося тела. К сожалению, ни один подобный эксперимент нельзя назвать успешным; эфир постоянно выскальзывает из наших рук. Представьте обыкновенный барометр, который мы наклоняем так, что ртуть поднимается к самому верху, полностью заполняя трубку. Эфир, который первоначально находился над ртутью, должен был куда-то переместиться; он должен был либо пройти через стекло, либо поглотиться металлом, и все это без воздействия на него какой-либо силы, которую мы могли бы измерить. Эксперименты такого рода показывают, что, судя по всему, тела нормальных размеров полностью проницаемы для эфира. Применимо ли

это в равной степени к гораздо бо́льшим телам, или мы можем надеяться, что нам удастся сместить эфир с помощью некоторого огромного и очень быстро движущегося поршня? К счастью, природа проводит такой эксперимент в большом масштабе. Как-никак, в своем годовом путешествии вокруг Солнца Земля движется через космическое пространство со скоростью, более чем в тысячу раз превышающей скорость экспресса. Мы могли бы ожидать, что при таких обстоятельствах неподвижности эфира должен был бы прийти конец; Земля толкала бы его перед собой, и эфир перетекал бы за планету либо по ее поверхности, либо на некотором расстоянии от нее, чтобы занять то пространство, которое только что освободила Земля. Астрономическое наблюдение положений небесных тел обеспечивает точное средство, помогающее определить, так ли это на самом деле; движения эфира несомненно оказывали бы хоть какое-то влияние на распространение световых лучей.

И опять на наш вопрос о том, движется ли эфир, мы получаем отрицательный ответ. Направление, в котором мы наблюдаем звезду, определенно отличается от истинного направления ее расположения из-за движения Земли — это так называемая аберрация света. Однако самым простым объяснением этого явления, безусловно, будет принятие того, что вся Земля полностью проницаема для эфира и может двигаться через него, не увлекая его за собой. Впервые эту гипотезу выдвинул Френель, и вряд ли мы сможем ее опровергнуть в настоящее время.

Если мы пожелаем дать отчет о важности этого результата, нам придется рассмотреть кое-что еще. Благодаря исследованиям Ван дер Ваальса и других физиков, мы довольно точно знаем, какую часть пространства, занимаемого телом, действительно занимают его молекулы. В достаточно плотных веществах это доля настолько велика, что нам сложно представить, что Земля имеет настолько свободную молекулярную структуру, что эфир почти абсолютно беспрепятственно может протекать через промежутки между ее молекулами. Нам скорее придется принять, что проницаемой для эфира является каждая отдельная молекула. Далее, проще всего предположить, что то же самое относится и к каждому атому, что приводит нас к мысли о том, что, в крайнем случае, атом представляет собой некоторую локальную разновидность вездесущего эфира, разновидность, которая способна двигаться с места на место, не вызывая при этом изменения положения самой среды. Придя к такому выводу, мы можем рассматривать эфир как субстанцию совершенно иной природы, абсолютно отличную от вещества. Что же касается внутреннего строения эфира, то при настоящем состоянии на-

шего знания нам очень сложно дать хоть сколь-нибудь адекватную его картину.

Вряд ли мне нужно упоминать, что, помимо вопроса строения, всегда будет важно обрести большее понимание передачи через эфир действий, которые кажутся удаленными друг от друга, посредством демонстрации того, как подобные эффекты могут происходить, например, в жидкости. Сейчас я говорю, в частности, об экспериментах профессора Бьеркнеса из Христиании[1] с силами, передаваемыми гидродинамически, и о его имитации электрических явлений с помощью пульсирующих сфер.

Итак, я подхожу к важному вопросу, который очень тесно связан с неподвижностью эфира. Вам известно, что при определении скорости звука на открытом воздухе необходимо учитывать влияние ветра. Если ветер дует на наблюдателя, искомое значение увеличится на величину скорости ветра, а если он дует в противоположном направлении, то наше значение уменьшится на ту же самую величину. Тогда, если движущееся прозрачное тело, например, текущая вода, во всем своем объеме переносит содержащийся в ней эфир, то оптические явления должны вести себя практически таким же образом, какой мы только что описали в отношении явлений акустических. Рассмотрим, к примеру, случай, когда вода течет по трубе, а луч света распространяется *в толще* этой воды в направлении течения. Если все, что составляет световые колебания, подвержено движению течения, то распространение света в текущей воде будет по отношению к последней вести себя точно так же, как и в неподвижной воде. Скорость распространения света относительно стенки трубы можно определить, складывая скорость его распространения *в* воде со скоростью потока воды, аналогично тому, как мяч, катящийся по палубе корабля в направлении движения последнего, для наблюдателя, стоящего на берегу, имеет скорость, равную сумме двух скоростей: скорости корабля и скорости, с которой мяч катится по его палубе. Согласно этой гипотезе вода увлекала бы световые волны с полной скоростью своего собственного течения.

Совершенно другой вывод мы получаем, если принимаем, как мы теперь должны это делать, что эфир, содержащийся в текущей воде, неподвижен. По мере того как свет частично распространяется через этот эфир, несложно увидеть, что распространение световых лучей, например, в правую сторону, должно происходить медленнее, чем это было бы, если бы эфир тоже двигался вправо. Безусловно, световые волны

[1]Сейчас Осло.

увлекаются потоком воды, но при этом они приобретают лишь некоторую долю скорости этого потока. Френель уже показал величину этой доли; она зависит от коэффициента преломления вещества: для воды, например, эта доля равна 0,44. Принимая эту цифру, можно объяснить различные явления, связанные с аберрацией. Однако Френель вывел это значение из теории, которую, несмотря на всю ее оригинальность, мы более не можем считать верной.

В 1851 году эту проблему решил Физо, проведя свой знаменитый эксперимент, в ходе которого он сравнил распространение света в воде, направление течения которой совпадает с направлением распространения света, и распространение света в воде, которая течет в противоположном направлении. Результат этих экспериментов, которые впоследствии повторили Майкельсон и Морли, полностью совпал со значениями, которые Френель принял для коэффициента увлечения света движущимися телами.

Затем возник вопрос, можно ли вывести эту величину из новой теории света. В этой связи, прежде всего, нужно было разработать теорию электромагнитных явлений в движущихся средах, принимая, что эфир не участвует в их движении. Чтобы найти исходную точку для такой теории, я опять-таки вернулся к электронам. Я полагал, что электроны должны быть проницаемы для эфира и что каждый электрон должен быть центром электрического, а также, в случае его движения, и магнитного поля. Что касается состояния эфира, я ввел уравнения, которые стали общепринятыми после работы Герца и Хевисайда. Затем я добавил некоторые допущения относительно силы, действующей на электрон, а именно: эта сила всегда создается эфиром, находящимся в непосредственной окрестности электрона, вследствие чего она *прямо* зависит от состояния этого эфира и *косвенно* — от зарядов и скоростей других электронов, которые создали это состояние. Более того, эта сила зависит от заряда и скорости частицы, на которую оказывается воздействие; эти значения определяют чувствительность электрона к действию, произведенному эфиром. Развивая эти идеи, я использовал методы, восходящие к Максвеллу, и частично полагался на работу Герца. Таким образом, я пришел к полученному Френелем коэффициенту увлечения света движущимися телами, и довольно просто смог объяснить большинство оптических явлений в движущихся телах.

В то же самое время начала создаваться общая теория, которая приписывала электронам все электромагнитные процессы, происходящие в материальных средах. В этой теории электрический заряд по-

нимается как избыток положительных или отрицательных электронов, а ток в металлической проволоке рассматривается как упорядоченное движение этих частиц, которым приписывается некоторая подвижность, присутствующая в проводниках, тогда как в диэлектриках эти частицы привязаны к некоторым положениям равновесия, относительно которых, как уже было сказано, они могут совершать колебательное движение. В некотором смысле, эта теория являет собой возвращение к более ранней идее о двух электрических субстанциях, за исключением того, что сейчас согласно идеям Максвелла мы должны работать с действиями, передающимися через эфир и распространяющимися из одной точки в другую со скоростью света. Поскольку природу и характер этой передачи можно разобрать во всех подробностях, требование, которое Гаусс предъявил к электродинамике, можно считать выполненным. Я не могу уделить этим вопросам больше времени, но мне хотелось бы отметить, что Вихерт в Геттингене и Лармор в Кембридже получили очень похожие результаты и что профессор Пуанкаре также сделал большой вклад в развитие этой теории.

Чтобы не слишком отклоняться от теории эффекта Зеемана, мне также придется пропустить множество явлений, которые были исследованы за последние годы и в которых концепция электронов показала себя полезным ориентиром.

Когда профессор Зееман сделал свое открытие, электронная теория, в ее основных чертах, уже была завершена и могла объяснить новое явление. Человек, населивший мир электронами и заставивший их совершать колебания синхронно со световыми, без зазрения совести допустит, что именно электроны совершают колебания внутри частиц раскаленного вещества и создают излучение света. Колеблющийся электрон представляет собой крошечный вибратор Герца; его воздействие на окружающий эфир во многом напоминает тот эффект, который мы создаем, когда беремся за один конец натянутого шнура и, двигая веревку туда-сюда, устанавливаем знакомое нам волновое движение. Что касается силы, вызывающей изменение в колебаниях магнитного поля, это, по сути дела, та сила, проявления которой впервые наблюдал Эрстед, когда открыл влияние тока на стрелку компаса.

Я оставлю объяснение триплетов профессору Зееману, а сам ограничусь замечанием, что колебания совершают отрицательные электроны и что из расстояния между компонентами, на которые расщепляется спектральная линия, можно вывести отношение численных значений заряда и массы этих частиц. Полученные результаты полностью согласуются с теми, что были найдены при других обстоятельствах. Те же

или близкие значения вышеупомянутого отношения были получены для отрицательных частиц, которые мы обнаруживаем в катодных лучах.

Нашего внимания заслуживает также огромное значение отношения заряда этих частиц к их массе. Чтобы дать вам некоторое представление об этом, я приведу численный пример. Представьте, что у нас есть две железные сферы радиусом в один метр, расположенные на расстоянии десяти метров друг от друга, и что мы придали каждой из них избыток наших отрицательных электронов такого размера, что масса этого избытка составляет одну миллионную долю миллиграмма. В этом случае сферы будут отталкиваться с силой, эквивалентной весу более 80 000 килограммов, вследствие чего они смогут развить скорость множества метров в секунду. Вряд ли мне нужно говорить, что мы далеки от проведения эксперимента такого масштаба; мы просто не можем сконцентрировать на одном теле такое огромное количество электронов одного конкретного типа. Если бы это было возможно, мы могли бы провести множество интересных экспериментов, о которых сейчас можем только мечтать. Например, мы могли бы продемонстрировать эффект Зеемана с помощью простого маятника. Этот маятник можно легко привести в круговое колебательное движение, и если его навеске придать электрический заряд, то вертикальная составляющая магнитного поля Земли несколько изменит период вращения, который увеличится в одном направлении и уменьшится в другом. Но с теми зарядами, которые есть в нашем распоряжении, эту разницу ощутить невозможно, так что даже сам профессор Зееман не смог бы наблюдать названный его именем эффект на маятнике.

А сейчас давайте перейдем от относительных величин заряда и массы к их абсолютным значениям. Эти значения мы, по крайней мере, можем оценить. Если мы объединим результаты, к которым приводят эксперименты Зеемана, с теми следствиями, которые можно вывести из дисперсии света в газах, на основе гипотезы о том, что в обоих случаях рассматривается один и тот же тип электронов, мы приходим к выводу, что заряд электрона имеет величину того же порядка, что и заряд иона электролита. Однако его масса гораздо меньше и составляет около 1/1800 массы атома водорода. Дж. Дж. Томсон в Кембридже подтвердил этот результат с помощью абсолютно другого метода. В настоящее время нас не волнует точное значение; принципиально важно то, как мы уже замечали ранее, что электрон очень мал по сравнению с атомом. Последний представляет собой сложную структуру, которая может содержать множество электронов, как подвижных, так и неподвижных; он может переносить электрические заряды, которые

не сосредоточены в отдельных точках, а распределены каким-то другим образом.

Что касается других магнитооптических явлений, то более или менее подробно я опишу лишь одно из них. Вскоре после того как Зееман опубликовал свое открытие, русские физики Егоров и Георгиевский обнаружили, что пламя натрия, расположенное между полюсами электромагнита, испускает частично поляризованный свет, т. е. в его лучах в определенном направлении присутствуют световые колебания большей интенсивности, чем колебания в направлении, перпендикулярном вышеназванному. Чтобы более точно описать вам это явление и в то же время показать, как его следует объяснять, я еще раз попрошу вас представить, что мои руки — это два противоположных полюса магнита и что между ними расположено пламя натрия. Далее, если бы вы находились прямо напротив меня, то наблюдали бы, что электрические колебания, происходящие в вертикальной плоскости, обладают большей интенсивностью, чем колебания, происходящие в горизонтальной плоскости.

Это связано с тем, что пламя имеет определенную толщину и что лучи, испускаемые задней его половинкой, при прохождении через переднюю его половинку снова частично поглощаются. Согласно знакомому правилу этот эффект поглощения проявляется наиболее сильно, когда все раскаленные частицы в пламени совершают колебания одного и того же периода. Этот эффект уменьшается, вследствие чего пламя становится ярче, как только эта однородность периода колебаний каким-то образом нарушается. Что делает магнитное поле? Вместо *одного* общего периода колебаний оно создает несколько таких периодов. Однако созданное таким образом увеличение излучательной способности ограничивается вертикальными колебаниями в пламени, которое мы воображаем. Горизонтальные колебания электронов: справа-налево и наоборот, — совершенно не подвержены влиянию магнитного поля, что следует из теоретических принципов.

Следовательно, можно сделать вывод, что из всех испускаемых колебаний усиливаются только вертикальные, но не горизонтальные, что и является причиной наблюдаемого нами явления.

Я могу добавить, что это явление относится к разряду тех магнитооптических эффектов, пронаблюдать которые наиболее легко. Данное объяснение можно доказать, если использовать вместо одного пламени два и исследовать поглощение, которое испытывает свет заднего пламени в переднем, расположенном между полюсами магнита.

Теперь, когда я подошел к поглощению, я также должен рассмотреть компетентные и важные теоретические соображения, к которым откры-

тие Зеемана привело профессора Фойгта из Геттингена. Его теория отличается от моей тем, что он всегда размышлял не об испускании света, а о его поглощении. Он объясняет так называемый *обратный* эффект Зеемана, представляющий собой следующее явление: когда сильный белый свет передается через пламя, расположенное между полюсами, вместо полосы поглощения мы получаем триплет из темных линий. Опираясь на аналогию между поглощением и испусканием, можно перейти от этого обратного явления к прямому.

Фойгт не говорит об электронах, которые совершают колебания; он довольствуется тем, что добавляет в уравнения распространения света в поглощающей среде должным образом подобранные новые слагаемые. Этот метод помогает найти связь между эффектом Зеемана и вращением направления колебания, которое открыл Фарадей, а также имеет другие преимущества, например, в случае с парáми достаточно высокой плотности, имеющими соответственно более широкие спектральные линии. Пример эффектов теории Фойгта вам сможет привести профессор Зееман.

Однако любой, кто ставит перед собой задачу сделать выводы из этих наблюдений относительно природы колебаний электронов, по-моему, предпочтет выбрать в качестве объекта изучения эмиссию из очень разреженных газов. В данном случае излучение отдельных молекул или атомов, незатемненное их действием друг на друга, проявляется в виде резких линий в спектре. В своих более поздних исследованиях я следовал именно этому курсу, но столкнулся со значительными трудностями, вызванными тем, что хотя простой триплет появляется достаточно часто, во многих случаях наблюдается расщепление более, чем на три линии. Это камень преткновения на пути теории. Но, во всяком случае, несложно вывести некоторые общие правила о состоянии поляризации световых лучей, соответствующих различным компонентам, т. е. о форме и направлении их колебаний, но, к сожалению, я вряд ли сумел продвинуться хоть сколь-нибудь дальше.

До тех пор пока мы говорим только о расщеплении на три компоненты, достаточно предполагать, что каждый возбужденный атом содержит один электрон, который может совершать колебания около своего положения равновесия одинаково во всех направлениях. Однако эта простая теория перестает нас удовлетворять, как только спектральные линии в магнитном поле расщепляются более, чем на три компоненты. Тогда очевидно, что мы должны представить атомы более сложной структуры, которые имеют электрический заряд и части которых способны совершать малые колебания, подобно частям упругого резонирующего тела.

Когда я исследовал теорию таких движений, что можно сделать без особого труда, стало очевидно, что подобная произвольная система в общем случае вовсе не проявляет эффект Зеемана.

Однако чтобы понять это и найти условие, необходимое для возникновения такого эффекта, математическая теория не нужна. Представьте источник света, который под воздействием магнитного поля проявляет триплет Зеемана. Трех линий, естественно, не может появиться, пока частицы источника света не начнут совершать колебания трех разных типов с несколько отличными периодами. Но эти периоды могут быть отличны, только если направления движения или формы траектории во всех трех случаях являются разными. Короче говоря, в источнике света присутствуют три различных *типа колебаний*, каждый из которых имеет свою частоту.

Теперь мы будем постепенно снижать величину магнитного поля, пока оно, наконец, не исчезнет полностью. В присутствии даже слабого магнитного поля мы по-прежнему видим три линии, только они располагаются ближе друг к другу; таким образом, все время существуют три типа колебаний, но их частоты приближаются к общему предельному значению — частоте нерасщепленной спектральной линии. Таким образом, мы подходим к предположению, что, даже когда мы наблюдаем только одну спектральную линию, по-прежнему существует три вида движения, хотя они и не отличаются друг от друга по своей частоте, как это происходит в случае с магнитным полем. Это можно выразить следующим образом: еще до появления магнитной силы спектральная линия уже является тройной, и единственное, что может сделать эта сила, — раздвинуть три первоначально совпадающие линии, что она и делает.

То же самое относится к четырех-, пяти- и шестикратной линиям, и вы можете быть абсолютно уверены, что спектральная линия никогда не разложится на шесть компонент, если еще до появления магнитного поля каждая возбужденная частица не могла совершать колебания шестью различными способами, но с одной и той же частотой.

В этом заключается одно необходимое условие, которое не так-то просто выполнить. Я мог бы добавить еще и второе условие появления четких компонент спектральных линий, но того условия, что я описал выше, должно быть достаточно, чтобы показать, что в последующем развитии теории мы не можем пустить свое воображение на самотек. Напротив, мы весьма и весьма ограничены в выборе гипотез. Подходящей моделью атома, совершающего колебания, была бы упругая сферическая оболочка с равномерно распределенным электрическим зарядом, поверхность которой разделяется узловыми линиями на большее или меньшее

число полей, которые совершают колебания в различных направлениях. Однако я не стану подробно останавливаться на явлениях, которые имеют место в подобных моделях, так как, следуя этому пути, я боюсь уйти слишком далеко от реальности.

Я попытался в общих чертах изобразить, сколь многого — или лучше сказать, сколь малого — достигла электронная теория в объяснении новых магнитооптических явлений. Если бы сейчас мне нужно было представить обзор экспериментальных работ, вы тут же поняли бы, что в области эксперимента достигнуты гораздо большие успехи. Экспериментаторы уже начали сравнивать различные спектральные линии химического элемента друг с другом, учитывая их расщепления под влиянием магнитного поля, а также исследовать связь между этим расщеплением и регулярными соотношениями, существующими в спектре.

В этой стране, где работали отец моего достопочтенного коллеги Ангстрема и профессор Тален, и где профессор Хассельберг с неутомимым трудолюбием продолжал свои наблюдения и измерения, мне вряд ли нужно говорить о том, какой удивительный и богатый мир открыли нам эти исследования спектров. Это мир, законы которого мы только начинаем понимать. Оказалось, что многие линейчатые спектры строятся по определенному типу: линии выстраиваются в определенные серии так, что каждая серия состоит из линий, распределенных по всему спектру согласно достаточно простому закону. Более того, определенные соотношения существуют и между различными сериями. Эти соотношения, в выяснении которых выдающаяся роль принадлежит проф. Ридбергу и немецким физикам Кайзеру и Рунге, говорят о том, что магнитные расщепления линий, принадлежащих к одной серии, связаны между собой. Сейчас такая связь действительно установлена. При исследовании эффекта Зеемана в ртути Рунге и Пашен обнаружили, что все линии одной серии расщепляются абсолютно одинаково.

Я убежден, что теория достигнет ощутимых успехов только тогда, когда обратит внимание не на отдельную спектральную линию, а на все линии химического элемента. Как только нам удастся построить теоретическую основу структуры спектра, тогда, и ни днем раньше, мы сумеем постичь более сложные виды эффекта Зеемана. Будет даже лучше сказать, что в будущем исследования регулярных соотношений в спектрах и эффекта Зеемана должны идти рука об руку. Только тогда однажды они смогут привести к теории излучения света, одной из величайших целей современной физики.

Электронная теория также представляет огромное поле для изучения за пределами области магнитооптических явлений. Например, сво-

бодное движение электронов, с которым мы имеем дело в катодных лучах и в некоторых разновидностях лучей Беккереля, порождает множество интересных проблем. Я выделю из них только важный вопрос так называемой кажущейся массы этих частиц. Определенное магнитное поле в окружающем эфире (и, следовательно, определенное количество энергии, которым обладает эта среда) неразрывно связано с любым движением электрона, вследствие чего мы никогда не можем привести электрон в движение, не сообщая при этом энергию эфиру. Чтобы это сделать, необходимо бóльшее количество работы и мы должны приложить бóльшую силу, чем если бы нам не нужно было создавать это магнитное поле. Расчеты показывают, что необходимая в таком случае сила равна той, что потребовалась бы, если бы масса была несколько больше той, что есть на самом деле. Другими словами, если мы определяем массу как обычно из явления, то действительную массу мы увеличиваем на количество, которое называется кажущейся, или электромагнитной, массой. Эти две массы образуют эффективную массу, определяющую явления.

Исследования, опубликованные в прошлом году Кауфманом и Абрагамом, показали, что кажущуюся массу ни в коем случае нельзя сбрасывать со счетов. Она, безусловно, образует значительную часть эффективной массы, и, кроме того, существует возможность, что в конечном счете нам придется приписать электронам исключительно кажущуюся массу и ни в коем случае действительную.

Более того, кажущаяся масса обладает интересной особенностью: она не постоянна, а зависит от скорости; следовательно, изучение движения электрона во многом отличается от обычной динамики.

Сложно сказать, появится ли у нас когда-либо возможность дальнейшего изучения вопроса природы электрона, который уже был затронут в ходе упомянутого мной исследования. Как бы то ни было, пока, даже не имея точного знания, мы можем продолжать проверять основные допущения теории на практике и из свойств материальной среды делать выводы относительно электронов, которые в ней содержатся. Электро- и теплопроводность металлов, термоэлектричество, постоянные магниты и электромагниты, тепловое излучение и поглощение, оптические, электрические и магнитные свойства кристаллов — все эти аспекты обещают нам богатый урожай. Более того, нашему взору открываются еще более обширные просторы. Если размеры материального тела действительно несколько изменяются при его движении через неподвижный эфир, как это было выведено из оптических экспериментов, мы должны заключить, что молекулярные силы передаются через эфир подобно электрическим

действиям, что приводит к мысли о том, что в основе своей эти силы имеют электромагнитную природу, а материальные частицы, между которыми они действуют, состоят из электронов, или, по крайней мере, электрические заряды этих частиц не есть нечто несущественное, а напротив, что-то очень важное; имеющее прямое отношение к молекулярным силам.

Таким образом, мы надеемся, что электронная гипотеза, по мере того как ее будут подхватывать в различных отраслях физики, приведет к общей теории, охватывающей многие аспекты физики, а также химии. Быть может, за время долгого путешествия сама она полностью трансформируется, но при этом вряд ли можно сомневаться в истинности нашей гипотезы о связи различных явлений с электромагнетизмом, вследствие чего в том, что касается природы материальных сред, ее общая теория будет электрохимической, как это смутно предвидел и пытался продемонстрировать, используя доступные ему ресурсы, еще Берцелиус.

Но это, вероятно, перспектива далекого будущего, и отдельный ученый вряд ли может надеяться на то, что сделает хоть сколь-нибудь значительный вклад в ее достижение. Что касается меня, я бы счел себя счастливчиком, если бы мне, воодушевленному и ободренному высоким знаком отличия, присужденным мне вашей Академией, выпало сыграть скромную роль в решении проблем, которые вскоре предстанут перед нами.

Я заканчиваю свою лекцию выражением самой искренней благодарности за то внимание, с которым вы меня слушали.

Биография

Хендрик Антон Лоренц родился в Арнхеме, в Нидерландах, 18 июля 1853 года в семье владельца детского сада Геррита Фредерика Лоренца и его жены, урожденной Гертруды ван Гинкель. Когда мальчику было четыре года, его мать умерла, и в 1862 году его отец женился на Люберте Хупкес. В то время занятия в начальной школе проводились не только в утренние и дневные часы, но и в вечерние, когда преподавание было более свободным (в некотором смысле напоминая метод Дальтона). Таким образом, когда в 1866 году в Арнеме открылась первая Высшая гражданская школа (H.B.S.), Хендрик Лоренц, как одаренный ученик, сразу поступил в третий класс. В 1870 году по окончании пятого класса и года изучения латыни и древнегреческого языка он поступил в Лейденский университет, в 1871 году получил степень бакалавра по

математике и физике и в 1872 году вернулся в Арнхем, чтобы начать преподавание в вечерней школе и параллельно с этим писать докторскую диссертацию по преломлению и отражению света. В 1875 году, в возрасте всего 22 лет, он получил степень доктора и три года спустя был назначен заведующим кафедрой теоретической физики в Лейденском университете, которая была создана специально для него. Несмотря на многочисленные предложения кафедр за границей, он всегда оставался верен своей Alma Mater[1]. С 1912 года, когда он принял на себя сразу две должности: директора физического кабинета Тейлеровского музея и секретаря «Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen» (Нидерландского научного общества), он по-прежнему работал в Лейденском университете в качестве внештатного профессора, до конца своей жизни продолжая читать свои знаменитые утренние лекции по понедельникам. Таким образом, дальновидные попечители Фонда Тейлера дали возможность его уникальному разуму освободиться от рутинных университетских обязанностей, тем самым позволив ему еще шире расправить крылья в направлении более высоких областей науки, которые доступны лишь немногим.

С самого начала своей научной деятельности Лоренц поставил перед собой задачу расширить теорию света Джеймса Клерка Максвелла. Уже в своей докторской диссертации он рассматривал явления отражения и преломления света именно с этих позиций, которые тогда были достаточно новыми. Его фундаментальный труд в области оптики и электричества произвел переворот в современных концепциях природы материи.

В 1878 году он опубликовал эссе о связи скорости света в среде с ее плотностью и составом. Конечная формула, которую почти одновременно с ним предложил датский физик Лоренц, получила название формулы Лоренц–Лоренца.

Кроме того, Лоренц внес значительный вклад в изучение электромагнитных явлений в движущихся телах. В пространном трактате по аберрации света и проблемам, с ней связанным, он следовал гипотезе О. Ж. Френеля о существовании неподвижного эфира, который свободно проникает во все тела. На основе этого допущения была построена общая теория электрических и оптических явлений в движущихся телах.

Именно Лоренц создал концепцию электрона; его мнение о том, что крошечная электрически заряженная частица играет важную роль в электромагнитных явлениях, протекающих в материальных средах,

[1] «Мать-кормилица» (университет) (лат.). — *Прим. пер.*

сделало возможным применить молекулярную теорию к теории электричества и объяснить поведение световых волн, проходящих через движущиеся прозрачные тела.

Так называемое преобразование Лоренца (1904 г.) основано на том, что электромагнитные силы между движущимся зарядами, вследствие их движения, испытывают небольшие изменения, которые приводят к крошечному сокращению размера движущихся тел. Это не только адекватным образом объяснило кажущееся отсутствие относительного движения Земли по отношению к эфиру, которое было выявлено в ходе опытов Майкельсона и Морли, но также проложило путь для специальной теории относительности Эйнштейна.

Не без оснований можно утверждать, что все физики-теоретики считали Лоренца великим идеологом, завершившим то, что не сумели завершить его предшественники, и подготовившим почву для плодотворного принятия новых идей, основанных на теории квантов.

В 1919 году Лоренц был назначен председателем Комитета, задача которого состояла в изучении движений морской воды, которых можно было ожидать во время и после мелиорации земель в Зюйдерзее, в Нидерландах, что являло собой один из величайших проектов всех времен в истории гидротехники. Его теоретические расчеты, результаты восьми лет исследовательской работы, наиболее поразительным образом подтвердились на практике и до сих пор не утратили своей ценности для гидравлики.

Лоренц получил огромное количество наград и знаков отличия от научных обществ всего мира. Он исключительно блестяще председательствовал на многих международных собраниях, что было обусловлено как его дружелюбием и рассудительностью, так и его мастерским владением несколькими языками. До самой смерти он оставался председателем всех Сольвеевских конгрессов, а в 1923 году был избран членом «Международного комитета интеллектуального сотрудничества» Лиги наций. В 1925 году Лоренц стал президентом этого Комитета, состоявшего всего лишь из семи самых выдающихся ученых мира.

Благодаря огромному авторитету, которым Лоренц пользовался в правительственных кругах своей собственной страны, ему удалось убедить правительство в важности науки для развития нации. Тем самым он сделал первые шаги, которые впоследствии привели к созданию организации, в настоящее время известной как T.N.O. (Нидерландцы для прикладного научного исследования).

Лоренц обладал громадным личным обаянием. Это было истинное воплощение доброжелательности и искреннего интереса по отношению

к любому, кому посчастливилось встретиться на его пути; он внушил любовь к себе не только великим мира его времени, но и обыкновенным гражданам.

В 1881 году Лоренц женился на Алетте Катарине Кайзер, отец которой, И. В. Кайзер, профессор Академии изобразительных искусств, был директором музея, который впоследствии стал знаменитой Амстердамской Rijksmuseum (Национальной галереей) и создателем первых в Нидерландах почтовых марок. У четы Лоренцов родились две дочери и сын. Старшая дочь, доктор Гертруда Люберта Лоренц, сама стала физиком и вышла замуж за профессора В. И. де Гааза, директора криогенной лаборатории (лаборатории Камерлинг-Оннеса) в Лейденском университете.

Лоренц умер в Гарлеме 4 февраля 1928 года.

ПИТЕР ЗЕЕМАН

Излучение света в магнитном поле

Нобелевская лекция, 2 мая 1903 г.

Как сказал вам профессор Лоренц в декабре прошлого года, едва мы узнали о великом и очень почетном знаке отличия, который был нам присужден, мы тут же начали работать над тем, чтобы наилучшим образом скоординировать две наших лекции. К моему великому сожалению, я не смог присутствовать здесь во время лекции профессора Лоренца, но он сумел представить вам современную электронную теорию со своей точки зрения, лишь вкратце затронув экспериментальные исследования, которые занимали меня все последние годы. Я надеюсь, что, вследствие этого, вы позволите мне остановиться именно на этих исследованиях. Предмет сегодняшней лекции объединяет две области физики: свет и магнетизм, история которых началась во времена Майкла Фарадея. Замечательное открытие связи света и магнетизма, которое он сделал в 1845 году, стало наградой за его исследование, проведенное с неустанным терпением и упорством. Сегодня мы называем эту связь магнитным вращением плоскости поляризации. Фарадей сумел показать, что плоскость, в которой происходят световые колебания, начинает вращаться, как только свет проходит сквозь специально намагниченные тела вдоль силовых линий магнитного поля. Сам Фарадей назвал свое открытие намагничиванием света и освещением магнитных силовых линий. Его современники не поняли этого названия, которое, вероятно, в большей степени соответствовало тому, что он искал, нежели тому, что он нашел. На протяжении всей жизни Фарадея его надежды, желания и стремления приводили его к повторным исследованиям связи света, магнетизма и электричества.

Последний эксперимент, записанный в лабораторном журнале Фарадея и, судя по всему, ставший последним в его жизни, указывает на его неизменный интерес к явлениям, происходящим на границе смежных областей.

Этот эксперимент Фарадей провел 12 марта 1862 года в лаборатории Королевского института. Записи в журнале, хотя они и не совсем ясны, не оставляют сомнений в том, что он с помощью спектроскопа пытался показать, что магнетизм оказывает непосредственное воздействие на источник света. Однако результат получился абсолютно отрицательным, и в своем журнале Фарадей записывает, что «ни с поляризованным, ни с обычным светом не удалось продемонстрировать ни малейшего воздействия».

Быть может, именно из-за этого наблюдения Максвелл на заседании Британской ассоциации, которое состоялось 15 сентября 1870 года в Ливерпуле, сказал об испускающих свет частицах в пламени, «что ни одна сила в природе не способна хотя бы чуть-чуть изменить их массу или период колебаний» — утверждение, вышедшее из уст основателя электромагнитной теории света и высказанное столь категорично, действительно должно удивить современных физиков.

Однако не просто из одного только духа противоречия я подверг источник света действию магнитных сил. Эта мысль пришла ко мне во время исследования эффекта, открытого Керром, в свете, отраженном магнитным зеркалом.

Когда возникает проблема расщепления света излучающим газом на очень тонкие составляющие, простая стеклянная призма Ньютона и Фраунгофера оказывается бесполезной, и физик прибегает к превосходному средству, которым мы обязаны Роуланду: вогнутой дифракционной решетке. Отполированное металлическое зеркало с огромным количеством канавок, например, 50 000 на ширине в 10 см, нанесенных с помощью алмаза, есть в большинстве физических институтов. Луч составного света уже не отражается разлинованной поверхностью как обычно; вместо этого каждый отдельный вид лучей распространяется в своем направлении.

Конечно, для того чтобы появилось много отдельных лучей, соответствующих различным видам света, источник должен быть очень ограниченным. Это требование удовлетворяется при помещении источника света за непрозрачным экраном с линейной щелью. Тогда можно наблюдать получаемую спектральную картину и по расположению и интенсивности изображений отдельных линий можно определить, каким образом разные виды света распределены в изучаемом свете по периоду колебаний и интенсивности.

по расположению и интенсивности изображений, создаваемых при прохождении света через линейную щель, можно определить, каким образом разные виды света, составляющие изучаемый свет, расщепляются по периодам колебаний и их интенсивностям. Кроме того, решетка Роуланда имеет еще одно важное преимущество: ее наносят уже не на плоские, а на сферические вогнутые поверхности радиуса, скажем, три метра, так что создаются реальные изображения светящихся линий, причем нет необходимости в использовании линз. Более того, фотография дает возможность фиксировать полученные изображения и теперь обеспечивает нас постоянной записью каждого наблюдаемого спектра, которая всегда есть в нашем распоряжении.

При изучении хорошо известного натриевого пламени бунзеновской горелки с помощью решетки Роуланда мы видим спектр, состоящий, главным образом, из двух отдельных резких желтых линий, которые в нашей решетке находятся на расстоянии около одного миллиметра друг от друга. Мы видим, что излучение натрия состоит из двух видов света, периоды колебаний которых отличаются друг от друга совсем чуть-чуть (1 на 1000). Мы ограничились рассмотрением только одной из этих двух линий.

А теперь я должен попросить вас отправиться вместе со мной в Институт физики Лейденского университета. В августе 1896 года я подверг пламя натрия действию значительных магнитных сил, поместив его между полюсами сильного электромагнита. И вновь я исследовал излучение пламени с помощью зеркала Роуланда, причем наблюдения проводились в направлении, перпендикулярном силовым линиям. Каждая линия, которая в отсутствии магнитных сил была очень резкой, теперь размывалась. Это значило, что пламя излучает не только исходные колебания, но и другие с большим, а также меньшим периодами. Однако изменение было очень мало. В легко создаваемом магнитном поле она соответствовала одной тридцатой расстояния между двумя линиями в спектре натрия, скажем, двум десятым ангстрема — единицы измерения, название которой всегда будет напоминать физикам о выдающейся работе, проделанной отцом моего уважаемого коллеги.

Так все-таки, сумели мы изменить период колебания, что Максвелл, как я только что сказал, считал невозможным? Или, быть может, результат исказился под влиянием каких-то возмущающих факторов? Об этом стóит упомянуть.

Мы сомневались в полученном результате. Мы исследовали источник света в направлении действия магнитной силы, мы пробивали отверстия в полюсах магнита; но даже в направлении магнитных силовых

линий мы находили подтверждение полученного нами результата. Кроме того, мы изучали и обратное явление: поглощение света в парах натрия, — и это тоже оправдало наши ожидания. Тогда мы задались вопросом: ведут ли себя разные вещества по-разному? Что происходит, когда магнитная сила принимает максимально достижимые значения? Как ведут себя различные спектральные линии одного и того же вещества? Но прежде чем удалось получить ответ на эти вопросы, появилась теория.

Фактически у меня была возможность опытным путем проверить некоторые выводы, следовавшие из теории оптических и электрических явлений моего глубокоуважаемого учителя и друга, профессора Лоренца. Эта теория допускает, что все тела содержат маленькие частицы, имеющие электрический заряд и массу, — «электроны», и что все электрические и оптические процессы определяются положением и движением этих «электронов». Световые колебания создаются колебаниями «электронов». В теории Лоренца, если ограничиться одной спектральной линией, достаточно предположить, что каждый атом (или молекула) содержит один движущийся электрон.

Если этот электрон смещается из своего положения равновесия, то сила, прямо пропорциональная смещению, возвращает его подобно маятнику в положение покоя. В этой модели электроны представлены красными шариками, а направление магнитной силы — стрелками. Все колебательные движения такого электрона можно представить разложенными на одно движение, параллельное магнитной линии, и два круговых колебания, перпендикулярных этому направлению и вращающихся в противоположные стороны. В отсутствие магнитного поля все эти колебания имеют один и тот же период. Но как только электрон подвергается воздействию магнитного поля, его движение изменяется. Согласно хорошо известным законам электродинамики на электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила, перпендикулярная направлению движения электрона и направлению магнитного поля, величину которой можно легко определить. Прямолинейное колебание не изменяется магнитным полем, и его период остается неизменным; два круговых колебания, напротив, испытывают действие новых сил, которые, будучи направленными параллельно радиусу, либо увеличивают, либо уменьшают первоначальную центростремительную силу. В первом случае период колебаний уменьшается, а во втором — увеличивается.

Теперь несложно определить световые колебания, к которым приведет такой тип движения электронов.

Прежде всего рассмотрим, что происходит в направлении, *перпендикулярном силовым линиям*. Трем движениям электрона соответствуют три электрических колебания, или, если говорить на языке электромагнитной теории света, три световых колебания различных периодов. Таким образом, источник света будет испускать свет *трех* цветов вместо первоначального света *одного* цвета. Следовательно, при помещении источника света в магнитное поле вместо одной неполяризованной спектральной линии мы увидим три отдельные линии. Разные направления колебания электронов влияют на состояние поляризации испускаемого света. Свет средней компоненты колеблется параллельно силовым линиям, а свет двух внешних компонент — перпендикулярно им.

Я представлю вам пример линии, которая действительно обнаруживает такое поведение, постулированное теорией профессора Лоренца.

Но сначала давайте рассмотрим лучи, которые движутся *параллельно силовым линиям*. Для этого я поверну модель так, чтобы стрелки стали указывать в вашем направлении. Противоположные круговые колебания электронов возбудят два луча, поляризованных по кругу и вращающихся в противоположных направлениях, причем период колебаний одного луча будет длиннее, а второго — короче периода колебаний исходной спектральной линии. Под действием магнитного поля исходная спектральная линия расщепляется на две компоненты, которые поляризованы по кругу в противоположных направлениях. Источник света испускает свет *двух* цветов.

Сейчас мне хотелось бы показать вам две увеличенные фотографии, сделанные с помощью решетки Роуланда[1]. Это спектральные линии кадмия. На первой половине картинки вы можете видеть исходную линию, а на второй — неизменную линию, обусловленную прямолинейными колебаниями вдоль магнитных силовых линий и две сдвинутые магнитными силами — так называемый триплет, который мы наблюдаем в направлении, перпендикулярном силовым линиям.

Затем я покажу вам линию кадмия, наблюдаемую в направлении силовых линий. На первой половине картинки изображена исходная линия, а на второй — двойная линия или дублет, созданный магнитными силами.

Вы видите, как замечательно в этих случаях наблюдение подтверждает выводы, следующие из теории профессора Лоренца. Однако я должен отметить, что поначалу наблюдать явления, предсказанные теорией, было довольно сложно из-за чрезвычайно малых изменений периода колебаний.

[1]Во время лекции было показано несколько диапозитивов.

Я только что сказал, что изменение чрезвычайно мало; но при этом можно было бы также сказать, что оно оказалось неожиданно большим. Расщепление спектральных линий под действием магнитного поля зависит от величины заряда электрона, или, точнее, от отношения массы электрона к его заряду. Посмотрим, чему нас учат наблюдения. Когда в 1895 году профессор Лоренц опубликовал свою теорию, еще не было данных, с помощью которых можно было бы оценить отношение массы к заряду возбуждающих свет частиц, так что в этой теории оно осталось неопределенным. Сейчас мы можем вычислить это отношение из величины расщепления спектральных линий под действием магнитного поля: оно равно 10^7 единиц СГС на грамм — колоссально большое число даже для физика, так как оно в тысячу раз больше аналогичного числа, полученного из электролитических явлений в случае с атомами водорода. Таким образом, физик сочтет наиболее вероятным, что в светящихся частицах только примерно 1/1 000 атома совершает колебания и что основная масса атома остается фактически неподвижной. Обнаружилось, что колеблющиеся электроны не идентичны электролитическим ионам, так как в противном случае расщепление спектральных линий равнялось бы лишь одной тысячной от наблюдаемой величины, и тогда сегодня я не имел бы чести выступать перед вами с лекцией в Стокгольме.

Здесь и сейчас нужно также ответить на следующий вопрос, а именно: положительный или отрицательный заряд имеют колеблющиеся частицы?

Мы наблюдали дублет в направлении магнитных силовых линий и изучали знак поляризации. И вдруг я неожиданно нашел решение: колеблющиеся электроны имеют *отрицательный* заряд. Мы знаем, что катодные лучи, которые могут появиться в трубках, заполненных сильно разреженными газами, представляют собой отрицательно заряженные частицы с той же величиной отношения заряда к массе. Мы можем заключить, что в источнике света колеблется то же самое, что движется в катодных лучах.

Мы вряд ли сумеем обойтись без упоминания двух заголовков основной работы Фарадея: «Намагничивание света», «Освещение силовых линий». Они кажутся почти пророчеством, поскольку мы уже видели, что свет действительно может намагничиваться, а согласно теории профессора Аррениуса даже в самой природе, в северном сиянии, мы можем наблюдать пример освещения магнитных силовых линий Земли электронами, исходящими от Солнца.

Природа преподносит свои сюрпризы всем нам, включая профессора Лоренца. Очень скоро обнаружилось, что из правила расщепления

спектральной линии только на триплет существует множество исключений. Вероятно, французский физик Корню впервые наблюдал, что, в противоположность элементарной теории, в некоторых случаях происходит расщепление на четыре линии — квартет. В других случаях может наблюдаться расщепление на пять, шесть или даже девять линий. В спектре железа, богатом линиями, мы находим целый ассортимент различных форм. Очень скоро в данной области уже начали работать несколько физиков; мне достаточно упомянуть только Беккереля, Коттона, Майкельсона, Престона, Риги, Рунге и Пашена. Если бы в моем распоряжении было больше времени, я бы с радостью рассказал о работе упомянутых мной исследователей более подробно. Однако сейчас я ограничусь тем, что покажу вам спектральную линию кадмия, которая расщепляется на четыре линии, и негативы спектральной линии ртути, которая расщепилась на девять компонент и за которую я приношу свою благодарность профессору Рунге. Но несмотря на это очень сложное расщепление, принятое в элементарной теории Лоренца разделение на три группы колебаний, две из которых перпендикулярны, а одна параллельна силовым линиям, остается в силе, как показывает эта фотография нонета.

Совершенно естественно, что после того как мне удалось расщепить спектральные линии, мне захотелось также узнать, как в этом отношении ведут себя разные линии. Очень скоро, исследуя спектральные линии цинка, я сумел показать, что в расщеплении различных линий вещества существует большая разница. Особенно большая разница была обнаружена в линиях, принадлежащих разным сериям, открытием которых мы обязаны ярким исследованиям вашего соотечественника профессора Ридберга, а также профессорам Кайзеру и Рунге.

Я обнаружил очень большие различия в линиях различных серий, причем оказалось, что вопреки постулатам элементарной теории расщепление, выраженное через частоты колебаний, *не* одинаково для всех линий в одном и том же магнитном поле. Из этого, основываясь на теории Лоренца, мы можем заключить, что отношение заряд/масса не одинаково для всех электронов.

Сейчас мне хотелось бы поговорить о трех отдельных явлениях: во-первых, о явлении, которое я не смог наблюдать, во-вторых, о явлениях, которые едва ли в состоянии проверить, и, в-третьих, об одном удивительном явлении.

Все результаты, которые обсуждались до сих пор, относились к линейчатым спектрам; но в случае множества тел мы знаем о существовании полосатых спектров. Вот здесь-то и появляется разница: полоса-

тый спектр поглощения паров йода или брома при низких температурах не изменяется в магнитном поле; лично мне, даже с помощью очень сильных магнитных полей, не удалось внести хоть какое-то изменение в чрезвычайно аккуратные изображения спектров поглощения паров йода и брома, которые нам дал профессор Хассельберг.

Мы обязаны профессору Фойгту за его обстоятельную теорию магнитооптических явлений. Триплет, который вы наблюдали сегодня, был абсолютно симметричным, как и постулируется в элементарной теории. Однако на основе своей теории профессор Фойгт сумел предсказать, что в результате действия *слабых* магнитных сил должна возникать асимметрия. Согласно Фойгту, две внешние компоненты должны иметь разную интенсивность света и находиться на разном расстоянии от средней линии. В случае с линиями железа, цинка и кадмия я смог наблюдать асимметрии обеих компонент, но из-за их чрезвычайной малости я не могу продемонстрировать эти явления с помощью диапроектора.

Однако следующее явление, которое даст вам некоторое представление о возможностях теории Фойгта, еще более поразительно. Это явление тесно связывает между собой фарадеевское магнитное вращение плоскости поляризации света и магнитное расщепление спектральных линий.

Вращение плоскости поляризации чрезвычайно мало во всех газах, а потому и в парах натрия. Как обнаружили Макалузо и Корбино, вращение является очень большим, порядка 180°, только в случае цветов, расположенных близко к полосе поглощения пара, причем вращение происходит в *положительном* направлении — направлении тока, возбуждающего магнит.

Что можно сказать о вращении внутри полосы поглощения?

Профессор Фойгт смог предсказать, что в сильно разреженных парáх вращение в области между двумя компонентами дублета также должно быть очень большим, но отрицательным, т. е. направленным противоположно вращению, происходящему за пределами полосы поглощения. Я имел удовольствие подтвердить это теоретическое предсказание, проведя эксперименты с парами натрия. При условии сильной разреженности пара вращение в очень сильных полях между линиями дублета может достигать −400°.

Чтобы дать вам некоторое представление о распределении вращений, я покажу вам два негатива, относящихся к этому исследованию.

Магнитное поле *отсутствует*.

Две темных вертикальных линии представляют собой линии поглощения паров натрия — хорошо известные D линии. Такая их ширина

обусловлена тем, что пар имел очень высокую плотность. Горизонтальные полосы являются интерференционными; они были созданы посредством специального устройства. Эти линии обозначают точки, в которых направление колебаний является одинаковым. Направления колебания в каждой из последующих полос отличаются на 180°.

Теперь, как только включается магнитное поле, мы сразу получаем проектируемое изображение. По обе стороны от D-линий полосы изгибаются *вверх* тем сильнее, чем ближе к полосам поглощения, поскольку с приближением к ним вращение очень быстро растет и достигает почти 180° в непосредственной близости от полос. Между полос видна только размытая полоса.

Это явление становится гораздо более ясным, как только используется сильно разреженный пар. Внешние полосы *поднимаются*, как и ранее. Но в то же время внутренняя полоса отделяется; она *опустилась*, вращение отрицательно. На нашей третьей картинке вращение вблизи одной из D-линий около −90°, а вблизи другой — все более размыто, вращение около −180°.

Подводя итог результатам экспериментов, описанных в свете теории Лоренца, можно сказать, что найдена твердая основа для утверждения о том, что электричество существует в тысячах точек, где мы, по большей части, предполагали его существование. Бесчисленные электрические частицы совершают колебания в каждом пламени и источнике света. Фактически мы можем допустить, что каждый источник тепла наполнен электронами, которые будут безостановочно и бесконечно совершать колебания.

Все эти электроны оставляют свой след в испущенных лучах. Мы можем надеяться, что экспериментальное изучение явлений излучения, подверженных различным возмущениям, но, в особенности, влиянию магнетизма, предоставит нам полезные данные, имеющие отношение к новой области — атомной астрономии, как назвал ее Лодж, населенной вместо планет и миров атомами и электронами.

Я считаю себя счастливчиком, так как смог внести свой вклад в эту работу; огромный интерес, проявленный к моей работе Королевской академией наук Швеции и признание ею моих прошлых успехов убеждают меня в том, что я на правильном пути.

Биография

Питер Зееман родился 25 мая 1865 года в Зоннемайре, небольшой деревеньке на острове Шувен, в Зеландии, в Нидерландах. Он был сы-

ном местного священника Катаринуса Форандинуса Зеемана и его жены, урожденной Вильгельмины Ворст. Закончив среднюю школу в Зирикзее, главном городе острова, он на два года уехал в Делфт, чтобы изучить древнегреческий и латинский языки, знание которых в то время было необходимо для поступления в университет. Поселившись в доме доктора И. В. Лели, со-ректора Гимназии и брата доктора С. Лели (министра по общественным работам, известного также тем, что он положил начало работам по мелиорации Зюйдерзее и продолжил их), Зееман попал в среду, которая благотворно повлияла на развитие его научных способностей. Именно здесь он познакомился с Камерлинг-Оннесом (Нобелевская премия по физике 1913 г.), который был двенадцатью годами старше его. Широкий кругозор Зеемана, который, помимо всего прочего, читал такие блестящие работы, как «Теплота» Максвелла, и его страсть к проведению экспериментов настолько удивила Камерлинг-Оннеса, что между этими учеными завязалась плодотворная дружба.

В 1885 году Зееман поступил в Лейденский университет и стал, главным образом, учеником Камерлинг-Оннеса (механика) и Лоренца (экспериментальная физика); вместе с последним он через некоторое время получил Нобелевскую премию. Первая награда пришла к нему в 1890 г., когда он был назначен ассистентом Лоренца, что дало ему возможность принять участие в обширной исследовательской программе, которая включала изучение эффекта Керра — важного основания его будущей великой работы. В 1893 году он получил степень доктора, после чего уехал в институт Ф. Кольрауша в Страсбурге, где в течение семестра работал под руководством Э. Кона. В 1894 году Зееман вернулся в Лейден и с 1895 по 1897 гг. был «приват-доцентом» (лектором на курсах заочного обучения).

В 1897 году, который последовал за годом его великого открытия расщепления спектральных линий под влиянием магнитного поля, его пригласили стать лектором в Амстердамском университете; в 1900 году его назначили внештатным профессором. В 1908 году Ван дер Ваальс (Нобелевская премия по физике 1910 г.) достиг пенсионного возраста — ему исполнилось 70 лет, — и его преемником был назначен Зееман, который параллельно работал еще и директором Физической лаборатории. В 1923 году в его распоряжение поступила новая лаборатория, которая была создана специально для него; выдающимся объектом этой лаборатории был бетонный блок весом в четверть миллиона килограммов, который свободно висел над полом и служил платформой для защиты экспериментов от влияния вибрации. Сейчас это заведение известно как лаборатория Зеемана Амстердамского университета. Многие физики

с мировым именем посещали там Зеемана или какое-то время работали вместе с ним. В течение 35 лет он исполнял эту двойную функцию, отказываясь от многочисленных предложений принять руководство кафедрой за рубежом, пока в 1935 году ему не пришлось оставить свой пост по причине достижения пенсионного возраста. Будучи хорошим учителем, Зееман был еще и добр по своей природе, и его очень любили ученики. Одним из его учеников был К. Дж. Бэккер, который с 1955 до своей преждевременной смерти в катастрофе самолета в 1960 году был генеральным директором Европейского Центра Ядерных Исследований (ЦЕРН) в Женеве. Другим сотрудником его лаборатории был С. Гаудсмит, который в 1925 году совместно с Дж. Уленбеком выдвинул концепцию спина электрона.

Талант Зеемана к естественным наукам впервые проявился в 1883 году, когда он, еще будучи школьником, дал правильное описание северного полярного сияния, которое тогда можно было ясно наблюдать в его стране, и нарисовал его. Творение Зеемана было опубликовано в журнале *Nature*. (Редактор журнала похвалил точные наблюдения, «сделанные профессором Зееманом в его обсерватории в Зоннемайре»!)

Основная тема исследований Зеемана всегда касалась оптических явлений. Его первый трактат «Измерения, связанные с эффектом Керра» (*Mesures relatives du phénomène de Kerr*), написанный в 1892 году, был награжден Золотой медалью Нидерландского научного общества в Гарлеме; его диссертация на соискание степени доктора была связана с той же темой. В Страсбурге он изучал распространение и поглощение электрических волн в жидкостях. И, тем не менее, его главной работой было изучение влияния магнетизма на природу светового излучения, которое он начал летом 1896 года и которое стало логическим продолжением его исследования эффекта Керра. Об открытии так называемого эффекта Зеемана, за которое он получил Нобелевскую премию, он сообщил Королевской академии наук в Амстердаме — через Каммерлинг-Оннеса (1896) и И. Д. Ван дер Ваальса (1897) — в виде статей, озаглавленных *Over den Invloed eener Magnetisatie op den Aard van het door een Stof uitgezonden Licht* (О влиянии намагничивания на природу света, испускаемого веществом) и *Over Doubletten en Tripletten in het Spectrum teweggebracht door Uitwedige Magnetische Krachten* (О дублетах и триплетах в спектре, созданных внешними магнитными силами). (Английский перевод этих работ был опубликован в *Philosophical Magazine*; их французская версия появилась в *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, а сокращенный немецкий вариант — в *Verhandlungen der Physikalischen Gesrellschaft zu Berlin*.)

О важности открытия можно судить по одному только факту, что это явление одним махом не только подтвердило теоретические выводы Лоренца относительно состояния поляризации света, испускаемого пламенем, но также продемонстрировала отрицательную природу колеблющихся частиц и неожиданно большое отношение их заряда к массе (e/m). Таким образом, когда в следующем году Дж. Дж. Томсон открыл существование свободных электронов в виде катодных лучей, то тождественность электронов и колеблющихся частиц света можно было установить, исходя из отрицательной природы частиц, а также их отношения e/m. Растущее число наблюдений других исследователей, изучавших влияние использования различных веществ в качестве источников света, — не все они объяснялись теорией Лоренца (так называемый «аномальный эффект Зеемана» удалось адекватным образом объяснить лишь позднее, когда появилась атомная теория Бора, квантовая волновая механика и концепция спина электрона), — Зееман собрал в своей книге «Исследования в магнитооптике» (Лондон, 1913 г.; немецкий перевод книги появился в 1914 г.). Эффект Зеемана не только прояснил механизм излучения света и природу материи и электричества; его огромная важность состоит в том, что даже сегодня он предлагает элементарное средство раскрытия внутренней структуры атома, а также природы и поведения его составляющих. Он по-прежнему служит нам окончательной проверкой любой новой теории атома.

Уже во втором своем сообщении Зееман выразил мнение, что предполагаемое существование сильных магнитных полей на поверхности Солнца можно проверить, так как эти поля должны изменять спектральные линии, полученные от небесных тел. (Зееман вообще был склонен распространять физические концепции в область небесных явлений.) В письме к Зееману (1908 г.) астроном Дж. Э. Хейл, директор Маунт-Вилсоновской обсерватории, подтвердил это мнение фотографиями, на которых было видно, что, судя по всему, спектральные линии в солнечных вихрях действительно подвергаются воздействию магнитных полей. Впоследствии Хейл подтвердил даже теоретическое предсказание, касающееся вероятной взаимосвязи между направлениями поляризации и магнитных полей.

Что касается деятельности Зеемана вне области расщепления спектральных линий под влиянием магнитного поля, то прежде всего следует упомянуть его работу, связанную с эффектом Допплера в оптике, и работу по каналовым лучам (лабораторные проверки). Вторая область его исследований была связана с распространением света в движущихся средах (доказательство существования слагаемого Лоренца в коэффици-

енте увлечения Френеля). Другие исследования были связаны с влиянием магнитного момента ядра на сверхтонкую структуру спектральных линий. Кроме того, ему, вместе с Ж. де Гиром, удалось открыть несколько новых изотопов (среди них ^{38}Ar, ^{64}Ni) с помощью параболического масс-спектрографа Томсона. Пристрастие Зеемана к проверке фундаментальных законов также нашло выражение в его экспериментальной проверке — проведенной с относительной погрешностью менее 10^{-7} — равенства тяжелых и инертных масс.

Зееман был Почетным доктором университетов Геттингена, Оксфорда, Филадельфии, Страсбурга, Льежа, Гента, Глазго, Брюсселя и Парижа. Он также был членом или почетным членом множества научных академий, в том числе был удостоен очень редкого отличия: он являлся иностранным членом Парижской академии наук. Кроме того, он был членом и председателем Международной комиссии весов и мер в Париже. Будучи избран членом Королевской академии наук Амстердама в 1898 году, он работал секретарем Физико-математического отделения с 1912 по 1920 г. Помимо других знаков отличия можно отметить медаль Румфорда Лондонского королевского общества, премию Вильде Парижской академии наук, премию Баумгартнера Венской академии наук, медаль Маттеучи Итальянского научного общества, медаль Франклина Института Франклина в Филадельфии, медаль Генри Дрэпера Национальной Академии Наук США. Его также посвятили в рыцари Ордена Оранж-Нассо и сделали Командором Ордена Нидерландского Льва.

Кроме области своих научных интересов Зееман проявлял значительный интерес к литературе и сценическому искусству. Умеющий развлечь гостей хозяин, он любил приглашать своих коллег и учеников пообедать с ним у него дома, чему предшествовала научная беседа в его рабочем кабинете и после чего следовало общение в кругу его домочадцев.

В 1895 году Зееман женился на Жоанне Элизабет Лебре; у них родился сын и три дочери. Во время последнего года профессорства Зееман страдал от плохого здоровья. Он скончался после недолгой болезни 9 октября 1943 года.

1903

Антуан Анри Беккерель

«в знак признания выдающихся заслуг, выразившихся в открытии естественной радиоактивности»

Пьер Кюри
Мария Склодовская-Кюри

«в знак признания заслуг перед наукой, выразившихся в их совместных исследованиях явлений излучения, открытых профессором Анри Беккерелем»

Антуан Анри Беккерель

О радиоактивности, новом свойстве материи

Нобелевская лекция, 11 декабря 1903 г.

Предмет, о котором я намерен говорить с вами, всего за последние несколько лет стал настолько обширным, что для того, чтобы уложить его в одну лекцию, мне придется ограничиться перечислением основных фактов, следующих в хронологическом порядке их открытия. Но

поскольку мсье и мадам Кюри должны сами рассказать вам о своей прекрасной работе с радием, я лишь подведу некоторый итог и расскажу вам о своих собственных исследованиях.

В начале 1896 года, в тот самый день, когда Париж узнал об экспериментах Рентгена и об удивительных свойствах лучей, испускаемых фосфоресцирующими стенками трубок Крукса, я подумал о том, чтобы исследовать, все ли фосфоресцирующие материалы испускают одинаковые лучи. Результаты эксперимента не подтвердили эту идею, однако в ходе исследования я столкнулся с неожиданным явлением.

Из всех фосфоресцирующих материалов соли урана казались наиболее подходящими для исследований вследствие исключительной структуры гармонических серий полос, составляющих их спектры поглощения и фосфоресценции. Итак, я поместил листы, покрытые сульфатом урана и калия, на фотопластинки, обернутые черной бумагой или защищенные листом алюминия, и на несколько часов подверг их действию света. После проявления фотопластинок я обнаружил, что соли урана испустили лучи, которые воспроизвели силуэты листов, покрытых кристаллами соли, через положенные на пластины листы черной бумаги и различные экраны из металла или тонкого стекла.

В таких условиях это явление можно было бы объяснить преобразованием солнечной энергии, подобным фосфоресценции, но очень скоро я осознал, что это излучение не зависит ни от одного знакомого источника возбуждения, будь то свет, электричество или тепло.

Таким образом, мы столкнулись с самопроизвольным явлением нового рода. На рисунке 1 изображен первый отпечаток, который выявил спонтанность излучения, испускаемого солью урана. Лучи прошли как через черную бумагу, которой была обернута фотопластинка, так и через тонкий лист меди в виде креста. На рисунке 2 показан радиографический снимок алюминиевой медали: неравномерное поглощение излучения металлом различной толщины создает изображение. Поскольку использованные соли урана были приготовлены задолго до проведения опыта, следовало предположить, что интенсивность явления не зависит от времени, а значит, эмиссия постоянна. Все более поздние эксперименты показали, что активность урана не обнаруживает ощутимого уменьшения с течением времени.

Получив эти первые результаты, я заметил, что излучение урана разряжает находящиеся на некотором расстоянии от него электрически заряженные материалы; это явление подсказало другой метод изучения новых лучей. Фотографический метод был, в основном, качественным,

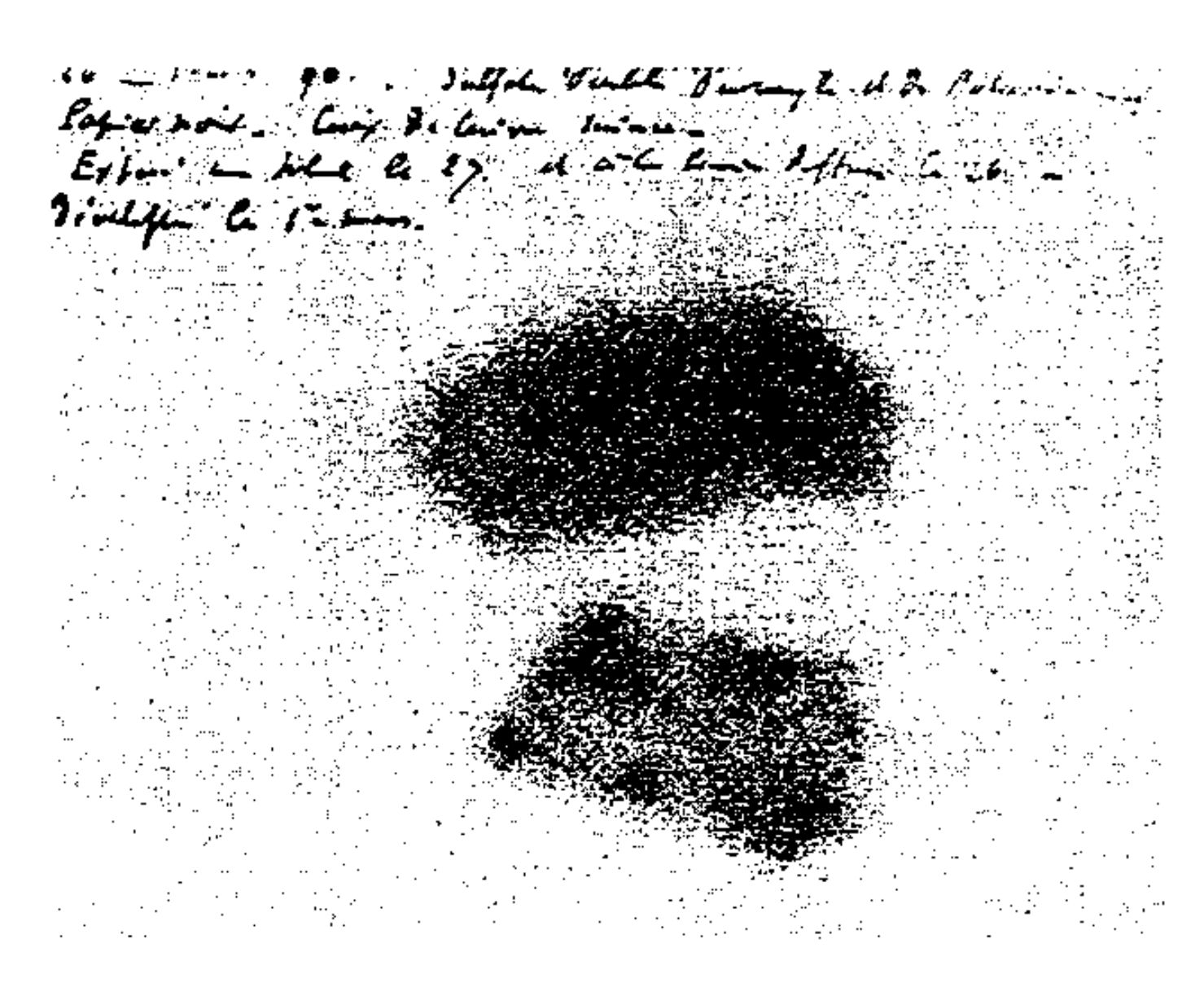


Рис. 1

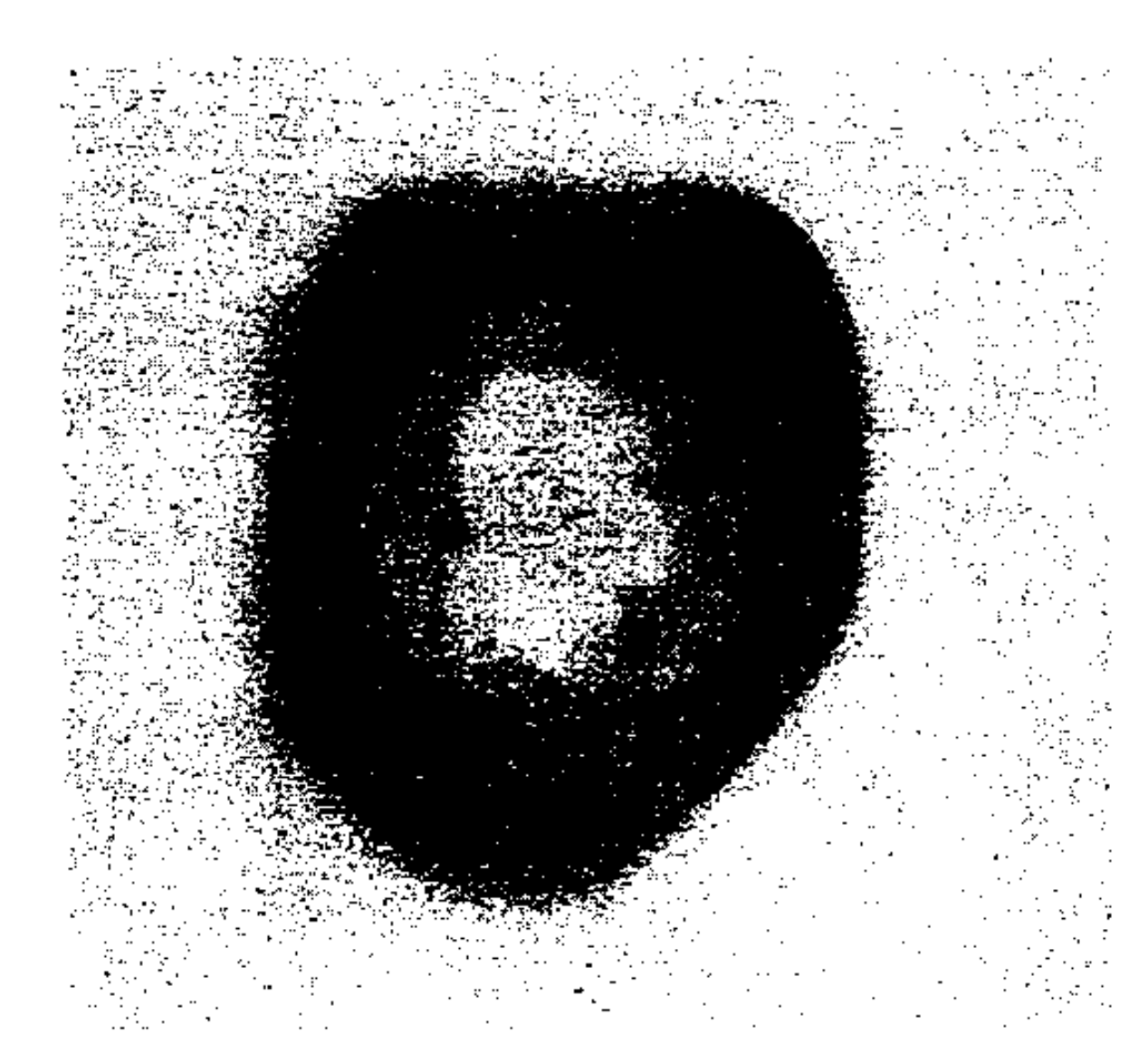


Рис. 2

электрический же предоставил численные данные, а первые измерения показали постоянство излучения во времени.

Оба метода показали, что все соли урана, независимо от их происхождения, испускают излучение одного и того же типа, что это свойство является атомным, присущим элементу уран, и что металлический уран примерно в три с половиной раза активнее своей соли, которая использовалась в первых экспериментах.

Сфера из заряженного урана, которая под влиянием своего собственного излучения самопроизвольно разряжается в воздухе, сохраняет свой заряд в абсолютном вакууме. Обмен электрическими зарядами, который под влиянием новых лучей происходит между заряженными телами, является результатом особого вида проводимости, сообщенной окружающим газам, — проводимости, сохраняющейся в течение нескольких минут после прекращения действия излучения.

Эти фундаментальные свойства излучения, испускаемого ураном, подтвердили многие исследователи, из которых я упомяну лишь Резерфорда, установившего, что проводимость газов, через которые проходит излучение урана, абсолютно идентична ионизации, вызванной другими факторами.

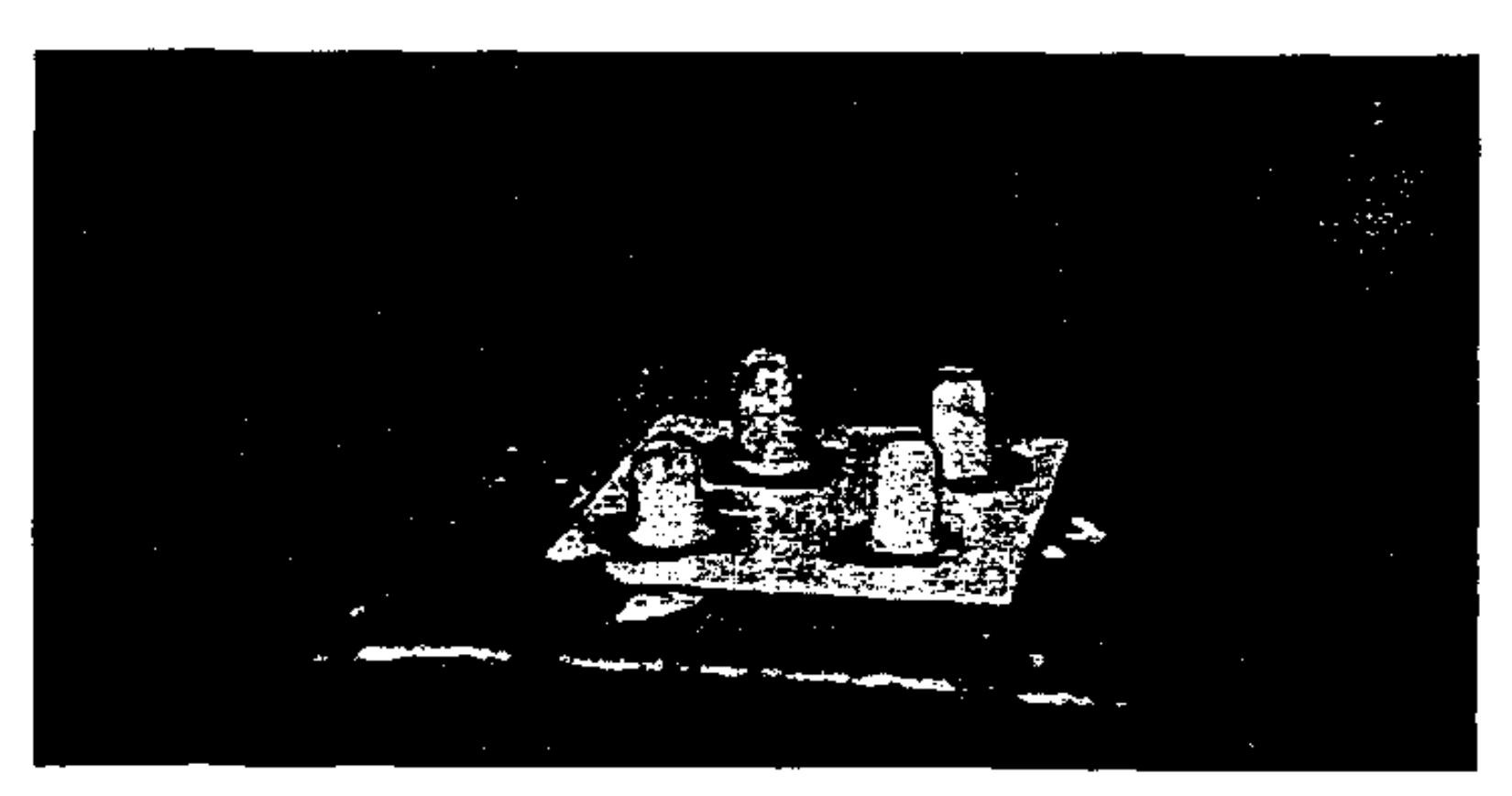


Рис. 3

Наблюдение нескольких доселе необъяснимых явлений в ходе этих первых экспериментов увело меня с пути, на который мне суждено было вернуться в более поздних экспериментах. Различные образцы фосфоресцирующего сульфида кальция, лежащие на маленьких стеклянных пластинках и накрытые стеклянными вакуумными колпаками, положили на фотопластинку, защищенную алюминиевым листом толщиной два миллиметра, как показано на рис. 3. На отпечатке, проявленном через 48

часов (рис. 4), были видны силуэты стеклянных пластинок, воспроизведенные с такими деталями, которые создались бы при преломлении и полном отражении световых лучей. Несмотря на то, что в то же самое время Труст и Нивенгловски наблюдали эмиссию проникающих лучей из фосфоресцирующих материалов, вышеописанный эксперимент воспроизвести не удалось; причина кратковременного появления и исчезновения активности этих продуктов не известна. Но поскольку в ходе экспериментов с ураном силуэты всех экранов, помещенных между ураном и фотопластинкой, окаймлены белыми линиями, очерчивающими спроецированные тени и аналогичными линиям отпечатка, о котором мы только что говорили, я приписал излучению урана свойства света, хотя все последующие эксперименты показали, что это излучение не может отражаться или преломляться, как это делают световые лучи.

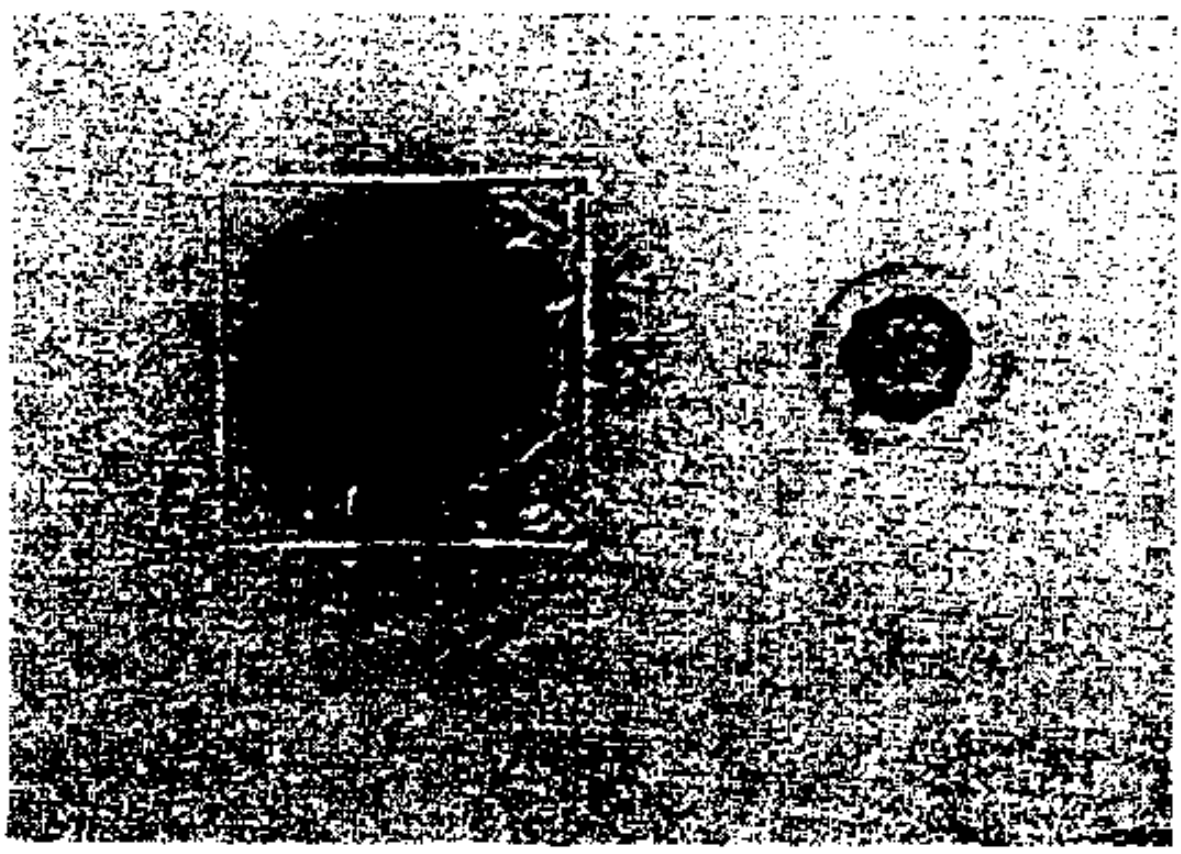


Рис. 4

В 1898 году Шмидт и мадам Кюри почти одновременно наблюдали, что торий имеет свойства, весьма похожие на свойства урана; эти свойства были изучены Оуэнсом и Резерфордом. Мадам Кюри, измерив с помощью ионизации воздуха радиоактивность большого количества минералов, содержащих уран или торий, обратила внимание на замечательный факт: некоторые минералы оказались гораздо более активными, чем металлический уран. Убедившись в том, что активность сопутствует молекуле урана в ее различных соединениях, мсье и мадам Кюри пришли к выводу, что в вышеупомянутых минералах должно присутствовать вещество, гораздо более активное, чем уран, и стали пытаться его выделить. Они обработали один из самых активных минералов —

урановую смолку — и впервые выделили из него активный висмут, который, по их предположениям, содержал новое вещество — полоний. Вскоре после этого они получили чрезвычайно активный барий в соединении с новым элементом — радием. Эти продукты были получены путем фракционной кристаллизации с учетом показаний электрометра. Активность продуктов возрастала вместе с обогащением их новыми элементами. Радиоактивность чистого радия примерно в миллион раз выше радиоактивности урана.

Гизелю удалось получить очень активные препараты, а Дебьерн изучил продукт, тесно связанный с торием, который он назвал актинием.

Из всех этих препаратов *один только радий обладает характеристиками*, которые мы ассоциируем с простыми веществами; радий имеет спектр испускания, созданный линиями, не принадлежащими ни одному другому известному элементу, а молекулярная масса солей радия возрастает с увеличением содержания в них радия.

Интенсивное излучение радия возбуждает фосфоресценцию различных материалов и восстанавливает способность кристаллов фосфоресцировать под действием тепла, когда они ее теряют в результате предыдущего повышения температуры; более того, соли радия начинают спонтанно светиться под влиянием своего собственного излучения.

Первые образцы полония и радия, которые столь любезно предоставили мне мсье и мадам Кюри, обнаружили поразительное различие в природе излучения, испускаемого каждым из этих веществ. Я поместил их в маленькие бумажные цилиндры, закрытые снизу очень тонкими кусочками слюды или алюминия; затем эти цилиндры были поставлены на фотопластинку. Отпечаток, изображенный на рисунке 5, показывает, что излучение радия легко прошло через различные оболочки, тогда как излучение полония не смогло проникнуть через стенку бумажного цилиндра; таким образом, лучи полония являются слабо проникающими.

Ближе к концу 1899 года сначала Гизель, а потом Мейер и фон Швейдлер наблюдали, что излучение радиоактивных препаратов отклоняется магнитным полем. Тогда же, не зная об этих экспериментах, я заметил, что то же самое происходит с излучением радия. Это произошло, когда я впервые обратил внимание на то, что в неоднородном поле излучение концентрируется на полюсах, подобно катодным лучам в экспериментах Биркеланда. На рисунках 6 и 7 изображены отпечатки, полученные следующим образом.

Несколько зерен радиоактивного вещества помещаются на фотопластинку, обернутую черной бумагой и расположенную горизонталь-

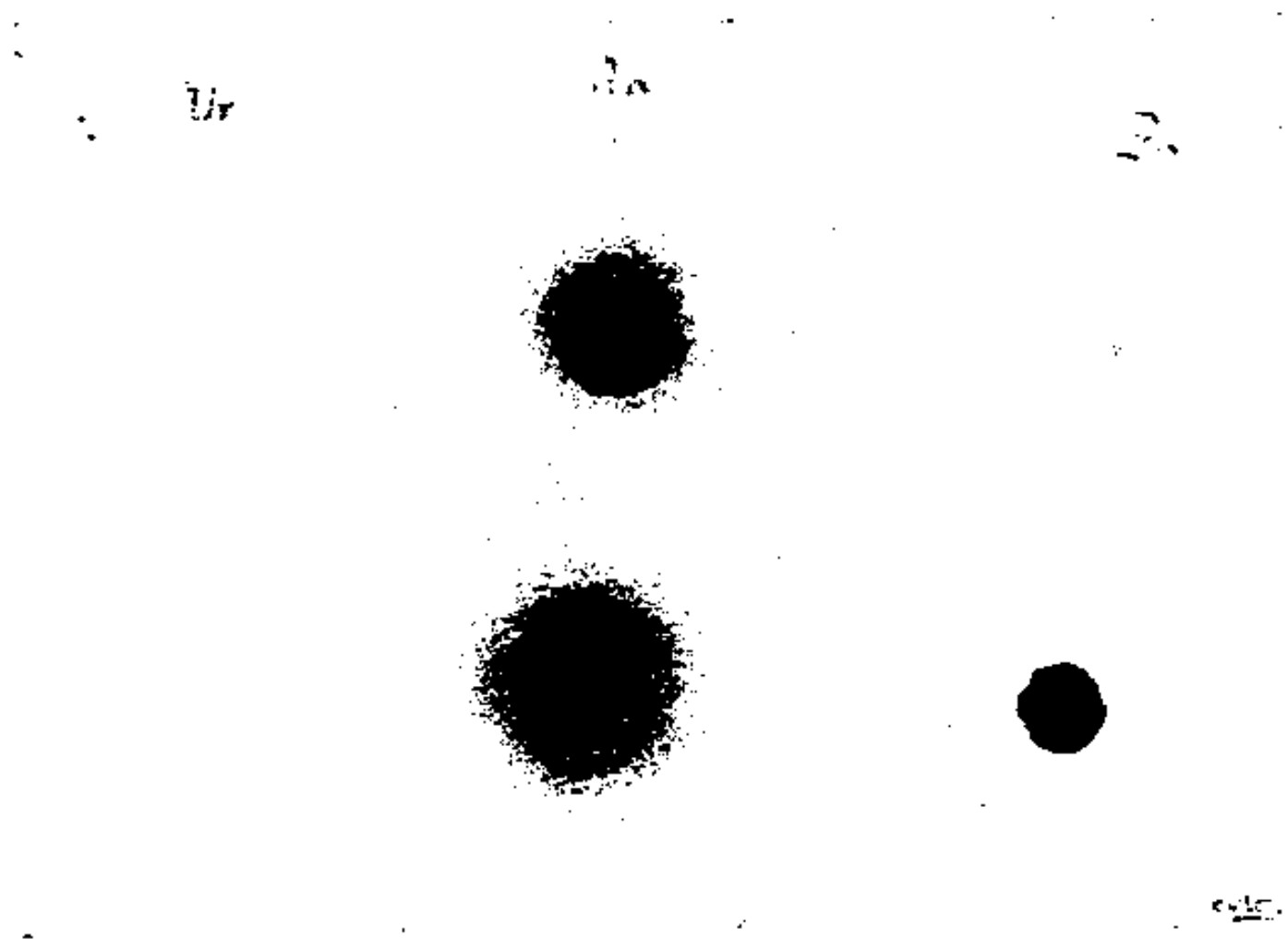


Рис. 5

но между полюсами магнита; после проявления пластинки, по прошествии нескольких минут экспозиции, становится очевидно, что, помимо изображения, обозначающего положение активного источника, создается сильный отпечаток, вызванный излучением, отраженным полем и сосредоточенным только на одной стороне пластинки.

Рис. 6

Рис. 7

Почти сразу же я осознал, что лучи, испущенные полонием, не отклоняются в вышеописанных экспериментальных условиях и что существует два вида лучей: первые сильно отклоняются магнитным полем,

другие, судя по всему, не отклоняются им вообще. Исследуя излучение радия, мсье и мадам Кюри наблюдали в нем одновременное присутствие двух видов лучей и видели, что лучи полония, вместе с лучами того же вида, испускаемыми радием, все больше поглощались по мере прохождения ими поглощающего материала возрастающей толщины; обратное имеет место в случае пучков разнородных лучей. Фотография на рис. 8 изображает два вида лучей, которые в наше время известны как альфа- (лучи, испускаемые полонием) и бета-лучи (та часть излучения радия, которая отклоняется магнитным полем). Затем я обнаружил, что торий испускает лучи двух видов, а уран даже в вакууме испускает только бета-лучи (рис. 9), не исключая существования гораздо менее активных, неотклоняемых лучей.

Рис. 8 Рис. 9

На самом деле есть еще и третий вид излучения — гамма-лучи, которые не отклоняются магнитным полем и которые впервые привлекли внимание, благодаря эксперименту, проведенному Вилларом. Они, судя по всему, аналогичны рентгеновским лучам.

Действие магнитного поля дает возможность разделять и анализировать различные компоненты излучения радиоактивных веществ.

Бета-лучи ведут себя подобно катодным лучам; как и в случае с последними, можно принять, что они состоят из частиц с массами m, переносящих отрицательные заряды e со скоростью v. В однородном магнитном поле напряженности H траектории, нормальные к этому полю, должны представлять собой окружности, радиус R которых задается соотношением $RH = (m/e)v$.

Для начального направления, составляющего с силовыми линиями угол α, траектории представляют собой винтовые линии, которые накручиваются на цилиндры радиуса $R\sin\alpha$. Я проверил различные геометрические следствия этого подобия.

Рис. 10 Рис. 11

Пучок бета-лучей состоит из множества лучей, траектории которых имеют различные радиусы кривизны; магнитное поле рассеивает их, подобно тому как призма рассеивает лучи света разных цветов. Например, фотопластинку, не обернутую черной бумагой, можно поместить параллельно однородному горизонтальному магнитному полю, а потом на нее поставить маленькое свинцовое блюдце, на котором находится несколько зерен радий-содержащего бария, образующих источник очень малого диаметра. Излучение направлено на пластинку и создает изображение только на одной стороне. Если на эту сторону поместить маленькие полоски других материалов — бумаги, алюминия или различных металлов, — то окажется, что в размытом изображении, представляющем своего рода спектр, присутствуют лучи с различной проникающей способностью, которые под каждым экраном создают изображения, имеющие разные границы и составляющие спектры поглощения. Далее будет видно, что изображение создается, главным образом, вторичным излучением, которое возникает на поверхности, где появляются падающие лучи. Рисунок 10 являет собой пример полученных фотографий; экранами служат полоска черной бумаги, полоска алюминия толщиной 0,1 мм и платиновая фольга толщиной 0,03 мм. Чтобы гарантировать то, что можно назвать чистым спектром, т. е. спектром, в каждую точку которого попадает только один луч, все траектории которого имеют одну и ту же кривизну, излучение от точечного источника должно проходить через узкую щель. Результат аналогичен вышеупомянутому (рис. 11). Более того, на фотографии видно изображение, созданное вторичными лучами, испущенными внутренней поверхностью свинцового полуцилиндра, которым накрыт источник и в котором проделана небольшая щель. Наконец, когда излучение собирается и проходит через вторую узкую щель, в результате получается один луч.

Каждый отдельный луч можно охарактеризовать соответствующим ему значением произведения RH. В вышеописанных экспериментах значения RH активных лучей варьировались в диапазоне от 600 до 2500.

Более полный анализ излучения можно провести, применяя следующий общий метод.

Радиоактивный материал помещается на дно глубокой узкой канавки в небольшом свинцовом блоке, чтобы создать очень тонкий вертикальный пучок лучей, исходящий от линейного источника, длина которого составляет несколько миллиметров. Эта система помещается в однородное магнитное поле, параллельно этому полю. Затем над источником, перпендикулярно полю, устанавливается фотопластинка, перехватывающая отклоненный луч. Лучи, имеющие большой угол наклона, попадая на пластинку, создают на ней изображение, которое почти не отличается от траектории скользящего луча, испускаемого перпендикулярно полю. На фотопластинке размещается цилиндрический экран, в котором перпендикулярно пластинке прорезаны узкие щели, позволяющие проходить либо порциям чистых спектров, либо отдельным лучам. Чтобы исключить свет, испущенный источником, последний накрывают тонкой алюминиевой фольгой. На практике эти экраны приклеивают к стеклянной пластинке, которая прижимает их к фотопластинке. Рисунки 12, 13, 14 и 15 показывают расположение экранов и некоторые фотографии, полученные с помощью этого метода. При получении первых двух фотографий за пределами пропускающего чистые спектры экрана, концентрически устанавливался цилиндр из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм. Видно, что наименее отклоняемые лучи проходят через эту фольгу, словно ее там и нет; другие же, более отклоняемые, лучи при появлении создают вторичные лучи, более активные по отношению к фотопластинке, нежели падающие; и, наконец, максимально отклоняемые лучи не проходят через алюминиевую фольгу и создают на внутренней поверхности вторичные лучи, дающие яркое изображение. Общее изображение, созданное в пределах контура экрана, также можно приписать вторичному излучению. Магнитное поле имело напряженность, равную 859 единицам СГС. В этих экспериментах альфа-лучи блокировались, а гамма-лучи создавали прямолинейные изображения, раскрывающие разницу, существующую между ними и наименее отклоняемыми бета-лучами, произведение RH которых примерно равно 10^4. В общем, слабо отклоняемые бета-лучи обладают большой проникаю-

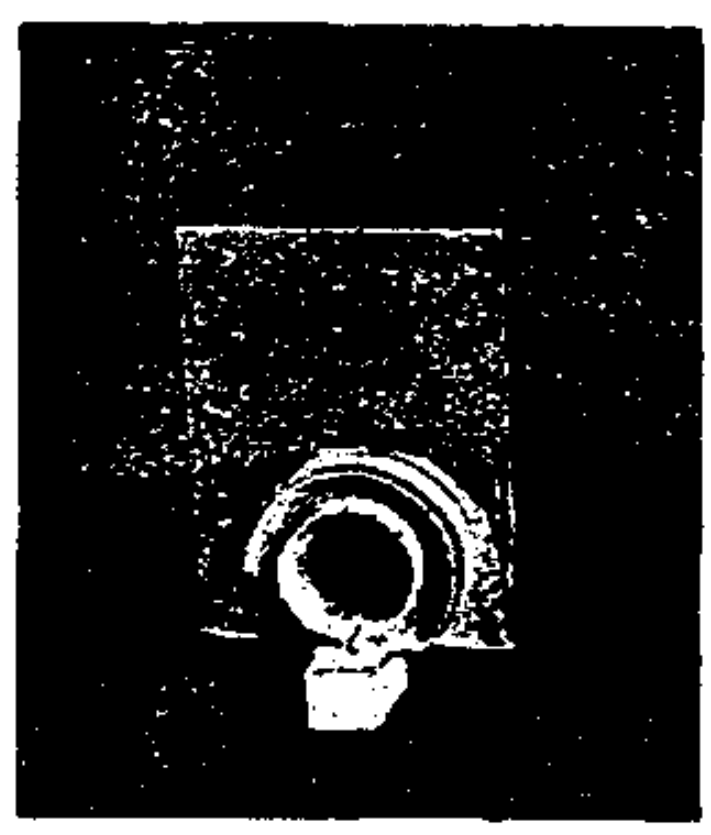


Рис. 12

щей способностью, а лучи, которые отклоняются сильно, также легко и поглощаются. Эти эксперименты иллюстрируют преимущества этого метода анализа эффектов, производимых каждым отдельным лучом.

Будучи примененным ко вторичному излучению, этот метод показал, что лучи отклоняются под действием магнитного поля в том же направлении, что и катодные.

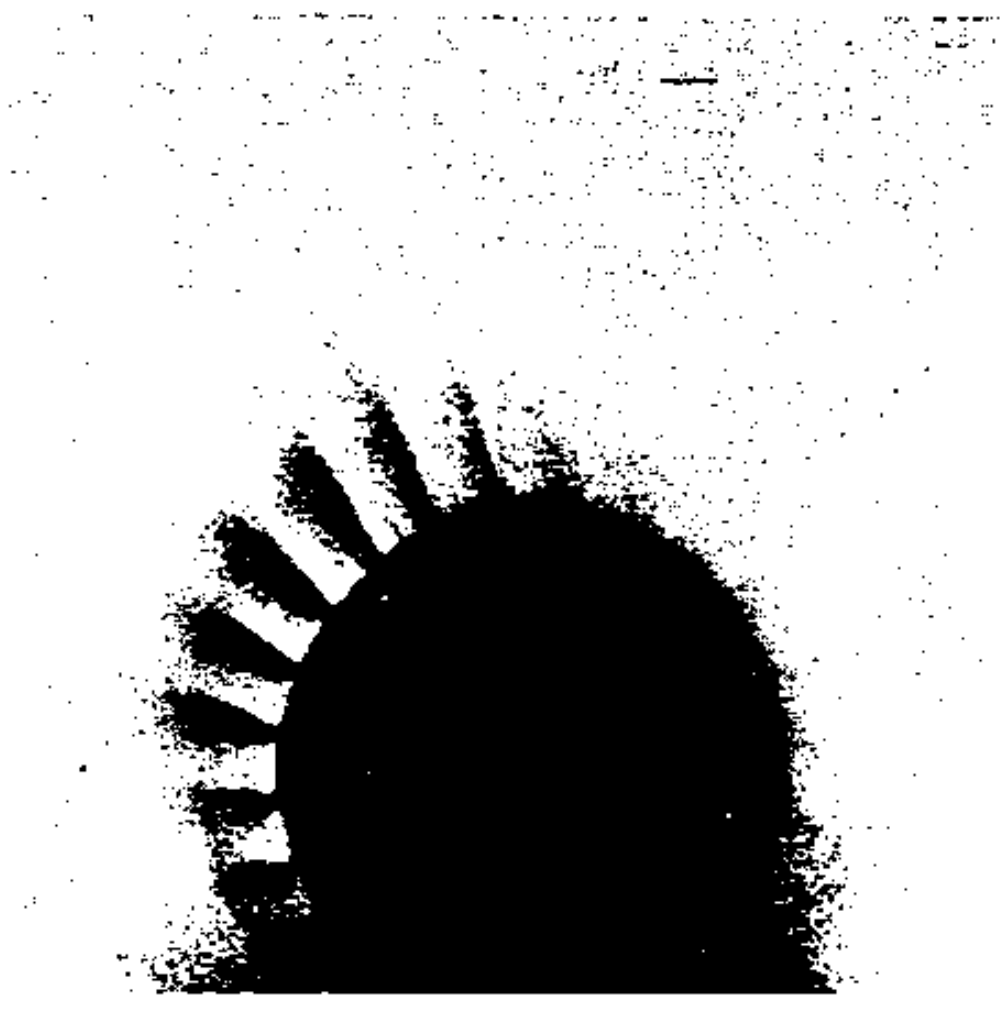


Рис. 13

Пока я проводил все эти эксперименты, мсье и мадам Кюри продемонстрировали, что бета-лучи, испускаемые радием, действительно переносят отрицательные электрические заряды: тела, подвергающиеся излучению, приобретают отрицательный заряд, тогда как сам источник приобретает положительный заряд. Чтобы пронаблюдать это двойное явление, все проводники и сам источник необходимо полностью окружить изолирующими материалами, например, парафином, или поместить в вакуум.

С другой стороны, я показал, что испускаемые радием бета-лучи отклоняются электростатическим полем. Если F — его напряженность, то траекторией отдельного луча, характеризуемого определенными выше величинами m, e и v, является парабола с параметром $(m/e)(v^2/F)$. Значение этого параметра вместе с величиной радиуса кривизны траектории того же луча в известном магнитном поле дает возможность определить m/e и v. Эксперимент, проведенный с помощью показанного

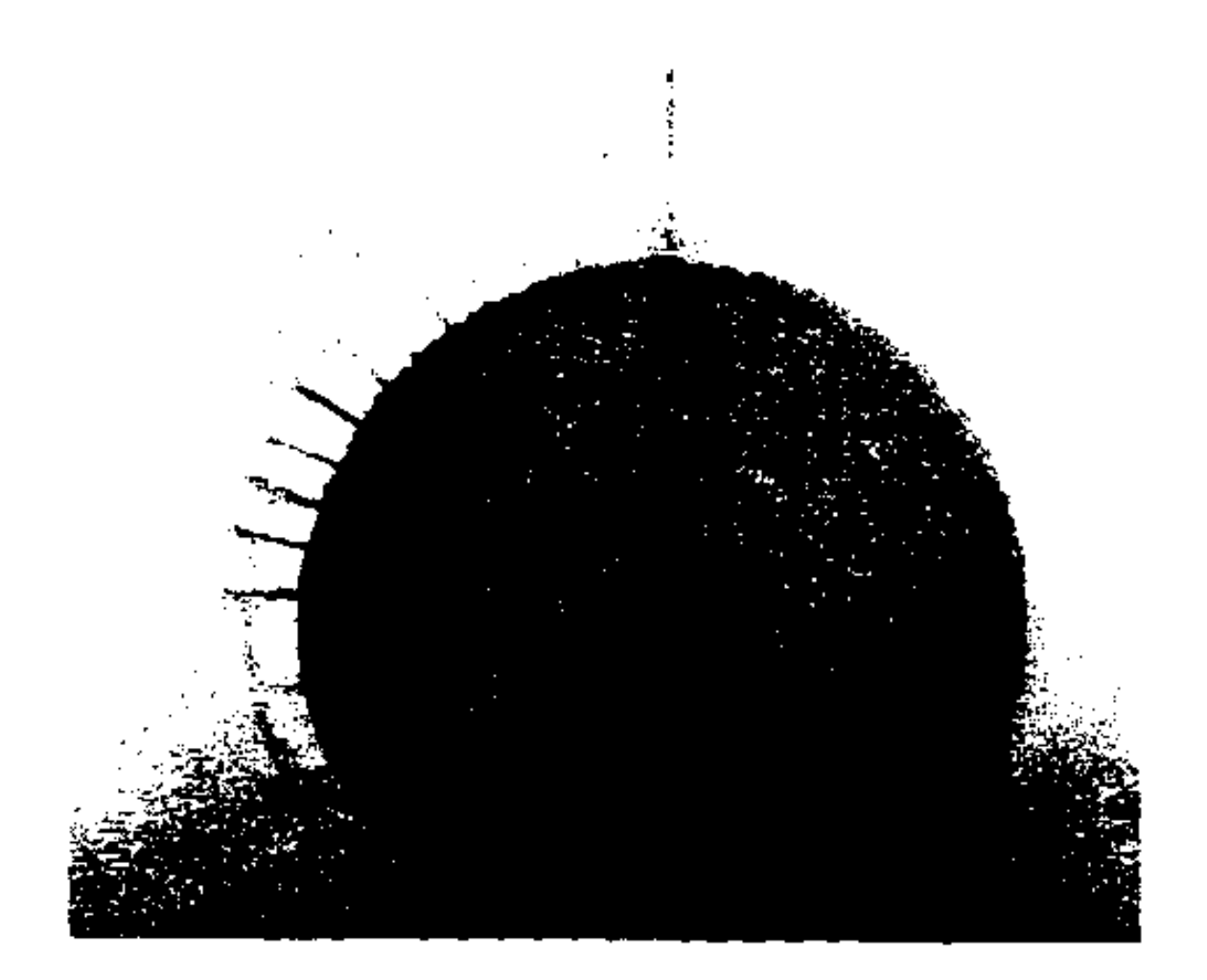


Рис. 14

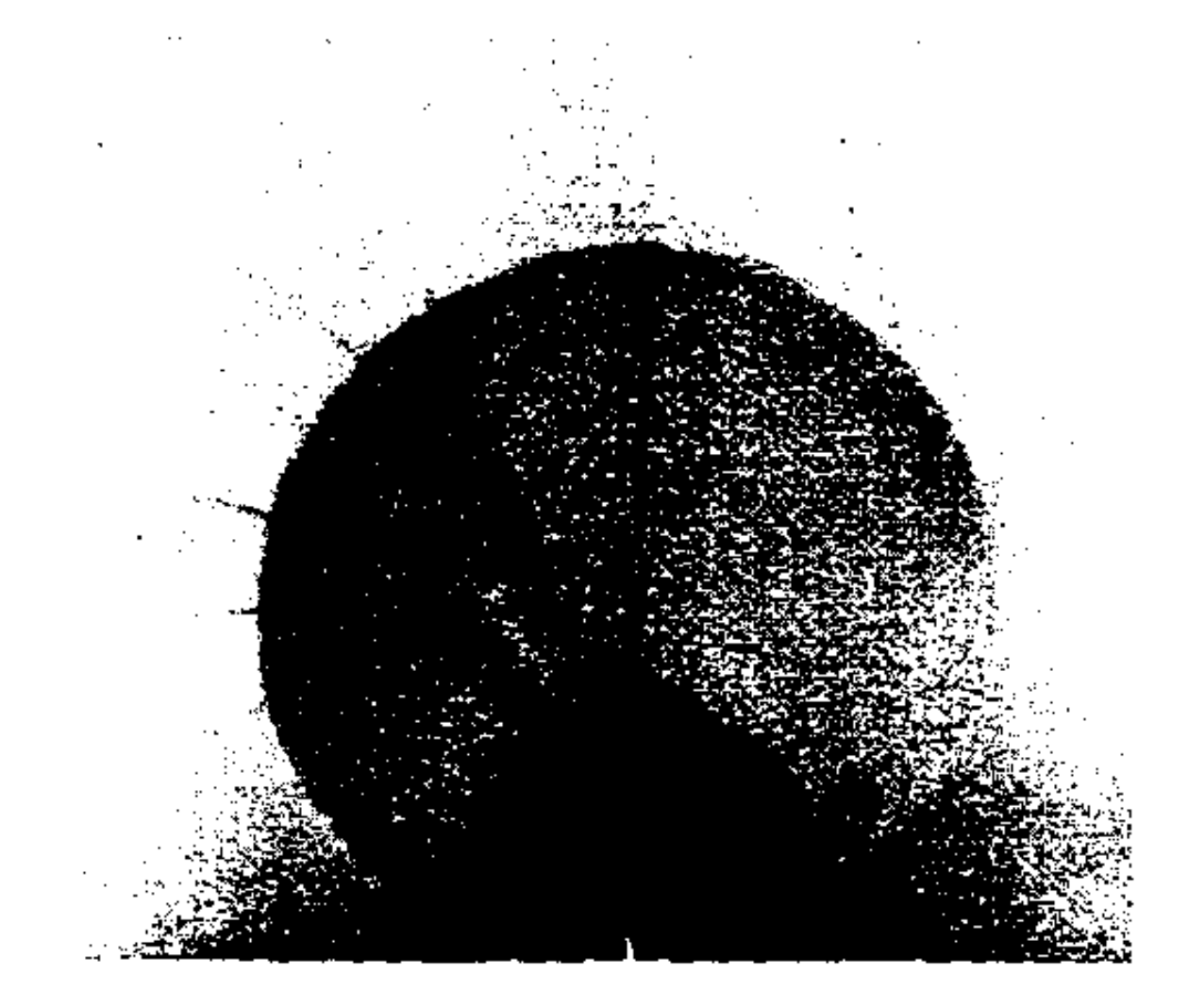


Рис. 15

на рисунке 16 устройства, дал изображение, приведенное на рисунке 17, которое демонстрирует электростатическое отклонение тени от вертикального экрана, расположенного перпендикулярно этому полю. Комбинируя отклонения отдельного луча поперечными электростатическим и магнитными полями, Кауфман осуществил гораздо более точные измере-

ния, чем те, которые можно было получить из более ранних опытов. Его измерения показали, что отношение e/m является функцией скорости v, которая для наименее отклоняемых бета-лучей приближается к скорости света. Интерпретация этого факта на основе идей Макса Абрагама предполагает, что масса электронов, по крайней мере частично, если не целиком, является следствием электромагнитных реакций — результат, который наводит на свежие мысли о природе инертности материи.

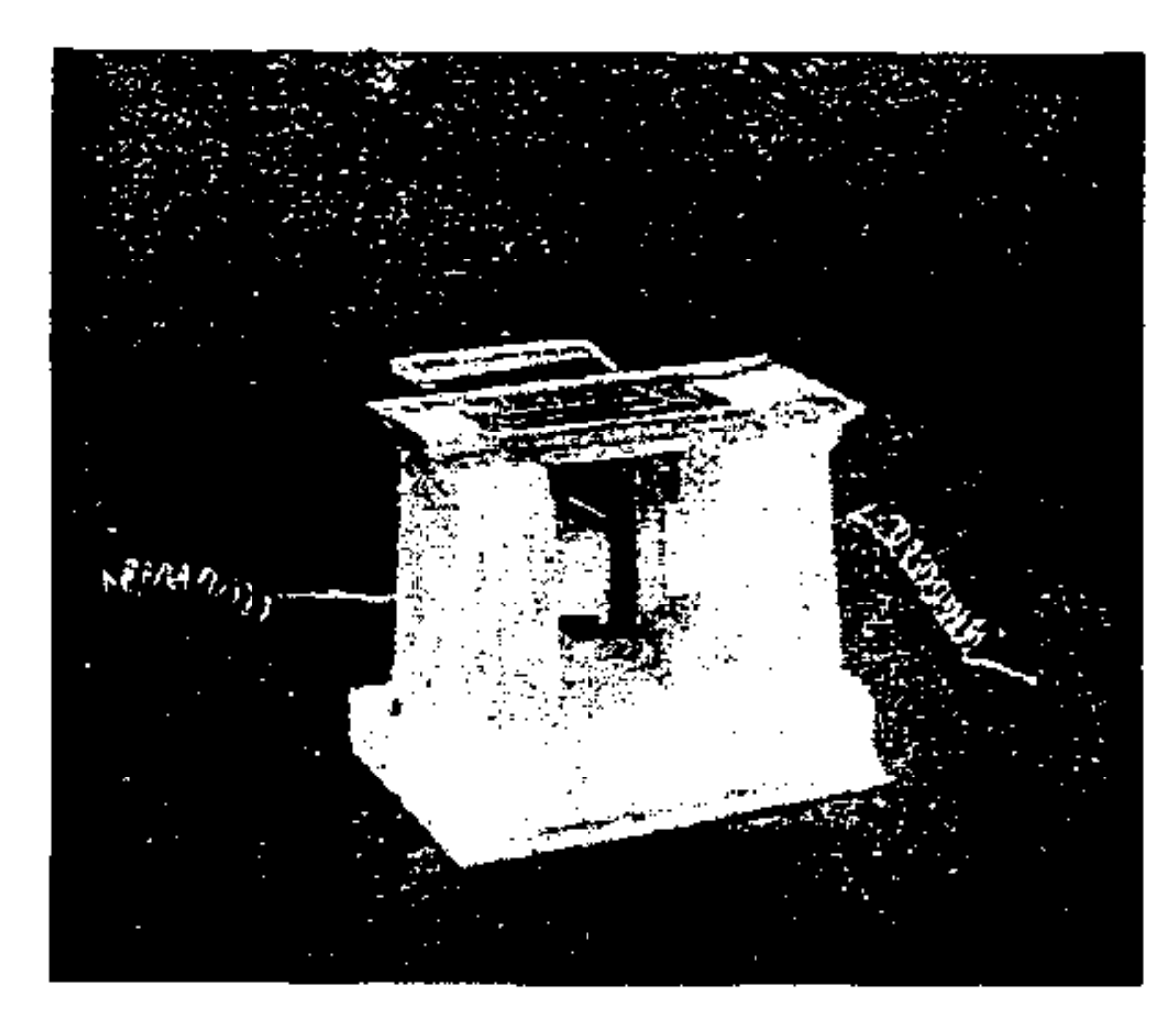


Рис. 16

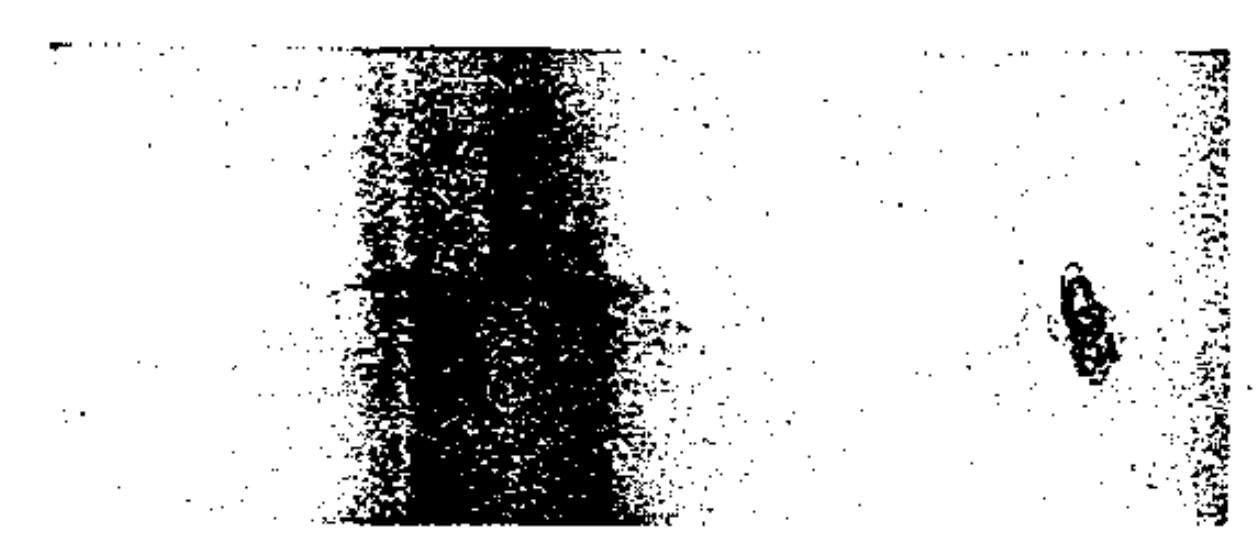


Рис. 17

Помимо идентичных катодным бета-лучей, важную часть излучения радиоактивных веществ составляют альфа-лучи. Я уже упоминал о том, как впервые наблюдал их в излучении полония и как особенности их низкой проникающей способности и отсутствие заметного отклонения

траекторий явились причиной выделения их в особый вид лучей. С помощью очень тонкого электрического эксперимента Резерфорд обнаружил, что альфа-лучи могут очень слабо отклоняться в очень сильном магнитном поле, и что направление этого отклонения противоположно направлению отклонения бета-лучей. Следовательно, они ведут себя как носители положительных электрических зарядов и, судя по всему, идентичны каналовым лучам Гольдштейна.

С помощью вышеописанного устройства я сделал фотоснимок траектории, описываемой в магнитном поле альфа-лучами радия и идентичными им лучами полония. На рисунке 18 приведена фотография (увеличенная), полученная в магнитном поле напряженности 10 000 единиц СГС. Каждая из двух сходящихся траекторий соответствует определенному направлению магнитного поля, которое в середине экспозиции менялось на противоположное. На фотографии не видно следов дисперсии, что позволяет нам считать радиоактивный луч однородным. Более того, замечено, что радиус кривизны, вычисленный в разных точках траектории, растет с увеличением пробега в воздухе. Это явление можно объяснить тем, что положительные заряды, скорость которых в десять раз меньше скорости бета-лучей, а реальная или предполагаемая масса в тысячу раз больше, притягивают нейтральные молекулы воздуха или постепенно разряжаются, ионизируя воздух.

Поскольку альфа-лучи очень легко поглощаются, по-видимому, именно они составляют самую активную часть излучения, когда оно измеряется ионизацией воздуха вблизи источника. Эти лучи также проявляют максимальную активность при возбуждении фосфоресценции цинковой обманки и алмаза, тогда как синеродистый барий светится одинаково как под воздействием альфа-, так и бета-лучей, а фосфоресценция двойного сульфата урана и калия особенно сильно стимулируется бета-лучами. Любопытный эффект спинтарископа сэра У. Крукса следует объяснить действием альфа-лучей; судя по всему, он вызван расщеплениями, которым сопутствуют вспышки, идентичные вспышкам, сопровождающим дробление различных кристаллов.

Рис. 18

Третий тип лучей, гамма-лучи, характеризуются высокой проникающей способностью и не отклоняются магнитным полем. На приведенной иллюстрации (рис. 19), полученной с помощью ранее описанного метода, альфа-лучи остановились вблизи своего источника, бета-лучи отклонились под влиянием магнитного поля, тогда как гамма-

лучи и свет, испускаемый солью радия, образуют прямолинейный пучок лучей, который падает на кварцевую призму. Лучи света отклоняются, тогда как гамма-лучи оставляют трек, которым можно следовать без отклонения не только после призмы, но и через нее.

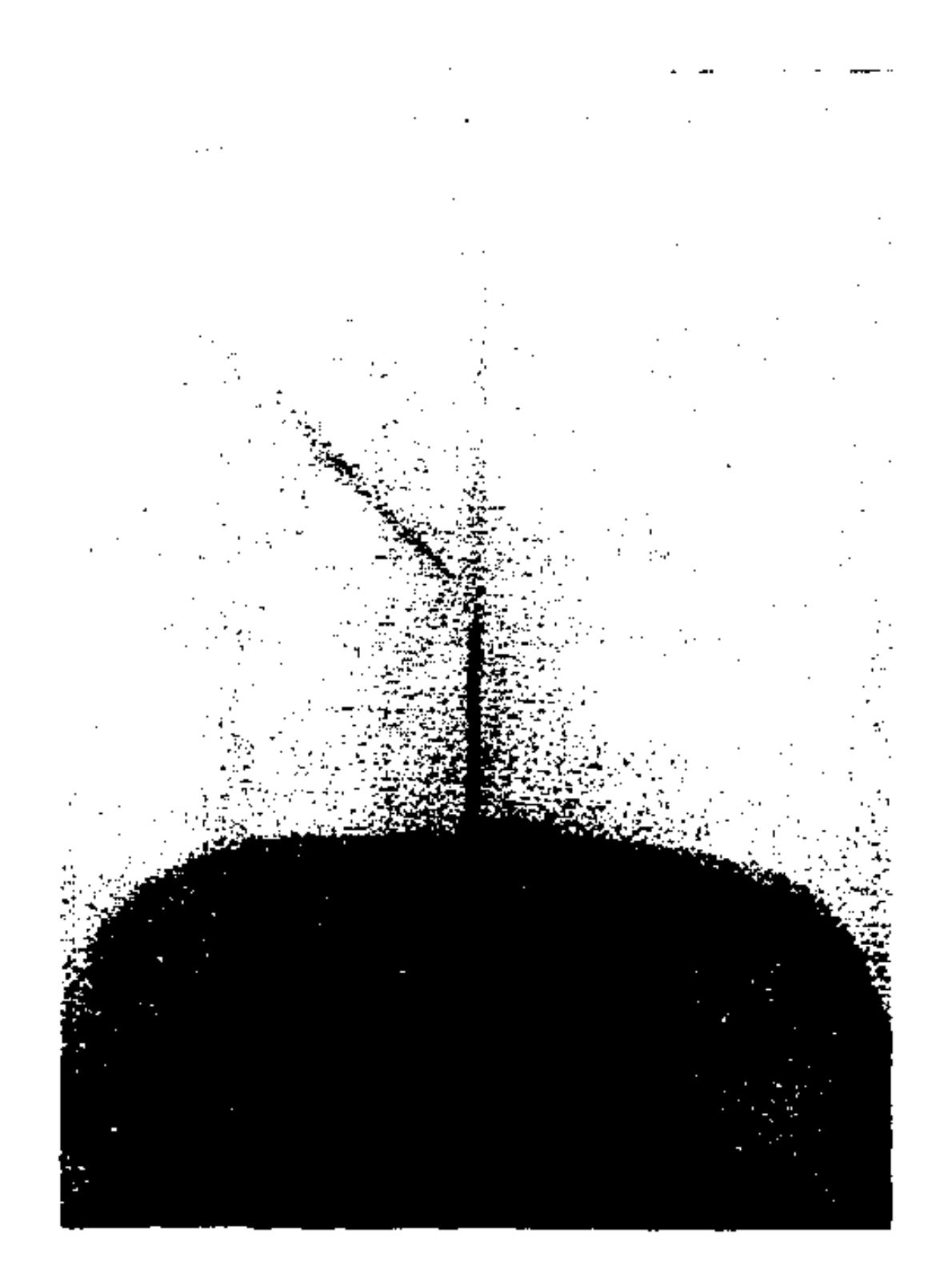


Рис. 19

Высокая проникающая способность гамма-лучей, а также наименее отклоняемых бета-лучей означает, что ни ионизация воздуха, ни фотопластинка не способны дать точное представление об их интенсивности, поскольку они проходят через газы и соли серебра без поглощения.

Если на их пути поместить достаточно толстые металлические пластинки, то эти лучи трансформируются, и либо на входной, либо на выходной ее поверхности, возникают вторичные лучи, которые поглощаются лучше настолько, что непосредственно за этими экранами наблюдается эффект, более сильный, чем если бы их не было вообще. Это преобразование напоминает эффект, создаваемый при помещении флуоресцентного экрана на пути пучка лучей невидимого излучения.

Фотопластинка, принимающая излучение радия, профильтрованное с помощью свинцовой пластинки толщиной в 1 см, подвергается бо́льшему воздействию в области, накрытой свинцовой полоской толщиной в 1 мм, нежели в областях, где такой экран отсутствует. На рисунке 20 показан эффект, созданный излучением, выходящее из стенки свинцового параллелепипеда после прохождения им металла толщиной от 5 до 12 мм.

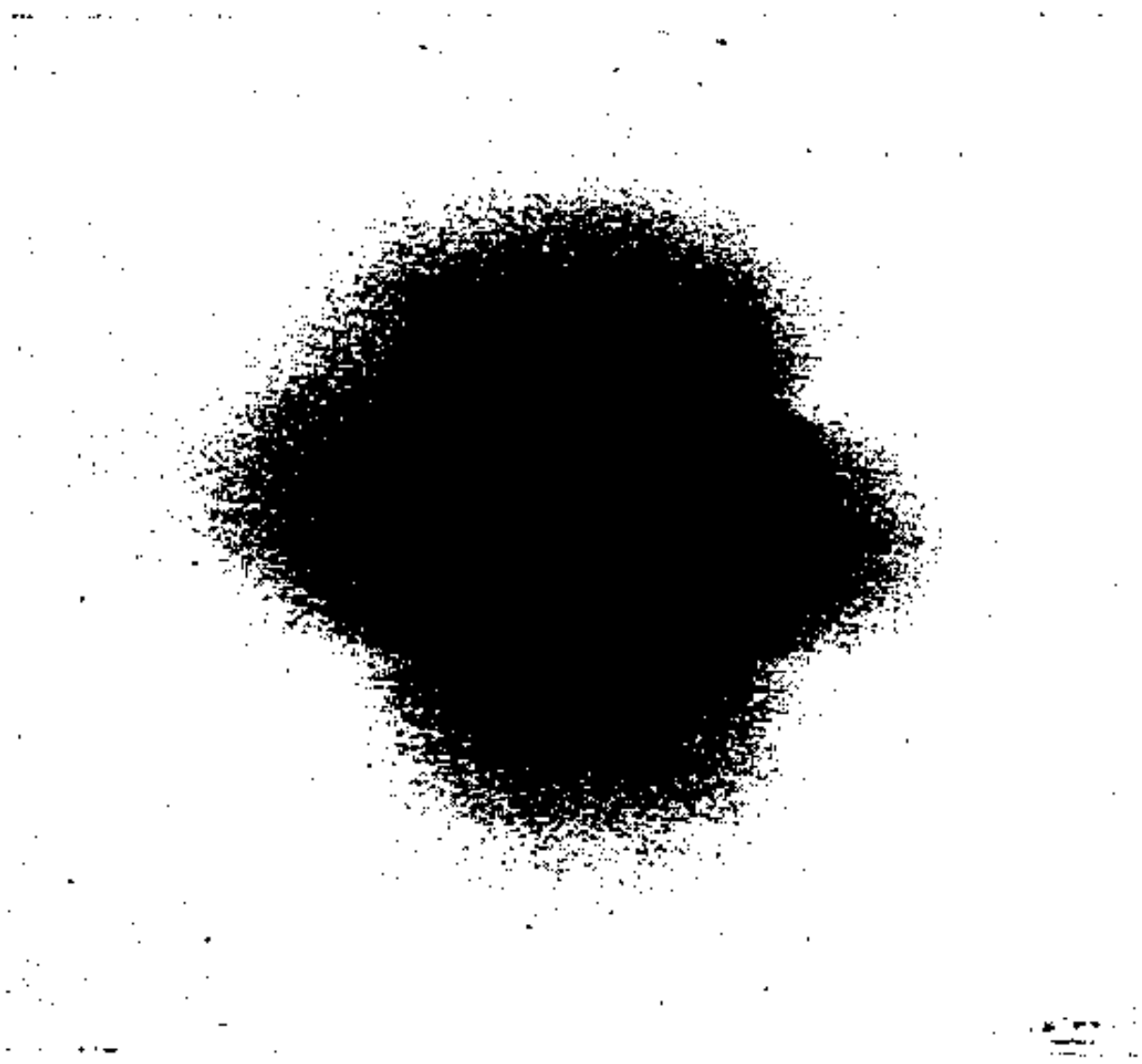


Рис. 20

Эти вторичные явления частично объясняют появление теней по краям всех более или менее прозрачных экранов, помещенных на фотопластинках.

Уран и полоний испускают проникающие лучи, которые, судя по всему, идентичны гамма-лучам.

Излучение радиоактивных веществ вызывает различные химические эффекты; оно воздействует на вещества, используемые в фотографии, причем в этом отношении наиболее активны альфа- и бета-лучи. Такое излучение окрашивает стекло в фиолетовый или коричневый свет, а соли щелочно-земельных металлов — в желтый, фиолетовый, голубой или зеленый цвет. Под действием этого излучения парафин, целлулоид и бумага желтеют, а белый фосфор превращается в красный. Это превращение было получено с помощью бета-лучей, но и альфа-лучи могут оказаться в данном случае не менее активными. Вокруг радиоактивных

тел в воздухе создается озон. Не только газы, но и жидкие (нефть, жидкий воздух) и твердые диэлектрики, например, парафин, ионизируются, когда в них проникает излучения радия, причем они сохраняют свои проводящие свойства в течение нескольких минут после прекращения воздействия радиоактивного излучения. Гизель наблюдал, что водный раствор бромида радия постепенно высвобождает кислород и водород со скоростью приблизительно 10 см^3 на грамм в день. Согласно Рамзаю и Содди эти газы также должны содержать гелий.

Более того, мсье Кюри обнаружил, что соли радия постоянно испускают тепло; чистый радий испускает примерно 80 калорий на грамм в час. Кюри и Дьюар наблюдали, что при погружении трубки с радием в жидкий водород происходило непрерывное высвобождение газообразного водорода: при использовании 0,7 граммов бромида радия за минуту было получено 73 см^3 водорода.

Наблюдались также различные физиологические действия излучения радия. Эти лучи вызывают фосфоресценцию внутри глаза. Если радиоактивный препарат поднести к виску, создается ощущение света. Эти вещества действуют на эпидермис и подобно рентгеновским лучам глубоко поражают кожный покров. Воздействие происходит без каких бы то ни было ощущений вначале и развивается только через несколько недель, создавая более или менее глубокое поражение, на лечение которого может уйти несколько месяцев и после которого остаются рубцы. В настоящее время предпринимаются попытки использовать это действие для лечения волчанки и раковых заболеваний.

Лучи радия оказывают радиоактивное действие на нервные центры, вследствие чего могут вызвать паралич и смерть; судя по всему, особенно интенсивно они воздействуют на развивающиеся живые ткани.

До настоящего момента мы говорили исключительно об излучении, которое проходит через стекло, слюду, непрозрачные тела и металлы. Однако в эмиссии из радиоактивных тел присутствует явление отличной природы, которое, видимо, тесно связано с радиоактивностью, если только не является более фундаментальным. Торий и радий испускают энергию в особой форме; их результирующая активность распространяется в виде радиоактивного пара, который назвали *эманацией* и который можно задержать с помощью любой сколь угодно тонкой газонепроницаемой оболочки.

Судя по всему, эта эманация осаждается на всех телах, делая их радиоактивными, но эта активность исчезает, как только тела перестают подвергаться действию радиоактивного источника, даже если они

находятся в закрытой камере. Эти факты в конце 1899 г. одновременно открыли Резерфорд для тория и супруги Кюри для радия. Изучая активность тория, Резерфорд помимо обыкновенного излучения обнаружил эффект, производимый *эманацией*, которую можно сравнить с радиоактивным паром. Последний осаждается на всех телах, а в особенности на тех, что имеют отрицательный заряд, и на короткое время делает их радиоактивными.

В то же время мсье и мадам Кюри открыли, что под влиянием радия тела на некоторое время приобретают свойство радиоактивности; эта *наведенная* радиоактивность сохраняется в течение некоторого времени, после того как тела убрали от радия; на открытом воздухе это свойство уменьшается примерно вполовину за полчаса.

Вышеописанное явление создается регулярно и с большой интенсивностью в замкнутом пространстве; тогда наведенная радиоактивность одинакова для всех тел, она не зависит от природы газа и от давления внутри камеры, но активация прекращается, если внутри камеры постоянно поддерживать вакуум, удаляя высвобождающиеся газы, по мере их появления. Растворы солей радия обладают бóльшей активационной способностью, нежели твердый радий.

Сильные радиоактивные свойства проявляет кристаллизационная вода, экстрагированная из радиоактивных солей, или вода, отделенная от радиоактивного раствора полупроницаемой целлулоидной стенкой. Тела, активированные радием, создают те же эффекты, что и сам радий; активированные эманацией стеклянные стенки испускают проникающее излучение, которое проходит сквозь них и вызывает их свечение, тогда как сам активирующий раствор способен испускать лишь слабое излучение.

Активационные свойства постепенно диффундируют в газах внутри закрытой камеры через капиллярные трубки или незаметные трещинки; тела становятся более радиоактивными по мере увеличения объема газа у их поверхности.

Газ, который находился вблизи радия и приобрел свойство передавать радиоактивность твердым телам, сам тоже является радиоактивным, но испускает лучи с очень маленькой проникающей способностью, которые не способны пройти сквозь стеклянную стенку. Будучи удаленным от радия, этот газ продолжает испускать лучи и создавать радиоактивность. С этой точки зрения его активность уменьшается вполовину в каждые четыре дня и, в конечном итоге, угасает. Этот четырехдневный период является временнóй постоянной характеристикой эманации радия.

Воздух, содержащий эманацию, создает фосфоресценцию различных веществ (стекла, цинковой обманки и т. д.), и это явление позволяет проводить различные поразительные эксперименты, связанные с распространением эманации.

Эманация радия ведет себя как газ со многих точек зрения. Мсье и мадам Кюри показали, что, подобно газу, она распределяется между двумя сообщающимися газовыми камерами и что она диффундирует в воздухе согласно закону диффузии газов, причем ее коэффициент диффузии, судя по всему, близок к коэффициенту диффузии углекислоты.

Резерфорд и Содди открыли, что эманация конденсируется при температуре жидкого воздуха. Все эксперименты заставляют рассматривать эманацию как материальный газ. Однако гипотеза существования такого газа основана исключительно на проявлениях радиоактивности и противоречит тому, что происходит с обыкновенной материей: эманация самопроизвольно исчезает, будучи заключенной в герметичную трубку.

Рамзай и Содди недавно обнаружили, что если заключить эманацию радия в герметичную трубку и изучить ее спектр, то постепенно можно увидеть появление спектра гелия, который сначала не наблюдался. Авторы объясняют эти факты превращениями, которые лишь наполовину происходят за четыре дня и полностью завершаются через двадцать восемь. Не прибегая к гипотезе превращения вещества, в ожидании более полного проявления столь важного факта, данные явления можно было бы объяснить, согласившись с тем, что гелий уже существует в газах эманации в герметичной трубке, но особое состояние эманации препятствует появлению спектральных линий гелия. Спектр гелия начал бы появляться постепенно по мере превращения эманации. Во время экспериментов наблюдалось, что радиоактивность эманации сокращалась вполовину к концу четырехдневного периода.

Далее уместно рассказать о поразительном методе активации, приводящем к некоторым оговоркам в отношении выводов, которые следует сделать относительно присутствия новых элементов в радиоактивных препаратах. Каждое инертное вещество, помещенное в растворы урана, радия или тория, а затем осажденное из них, приобретает радиоактивность, но потом медленно ее теряет. На этот факт первыми внимание обратили Кюри и Гизель; последний таким образом получил радиоактивный висмут.

В соединении с ураном остаток бария, осажденный в виде своего сульфата, становится заметно более радиоактивным по сравнению с ураном; когда же таким образом активируется чистый барий, то он, как и уран, испускает только бета-лучи. После осаждения соль ура-

на, собранная в виде кристаллов, проявляет меньшую активность. Это снижение активности можно продолжить, повторяя процесс, однако постепенно продукты спонтанно восстанавливают свою прежнюю радиоактивность.

Временное снижение радиоактивности после растворения является общим явлением. Соли радия, будучи вновь извлеченными из раствора, проявляют меньшую активность, чем та, которой они обладали до растворения; затем их активность увеличивается в течение нескольких месяцев, пока не достигнет своего максимума. Параллельно с этим увеличением активности соли радия испускают тепло.

Согласно Дебьерну барий, облученный актинием, можно отделить от неактивного бария; он фракционирует как радий-содержащий хлорид бария, причем та его часть, которая имеет минимальную активность, меньше других растворяется в воде и соляной кислоте. С помощью этого метода Дебьерн получил продукт, в тысячу раз более активный, чем уран. Облученный барий ведет себя как ложный радий, отличаясь от истинного радия отсутствием характеристического спектра и потерей своей радиоактивности с течением времени.

Спонтанное восстановление радиоактивности веществами, в которых она снизилась, можно объяснить тем, что они захватывают свою собственную эманация либо активными, либо инертными молекулами, с ними связанными.

Следуя этому исследованию, различные ученые обнаружили другие примеры радиоактивности: иногда в качестве остаточных элементов в металлах, а иногда в природных явлениях.

Эльстер и Гейтель обнаружили, что атмосферный воздух в небольшой степени обнаруживает те же свойства, что и облученные газы. Протягивая в воздухе длинные проволоки, имеющие отрицательный заряд, они смогли получить на них остатки облученных веществ. Газы, заключенные в замкнутые пространства, и воздух, экстрагированный из земли или вблизи водопадов, проявляют такие же свойства, что и газы, экстрагированные из определенных типов воды.

Итак, сделаем вывод. В настоящее время полностью установлена природа таких радиоактивных веществ, как уран, торий, радий и полоний. К ним можно добавить еще актиний, хотя о нем написано еще очень мало. Следует также упомянуть о других различных продуктах, полученных Гизелем, и о получении радиоактивного висмута или радиоактивного теллура, который Марквальд выделил путем электролиза.

Уран испускает только бета- и гамма-лучи; он не испускает эманацию в воздух, но создаваемую им в растворе активацию можно объяснить как действие эманации.

Торий и радий испускают альфа-, бета- и гамма-лучи, а также активирующую эманацию в газах.

Полоний не испускает бета-лучей. Он испускает альфа- и гамма-лучи, но со временем утрачивает свою активность.

Актиний, судя по всему, обладает замечательной активационной способностью.

Помимо урана и тория только радий обладает характеристиками, которые дают возможность считать его элементом, имеющим свойства, родственные свойствам бария, но отличные от них. Однако стóит отметить, что это вещество так и не было обнаружено, даже в качестве остаточного элемента в обыкновенных бариевых минералах и что оно встречается только в урановых минералах, где находится вместе с барием. Этот факт тоже может иметь определенное значение, которое станет ясным для нас несколько позже.

Радиоактивные вещества, и особенно радий, испускают энергию во всех известных видах: в форме тепла, света, химических реакций, электрических зарядов, гамма-излучения. Судя по всему, эти вещества поддерживают одно и то же состояние неопределенно долго, а источник, из которого они получают отдаваемую ими энергию, нам не известен.

Среди гипотез, предлагаемых для заполнения пробелов, оставленных текущими экспериментами, одна из наиболее вероятных состоит в том, что испускание энергии является результатом медленного изменения атомов радиоактивных веществ. Подобное изменение, которое методы, имеющиеся в нашем распоряжении, выявить не способны, безусловно могло бы высвобождать энергию в достаточно больших количествах, чтобы создавать наблюдаемые эффекты без изменений в материи, достаточно больших, чтобы их можно было обнаружить с помощью наших методов исследования.

Однако в этой схеме по-прежнему остается возможность задать вопрос: представляет ли собой превращение атома медленную спонтанную эволюцию или оно является следствием поглощения внешнего излучения, находящегося за пределами диапазона наших чувств. Если бы такое излучение существовало, то мы могли бы представить, что радиоактивные вещества его преобразуют, а сами при этом не изменяются. Однако пока что ни один эксперимент не смог ни подтвердить, ни опровергнуть эти гипотезы.

Биография

Антуан Анри Беккерель родился в Париже 15 декабря 1852 года в выдающейся семье ученых. Его отец, Александр Эдмон Беккерель, был профессором прикладной физики и занимался исследованием солнечного излучения и фосфоресценции, а его дед, Антуан Сезар, был членом Королевского общества и изобрел электролитический метод получения металлов из их руд. В 1872 году Антуан Анри поступил в Политехническую школу в Париже, а затем в 1874 году — в правительственное отделение Ponts-et-Chaussées[1], став в 1877 году *ingénieur*[2], а в 1894 году *ingénieur-en-chef*[3]. В 1888 году он получил степень *docteur-ès-sciences*[4]. С 1878 года он работал ассистентом в Музее естественной истории, вслед за своим отцом став заведующим кафедрой прикладной физики в Консерватории искусств и ремесел. В 1892 году он был назначен профессором прикладной физики на кафедре естественной истории Парижского музея. В 1895 году он стал профессором в Политехнической школе.

Ранняя работа Беккереля была связана с плоской поляризацией света, с явлением фосфоресценции и с поглощением света кристаллами (его диссертация на соискание степени доктора наук). Кроме того, он работал над вопросом земного магнетизма. В 1896 году его предыдущие работы затмило открытие им естественной радиоактивности. После дискуссии с Анри Пуанкаре об излучении, открытом совсем недавно Рентгеном (рентгеновские лучи) и сопровождавшемся некоторой фосфоресценцией в вакуумной трубке, Беккерель решил исследовать, существует ли какая-то связь между рентгеновскими лучами и естественно возникающей фосфоресценцией. Он унаследовал от отца запас солей урана, которые фосфоресцируют под действием света. Когда соли поместили около фотопластинки, накрытой непрозрачной бумагой, обнаружилось, что пластинка затуманилась. Оказалось, что это явление характерно для всех изучаемых солей урана и является свойством, присущим атому урана. Впоследствии Беккерель показал, что лучи, испущенные ураном, которые очень долго называли именем человека, их открывшего, вызывают ионизацию газов и отличаются от рентгеновских лучей тем, что могут отклоняться под действием электрического или магнитного поля. За открытие естественной радиоактивности в 1903 году Бекерель получил половину Нобелевской премии по физике, вторая же ее половина

[1]Высшая школа мостов и дорог (фр.) — *Прим. пер.*

[2]Инженер (фр.) — *Прим. пер.*

[3]Главный инженер (фр.) — *Прим. пер.*

[4]Доктор наук (фр.) — *Прим. пер.*

была присуждена Пьеру и Марии Кюри за их изучение излучения Беккереля.

Беккерель опубликовал результаты своих исследований во многих работах, которые появились, главным образом, в *Annales de Physique et de Chimie* и *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*.

В 1899 году Беккереля избрали членом Парижской академии наук (Académie des Sciences de France), где в том же году он занял пост секретаря, став преемником Бертло. Кроме того, Беккерель был членом Академии деи Линчеи, Королевской академии наук Берлина и еще нескольких академий. В 1900 году он стал Офицером Почетного Легиона.

Беккерель бы женат на мадемуазель Жанин, дочери инженера-строителя. В 1878 году у них родился сын Жан, который тоже стал физиком — представителем четвертого поколения ученых в семье Беккерелей.

Антуан Анри Беккерель умер в Ле-Круази 25 августа 1908 года.

Пьер Кюри

Радиоактивные вещества и, в частности, радий

Нобелевская лекция, 6 июня 1905 г.

Прежде всего, позвольте мне сказать вам, что я счастлив выступать сегодня перед Академией Наук, которая оказала мадам Кюри и мне огромную честь, присудив нам Нобелевскую премию. Мы также должны принести вам свои извинения за то, что столь поздно приехали в Стокгольм по неподвластным нам причинам.

Сегодня я должен говорить с вами о свойствах *радиоактивных веществ* и, в частности, о свойствах *радия*. Я не смогу рассказать о каждом из наших исследований по отдельности. В 1898 году, когда мы только начинали заниматься данным вопросом, он интересовал только нас и Беккереля, но с тех пор была проделана весьма обширная работа, и сегодня уже нельзя говорить о радиоактивности, не упоминая результатов исследований множества физиков, как-то: Резерфорд, Дебьерн, Эльстер и Гейтель, Гизель, Кауфман, Крукс, Рамзай и Содди, — и это лишь немногие из тех, кто способствовал важному прогрессу в нашем знании о свойствах радиоактивных веществ.

Я лишь кратко расскажу вам об открытии радия и его свойствах, а потом буду говорить на тему следствий новых знаний, которые радиоактивность дает нам в различных областях науки.

В 1896 году Беккерель обнаружил особые излучательные свойства *урана* и его соединений. Уран испускает очень слабые лучи, оставляющие отпечаток на фотопластинках. Эти лучи проходят через черную бумагу и металлы; они делают воздух проводником электричества. Это излучение не изменяется со временем, а причина его возникновения не известна.

Мадам Кюри во Франции и Шмидт в Германии показали, что подобными свойствами обладают торий и его соединения. В 1898 году мадам Кюри также показала, что из всех химических веществ, приготовленных или используемых в лаборатории, только содержащие уран или торий способны испускать заметное количество лучей Беккереля. Мы назвали такие вещества *радиоактивными*.

Следовательно, радиоактивность представляется как свойство, присущее атомам урана и тория, причем чем больше в каком-либо веществе содержится урана или тория, тем более радиоактивным оно является.

Мадам Кюри изучила минералы, содержащие уран или торий, и в соответствии с вышеизложенной теорией все эти минералы оказались радиоактивными. Но в ходе измерений она обнаружила, что некоторые из них более активны, чем должны были бы в соответствии с содержанием в них урана или тория. Тогда мадам Кюри предположила, что эти вещества содержат какие-то неизвестные радиоактивные химические элементы. Мы, мадам Кюри и я, стали искать эти новые гипотетические вещества в урановой руде, в *урановой смолке*. Проведя химический анализ этого минерала и оценив радиоактивность каждой порции, отделенной в процессе обработки, мы, прежде всего, обнаружили сильно радиоактивное вещество с химическими свойствами, близким к свойствам висмута, которое мы назвали *полонием*. Затем (вместе с Бемонтом) мы обнаружили второе сильно радиоактивное вещество, по свойствам напоминающее барий, которое мы назвали *радием*. Наконец, Дебьерн сумел выделить третье радиоактивное вещество, принадлежащее к группе редкоземельных элементов, — *актиний*.

Эти вещества присутствуют в урановой смолке лишь в виде остаточных элементов, но они обладают огромной радиоактивностью, которая примерно в два миллиона раз превышает радиоактивность урана. Обработав огромное количество материала, нам удалось получить достаточное количество радий-содержащей соли бария, из которой мы с помощью фракционного метода смогли выделить радий в виде чистой соли. Радий является более высоким гомологом бария в ряду щелочно-земельных металлов. Радий характеризуется отчетливым спектром, который открыл и впервые исследовал Демарсе, а затем Крукс, Рунге, Прехт, Экснер и Гашек. Спектральная реакция радия весьма чувствительна, однако для обнаружения следов радия она гораздо менее чувствительна, чем радиоактивность.

Общие эффекты излучения радия интенсивны и очень разнообразны.

Различные эксперименты. Разрядка электроскопа. — Лучи проходят через свинец толщиной в несколько сантиметров. — Искра, индуцированная присутствием радия. — Возбуждение фосфоресценции платино-синеродистого бария, виллемита и кунцита. — Окрашивание стекла лучами. — Термолюминесценция фтора и ультрамарина после действия на них излучения радия. — Радиографические снимки, полученные с помощью радия.

Радиоактивное вещество, подобное радию, представляет собой постоянный источник энергии. Эта энергия проявляется в виде излучения. Вместе с Лабордом я также показал, что радий непрерывно высвобождает тепло в количестве, равном примерно 100 калориям на грамм радия в час. Резерфорд и Содди, Рунге и Прехт, а также Кнут Ангстрем тоже измеряли высвобождение тепла радием, которое, судя по всему, остается постоянным в течение нескольких лет, так что полная энергия, которую таким образом высвобождает радий, значительна.

Работа многих физиков (Мейера и Швейдлера, Гизеля, Беккереля, П. Кюри, мадам Кюри, Резерфорда, Виллара и др.) показывает, что радиоактивные вещества способны испускать лучи трех разных типов, которые Резерфорд назвал, альфа-, бета- и гамма-лучами. Они отличаются друг от друга действием на них магнитного и электрического *полей, которые изменяют траекторию альфа- и бета-лучей.*

Бета-лучи, подобно катодным лучам, ведут себя как отрицательно заряженные бомбардирующие частицы, масса которых в 2000 раз меньше массы атома водорода (электрон). Мы, мадам Кюри и я, установили, что бета-лучи переносят отрицательное электричество. Альфа-лучи, схожие с каналовыми лучами Гольдштейна, ведут себя как бомбардирующие частицы, которые в тысячу раз тяжелее и заряжены положительным электричеством. Гамма-лучи напоминают рентгеновские лучи.

Некоторые радиоактивные вещества, например, радий, актиний и торий, действуют не только посредством прямого излучения; окружающий их воздух становится радиоактивным, вследствие чего Резерфорд предположил, что каждое из этих веществ испускает нестабильный радиоактивный газ, который он назвал *эманацией* и который распространяется в воздухе, окружающем радиоактивное вещество.

Радиоактивность газов, которую они приобретают таким образом, исчезает самопроизвольно по экспоненциальному закону с характерной для каждого радиоактивного вещества постоянной времени. Следовательно, можно утверждать, что эманация радия уменьшается вполовину каждые четыре дня, эманация тория — вполовину каждые 55 секунд, а эманация актиния — вполовину каждые 3 секунды.

Твердые вещества, помещенные в присутствие радиоактивного воздуха, окружающего радиоактивные вещества, на некоторое время сами становятся радиоактивными. Это явление *наведенной радиоактивности*, которое открыли мы с мадам Кюри. Наведенные радиоактивности, как и эманации, являются нестабильными и спонтанно разрушаются по характерным экспоненциальным законам.

Эксперименты. Стеклянная трубка, наполненная эманацией радия, привезенная из Парижа. — Разрядка электроскопа лучами наведенной радиоактивности. — Фосфоресценция сульфида цинка под действием эманации.

Наконец, согласно Рамзаю и Содди радий является источником непрерывного и самопроизвольного производства гелия.

Радиоактивность урана, тория, радия и актиния кажется неизменной в течение нескольких лет; с другой стороны, радиоактивность полония уменьшается по экспоненциальному закону: вполовину за 140 дней, — и через несколько лет исчезает почти полностью.

Это самые важные факты, которые были установлены усилиями многих физиков. Некоторые явления они уже в значительной степени изучили.

Следствия этих фактов ощущаются во всех областях науки.

Важность этих явлений для *физики* очевидна. Радий представляет собой новый лабораторный инструмент, источник нового излучения. Изучение бета-лучей уже принесло немало плодов. Оказалось, что это изучение подтверждает теорию Дж. Дж. Томсона и Хевисайда о массе электрически заряженных движущихся частиц; согласно их теории часть этой массы является результатом электромагнитной реакции эфира вакуума. Эксперименты Кауфмана с бета-лучами радия ведут к предположению о том, что некоторые частицы имеют скорость, чуть меньшую скорости света, и что в соответствии с теорией масса таких частиц возрастает вместе с их скоростью и имеет электромагнитную природу. Если также предположить, что материальные тела представляют собой совокупность наэлектризованных частиц, то ясно, что *фундаментальные принципы механики* придется изменить в самой их основе.

Следствия наших знаний о свойствах радиоактивных веществ еще, быть может, более важны для *химии*. Они заставляют нас говорить об источнике энергии, поддерживающей радиоактивные явления.

В начале наших исследований мы с мадам Кюри установили, что эти явления можно объяснить двумя различными гипотезами очень общего характера, которые мадам Кюри описала в 1899 и 1900 гг.

(*Revue Générale des Sciences*, 10 января 1899 г. и *Revue Scientifique*, 21 июля 1900 г).

I. Первая гипотеза предполагает, что радиоактивные вещества заимствуют высвобождаемую ими энергию из внешнего излучения: тогда их собственное излучение было бы вторичным. Нет ничего абсурдного в предположении, что пространство постоянно пронизывают излучения, обладающие высокой проникающей способностью, которые некоторые вещества вполне способны уловить. Согласно недавней работе Резерфорда, Кука и Мак-Леннана эта гипотеза кажется полезной для объяснения части чрезвычайно слабого излучения, испускаемого большинством веществ.

II. Вторая гипотеза предполагает, что радиоактивные вещества черпают высвобождаемую ими энергию их своих внутренних источников. Тогда радиоактивные вещества, несмотря на кажущуюся неизменность некоторых из них, находились бы в состоянии эволюции и постепенного и медленного превращения. За несколько лет радий высвобождает огромное количество тепла, если сравнить его с теплом, выделяющимся в ходе любой химической реакции с участием вещества такого же веса. Количество выделяющегося тепла, представляющее собой энергию химического превращения такого количества радия, так мало, что его невозможно было бы оценить даже по прошествии нескольких лет. Это ведет к предположению, что такое превращение является гораздо более глубоким, нежели обыкновенные химические превращения, что на карту поставлено существование атома и что мы присутствуем при превращении элементов.

Вторая гипотеза оказалась более плодотворной для объяснения свойств радиоактивных веществ. В частности, эта гипотеза дает прямое объяснение самопроизвольного исчезновения радиоактивных свойств полония и рождение гелия радием. Эта теория превращения элементов была с большой смелостью сформулирована и разработана Резерфордом и Содди, которые утверждали, что существует непрерывный и необратимый распад атомов радиоактивных элементов. В теории Резерфорда продуктами распада, с одной стороны, являются лучи бомбардирующих частиц, а с другой стороны, эманации и наведенные радиоактивности. Последние, согласно его теории, представляют собой новые газообразные или твердые радиоактивные вещества, часто быстро эволюционирующие и имеющие атомный вес, меньше атомного веса исходного элемента, из которого они получены. Рассмотренная таким образом жизнь радия была бы непременно ограничена тем временем, когда это вещество было отделено от других элементов. В природе радий всегда обнаруживает-

ся вместе с ураном, поэтому можно предположить, что последний его создает.

Следовательно, это истинная теория превращения одних элементов в другие, хотя и не в том виде, в каком ее понимали алхимики. Неорганическая материя непременно изменялась бы с течением веков в соответствии с непреложными законами.

Неожиданным следствием радиоактивных явлений оказалась их важность для *геологии*. Например, обнаружилось, что в минералах радий всегда встречается вместе с ураном. Кроме того, выяснилось, что отношение содержания радия к содержанию урана постоянно во всех минералах (Болтвуд). Этот факт подтверждает идею рождения радия из урана. Эту теорию можно расширить, чтобы попытаться объяснить совместное нахождение других элементов, которое столь часто встречается в минералах. Можно представить, что некоторые элементы образовались в одном месте на поверхности Земли или что они произошли из других элементов за время, величина которого может иметь порядок геологических периодов. Это новая точка зрения, которую должны учитывать геологи.

Эльстер и Гейтель показали, что эманация радия очень широко распространена в природе и что радиоактивность, вероятно, играет важную роль в *метеорологии*, так как ионизация воздуха вызывает конденсацию водяного пара.

И наконец, в *биологических науках* лучи радия и его эманация создают интересные эффекты, которые в настоящее время изучаются. Лучи радия использовались при лечении некоторых болезней (волчанки, рака, нервных заболеваний). В некоторых случаях их действие может быть опасным. Если на несколько часов положить в карман деревянную или картонную коробочку с маленькой стеклянной ампулой, содержащей несколько сантиграммов соли радия, то ничего не почувствуешь. Но через 15 дней на коже появится покраснение, которое затем развивается в очень трудно излечимую язву. Более длительное воздействие излучения радия может привести к параличу и смерти. Вследствие этого радий следует транспортировать в свинцовом ящике с толстыми стенками.

Нетрудно понять, что в преступных руках радий может стать очень серьезной опасностью и встает вопрос: выиграет ли человечество от познания тайн Природы, готово ли оно извлечь из этого знания пользу или оно обратится во вред? В этом отношении показателен пример открытия Нобеля, в результате которого мощные взрывчатые вещества дали людям возможность выполнить замечательную работу. Но они же являются ужасным средством разрушения, попадая в руки величайших

преступников, ведущих людей к войне. Я принадлежу к числу тех, кто, как и Нобель, верит, что новые открытия принесут людям больше добра, чем зла.

Биография

Пьер Кюри родился 15 мая 1859 года в Париже, где его отец был врачом, занимавшимся общей практикой[1]. Начальное образование Пьер получил дома, после чего поступил в Сорбонну на факультет естественных наук. В 1878 году он получил диплом лиценциата по физике и стал ассистентом в физической лаборатории, где он работал до 1882 года, когда был назначен ответственным за всю практическую работу в Школе физики и промышленной химии. В 1895 году Пьер получил степень доктора и был назначен профессором физики. В 1900 году он получил должность профессора факультета естественных наук, а в 1904 — профессора физики Сорбонны.

В ранних исследованиях в области кристаллографии вместе со своим братом Жаком Пьер Кюри открыл пьезоэлектрический эффект. Впоследствии он выдвинул теорию симметрии физических явлений и обратил свое внимание на магнетизм. Он показал, что магнитные свойства данного вещества изменяются при определенной температуре — сейчас эта температура известна как точка Кюри. Для проведения своих экспериментов он сконструировал несколько очень чувствительных устройств: весы, электрометры, пьезоэлектрические кристаллы и т. д.

Изучением радиоактивных веществ Кюри занимался вместе со своей женой, брак с которой был заключен в 1895 году. Полученные ими результаты были достигнуты в очень сложных условиях: с почти непригодными лабораторными приспособлениями и под давлением необходимости давать множество уроков, чтобы прокормить себя. В 1898 году они объявили об открытии радия и полония путем фракционирования урановой смолки, после чего приложили много усилий, чтобы объяснить свойства радия и продуктов его превращения. Эта их работа создала основу для множества последующих исследований в ядерной физике и химии. В 1903 году супруги Кюри получили половину Нобелевской премии за изучение спонтанного излучения, открытого Беккерелем, который получил вторую половину этой премии.

Работа Пьера Кюри описана во многих статьях, опубликованных в *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Journal de Physique* и в *Annales de Physique et Chimie*.

---

[1]Врач общей практики является одновременно терапевтом и хирургом. — *Прим. пер.*

В 1903 году Кюри (вместе со своей супругой) был награжден медалью Г. Дэви Лондонского Королевского общества, а в 1905 году он был избран членом Парижской академии наук.

Его женой была урожденная Мария Склодовская, дочь учителя средней школы из Варшавы (Польша). Одна их дочь, Ирен, вышла замуж за Фредерика Жолио, и в 1935 году супруги Жолио получили Нобелевскую премию по химии. Младшая дочь Пьера и Марии Кюри, Ева, вышла замуж за американского дипломата Лабуиссе. Они оба активно занимались социальными проблемами, и Лабуиссе, будучи директором детского фонда Организации Объединенных Наций, от его имени получил Нобелевскую премию мира в Осло в 1965 году. Его жена написала знаменитую биографию своей матери «Мадам Кюри» (Издательство Gallimard, Париж, 1938 г.), которая была переведена на несколько языков.

Пьер Кюри трагически погиб во время несчастного случая в Париже 19 апреля 1906 г.

Мадам Кюри лекции не читала.

Биография

Мария Кюри, урожденная Склодовская, родилась в Варшаве 7 ноября 1867 года в семье учителя средней школы. Среднее образование она получила в местных школах, а отец обучал ее науке. Она входила в студенческую революционную организацию и сочла благоразумным уехать из Варшавы, которая тогда находилась в той части Польши, что подчинялась России, в Краков, который в то время находился под управлением Австрии. В 1891 году она уехала в Париж, чтобы продолжить обучение в Сорбонне, где она получила два диплома лиценциата по физическим и математическим наукам. В 1894 году она познакомилась с Пьером Кюри, профессором в Школе физики, и в следующем году они поженились. Она сменила своего мужа на посту главы лаборатории Школы физики в Сорбонне, в 1903 году получила степень доктора, а после трагической гибели Пьера Кюри в 1906 году она стала профессором общей физики на факультете естественных наук, сменив на этом посту своего мужа. Кроме того, Мария Кюри была назначена директором Лаборатории Кюри в Институте радия, открытом в 1914 году в Парижском университете.

Ее ранние исследования, которыми она занималась вместе с мужем, зачастую проводились в очень сложных условиях, так как лабораторные установки не особенно подходили для таких опытов, да и обоим приходилось много преподавать, чтобы заработать на жизнь. Открытие радиоактивности Анри Беккерелем в 1896 году вдохновило Кюри на их блестящие исследования и анализы, которые привели к выделению полония, названного так в честь родной страны Марии, и радия. Мадам Кюри разработала методы выделения достаточных количества радия из радиоактивных остатков, которые позволили определить его характеристики, тщательно изучить его свойства, в частности, терапевтические.

На протяжении всей своей жизни мадам Кюри активно пропагандировала использование радия для облегчения страданий людей и во время Первой мировой войны она вместе со своей дочерью, Ирен, посвятила себя этой врачебной работе. Она сохранила свой энтузиазм по отношению к науке на всю жизнь и очень много сделала для того, чтобы основать лабораторию по изучению радиоактивных веществ в своем родном городе. В 1929 году Президент Соединенных Штатов Америки Гувер преподнес ей в дар 50 000 долларов, пожертвованных Американскими друзьями науки, чтобы она могла купить радий для использования в своей Варшавской лаборатории.

Мадам Кюри, спокойную, почтенную и непритязательную, высоко ценили восхищавшиеся ею ученые во всем мире. С 1911 года и до самой смерти она оставалась членом Сольвеевского совета по физике (Conseil du Physique), а с 1922 года входила в «Международный комитет интеллектуального сотрудничества» Лиги наций. Ее работа описана во многих статьях, опубликованных в научных журналах. Она также является автором трудов *Recherches sur les Substances Radioactives*[1] (1904), *L'Isotopie et les Éléments Isotopes*[2] и классического *Traité de Radioactivité*[3] (1910).

Важность работы мадам Кюри отражают многочисленные награды, которых она удостоена. Мария Кюри получила множество почетных научных, медицинских и юридических степеней; она была почетным членом научных обществ во всем мире. Вместе со своим мужем она получила половину Нобелевской премии по физике в 1903 году за их изучение спонтанного излучения, открытого Беккерелем, который получил вторую половину этой премии. В 1911 году Мария получила вторую Нобелев-

[1]Исследования радиоактивных веществ (фр.) — *Прим. пер.*

[2]Изотопия и изотопы элементов (фр.) — *Прим. пер.*

[3]Трактат о радиоактивности (фр.) — *Прим. пер.*

скую премию, на этот раз по химии, в знак признания ее работы с радиоактивностью. Кроме того, в 1903 году она вместе со своим мужем получила медаль Г. Дэви Лондонского Королевского общества, а в 1921 году Президент Соединенных Штатов Америки Гардинг от имени американских женщин в знак признания ее заслуг перед наукой подарил ей грамм радия.

Другие подробности см. на стр. 75. Мадам Кюри умерла в Савойе, Франция, после непродолжительной болезни 4 июля 1934 года.

Лорд Рэлей (Джон Уильям Стретт)

«за исследования плотности наиболее распространенных газов и за открытие аргона в ходе этих исследований»

Лорд Рэлей (Джон Уильям Стретт)

Плотность газов в воздухе и открытие аргона

Нобелевская лекция, 12 декабря 1904 г.

Тема плотности газов занимала большую часть моего внимания в течение более чем 20 лет. В 1882 году, обращаясь с речью к Британской ассоциации, я выразил свое мнение о необходимости перепроверки плотностей газов в связи с сомнениями в справедливости гипотезы Праута[1]. В то время лучшими считались результаты, полученные Реньо, согласно которым плотность кислорода была в 15,96 раза больше плотности водорода. Отклонение этого числа от ближайшего целого 16, казалось, не выходит за пределы ошибки эксперимента.

Я в своей работе, равно как и Кук в своей, следовал методу Реньо в том, что рабочая сфера уравновешивалась эквивалентной (всегда

[1]Гипотеза Праута — предположение, согласно которому атомы всех химических элементов образовались из атомов водорода, являющегося «первичной материей». Высказана в 1815-16 английским врачом У. Праутом (W. Prout). Гипотеза Праута была первой (позднее не подтвердившейся) гипотезой, допускавшей сложное строение атомов. — *Прим. пер.*

замкнутой), имеющей равный внешний объем. При этих условиях мы смогли добиться независимости измерений от колебаний плотности атмосферы. Важность этого соображения станет очевидной, если обратить внимание на то, что при обычном процессе взвешивания с помощью латунных или платиновых разновесов разница при высоких или низких показаниях барометра может проявиться гораздо более явно, нежели в случае, когда рабочая сфера пуста или наполнена водородом до атмосферного давления. Результат Кука опубликованный первым, был практически идентичен результату Реньо, но оба эти исследователя пропустили в своих вычислениях чрезвычайно важную поправку. Считалось, что внешний объем рабочей сферы одинаков вне зависимости от того, пуста она или наполнена до атмосферного давления, тогда как в последнем случае объем, конечно, должен быть бо́льшим. Введение этой поправки сократило результат Кука до той же величины, которую тем временем объявил я, а именно: 15,88. Но в этом случае новое определение не уменьшало, а увеличивало расхождение с гипотезой Праута.

Обратив свое внимание на *азот*, я сделал ряд измерений, используя метод приготовления, изобретенный Харкуром и рекомендованный мне Рамзаем. Воздух, пропущенный через жидкий аммиак, проводится через трубку, содержащую медь, при температуре красного каления, где кислород воздуха поглощается водородом аммиака, причем излишек аммиака впоследствии удаляется с помощью серной кислоты. В этом случае медь необходима лишь для того, чтобы увеличить поверхность, и действует как индикатор. Пока она остается блестящей, мы можем быть уверены, что аммиак выполняет свою работу.

Сделав ряд согласующихся наблюдений над таким образом приготовленным газом, я сначала был склонен считать работу с азотом завершенной. Однако впоследствии я подумал, что использовал метод, отличный от метода Реньо, и что, в любом случае, желательно проверить несколько методов, поэтому я прибегнул к более ортодоксальной процедуре, в которой аммиак не нужен, и воздух проходит непосредственно через медь при температуре красного каления. И опять последовала серия согласованных результатов, но, к моему удивлению и досаде, плотности газов, полученные с помощью двух этих методов, отличались на тысячную долю — сама по себе эта разница мала, но, тем не менее, она выходит за пределы экспериментальных ошибок. Метод, в котором использовался аммиак, дал меньшую плотность, вследствие чего возникал вопрос, можно ли приписать эту разность известным примесям. Несколько затянувшееся исследование дало на этот вопрос отрицательный ответ, и я почти растерялся, не зная, что мне делать дальше. Хорошим прави-

лом экспериментальной работы является стремление увеличить несоответствие, как только таковое появляется, а не пытаться избавиться от него, следуя природному инстинкту. В чем состояла разница между двумя видами азота? Один был получен полностью из воздуха, а другой — частично, примерно на одну пятую часть, из аммиака. Самым многообещающим путем увеличения полученного несоответствия, судя по всему, была замена воздуха кислородом в методе с аммиаком, чтобы *весь* азот получался из аммиака. Опыт сразу же оказался успешным: азот, полученный из аммиака, был на 1/200 долю легче, чем азот, полученный из воздуха. С такой разницей уже можно было работать, рассчитывая на какой-то удовлетворительный результат. Среди возможных возникавших объяснений были присутствие в воздухе газа, тяжелее азота, или (к чему сначала благоволили мои друзья-химики) существование в газе, полученном из аммиака, диссоциированного азота. Поскольку такой диссоциированный азот, вероятно, был бы неустойчивым, мы в течение восьми месяцев хранили полученный образец, однако плотность осталась неизменной.

Как только мы предположили, что газ, выделяемый из воздуха, тяжелее «химического» азота из-за существования в атмосфере неизвестного компонента, следующим шагом стало выделение этого компонента путем поглощения азота. Это была довольно сложная задача; мы работали над ней с Рамзаем: сначала по отдельности, а потом вместе. В нашем распоряжении было два метода: первым был метод, с помощью которого Кавендиш первоначально установил идентичность основного компонента атмосферы с азотом селитры и который состоял в окислении азота под воздействием электрической искры с поглощением кислотных соединений щелочами; другой же метод заключался в поглощении азота магнием при температуре красного каления. В обоих экспериментах выделился газ объема, равного примерно одному проценту от состава атмосферного воздуха, и плотности, примерно в полтора раза большей, чем плотность азота. Способ его получения доказал, что этот газ не окисляется кислородом воздуха и не поглощается магнием при температуре красного каления, да и дальнейшие разнообразные попытки вызвать его химическое соединение с каким-либо веществом остались безрезультатными. По этим причинам новый газ назвали *аргоном*[1]. Самой замечательной характеристикой данного газа является отношение его удельных теплоемкостей, которое является самым высоким из возможных, а именно: 1,67,— что указывает на то, что практически вся энер-

[1]От греческого слова «argos» — неактивный. — *Прим. пер.*

гия молекулярного движения является энергией поступательного движения.

Аргон не следует считать редким. Большой зал может содержать такое его количество, которое не под силу поднять одному человеку.

В последующих исследованиях Рамзай и Траверс обнаружили небольшие количества новых газов, содержащихся в смеси, первоначально названной аргоном. В ней в крошечном количестве присутствует и гелий, первоначально полученный Рамзаем из клевита.

Эксперименты по преломлению света и вязкости аргона не выявили ничего особенно замечательного, но коэффициент преломления гелия оказался неожиданно низким: ниже одной третьей коэффициента преломления водорода, — самого низкого из тогда известных.

Что касается получения аргона, здесь полезно начинать с *жидкого воздуха*, установка для получения которого сейчас есть во многих лабораториях. Вероятно, следует заметить, что «жидкий воздух» — это неправильный термин. Сжижается не весь поданный воздух и даже не его ощутимая часть. Кислород, будучи менее летучим, содержится в чрезмерно большом количестве, и этот избыток увеличивается по мере испарения. Можно ожидать, что содержание аргона, имеющего среднюю летучесть, будет возрастать относительно содержания азота, но уменьшаться относительно содержания кислорода. Несколько анализов на содержание кислорода и водорода в процессе испарения приведены в таблице 1; они относятся к *пару*, поднимающемуся от жидкости, а не к самой жидкости. Содержание кислорода, выраженное как доля от целого, изменилось от 30 до 98 процентов. В промежутке от 43 до 90 процентов содержания кислорода процентное содержание аргона от всего пара, почти не отклонялось от 2,0.

Таблица 1

Процентное содержание кислорода	Процентное содержание аргона	Аргон в процентном содержании от азота и аргона
30	1,3	1,9
43	2,0	3,5
64	2,0	5,6
75	2,1	8,4
90	2,0	20,0
98	0,76	33,0
100	0,00	100,0

Эксперимент, к которому относится 98 процентов кислорода, вряд ли стóит сравнивать с остальными. Последняя же строка, которая соответствует 100 процентам кислорода, является теоретической и не представляет результатов реального эксперимента.

Вышеприведенные числа показывают, что, отправляясь от жидкого воздуха, можно получить огромное преимущество. Кое-что зависит от процедуры, которую следует предпринять для удаления азота. При экспериментах среднего объема и там, где есть доступ к переменному току, метод окисления, использованный при анализе, вероятно, является наиболее удобным. В этом случае сохранение кислорода может оказаться выгодным. Если содержание кислорода составит около 60 процентов, как в третьем эксперименте, этой доли будет почти достаточно для окисления азота. Мы можем сравнить это со смесью атмосферного воздуха и кислорода, которая ведет себя точно также. В последнем случае доля аргона сократится от 2,0 процентов до почти 0,4 процентов, так что жидкий воздух использовать примерно в *пять* раз выгоднее. В описанном мной устройстве для окисления азота в большом объеме смешанные газы поглощались со скоростью 20 литров в час.

В другом методе азот поглощается магнием или кальцием. В этом случае сначала необходимо удалить кислород; но с кислородом настолько легче работать, чем с азотом, что его присутствие, даже в больших количествах, вряд ли можно считать препятствием. Следуя этому мнению, а также предполагая, что жидкий воздух доступен в больших количествах, полезно проводить испарение в течение длительного времени. Тогда легко получается двадцатипроцентная смесь аргона и азота (эксперимент 5).

Несмотря на то, что получение значительного количества аргона — дело непростое, его существование несложно продемонстрировать с помощью самых обычных устройств. Используя специально изогнутую трубку и обычную индукционную катушку, приводимую в действие батареей Гроува, мне удалось показать характеристический спектр аргона при атмосферном давлении, начав с использования всего 5 кубических сантиметров воздуха.

Мое внимание привлекал и другой вопрос, касающийся атмосферных газов, а именно: содержание свободного водорода. Вспомним, что мсье А. Готье, проведя весьма скрупулезные исследования, объявил, что количество свободного водорода достигает 2/10 000 кроме переменного количества углеводородов, зависящего от местности, где был собран воздух. Мои собственные ранние наблюдения относились к видимой С-линии в искре, зажженной в тщательно высушенном воздухе при ат-

мосферном давлении. От этой линии никак не удавалось избавиться полностью, но, приняв должные меры предосторожности, ее можно было сделать достаточно слабой. Когда воздух (из сельской местности), к которому добавили 1/5 000 водорода, заменили чистым воздухом, видимость С-линии заметно увеличилась, причем разница была такова, что легко можно было поверить в то, что доля активного водорода удвоилась. Такой вывод в точности согласовался бы с наблюдениями мсье Готье, если бы мы могли принять, что воздух действительно содержит меньшее количество водорода. Но другие наблюдения вызвали очень сильные сомнения относительно истинности такого допущения.

Во-первых, видимость С-линии не уменьшалась ощутимым образом при прохождении воздуха над раскаленным докрасна оксидом меди. Можно спорить, что этот реагент не подходит для устранения остатков водорода из воздуха за достаточно короткое время, даже если воздух проходит над ним медленным потоком. Однако ранее я обнаружил, что водород, намеренно введенный в азот, можно выделить с помощью этого метода настолько хорошо, что плотность азота остается практически неизменной, хотя можно ожидать проявления 1/10 000 остаточного водорода.

Более того, когда над оксидом меди пропускался воздух, умышленно загрязненный 1/5 000 долей водорода, дополнительный водород, судя по всему, удалялся, а видимость С-линии уменьшалась до величины, соответствующей необработанному воздуху.

Затем были проделаны следующие спектроскопические эксперименты, в которых платиновые иглы были заменены алюминиевыми, а полученные результаты вряд ли можно было примирить с точкой зрения Готье без *a priori* маловероятного случайного стечения обстоятельств.

Это побудило меня выполнить измерения путем непосредственного сжигания. Десять литров свежего *деревенского* воздуха, высушенного максимально возможным образом, пропускалось над оксидом меди при температуре красного каления. Увеличение веса фосфорной трубки, через которую проходил воздух, указывало на присутствие свободного водорода в количестве, равном одной седьмой от указанного Готье, несмотря на то, что не учитывалась возможность наличия углеводородов.

Недостаточное увеличение веса вряд ли можно объяснить небрежностью измерения. В данном случае возникает важный вопрос относительно эффективности оксида меди. Позволила ли моя труба-реактор пройти несгоревшей основной части свободного водорода? На этот вопрос сложно дать прямой ответ, но я могу сказать, что из-

менения температуры (в умеренных пределах) никак не повлияли на результат.

Что можно было удовлетворительно исследовать, так это влияние небольших добавок водорода в собранный воздух. В моих более поздних экспериментах добавленный водород составлял всего один кубический сантиметр, то есть 1/10 000 от объема, или половину величины, первоначально присутствующей в воздухе, согласно мсье Готье. Сначала водород был растворен в газовой пипетке, содержавшей около ста кубических сантиметров воздуха, причем на диффузию газа было отведено некоторое время. В десятилитровый аспирационный сосуд, предварительно наполненный водой, сверху ввели разбавленный водород, а затем — десять литров воздуха, собранного на открытой местности, после чего данная смесь простояла ночь, — такие меры предосторожности сочли необходимыми, чтобы обеспечить полное смешение для спектроскопической работы. Результаты выявили *дополнительное* увеличение веса на 0,00072 грамма, что очень близко к полному количеству (0,00075), соответствующему одному кубическому сантиметру добавленного водорода. Значит, мы можем сказать, что оксид меди подходил для учета небольших *добавок* водорода к воздуху.

Другое направление моей работы с газами относится к закону давления, а особенно при низких давлениях. В этих обстоятельствах обычным методам недостает точности. Таким образом, Амага полагает, что при наилучших условиях нельзя ручаться ни за что при давлении меньше 0,1 мм ртутного столба. Используя специальный манометр, я смог добиться точности, как минимум, в 50 раз большей, чем норма Амага, и достаточно точно исследовать влияние давлений, в общей сумме не превышающих 0,01 мм. рт. ст. При этом полностью подтвердился закон Бойля даже в кислороде, для которого К. Баур обнаружил некоторые аномалии, особенно при давлении около 0,7 мм. рт. ст.

Совсем недавно я измерил сжимаемость газов при давлении от одной атмосферы до полатмосферы. Для этого я использовал два манометра, каждый из которых мог замерить давление в полатмосферы. Идентичность манометров можно было проверить, используя их *параллельно*, если говорить на языке электротехников. Тогда один манометр мог служить для измерения давления в полатмосферы, а два манометра, соединенные *последовательно*, могли измерять давление в одну атмосферу. С этими приборами нужно было также соединить сосуды, имеющие объемы, которые относятся друг к другу как 2:1. И опять-таки желаемый результат был получен при использовании двух сосудов равных объемов, либо поодиночке, либо вместе. Любой вопрос относительно точного ра-

венства двух объемов исключается в каждой серии наблюдений благодаря тому, что два отдельных сосуда используются по очереди. Тогда средний результат *обязательно* соответствует половине общего объема, за исключением того, что емкости сосудов могут измениться при изменении давления.

В таблице 2 приведена сводка результатов, полученных для различных газов. Здесь

$$B = \frac{pv \text{ при } \frac{1}{2} \text{ атм.}}{pv \text{ при } 1 \text{ атм.}},$$

причем температура одинакова в обоих случаях и имеет величину, указанную в таблице. То, что B должно быть меньше единицы для водорода и превышать это значение для других газов, следовало ожидать из известного поведения их при более высоких давлениях.

Таблица 2

Газ	B	Температура
O_2	1,00038	11,2
H_2	0,99974	10,7
N_2	1,00015	14,9
CO	1,00026	13,8
Воздух	1,00023	11,4
CO_2	1,00279	15,0
N_2O	1,00327	11,0

Главный интерес этих результатов, вероятно, состоит в том, чтобы вычислить поправки к отношению плотностей, найденных при атмосферном давлении, и сделать вывод о том, какими будут эти отношения при более сильном разрежении. Только при этом условии можно ожидать точного применения закона Авогадро к кислороду и водороду, как я указывал в 1892 году.

Для азота и кислорода поправка не столь важна, и первоначальное сравнение плотностей[1] ощутимо не изменяется. Согласно этому методу атомный вес азота составляет 14,01, а не 14,05, как это определил Стас.

[1] Рэлей и Рамзай, *Phil. Trans.*, (1895).

Биография

Джон Уильям Стретт, третий барон Рэлей, родился 12 ноября 1842 года в Ленгфорд-Гроуве, в Мелдоне, в Эссексе. Он был сыном Джона Джеймса Стретта, второго барона, и его жены, Клары Элизабет Ля Туш, старшей дочери капитана Инженерных войск Ричарда Викерса. Джон Уильям был одним из очень немногих представителей высшей знати, которые завоевали славу выдающихся ученых.

На протяжении всего детства и юности он был очень хрупок физически; его обучение постоянно прерывалось из-за болезней, а перспективы достижения мальчиком зрелости казались весьма шаткими. После краткого пребывания в Итоне (в возрасте 10 лет), большую часть которого он провел в санатории, мальчик в течение трех лет учился в частной школе в Уимблдоне, затем некоторое время пробыл в Харроу, и, наконец, четыре года учился у преподобного Джорджа Таунсенда Уорнера (1857), который жил в Торки.

В 1861 году он поступил в Тринити-колледж, в Кембридже, где начал заниматься математикой. Сначала его достижения были далеки от достижений его лучших сверстников, но благодаря своим исключительным способностям очень скоро он сумел их опередить. В 1865 году он сдал выпускные экзамены по математике «Математический треножник», заняв первое место и получив премию Смита. В 1866 году он получил должность в Тринити, где и работал до 1871 года — года своей женитьбы.

Тяжелый приступ ревматизма в 1872 году заставил его провести зиму в Египте и Греции. Вскоре после его возвращения домой умер его отец (1873), и он унаследовал титул барона, поселившись в родовом имении, Терлинге, в Уитхеме, в Эссексе. Теперь Джон Уильям был вынужден посвящать часть своего времени управлению своим имением (7 000 акров). Сочетание общих научных знаний и сообразительности с приобретенными знаниями по сельскому хозяйству сделало его практику в управлении имением во многих отношениях опережающей свое время. Тем не менее в 1876 году он передал все управление землей своему младшему брату.

С того времени он снова смог посвятить все свое время науке. В 1879 году его назначили преемником Джеймса Клерка Максвелла на должности профессора экспериментальной физики и директора Кавендишской лаборатории в Кембридже. В 1884 году он уехал из Кембриджа, чтобы заниматься экспериментами в своем имении в Терлинге, в Эссексе. С 1887 по 1905 Стретт был профессором натурфилософии

в Королевском институте Великобритании, став преемником Тиндаля. В течение шести лет он был президентом Правительственного комитета по взрывчатым веществам, а с 1896 по 1919 — научным руководителем в Тринити-хауз. С 1892 по 1901 год он был главой судебной и исполнительной власти в Эссексе.

Первые исследования лорда Рэлея носили, главным образом, математический характер; они касались оптики и колебательных систем, но его более поздняя работа охватывала почти всю физику: звук, волновую теорию, цветное зрение, электродинамику, электромагнетизм, рассеяние света, течение жидкостей, гидродинамику, плотность газов, вязкость, капиллярность, упругость и фотографию. Его сложные эксперименты, проведенные с огромным терпением, привели к установлению стандартов сопротивления, тока и электродвижущей силы, а более поздняя работа была связана с проблемами электричества и магнетизма. Лорд Рэлей был замечательным руководителем, и под его активным наблюдением в Кембридже была создана система практического руководства в экспериментальной физике, которая из класса из пяти или шести студентов выросла в перспективную школу из семидесяти физиков-экспериментаторов. В 1877–1878 гг. вышел труд Рэлея «Теория звука» в двух томах, а его другие обширные исследования описаны в «Научных работах» — шесть томов, выпущенных в период с 1889 по 1920 гг. Он также внес свой вклад и в энциклопедию «Британик».

Лорд Рэлей обладал прекрасным чувством литературного стиля; каждая написанная им работа, даже по самой сложной теме, являет собой пример ясности и простоты изложения. Четыреста сорок шесть работ, переизданные в собрании его сочинений, ясно показывают его способность понимать все немного глубже других. Несмотря на то, что лорд Рэлей был членом палаты лордов[1], он очень редко вмешивался в споры и никогда не позволял политике мешать его научной деятельности. Он любил путешествовать, играть в теннис, заниматься фотографией и музыкой.

Лорд Рэлей, первый номинальный глава Кембриджского университета, был мировым судьей и обладателем почетных научных и юридических степеней. Он был членом Королевского общества (1873), с 1885 по 1896 год — его секретарем, а с 1905 по 1908 г. — его президентом. Он был первым обладателем ордена «За заслуги» (1902), а в 1905 году его назначили членом Тайного совета. Лорд Рэлей был награжден медалью Копли, Королевской медалью, медалью Б. Румфорда Лондонского королевского общества, а в 1904 году получил Нобелевскую премию.

[1]Верхняя палата британского парламента. — *Прим. пер.*

В 1871 году он женился на Эвелин, сестре будущего премьер-министра Великобритании графа Бальфура и дочери Джеймса Мейтланда Бальфура и его жены Бланш, дочери второго маркиза Солсберисского. У них родились трое сыновей, старшему из которых суждено было стать профессором физики в Императорском колледже науки и технологии в Лондоне.

Лорд Рэлей умер 30 июня 1919 года в Уитгаме, в Эссексе.

Филипп Эдуард Антон фон Ленард

«за исследование катодных лучей»

Филипп Эдуард Антон фон Ленард

О катодных лучах

Нобелевская лекция, 28 мая 1906 г.

Мне очень приятно выполнить свою обязанность лауреата Нобелевской премии и рассказать вам о катодных лучах. Я могу предположить, что вам хотелось бы услышать от меня то, что не смогут рассказать другие. Я опишу вам развитие данного предмета, — который также охватывает недавно созданные теории электричества и материи, — каким оно представляется мне на основе моего собственного опыта[1]. Это даст мне приятную возможность показать, с одной стороны, каким образом в одном-двух моментах связаны с ней последующие или более-менее современные работы других исследователей. Таким образом, мои достопочтенные коллеги из Шведской академии наук, пользуясь аллегорией, примененной в заголовке ваших дипломов[2], сейчас я буду говорить не только о плодах, но и о деревьях, их породивших, а также о тех, кто

[1]В этом докладе я попытался расположить в хронологическом порядке все публикации, которые, на мой взгляд, сделали основной вклад в данный предмет, даже если они встретились мне слишком поздно, чтобы повлиять на мою работу.

[2]На них изображен герб: садовник, сажающий молодые деревца, с девизом «Для наших потомков».

посадил эти деревья. Такой подход наиболее уместен в моем случае, так как меня никоим образом не причисляли к тем, кто собирает плоды; я был лишь одним из тех, кто сажает деревья, ухаживает за ними или помогает это делать.

За то время, которое есть в моем распоряжении, я могу рассказать лишь о нескольких аспектах своей работы в рассматриваемой области.

Чтобы начать свой рассказ, мне придется вернуться на двадцать шесть лет назад, к Круксу. Я прочел его лекцию об «излучающей материи» (5)[1] — именно так он назвал катодные лучи[2], — и она произвела на меня огромное впечатление. Всем вам знакомы проведенные им эксперименты. На рисунке 1 представлен один из них: стеклянная трубка с сильно разреженным воздухом; отрицательно заряженная пластина или катод (a), на котором создаются лучи; крест (b) на пути лучей и тень от креста (d), отброшенная лучами на фосфоресцирующую стеклянную стенку. В присутствии магнита тень движется, и это указывает на то, что катодные лучи — в отличие от световых — изгибаются в магнитном поле.

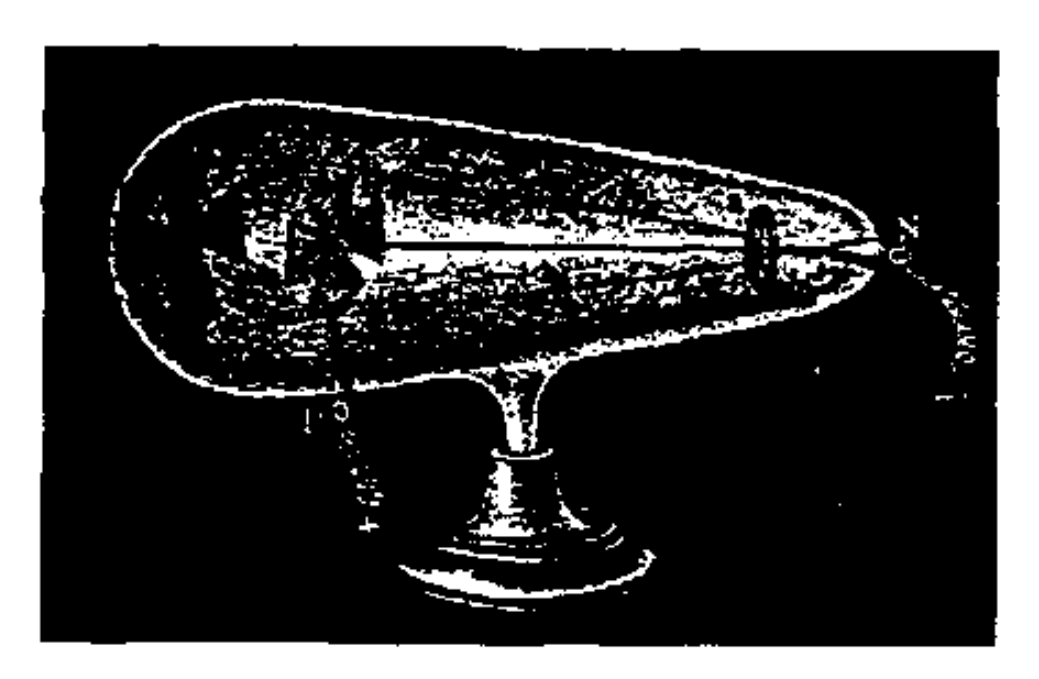


Рис. 1

В своей работе я всегда придавал большое значение проблеме изоляции изучаемого явления от источников любых помех независимо от сложностей, которые это влечет за собой. Такого подхода уже придерживался в своей работе Крукс, который добился получения катодных лучей в чистом виде, чего не могли достичь ранее, и показал, что они представляют собой весьма специальный тип явления разряда, отличающийся от

[1]Числа в скобках относятся к библиографии, приведенной в конце доклада, а «с.» дает номер страницы в объемных публикациях.

[2]После Фарадея Гитторф (2), а затем Гольдштейн (4) уже получили и исследовали «тлеющие лучи» или «катодные лучи». Но Крукс добился гораздо бо́льших успехов, чем предыдущие исследователи, так как он проводил эксперименты в более глубоком вакууме.

других своей подкупающей простотой. Истинная природа «излучающей материи» или, как он ее назвал, «четвертого агрегатного состояния», тогда лежала за пределами моего понимания так же, как она, должно быть, была и вне его понимания, в чем сейчас мы можем быть уверены. Но я с готовностью разделил его энтузиазм, когда он сказал: «Я верю, что здесь заключена конечная реальность». И мы оказались правы: именно поэтому я и стою здесь сегодня!

Мой интерес к данному предмету не нашел прямого выражения в годы студенчества. Электрические разряды в газе считались неподходящим объектом изучения для начинающих, и правильно. В годы, последовавшие за работой Крукса, даже зрелые исследователи не могли добиться в этой области ничего действительно значительного. Они не могли получить никаких результатов, которые сами по себе открыли бы новые перспективы, да и что касается чистоты условий проведения экспериментов, они вряд ли продвинулись дальше работы Крукса.

Лишь позднее, когда я работал ассистентом Квинке в Гейдельберге, у меня появились возможность и средства для создания ртутного воздушного насоса, способного обеспечить очень высокую степень разрежения, — этот насос тогда был отнюдь не стандартным предметом оснащения физических институтов, — а также для проведения своих собственных опытов с катодными лучами. Я хотел работать с этими лучами непосредственно, насколько это было возможно, и думал, как замечательно было бы, например, вывести их из трубки на открытый воздух, так как тогда с ними можно было бы проводить прямые эксперименты. Для этого в стенку трубки нужно было вставить герметичный затвор, который пропускал бы лучи. В то время *излучающая материя* не могла легко проходить через герметичные затворы. Но, быть может, прав был Эйлхард Видеман, предполагавший, что катодные лучи представляют собой разновидность далекого ультрафиолетового света? В конечном счете кварц показался мне наиболее подходящим материалом для моих исследований, так как он наилучшим образом пропускал все известные тогда излучения. На рисунке 2 изображена трубка I, изготовленная вместе с катодной пластиной, а сверху вы видите отверстие, запечатанное кварцевой пластиной толщиной 2,4 мм. Однако опыт оказался неудачным; над кварцем мне не удалось обнаружить ни свечения, ни даже электрических эффектов[1], которые определенно можно было бы приписать свету, исходящему из трубки.

[1]В то время Герц только что открыл такие эффекты, создаваемые ультрафиолетовым светом (8).

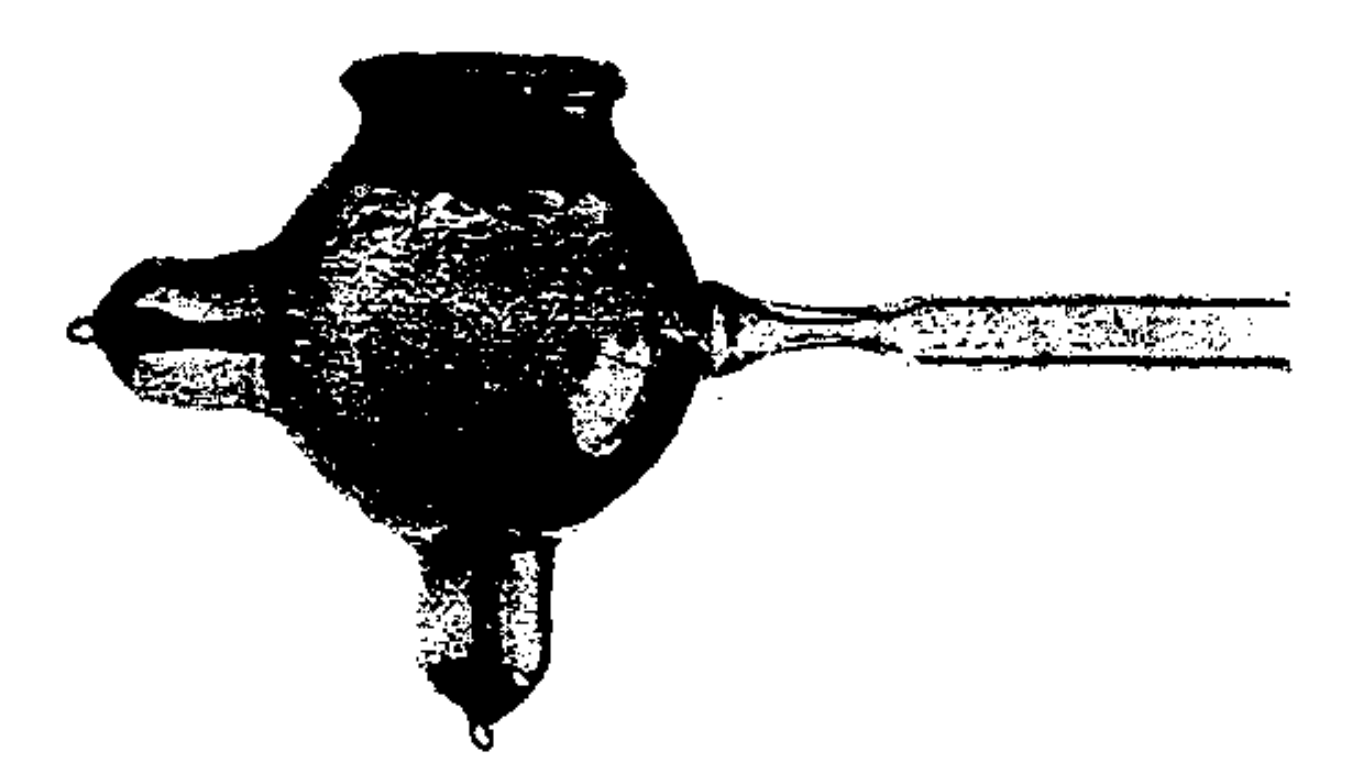


Рис. 2

Другая возможность появилась в 1892 году. Герц, ассистентом которого я тогда был, обнаружил, что тонкий металлический лист пропускает катодные лучи (15). Он использовал очень тонкие, очень мягкие и пористые золотой, серебряный и алюминиевый листы, которые применяются в переплетном деле, но показал, что катодные лучи проходят не только через поры, но и через сам материал — металл листа. Однажды он позвал меня — событие, которое, к моему великому сожалению, в то время происходило не часто — и показал мне то, что только что обнаружил: урановое стекло, накрытое алюминиевым листом, внутри разрядной трубки светилось под листом, который облучался сверху. Он сказал мне: «Мы должны, — и это должен был делать я, так как у него не было времени, — разделить две камеры алюминиевым листом и создать лучи, как обычно, в одной из них. Тогда их можно будет наблюдать в другой камере в более чистом виде, чем это было до сих пор, и хотя из-за мягкости листа разность давлений в камерах невелика, можно будет полностью вакуумировать камеру наблюдения и посмотреть, помешает ли это распространению катодных лучей: другими словами, выяснить, что представляют собой эти лучи — явления, происходящие в материи, или явления, происходящие в эфире». Судя по всему, последний вопрос представлялся ему наиболее важным. Впоследствии я действительно провел этот эксперимент, но меня, главным образом, интересовал другой вопрос — распространение катодных лучей на открытом воздухе. Меня не отпугнула мягкость листа, которым воспользовался Герц. Я накладывал такие листы один на другой в подходящей для этого трубке и обнаружил, что и 10, и 15 листов по-прежнему достаточно хорошо пропускают лучи. Затем я раздобыл несколько кусочков алюминиевой фольги при-

мерно такой же толщины, чтобы посмотреть, выдержат ли они давление воздуха. Они выдержали при условии, что использовался кусочек фольги достаточно малой площади. Тогда, снова взяв старую трубку, я заменил кварц металлической пластинкой с небольшим отверстием, герметично закрытым алюминиевой фольгой, насыпал на это маленькое алюминиевое окошечко несколько крупинок щелочноземельного фосфора, возбудил трубку, и вот! — зернышки начали ярко светиться! Затем я немного приподнял их над алюминиевым окошечком, но и в таком положении они продолжали ярко светиться! Таким образом, катодные лучи не только вышли наружу из разрядной трубки, которой они прежде ограничивались, но и — чего никто не мог предсказать — проходили через воздух нормальной плотности. Мне стало ясно, что передо мной открылось новое огромное поле для исследований — поле, которое не только охватывало доселе невиданные явления, но и обещало прорыв в неизвестное. Катодные лучи, которые до этого упрямо ускользали от объяснения, раскрыли свою тайну, и, что еще важнее, теперь впервые можно было провести максимально чистые опыты. Давайте перенесем эту ситуацию на другое излучение — свет: пусть до сих пор можно было бы излучать свет лишь внутри печей и пламени, где он создается, как катодные лучи в трубке. Где бы в таком случае остановилась великая и детальная наука оптика? Теперь в печи появилось окно, через которое мог выходить только чистый свет, свободный от сложных и попрежнему необъясненных процессов его формирования. Эти процессы остались ограниченными внутренней областью разрядной трубки и, как с тех пор обнаружилось, не могли быть поняты, пока не были в достаточной степени изучены сами катодные лучи. Как мы увидим в данном историческом обзоре, это изучение также принесло много другой информации об Х-лучах и радиоактивности, определенная часть которой сейчас общеизвестна, а также более глубокое понимание электричества и материи.

Теперь прежде всего было необходимо расширить уже произошедшее вторжение в новую область знаний. Было важно увеличить интенсивность лучей, выходящих из окошечка и усовершенствовать условия их получения по сравнению с первой трубкой. Это привело к созданию трубки, изображенной на рисунке 3, которая использовалась во многих экспериментах (18). Здесь видна камера создания лучей с анодом (А), катодом (С) и герметичной крышкой (m m) с окошечком, за которым расположена камера наблюдения, где появляются лучи. Число явлений, возможных в такой трубке, таково, что, несмотря на то, что все наиболее очевидные, а также несколько менее очевидные из них к настоящему

моменту уже, вероятно, были открыты, следствия всех этих явлений до сих пор недостаточно изучены.

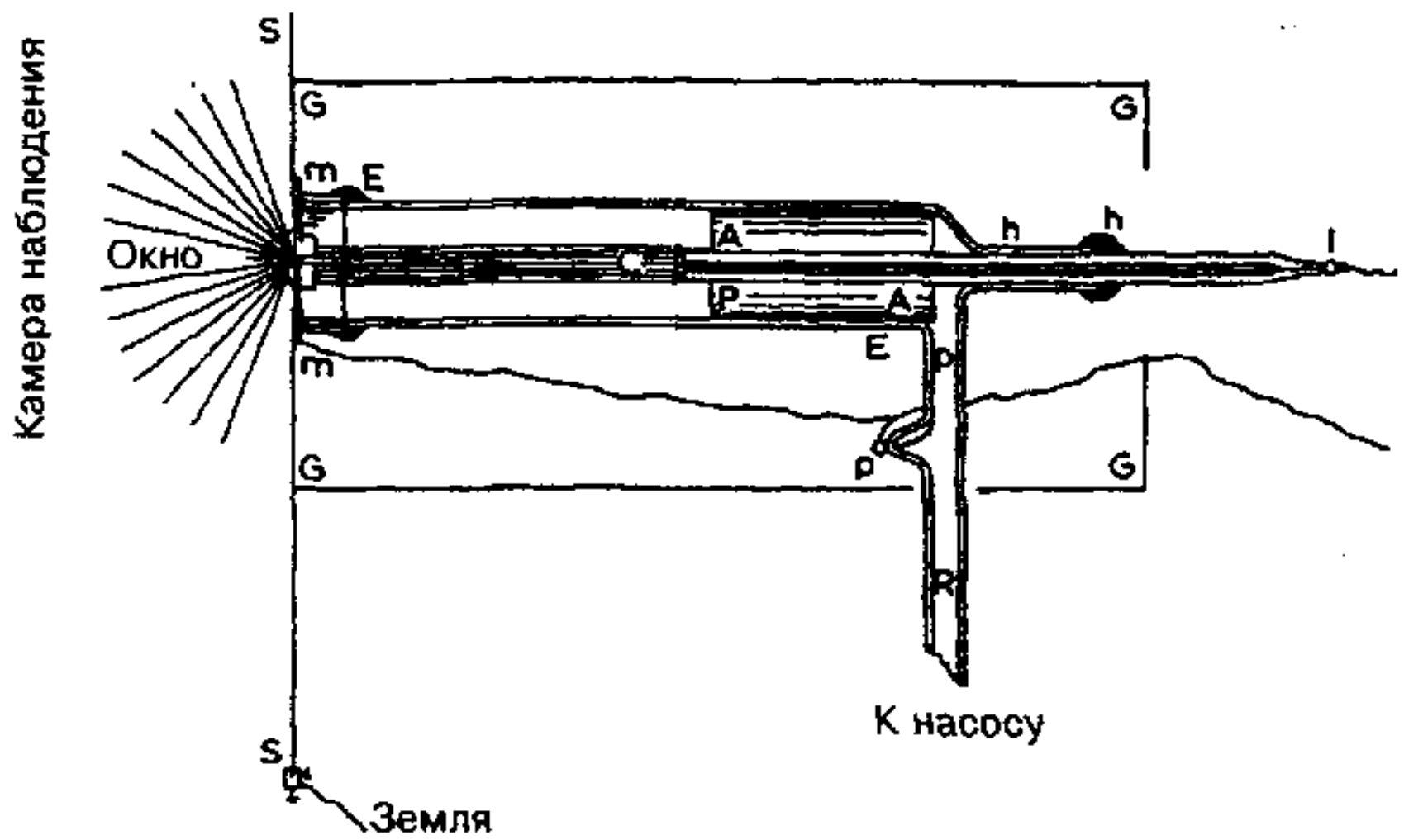


Рис. 3

Следует отметить, что эти лучи невозможно увидеть: приникать глазом к окошечку было бы бесполезно, так как данный орган не воспринимает катодные лучи. С другой стороны, материалы, способные к свечению без тепла — фосфоресцирующие материалы, как их называют, — вполне подходят для того, чтобы сделать эти лучи видимыми. Лучше всего использовать бумажные листы, покрытые такими материалами, как, например, какой-нибудь кетон, цианид платины или щелочноземельный фосфор, и держать их в качестве экрана на пути лучей. Если экран светится, это значит, что на него попали лучи. Эти лучи также можно сфотографировать. В общем, здесь применимы те же методы, что используются для того, чтобы сделать видимым ультрафиолетовый свет, бывший в то время единственным известным примером подобного невидимого излучения, которое можно продемонстрировать.

Используя фосфоресцирующий экран, мы обнаруживаем, что он ярко светится при приближении к окошечку; по мере увеличения расстояния от экрана до окошечка интенсивность лучей постепенно снижается, пока на расстоянии около восьми сантиметров экран не становится практически темным. Очевидно, что воздух при полном атмосферном давлении не особенно проницаем для катодных лучей и уж, конечно, гораздо

менее проницаем, нежели для света. Но гораздо более интересно было обнаружить, что воздух является для этих лучей мутной средой, какой для света является молоко. Если на некотором расстоянии от окошечка поместить непроницаемую стенку с отверстием в ней и перпендикулярно ей расположить экран, то мы получим следующий вид (рис. 4). На этом рисунке пунктирные линии обозначают узкий пучок лучей, который мы должны ожидать в случае прямолинейного распространения. Однако, в действительности, на экране, расположенном на открытом воздухе, мы видим размытый изогнутый пучок лучей, который увидели бы, если бы через то же отверстие пропустили свет в емкость с немного разбавленным молоком. Что замутняет воздух? Молоко делают мутным для света многочисленные маленькие частицы жира, находящиеся во взвешенном состоянии. Но чистый воздух не содержит ничего, кроме взвешенных в эфире молекул содержащихся в нем газов. Эти молекулы чрезвычайно малы: они в 10 000 раз меньше, чем частицы жира; они слишком малы, чтобы по отдельности как-то повлиять на свет. Но, как мы видим, каждая из этих молекул препятствует распространению катодных лучей. Таким образом, эти лучи должны быть чрезвычайно тонкими, настолько, что молекулярная структура материи, которая просто крошечна по сравнению с очень тонкими световыми волнами, становится весьма значительной по сравнению с ними. Следовательно, с помощью этих лучей можно попробовать получить информацию о природе молекул и атомов.

Рис. 4

Таким образом, особый интерес представляет изучение поведения разнообразных материалов по отношению к катодным лучам. Первым моментом, который стоило изучить, была *проницаемость*. Некоторое представление о ней можно получить, подержав тонкий слой изучаемого материала между окошечком и экраном. Совершенно ясно, что проницаемость или непроницаемость материала для света ни малейшим образом не связана с его поведением по отношению к катодным лучам. На рисунке 5 приведен пример: отпечаток прямой фотографии, сделанной у алюминиевого окошечка. На верхней ее половине видна глубокая тень абсолютно проницаемой для света прямоугольной кварцевой пластинки толщиной в полмиллиметра, а на нижней половине, — как матовая завеса, — изображение обыкновенного непроницае-

мого для света алюминиевого листа, накрывающего эту половину и имеющего несколько неправильные границы. При выборе толщины слоя, отбрасывающего тень, нужно проявлять особую осторожность. Так, например, кварцевая пластинка, которая используется в этом опыте, непроницаема просто потому, что она слишком толстая, а причина того, почему металлические листы оказались единственным примером проницаемых слоев в опытах Герца, заключается в их малой толщине. Скоро мы увидим, что большая часть других материалов, имеющих такую же толщину, проницаема для катодных лучей даже в большей степени, нежели золото и серебро. Абсолютно очевидно, что поглощение катодных лучей в любом веществе представляет собой постепенный процесс так же, как в случае со светом, когда, как нам известно, золото становится проницаемым, если его сделать достаточно тонким. На рисунке 6 мы видим тень от листов алюминия, ступенчато наложенных друг на друга; числа с левой стороны означают количество листов, а числа с правой стороны — общую толщину. На изображении можно заметить каждое увеличение количества листов, любую неравномерность толщины отдельного листа, а также то, как почти полная проницаемость переходит в почти полную непроницаемость. Таким образом, для каждого материала нужно было не просто решить, является он «проницаемым» или «непроницаемым», а найти численную величину степени поглощения катодных лучей этим материалом, измерить его *поглощающую способность*, что я и проделал для множества твердых и газообразных материалов.

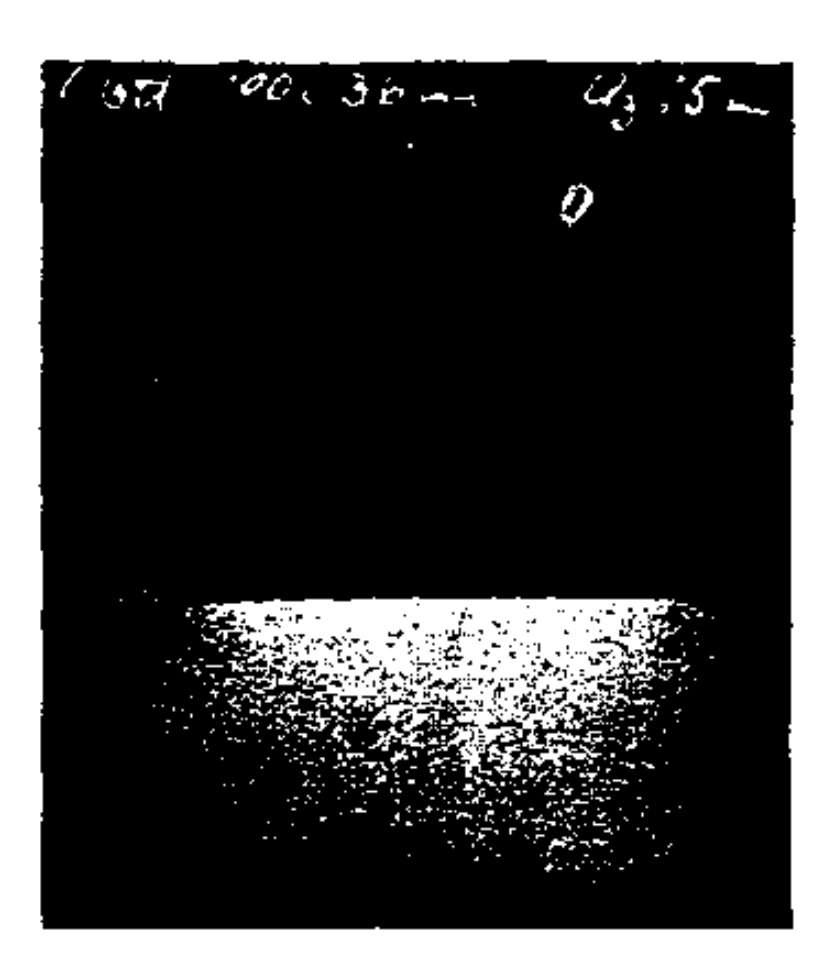


Рис. 5

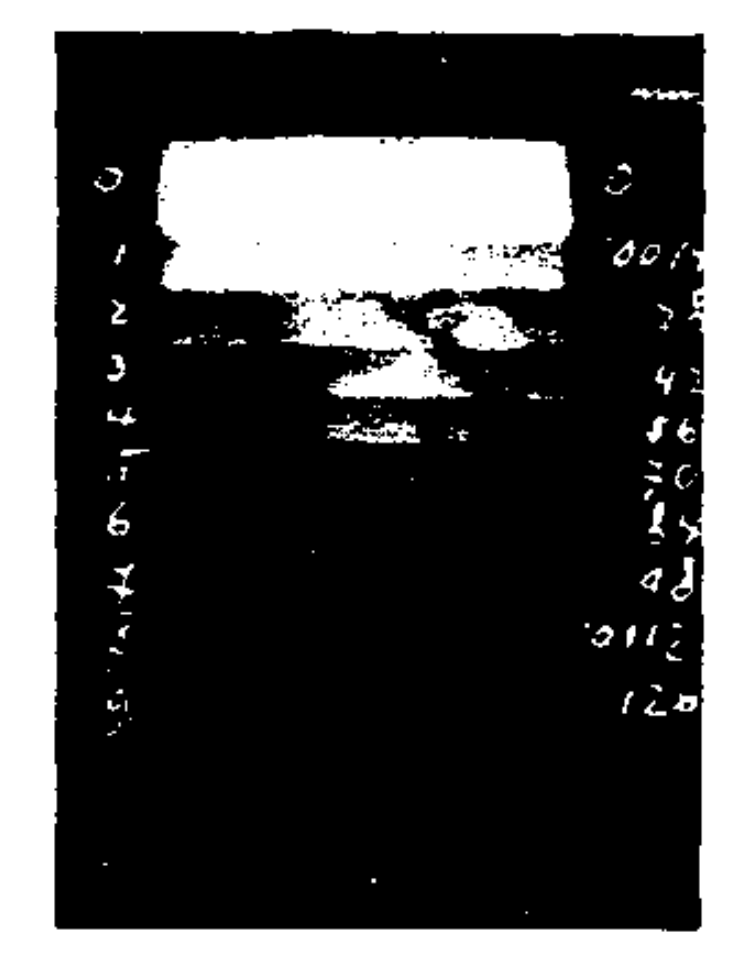


Рис. 6

Результат был поразительным. Исчезло все великое множество свойств, которые мы связываем с окружающими нас материалами. Единственной определяющей характеристикой оказался *вес* (21). Все, что имело одинаковый вес, поглощало одинаково; все, что было тяжелее, поглощало больше; все, что было легче, поглощало меньше и всегда пропорционально весу или массе. В первом приближении химический состав материалов, их агрегатное состояние и другие свойства вообще не имели значения, что было довольно беспрецедентным результатом, который не имел места для любого другого, известного в то время излучения[1]. Во втором приближении при более близком рассмотрении видно, что химический состав тоже оказывает небольшое влияние. Так, например, водород и все, что его содержит, поглощает немного больше, чем это можно было бы ожидать в соответствии с пропорциональностью его весу. Но здесь мне следует воздержаться от подробного обсуждения этих отклонений и их смысла[2]. В качестве иллюстрации закона пропорциональности массы и поглощения катодных лучей, который действует в первом приближении, рассмотрим прямые фотографии теней, отброшенных слоями алюминия, серебра и золота равной толщины (рис. 7). Мы видим, что тяжелое серебро поглощает больше, чем более легкий алюминий, а золото, которое тяжелее и серебра, и алюминия, поглощает больше всего. С другой стороны, если мы возьмем слои трех металлов равного веса (рис. 8), мы соответственно получим одинаковые тени и равное поглощение, причем этот результат был бы точно таким же, если бы мы взяли слои равного веса любых других материалов.

На самом деле, в отношении катодных лучей оказалось, что не только поглощение, но и рассеивающая способность, которую я также изучил для нескольких различных материалов (18b, с. 257; 21, с. 265), связана исключительно с весом, массой рассматриваемого материала, — *количеством* материи, как называл это Ньютон, а не *качеством* материала[3]. Если мы сейчас вспомним, что катодные лучи по мере их распространения в веществе подвергаются воздействию отдельных молекул вещества, мы можем сделать вывод, что молекулы самых разнообразных материалов, а также атомы разнообразных химических элементов отличаются

[1]Позднее обнаружилось, что X-лучи являют собой второй пример излучения, которое поглощается более или менее пропорционально массе поглощающего материала.

[2]Сравните (21, 47, 52).

[3]Диффузное отражение катодных лучей, которое можно рассматривать как направленное назад рассеяние, также определяется массой, как это можно увидеть из измерений А. Беккера (52, с. 448).

Рис. 7 Рис. 8

друг от друга не качественно, а лишь количественно, т. е. все они состоят из одного базового материала, но содержат разные его количества. Эта старая, но из-за отсутствия достоверных данных почти позабытая гипотеза алхимиков ярко вспыхнула в наших умах, причем на этот раз не для того, чтобы вновь исчезнуть, а для того, чтобы обрести доказательство, и как свидетельство этого мы можем процитировать результаты, недавно полученные Рамзаем (54) и Резерфордом (51) и связанные с поразительным превращением радия[1] в другие элементы. Однако, чтобы воспользоваться законом пропорциональности массы и поглощения катодных лучей в качестве основы для более подробных выводов о строении материи, прежде всего нужно было хоть что-то узнать о природе самих катодных лучей. Так давайте же сейчас обратимся к этой проблеме, о которой я также не переставал размышлять на протяжении всей своей работы.

Прежде всего нам нужно решить, в какой среде распространяются катодные лучи — в веществе или в эфире. Когда с помощью воздушного насоса мы полностью откачаем из камеры воздух, то она уже не содержит вещество, а, подобно небесам, содержит только эфир. Уже давно было известно, что, например, звук не способен проходить через такие вакуумные камеры, но это может делать свет, а также электрические и магнитные силы. Таким образом, несомненно, что звук — это явление, происходящее в веществе, тогда как свет, электрические и магнитные силы — это явления, происходящие в эфире. Нам не удалось провести соответствующую проверку для катодных лучей в обычных разрядных трубках, потому что как только весь воздух удаляется, создание лучей

[1]В качестве свидетельства элементарной природы радия в работах (38, 39) приведен его спектр и атомный вес.

в такой трубке прекращается. Но, ничуть не мешая созданию созданию лучей, мы смогли полностью вакуумировать нашу камеру наблюдений, расположенную по другую сторону окошечка и посмотреть, распространяются ли в этой камере катодные лучи, несмотря на отсутствие там воздуха. Мы обнаружили, что особенно хорошо лучи распространяются в полном вакууме; поскольку исчезают как поглощение, так и рассеяние, вызванные молекулами газа, лучи достигают длины в несколько метров и являются такими прямолинейными и тонкими, какими мы привыкли видеть только световые лучи (18). Таким образом, катодные лучи — это *явления, происходящие в эфире*. В частности, на основе вышеупомянутой гипотезы можно было утверждать, что катодные лучи не являются ни *материей*, ни испущенными молекулами газа, каковыми их считали некоторые ученые, особенно в Англии[1]. Однако нам по-прежнему было неясно, к какому типу явлений, происходящих в эфире, относятся катодные лучи. Многие мои читатели весьма ошибочно полагали, что я заранее убедил себя в том, что катодные лучи — это «волны в эфире». На самом деле, у меня не было никакого желания утверждать ни это, ни что-либо еще, пока мои эксперименты не показали, что это именно так и есть, и пока у меня не появилось хоть какое-то объяснение. В моем распоряжении были средства, предоставленные самой природой и необходимые для открытия новых явлений в ходе дальнейших экспериментов. Я надеялся на эти открытия или, по крайней мере, так думал. И потому мне было очень жаль, когда на этом этапе мне на довольно долгое время пришлось прервать свои эксперименты, сначала для решения далеко не простой задачи, которая неожиданно свалилась на меня из-за преждевременного ухода из жизни Генриха Герца, — публикации его «Prinzipien der Mechanik» («Принципы механики»), — а затем по причине моего назначения профессором теоретической физики.

Вряд ли стóит упоминать о следующем факте, однако он имел некоторое значение для дальнейшего развития данного предмета. Еще до этого перерыва в моей работе я изобрел разрядную трубку нового и гораздо более удобного типа. Я проверил ее настолько, насколько это было возможно, а затем порекомендовал ее к использованию и сделал общедоступной (18b, p.228). На рис. 9 герметичное окошечко вставлено в платиновую трубку, которая, в свою очередь, сплавлена со стеклянной трубкой. Это означает, что большое количество замазки, из-за которого

[1] Даже после сообщения результатов экспериментов с алюминиевым окошечком в течение некоторого времени эта теория продолжала оставаться в силе, причем предполагалось, что столкновения молекул приводят в действие, через окошечко, молекулы наружного воздуха или молекулы, остающиеся в вакууме.

трубку обычно очень сложно использовать, здесь отсутствует. При этом трубка данного типа имела еще и особое преимущество, которое в то время нельзя было предвидеть. В ней интенсивные катодные лучи ударяются о *платину большой* площади — металл, который, как мы теперь знаем, наиболее эффективно превращает эти лучи в Х-лучи, которые тогда еще не были открыты. Таким образом, в этой трубке в очень больших количествах создаются Х-лучи, которые также способны проходить через окошечко в камеру наблюдения, либо смешиваясь с катодными лучами, либо отдельно от них. Это было невозможно в прежних типах трубок из-за большого и толстого металлического экрана, расположенной на пути лучей (27). Открытие вскоре после этого Х-лучей Рентгеном, первым исследователем, использовавшим трубку вышеописанного типа, обычно рассматривают как хороший пример научного везения. Но если у наблюдателя есть эта трубка, то его внимание уже обращено не внутрь трубки, а наружу, причем вне трубки по причине ее назначения находятся фосфоресцирующие экраны, и вследствие этого мне кажется, что данное открытие непременно должно было быть сделано на этом этапе развития предмета.

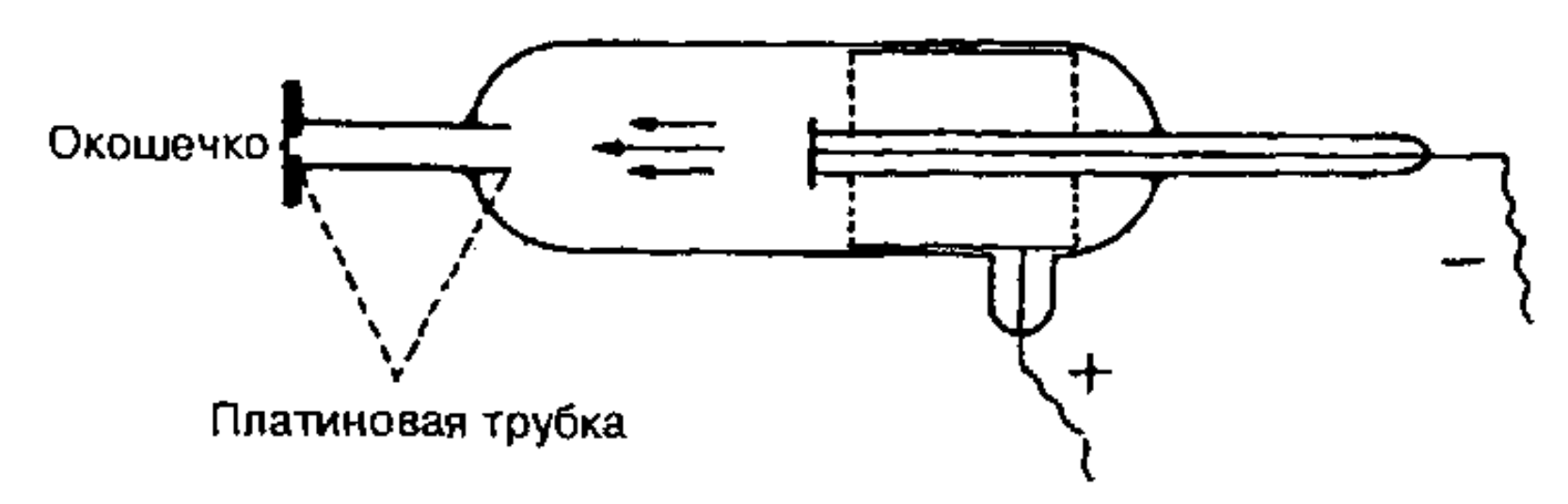


Рис. 9

Возобновив свои эксперименты, я вскоре занялся исключительно одной идеей, которую уже выдвинули Герц (7b, с. 275) и Шустер (13), которая в связи с природой катодных лучей с самого начала представлялась мне очень важной и которой я уже начал было следовать на первом этапе своих исследований. Еще со времен Гитторфа было известно, что катодные лучи отклоняются под действием *магнитов* (2); поэтому замеченное Гольдштейном (4) отклонение катодных лучей можно было аналогичным образом интерпретировать как влияние на эти лучи *электрических* сил. Отклонение лучей под действием как магнитных, так и электрических сил говорит о том, что катодные лучи состоят

из испущенных отрицательно заряженных материальных частиц. Более того, из экспериментов, проведенных с целью измерения величины магнитных и электрических воздействий на луч, можно даже вычислить скорость предполагаемых материальных частиц, а также электрический заряд на единицу массы (отношение заряд/масса). Именно это и сделали Герц и Шустер, но они получили противоречивые результаты. Герц обнаружил, что его наблюдения опровергают теорию испущенных молекул газа, а Шустер нашел, что его наблюдения подтверждают эту теорию, вследствие чего он принял их в качестве обоснования данной теории.

Меня не удивило это противоречие. Дело в том, что оба исследователя наблюдали внутреннюю область разрядной трубки, и их могли запутать сложность процесса создания лучей и присутствие газа, что они оба и оговаривали. Теперь настало время провести эти важные опыты в хорошо определенных экспериментальных условиях, т.е. вне разрядной трубки и в очень глубоком вакууме, и некоторое беспокойство относительно результата было допустимо. Ведь если мы уже знаем, что эти лучи — явления, происходящие в эфире, а не в материи, нас должно удивлять, почему их поведение по-прежнему столь обманчиво напоминает поведение испущенных отрицательно заряженных молекул газа. Ничто, известное до сих пор, не могло разрешить эту дилемму потока молекул и эфирных явлений; однако это могли сделать мои эксперименты, которые, в любом случае, открыли бы что-то достаточно новое.

Пока я занимался подготовкой к экспериментам[1], я узнал, что другие ученые уже убеждены в их важности. Дж. Дж. Томсон первым опубликовал обстоятельную статью по этому предмету (25). Его эксперименты, как и эксперименты Герца и Шустера, проводились в разрядной трубке. С помощью защитных устройств он попытался избежать опасности запутаться из-за взаимодействия продуктов разряда и компенсировать отсутствие надежности, вызванное присутствием газа, широко варьируя условия проведения эксперимента. Мне было ясно, что все последующее покоится на том основании, которому я перестал доверять после расхождения результатов Герца и Шустера. Мне казалось, что, прежде чем этот предмет войдет в структуру науки, его следует проверить настолько прямо и строго, насколько это возможно, используя при этом все те средства, которые есть в нашем распоряжении. Поэтому я завершил свои эксперименты, которые привели к следующим результатам (28).

[1]Эти эксперименты я возобновил в Эксе под эгидой Вюльнеровского института и с помощью гранта (1896), им выделенного, но мне опять пришлось их прервать, когда я вновь был назначен профессором в другом месте.

Скорость предполагаемых масс составляла примерно одну треть от скорости света, а отношение их заряда к массе было примерно в 1000 раз больше аналогичного отношения для выделяемых при электролизе атомов атома водорода при электролизе, а эти атомы являются самыми легкими материальными носителями электричества из всех нам известных. Таким образом, если бы лучи являли собой струящиеся атомы водорода, то их заряд следовало бы принять как в 1000 раз больший, чем тот, который они имеют при электролизе. Однако эту возможность исключали мои предыдущие эксперименты, которые показали, что лучи не являются материальными частицами. Казалось очевидным, что я открыл доселе неизвестные части эфира, представляющие собой электрические заряды и движущиеся подобно инертным материальным частицам. Малость определенной массы — 1/1000 массы иона водорода при равном заряде — и остальное поведение (30) этих частей эфира способствовало их отождествлению с тем, что было давно известно как «электрический флюид». Таким образом, наша дилемма имела следующее решение. Лучи представляют собой не испущенные электрически заряженные молекулы, а просто струящееся *электричество*. Таким образом, в катодных лучах под самым носом мы обнаружили то, что не надеялись когда-либо увидеть: электричество без материи, электрические заряды без заряженных тел. Мы, в некотором смысле, открыли *само электричество* — вещь, существование или несуществование, а также свойства которой ставили в тупик многих исследователей, начиная с Гильберта и Франклина. Ранние авторы, включая даже Кулона, наивно считали электричество чем-то, что существует и что почти можно потрогать. Однако количество известных электрических явлений постоянно росло, но никто не мог утверждать, что видел что-либо, относящееся непосредственно к предполагаемому электричеству. Поэтому случилось так, что — примерно через поколение после Кулона — Фарадей (1), а затем и Максвелл (3) полностью позабыли об электричестве и сосредоточились на *электрических силах*, которые можно было наблюдать. Эти силы (понимаемые как состояния в эфире), как показали знаменитые эксперименты Герца (9), настолько способны к независимому существованию, что с тех пор все начали склоняться к тому, чтобы позабыть об их центрах, электрических флюоидах, которые прежде считались необходимыми. Теперь же — опять-таки через поколение от Фарадея и Максвелла — эта картина несколько изменилась: она стала более законченной. В катодных лучах мы нашли столь же хороший способ изучения электричества, какой ранее мы находили только в электрических силах; вдоль этих лучей мы можем следовать движению электричества вперед и назад, на рас-

стояния в несколько метров, по своему желанию и непосредственно с помощью наших чувств, без каких бы то ни было промежуточных теоретических заключений; мы можем видеть, как ведет себя электричество в различных условиях и каковы его свойства; теперь мы в состоянии придать старому термину «электричество» новый основанный на опыте смысл.

Этот новый смысл, значительная часть которого нам теперь понятна, сейчас кажется во многих отношениях отличным от того, что можно было бы предположить ранее.

Следует отметить, что все наши замечания, касающиеся электричества, применимы только к *отрицательному*, но не к положительному электричеству, о котором мы даже сегодня можем сказать очень мало конкретного. Мы не можем утверждать, что это электричество нам знакомо; мы можем только распознать положительно заряженный материал, будь то атомы, молекулы или группы молекул[1]. Таким образом, мы используем единый способ выражения и говорим, что кусочек материала заряжен положительно, когда он утратил отрицательный электрический заряд.

Так давайте же рассмотрим отрицательное электричество, каким оно появляется в наших опытах. Здесь нас поражает свобода его движения, которая, по нашим прежним убеждениям, могла иметь место только в металлических проводниках. Уже в разрядной трубке, в самом центре газа, мы приводим это электричество в ускоренное движение посредством напряжения, приложенного к электродам, и его скорость мгновенно становится равной *одной трети скорости света*, 100 000 км/с, а само электричество представляет собой катодный луч. Теперь он ударяется об алюминиевое окошечко. «Он прилипнет к нему и стечет на землю» сказали бы мы, основываясь на предыдущих знаниях. Далеко не так: луч проходит через металлическую пластинку (28, с. 28), и, как мне удалось проверить, его скорость при этом не уменьшится ощутимым образом (19; 46, с. 479). За окошечком он может войти в более или менее глубокий вакуум, в котором он продолжает свое линейное движение, представляя собой электрический ток в свободном эфире, — явление, которое ранее мы тоже считали невозможным. Когда он, наконец, ударяется о кусочек металла достаточной толщины, он проникает в него и остается там; наконец, пройдя столь необычным курсом, он появляется в виде обыкновенного заряда на поверхности металла (28).

[1]Таким образом, например, было обнаружено, что каналовые лучи и альфа-лучи радия, насколько они были изучены, испускают положительно заряженные молекулы.

Особенный интерес представляет вопрос о том, занимает ли электричество все пространство постоянно и имеет ли оно структуру. Я наблюдал, как два катодных луча проходят через одну и ту же камеру в противоположных направлениях, и в количественном исследовании данного явления обнаружил, что эти лучи абсолютно не мешают друг другу (44, с. 165). Это говорит о том, что электричество этих лучей состоит из дискретных и очень маленьких порций, разделенных большим объемом свободного пространства. Мы можем представить сами эти частички как более или менее непроницаемые друг для друга, потому что согласно закону Кулона, как только две частички приближаются друг к другу на слишком маленькое расстояние, между ними должны возникнуть огромные силы отталкивания. Однако лучший признак структуры электричества происходит из совершенно другого источника, и он гораздо более стар.

Здесь мы подходим к связи между нашими находками и ранним знанием. Это знание было очень скудным и относилось к явлениям, происходящим в отдельных атомах и с этими атомами, т. е. явлениям, которые нельзя было изучить непосредственно, однако эта связь оказалась очень хорошей и плодотворной.

Много лет назад Гельмгольц в своей лекции, посвященной Фарадею, заметил, что явления электролиза говорят о том, что электричество расщепляется на частички постоянного размера точно так же, как материя расщепляется на атомы (6). Таким образом, у нас уже был один признак структуры электричества — существование электрических атомов, *элементарных электрических квантов*, как их назвал Гельмгольц[1].

Более того, в области оптики благодаря открытию Зеемана внезапно обрела осязаемую форму уже надежно обоснованная в знаменитых экспериментах Герца (9) теория, в которой каждый светящийся атом рассматривается как электрический осциллятор. Исходя из своих наблюдений, Зееман совместно с Лоренцем пришел к выводу, что в светящихся атомах натриевого или любого другого пламени колеблется именно *отрицательное*[2], а не *положительное* электричество и что имеется определенное отношение заряда к массе колеблющегося материала (24). Это отношение имело такую же величину, что и аналогичное отношение,

[1]Я вспоминаю, что неоднократно слышал от него это выражение во время демонстрационной лекции, которую он читал в летний семестр 1885 года.

[2]Интересно, что в первых публикациях Зеемана присутствовало слово «положительное», а не «отрицательное» электричество (24, с. 18), так что связь между его открытиями и катодными лучами установили несколько позднее.

найденное вскоре после этого вышеописанным способом для катодных лучей.

Казалось, что во всех этих случаях: в ионах в электролизе, в светящихся атомах металла, в катодных лучах и, вероятно, везде, где электричество играет некоторую роль, — мы, должно быть, имеем дело с *одними и теми же* элементарными электрическими квантами, на существование которых впервые указал закон электролиза Фарадея и которые с помощью катодных лучей можно было бы объяснить более подробно. Итак, эта теория проверена настолько, что породила новую область физики, столь плодотворную и уже столь обширную, что в этом докладе, который посвящен, главным образом, моей собственной работе, я не могу больше распространяться об общих чертах данного предмета. Мне лишь хотелось бы упомянуть лишь три момента.

Во-первых, важной первоначальной количественной проверкой наших выводов является выполненное Вихертом экспериментальное измерение скорости катодных лучей, в котором было получено то же число, что и в экспериментах по отклонению катодных лучей электрическим и магнитным полями (см. выше), а именно: около одной трети скорости света (29).

Во-вторых, отмечу экспериментальный результат Кауфмана, полученный на основе работы Дж. Дж. Томсона и Хевисайда (10) и относящийся к элементарным электрическим квантам, а именно, что их масса и инерционные свойства имеют исключительно электромагнитную природу (55). Этот результат можно интерпретировать следующим образом. У нас нет свидетельств того, что (отрицательное) электричество является особым *материалом*, обладающим инерцией; судя по всему, это лишь *состояние*, состояние эфира, которое мы, вслед за Фарадеем (1), Максвеллом (3) и Герцем (9), привыкли обозначать как электрическое силовое поле в окрестности наэлектризованных тел, состояние, которое согласно Герцу (20) и Бьеркнесу (33) может заключаться в скрытом движении эфира. Таким образом, даже с чистыми квантами электричества ничего не обнаружено, кроме состояния эфира в их окрестности. Сами же эти элементарные кванты представляются нам, в смысле Максвелла, вероятно, пустыми чисто геометрическими центрами электрических сил, за исключением того, что сейчас мы можем утверждать, что в состоянии успешно наблюдать эти центры по отдельности, следовать их движению и изучать геометрические пропорции их размера и формы. Согласно этому результату катодные лучи — струящиеся центры состояния — более, чем когда-либо, представляются нам тем, чем они казались с самого начала, — чистыми эфирными явлениями.

В-третьих, необходимо перечислить названия, данные этим частичкам электричества, или центрам состояния. Я назвал их, как и Гельмгольц, *элементарными квантами электричества*, или, короче, *квантами*; Дж. Дж. Томсон говорит о *корпускулах*, лорд Кельвин об *электрионах*; но в обиход вошло название, которое предпочли Лоренц и Зееман, — *электрон*.

До сих пор мы говорили о катодных лучах, как таковых; сейчас же мы рассмотрим методы их формирования, их генерацию.

Самый старый и в течение долгого времени единственно известный метод генерации этих лучей, который ранее мы использовали, исключая все остальные, — это разрядная трубка. Здесь, как и следует из ее названия, лучи возникают на катоде[1]. Молекулы газа, находящиеся под влиянием доминирующих электрических сил, оказывают некоторое воздействие — эффект близости, как назвал его я (53), — на металл электрода, вследствие чего из последнего вылетают кванты. Высвобождаясь, они попадают под воздействие ускоряющих сил поля, существующего между электродами, вследствие чего они движутся, удаляясь от катода с постоянно увеличивающейся скоростью. Это и есть готовый луч. Конечная скорость, с которой луч покидает трубку, допустим, через окошечко, определяется величиной поданного напряжения, и тот факт, что в действительности все это напряжение, а не какая-то его доля, определяет конечную скорость луча, доказывает, что источник луча следует искать на катодной поверхности, но, например, не в центре газа[2]. Таким образом, изменяя величину напряжения, мы можем получить более быстрые или более медленные катодные лучи, и, когда ранее мы говорили об одной третьей скорости света, это значение относилось исключительно к напряжению, равному приблизительно 30 000 вольт, которое я использовал практически во всех своих экспериментах.

Как вели бы себя более быстрые или более медленные лучи? Кое-что можно предсказать на основе моих первых экспериментов, в которых напряжение, а следовательно, и скорость, немного изменялось (18b, с. 266; 19; 21, с. 261). Можно было ожидать, что очень быстрые лучи чрезвычайно мало поглощаются (имеют высокую проникающую способность)[3];

---

[1]Эта трубка также называется катодной. — *Прим. пер.*

[2]Во многих предыдущих исследованиях катодных лучей это было произвольным допущением; доказательство его правильности обеспечивалось растущей с течением времени точностью измерений, причем самой высокой точности достиг, вероятно, А. Беккер (52, с. 404).

[3]Когда были открыты X-лучи, то это ожидание, казалось, подтвердилось; их первые ставшие известными свойства соответствовали тем, которые предвосхищал я, исходя из

медленные же лучи, судя по всему, наилучшим образом подходят для получения информации о межатомных силах и строении материи. Однако в течение очень долгого времени казалось невозможным осуществить чистые эксперименты в достаточно широком диапазоне скоростей, поскольку стекло разрядной трубки не выдерживало сильных напряжений, которые были необходимы для получения очень быстрых лучей, тогда как медленные лучи, несмотря на легкость их получения в трубке, не проходили сквозь окошечко; они слишком легко поглощались. Не удавалось провести эти опыты и с помощью других устройств[1].

Обе проблемы, как проблема самых медленных, так и проблема самых быстрых, лучей в конечном счете, были решены достаточно новыми способами.

Открытие, сделанное Герцем еще в 1887 году (8) и вскоре после этого дополненное Гальваксом (11), показало, что металлические пластинки, если их просто подвергнуть воздействию ультрафиолетового света, испускают в воздух отрицательный электрический заряд. Это замечательное явление — сейчас обычно называемое фотоэлектрическим эффектом — в то время сразу привлекло мой интерес, который не угас и по сей день. Эксперименты, проведенные вместе с астрономом Вольфом, показали, во-первых, что ультрафиолетовый свет делает вещества шероховатыми или измельчает их (12; 46, с. 490). Однако последующие эксперименты привели к тому, что я счел невероятным, чтобы металлические частицы уносили с пластинки отрицательный заряд. Когда я проводил свои первые эксперименты с катодными лучами и обнаружил, что воздух перед алюминиевым окошечком приобретает способность проводить электричество (18), у меня возникла мысль о том, что катодные лучи могут переноситься с пластинки в воздух ультрафиолетовым светом. И тогда, и впоследствии я сделал множество тщетных попыток обнару-

---

своих экспериментов с самыми быстрыми катодными лучами (27). Однако первое же убедительное наблюдение Риги, что Х-лучи не переносят отрицательный заряд (23), показало непригодность теории о том, что они являются чрезвычайно быстрыми катодными лучами. Сейчас их считают короткими, поперечными импульсами в эфире, разновидностью ультра-ультрафиолетового света. Тот факт, что такие импульсы действительно могут возникать бок о бок с сильным поглощением катодных лучей, какое, например, происходит в тяжелой платине, следует, как это впервые отметил Хевисайд, из теории Максвелла (10). То же, что чрезвычайно короткие волны ультрафиолетового света будут проходить через призмы, не преломляясь, предвидел еще Гельмгольц в своей теории дисперсии (17с, с. 517). Предсказание низкой степени поглощения катодных лучей впервые подтвердилось в лучах, испущенных радием.

[1]Помимо прочих мер, я пробовал вставлять вместо окошечка узкие желоба между камерой генерации лучей и полностью вакуумированной камерой наблюдения, но они пропускали слишком много газа.

жить возможные лучи с помощью флуоресцентных экранов в вакууме. И только мое решение — основанное на работе Риги (14) — применить электрометр вместо флуоресцентного экрана позволило обнаружить эти лучи. Использованный мной аппарат изображен на рис. 10. U — находящаяся в абсолютном вакууме облучаемая пластина; кварцевый затвор B пропускает ультрафиолетовый свет. Катодные лучи исходят из U, а отверстие в расположенной напротив пластинке E пропускает узкий пучок лучей. Этот пучок лучей ударяется о маленькую пластинку α, которая собирает принесенный им отрицательный заряд, и тем самым с помощью электрометра указывает на существование излучения. Мы подносим близко к трубке магнит или катушку, обозначенную пунктиром, и обнаруживаем заряд на пластине β, а не α, что говорит о том, что невидимый луч действительно отклонился под действием магнита, причем он отклонился именно в том направлении, в каком отклоняются катодные лучи. Когда этот же эксперимент мы проводили, обращая внимание на его количественный аспект, он показал, что отклонение также происходит на угол, соответствующий углу отклонения катодных лучей, и что между зарядом и массой квантов получается то же отношение, что и в случае с лучами, полученными в разрядных трубках (32; 44, с. 150; 46).

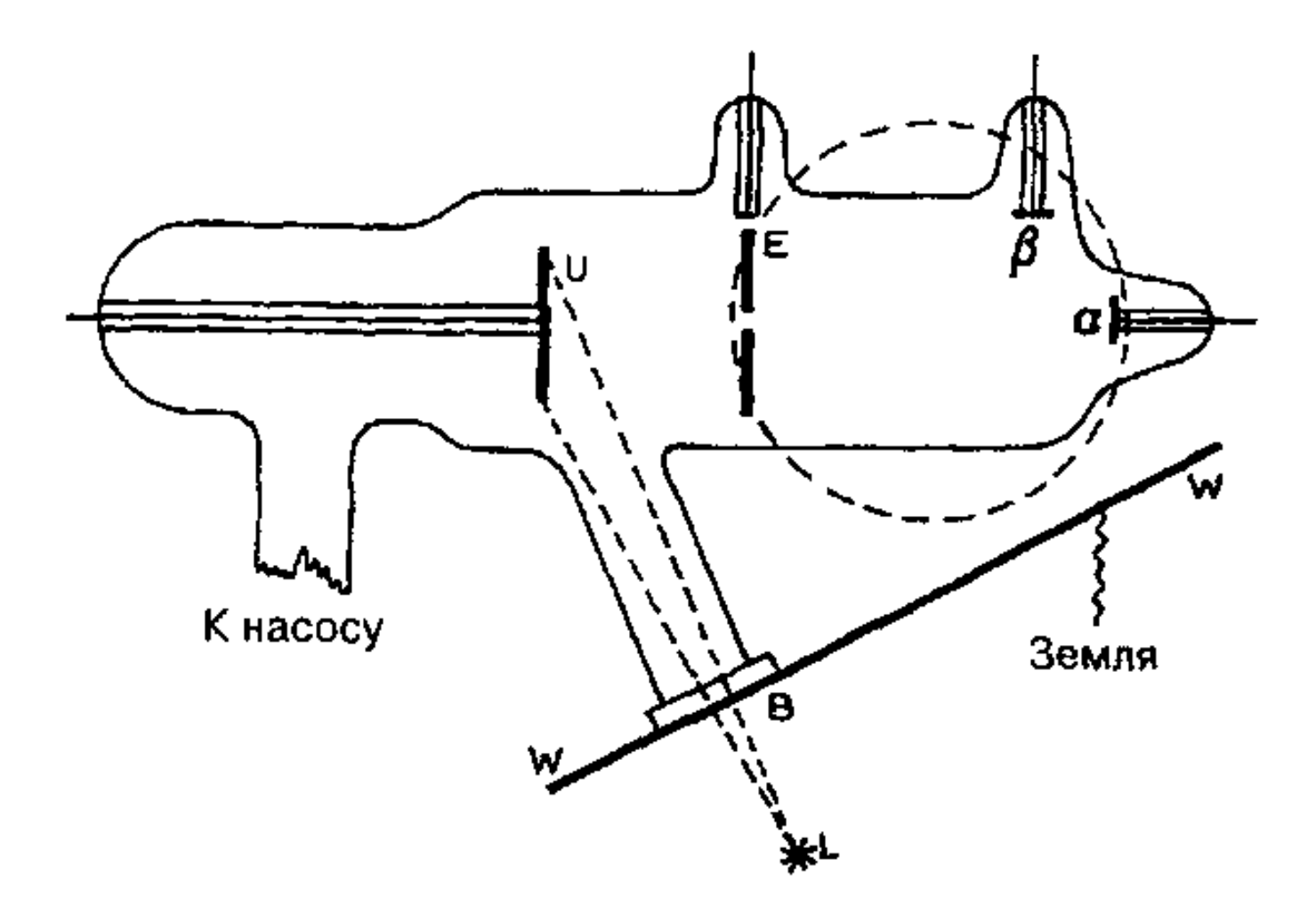


Рис. 10

Как только мы таким образом точно установили, что катодные лучи создаются ультрафиолетовым светом, и как только их поведение стало

достаточно хорошо известно, я вскоре сумел обнаружить их и на флуоресцентных экранах (44), а затем продолжил изучать их и даже начал использовать. Позже я расскажу об этом подробнее. Однако относительно действительного образования лучей необходимо отметить следующее.

Во-первых, (и это очень важно для чистых экспериментов) этот метод может быть использован даже в абсолютном вакууме, где обычный метод бесполезен. Газ вообще не нужен, но он ничуть не мешает образованию лучей, для которого необходимо прямое действие света на металл пластинки. Начальные скорости, с которыми кванты вылетают из пластинки, настолько малы, что отрицательного заряда всего лишь в несколько вольт на противоположной пластинке достаточно, чтобы заставить лучи повернуть назад, еще не достигнув ее. Тогда лучи возвращаются к облученной пластинке точно так же, как брошенный вверх камень упадет обратно на землю (32; 44)[1].

Следовательно, в данном случае мы получаем чрезвычайно медленные катодные лучи; более быстрые лучи можно получить, придав противоположной пластинке положительный заряд. Скорость лучей можно свободно контролировать уровнем напряжения противоположной пластинки.

Во-вторых, рассматривая действие ультрафиолетового света на пластинку, мы должны представлять, что световые волны заставляют внутреннюю область атомов металла пластинки совершать колебания. Мы уже упомянули о том, что открытие Зеемана доказало, что атомы содержат отрицательное электричество, способное совершать колебания. Если колебание отрицательного кванта в атоме, происходящее синхронно со световыми волнами, станет слишком сильным, то квант вылетит из атома[2], а потому и из пластинки, и мы получим катодный луч.

Мы уже сказали о том, что скорость кванта при отрыве от пластинки очень мала. Я также обнаружил, что эта скорость не зависит от

---

[1]Мое первое подробное сообщение по данному предмету (32) появилось в *Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wiss. zu Wien* от 19 октября 1899 года. В декабрьском номере *The Philosophical Magazine* за тот же год Дж. Дж. Томсон опубликовал исследование «О массе ионов в газах при низком давлении», в котором также говорится о фотоэлектрическом эффекте, хотя его источник автор по-прежнему ищет в газе, прилегающем к облученной пластинке, как на то указывает замечание на стр. 552. В книге того же автора «Электропроводность газов», второе издание, 1903 г., стр. 109, моя публикация датирована следующим годом, чем тот, который я упомянул сейчас, так как цитируется не оригинал, а последующее его переиздание (*Ann. Physik*, 2 (1900), 359, где ясно отмечено, что это именно переиздание).

[2]Этот процесс предвосхищала еще всеобъемлющая теория дисперсии Гельмгольца (17с, с. 518).

интенсивности лучей ультрафиолетового света (44) и потому заключил, что энергия при отрыве исходит вовсе не из света, а из внутренней области конкретного атома. Свет оказывает исключительно инициирующее действие, весьма напоминающее действие запала при выстреле из ружья. Я нахожу этот вывод важным, поскольку благодаря ему мы узнаем, что запас энергии содержат не только атомы радия, о свойствах которых мы в то время только начинали узнавать более подробно, но и атомы других элементов, которые также могут испускать излучение и, делая это, вероятно, полностью разрушаются, чему соответствует распад и повышение шероховатости веществ, подвергнутых действию ультрафиолетового света. Это мнение недавно подтвердилось в Кильском институте при проведении специальных экспериментов, которые также показали, что фотоэлектрический эффект происходит с неизменными начальными скоростями даже при температуре жидкого воздуха.

Мы не можем рассматривать действие света как ограниченное исключительно твердым агрегатным состоянием. Молекулы или атомы газов подвергаются абсолютно аналогичному воздействию ультрафиолетового света (35; 40); разумно допустить, что из них также вылетают кванты (49, с. 486); газ же при этом приобретает свойство электропроводности, которое позже мы рассмотрим подробнее. Если этот газ, подобно воздуху, содержит кислород, то в качестве побочного продукта создается озон (35)[1].

Это же самое действие света, а именно: создание катодных лучей, колебание атомов и высвобождение из них квантов — также связано и с фосфоресценцией (50, с. 671), а потому, вероятно, и с флуоресценцией, и, может быть, со всеми фотохимическими эффектами. Помня об обнаруженной нами связи преобразования энергий из внутренней области атомов с фотоэлектрическим эффектом, мы не должны удивляться, если в будущем столкнемся с явлениями такого же типа, действующими как источники энергии, не привнесенной извне.

[1]В свете последующих исследований Варбурга можно допустить, что наиболее плодотворные из современных методов получения озона, т. е. методов, которые используют то, что называется «тихими электрическими разрядами», полностью или главным образом, эффективны из-за ультрафиолетового света, сопровождающего эти разряды (48). Богатые источники ультрафиолетового света, которые доступны в настоящее время, например, электрические ртутно-кварцевые лампы, распространяют вокруг себя столь заметный запах озона, что это действие ультрафиолетового света сейчас стало заурядным. Тем не менее, значение действия ультрафиолетового солнечного света в верхних слоях атмосферы (35, с. 504) для метеорологии, судя по всему, все еще не получило должной оценки. И по-прежнему не ясно, является ли ионизация воздуха, вызванная катодными лучами и впервые обнаруженная у алюминиевого окошечка (18), влиянием присутствующего там света или вообще прямым воздействием катодных лучей.

Следует также отметить, что исследования, проведенные как Кюри и Саньяком (37), так и Дорном (42), говорят о том, что Х-лучи, как и ультрафиолетовый свет, тоже влияют на образование катодных лучей. Это свойство согласуется с их способностью делать газы электропроводящими и вызывать фосфоресцентные и фотохимические эффекты.

Не успели мы показать, что ультрафиолетовый свет подходит для образования самых медленных лучей, как было найдено решение проблемы образования самых быстрых лучей. В то время уже были известны лучи, испускаемые ураном и радием; Беккерель, Пьер и Мария Кюри продолжали работать над своим открытием. Применив к этим новым лучам вышеописанные методы, разработанные для катодных лучей из разрядных трубок, удалось показать, что новые лучи частично представляют собой катодные лучи (34; 36; 41)[1], причем, что удивительно, такие катодные лучи, скорость которых близка к скорости света или равна ей (43). Таким образом, атом радия позволил достичь того, чего не могла выдержать ни одна разрядная трубка, причем он это делает достаточно самопроизвольно, хотя следует признать, что в процессе этого он полностью разрушается (51; 54).

Когда таким образом стал доступен полный диапазон скоростей от полного покоя до скорости света, стоило более подробно исследовать поведение материи по отношению к облучению.

Из замутненности всех веществ, включая воздух, для катодных лучей мы заключили, что каждая молекула или атом действует на эти лучи как отдельное препятствие, которое в большей или меньшей степени отклоняет их от траектории их движения. Как нам следует представить это отклонение? Давайте прежде всего исследуем такой вариант. Быть может, кванты лучей, встречая молекулы вещества, отклоняются так же, как при столкновении отклоняются друг от друга молекулы газа. Может ли быть так, что катодный луч в газе ограничивается той длиной, которую с помощью кинетической теории газов можно легко и точно вычислить как *среднюю длину свободного пробега* очень маленьких частиц между молекулами газа. Однако такие длины траекторий очень малы; например, в водороде при давлении в 40 мм рт. ст. они составляют около двух сотых миллиметра. За пределами этой столь короткой траектории луч вообще не смог бы распространяться в этом газе, то есть почти мгновенно произошла бы диффузия. Однако, как показали мои более ранние наблюдения (18b), опубликованные в виде диаграмм, газы ни в коем случае не являются настолько мутными. Даже воздух при полном атмосферном давлении оказался гораздо прозрачнее, чем мы уже наблю-

[1]Это та часть уранового или радиевого излучения, которая обыкновенно обозначается как бета.

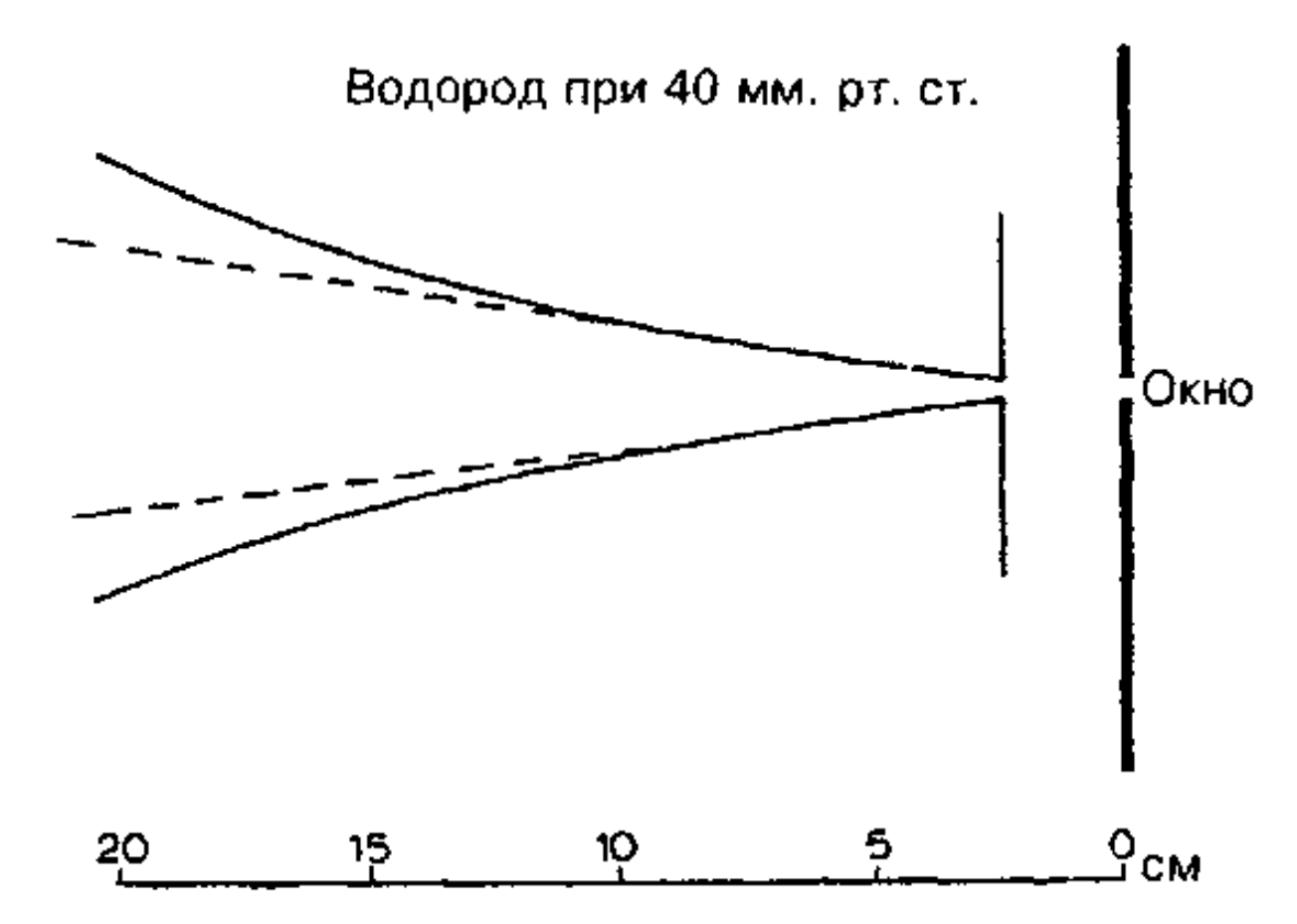


Рис. 11

дали (рис. 4), а более легкий водород, разреженный до обозначенного давления в 40 мм. рт. ст., еще более прозрачен. На рис. 11 изображена траектория луча в водороде, как она видна на флуоресцентном экране. Пунктирные линии показывают степень распространения прямолинейного света в тех же условиях. Мы видим, что даже на расстоянии десяти сантиметров от окошечка катодный луч практически не отклоняется от этого прямолинейного распространения, и только за пределами этой длины он распространяется намного шире. Однако длина в 10 см в 5000 раз превышает длину траектории свободного пробега, равную 0,02 мм. Тогда из этого следует, что в данном случае излучающие кванты должны были пройти сквозь 5000 молекул водорода, прежде чем произошло первое заметное изменение направления. Нам было удивительно наблюдать, как мы превзошли старую непроницаемость материи. Каждый атом вещества занимает пространство, непроницаемое для других атомов[1]; но для мельчайших электрических квантов все типы атомов являются легко проницаемыми структурами, которые словно состоят из мельчайших компонент с огромным множеством промежутков.

Каковы же эти мельчайшие составляющие атомов? Согласно закону пропорциональности поглощения лучей массе вещества, мы уже пришли

[1]Во всяком случае при нормальных скоростях движения молекул. Для очень высоких скоростей, которые имеют место в случае с альфа-частицами излучения радия, взаимную проницаемость даже целых атомов, несмотря на то, что она, вероятно, сопровождается их распадом, нельзя назвать невозможной в свете тех концепций, к которым мы пришли при рассмотрении структуры атомов. Последние исследования Брэгга и Клеемана обещают пролить свет на данный вопрос.

к выводу, что они одинаковы во всех атомах, но присутствуют в них в разном количестве. Теперь мы можем узнать дальнейшие подробности. Мы можем использовать кванты, составляющие катодные лучи, в качестве мелких пробных частиц, которым мы позволяем проникать внутрь атомов, и таким образом обеспечивать нас нужной нам информацией.

Первую и самую заметную вещь, которая происходит с ними в процессе этого пересечения, т. е. отклонения от прямолинейной траектории движения, мы уже обсудили как *диффузию лучей*. Насколько нам известно, катодные лучи претерпевают подобное отклонение исключительно под действием электрических и магнитных сил. Предположить существование магнитных сил внутри атомов означало бы допустить существование в атомах подвижного электричества, а следовательно, опять-таки электрических сил. Значит, диффузию катодных лучей в материи мы должны рассматривать как доказательство *существования электрических сил во внутренней области атомов*. Величину этих сил можно оценить, рассматривая степень отклонения вместе с временем пролета частицы, которое зависит от скорости квантов и конечно же от размеров атомов. Если мы будем брать все более и более медленные лучи, то время пролета частицы станет длиннее, и, соответственно, более сильной станет происходящая диффузия (19, с. 30; 46; с. 480). Таким образом, мы обнаруживаем внутри атомов напряженность электрического поля такой необыкновенной величины, какую мы никогда не сможем воспроизвести с помощью известных нам средств, так как достаточное сопротивление отсутствует даже у лучших изоляторов. Это поля такой напряженности, по сравнению с которой напряженность, возникающая во время самых неистовых штормов, ничтожно мала (47). Тогда силовые эффекты атома радия перестают казаться столь удивительными, но тем больше мы должны удивляться тому, что большинство окружающих нас атомов ведет себя так спокойно и раскрывает какую-то часть скрытой в них силы лишь тогда, когда подвергается фотоэлектрическому или подобному ему действию.

Дальнейшее количественное изучение диффузии катодных лучей в различных материалах обещает дать ценную информацию о точной природе электрических полей в атомах. А сейчас мы должны обратиться ко второму явлению, которое несколько проще определить численно и которое вполне может произойти при таком зондировании атомов. Может случиться так, что квант, успешно пройдя через тысячи атомов, наконец останавливается в одном из них и не испускается им сразу же. Это явление называется *поглощением катодных лучей*. Я дал количе-

ственное определение этого эффекта для всего диапазона имеющихся скоростей этих лучей и получил следующее (47).

Поглощение, подобно диффузии, возрастает с уменьшением скорости луча. Этого также следовало ожидать, если поглощение, как и диффузия, является следствием воздействия электрических силовых полей, существующих внутри атомов, и если эти силовые поля сосредоточены вокруг некоторых центров в атомах, вблизи которых их напряженность выше, нежели на более отдаленном расстоянии, так же, как напряженность магнитного поля сосредоточена около двух полюсов. Квант излучения, пересекающий такие поля с подвижными центрами, останавливается только тогда, когда попадает в те области этих полей, которые, встречаясь на его пути, имеют достаточно высокую напряженность; в противном случае квант пройдет через все поле и лишь в большей или меньшей степени отклонится от своей первоначальной траектории. Таким образом, полное сечение атома — область, которую атом подставляет под действие луча, состоит из двух частей: поглощающей и пропускающей, причем первая из них, — которую я для краткости называю поглощающим сечением, — известна из моих измерений в квадратных сантиметрах. Это сечение обеспечивает единицу измерения размера тех областей силовых полей атома, напряженность которых превышает соответствующий уровень, достаточный для остановки кванта, движущегося с некоторой определенной скоростью. Чем медленнее движется квант, тем бо́льшие области силового поля атома действуют как поглощающие сечения. Для самых медленных лучей я нашел, что поглощающее сечение не только становится равным полному сечению атома или молекулы, — полное сечение, известное из кинетической теории газов, — но даже немного его превышает. Это равносильно прямому доказательству существования электрических силовых полей как внутри атомов и молекул, так и на определенном расстоянии вокруг них. Вероятно, правильно будет отождествить эти внешние электрические силы молекул с силами сопротивления, упругости, сцепления и молекулярного притяжения, короче говоря, с *молекулярными силами* вообще, которые были известны уже давно, хотя и не сразу рассматривались как имеющие электрическую природу. Мнение Берцелиуса о том, что *химические силы* атомов имеют электрическую природу, теперь будет поддерживаться со все увеличивающимися на то причинами, и по мере продолжения настоящего исследования следует надеяться на то, что появятся такие концепции электрических силовых полей в атомах, которые обеспечат лучшую и более полную картину их химического поведения, нежели

та, которую дает простая концепция числа фиксированных валентных позиций с электрическими зарядами.

Интересен переход не только к самым низким, но и к самым высоким скоростям. По мере возрастания скорости луча поглощающее сечение сжимается, и, в конце концов, останавливаются только те кванты, траектория движения которых проходит через самые напряженные области внутренних силовых областей, близкие к их центрам. Именно по этой причине самые быстрые лучи также способны дать ответ на вопрос, имеют ли эти центры особый непроницаемый характеристический объем, или, говоря в общем: есть ли в атомах, помимо силовых полей, что-то еще, что удерживает наши пробные частицы. То, что происходит при проведении эксперимента с самыми быстрыми лучами, лучше всего проиллюстрировать на примере. Представим блок размером в кубический метр самого твердого и тяжелого вещества из всех нам известных, скажем, платины. Во всем этом блоке мы находим непроницаемый для лучей характеристический объем, не превышающий, самое большее, один кубический миллиметр. Помимо этой крошечной доли, мы обнаруживаем, что оставшаяся часть нашего блока пуста, как небо. Нам следовало бы удивиться той незначительной степени, в какой, на самом деле, заполнено пространство в материи! В пространстве, занятом материей, мы нашли лишь силовые поля, подобные тем, которые могут также формироваться и в свободном эфире: Каковы же тогда основные составляющие всех атомов, к которым нас привела зависимость поглощения катодных лучей от массы? Ясно, что они, подобно целым атомам, также находятся в силовых полях. Поэтому я назвал эти основные составляющие всей материи «динамидами».

Являясь составляющими электрически нейтральных атомов, динамиды также будут рассматриваться как электрически нейтральные, вследствие чего обладающие теми же количествами отрицательного и положительного электричества, что и центры их полей. Тогда мы можем утверждать, что материя — все осязаемые, весомые вещества, которые нас окружают, — состоит, в конечном счете, из равных количеств отрицательного и положительного электричества. Ранее упомянутые сведения, полученные из явления Зеемана, фотоэлектрического эффекта и вторичного катодного излучения, которые мы сейчас рассмотрим, показывают, что отрицательное электричество содержится в атомах в виде точно таких же квантов, которые мы обнаружили в катодных лучах и которые исследователь с тех пор не раз встречал самих по себе, отдельно от материи. Положительное электричество, напротив, кажется чем-то, гораздо более характерным для атомов материи; как уже под-

черкивалось ранее, это электричество было обнаружено исключительно в атомах. Из наших данных по заполнению пространства следует, что для отрицательных квантов характеристический объем, непроницаемый для частиц того же рода, должен быть чрезвычайно маленьким. Этот вывод согласуется с ранее упомянутыми экспериментами Кауфмана. Вероятный характеристический объем положительного электричества, при условии, что он также не является чрезвычайно малым, следует рассматривать как полностью проницаемый для отрицательных квантов.

При таком строении материи несложно понять и третье явление, которое имеет место при пересечении атома и о котором мне еще предстоит рассказать. Вследствие отталкивающей силы, которую квант пересекающего атом луча прикладывает к другим принадлежащим этому атому отрицательным квантам, он способен вызвать огромное возмущение внутри атома, в результате которого квант, принадлежащий атому, может из него вылететь[1]. Этот процесс называется *вторичным катодным излучением*. Мы позволили одному катодному лучу — первичному — проникнуть в атом, и вместо него появились *два* луча: первичный и вторичный[2] (46, с. 481).

Скорость вторичных лучей, — как и скорость катодных лучей, созданных в результате фотоэлектрического эффекта, — очень мала, даже когда скорость первичных лучей высока. *Количество* вторичного излучения, т. е. вероятность эмиссии квантов из атомов во время их пересечения лучом, максимально при некотором оптимуме скорости первичных лучей; как быстрые, так и более медленные первичные лучи менее эффективны, а при достаточно низкой скорости первичных лучей — ниже 1/200 скорости света — вторичное излучение вообще отсутствует (44, с. 188 и далее; 46, с. 474 и далее; 49). Все это несложно понять, так как если первичный квант приближается к атому слишком медленно, он обладает слишком маленькой энергией, чтобы вызвать адекватное возмущение внутри атома, а если он приближается слишком быстро, то проведет в атоме слишком мало времени, чтобы вызвать какой-либо эффект.

Имея столь низкую скорость, вторичное излучение должно подвергаться сильному поглощению окружающими его молекулами материала. В газах, где молекулы находятся в свободном состоянии, молекула, поглотившая вторичный квант, начнет действовать как *подвижный но-*

[1]Из атома также могут вылететь два и более кванта (46, с. 485).

[2]Судя по всему, нередко допускают, что вторичное излучение представляет собой исключительно результат поглощения первичного излучения; однако, исходя из моих наблюдений, у меня сформировалась совсем иная концепция (46, с. 474 и далее).

ситель отрицательного электричества, а молекула, из которой этот вторичный квант вырвался, будет иметь избыток положительного электричества и, таким образом, будет являться носителем *положительного* электричества. Однако миграция таких носителей, — знанием которых мы обязаны беспрестанным усилиям Аррениуса, а после него, в частности, Дж. Дж. Томсона, — составляет электропроводность в газах[1], и, таким образом, во вторичном катодном излучении мы нашли и в процессе тщательных наблюдений адекватным образом подтвердили механизм, посредством которого катодные лучи придают газу свойство электропроводности (46, с. 474)[2]. Этот случай проводимости, наведенной и поддерживаемой катодными лучами, также должен иметь место во многих газовых разрядах, в которых появляются достаточно быстрые катодные лучи и, следовательно, в обычной разрядной трубке, которую мы вначале использовали в качестве первого генератора катодных лучей.

В других случаях механизм приобретения газами свойства электропроводности, судя по всему, является абсолютно таким же: квант вылетает из одной молекулы, его поглощает другая молекула; это происходит под влиянием на газы ультрафиолетового света, как уже было упомянуто ранее, а также в пламени (45), но причина, лежащая в основе вылетания кванта, различна в каждом случае (53, p. 242).

В заключение мне хотелось бы поблагодарить вас за внимание.

---

[1]На мой взгляд, убежденность в том, что электричество в газах переносят молекулы или их группы, подтверждают три последовательных этапа, а именно: (1) тщательное изучение одного из первых случаев электризации газа, когда оказалось, что пыль, которая сначала рассматривалась как единственный или, в любом случае, основной носитель электрических разрядов в газах, не имеет к ним никакого отношения. Это был случай электричества водопада (16); (2) первые измерения скоростей миграции носителей электричества в газах в различных случаях проводящих газов, которые проводили очень быстро друг за другом множество различных исследователей, прежде всего, Резерфорд (26); (3) первые, в сущности, безупречные измерения абсолютного электрического заряда отдельных носителей электричества в газах в различных случаях, выполненные Дж. Дж. Томсоном (31). В свете простых соображений кинетики газов из (2) и (3) был вычислен размер носителей электричества в газах, который оказался равным размеру молекул или групп молекул.

[2]Этот механизм отличается от механизма образования ионов в жидких электролитах, где он заключается в расщеплении электрически нейтральных молекул на два атома или две группы атомов с противоположным зарядом. В других отношениях аналогия между электропроводностью в газах и жидкостях тоже нарушается в самых характерных моментах. Величина заряда носителя в газе и его знак, в отличие от ионов в жидких электролитах, не определяется химической природой этого носителя, и вследствие этого электролиз, который является столь типично химическим видом разложения, в газах не происходит вообще (53, p.236). Поэтому я решил больше не останавливаться на этой аналогии, несмотря на эвристическую полезность, которую она имела в самом начале данной работы, и именно поэтому я всегда старался не называть носители электричества в газах ионами, а электропроводность в газах электролитической.

Хронология публикаций[1]

(1860) 1. M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (Экспериментальные исследования электричества) (с 1820 и далее).

(1869) 2. W. Hittorf, «Über die Elektrizitätsleitung der Gase» (Электропроводность газов), *Pogg. Ann. Physik*, Vol. 136.

(1873) 3. J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Трактат об электричестве и магнетизме).

(1876) 4. E. Goldstein, «Über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen» (Электрические разряды в разреженных газах), *Monatsber. Berl. Akad.* Продолжение следует в номерах этого же журнала за 1880 и 1881 гг.

(1879) 5. W. Crookes, *Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand* (Излучающая материя, или четвертое агрегатное состояние). (Перевод на немецкий язык опубликован в Лейпциге.) Также *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Vol. 170.

(1881) 6. H. Helmholtz, «On the modern development of Faraday's conceptions of electricity» (О современном развитии концепций электричества Фарадея), *J. Chem. Soc.*, Vol. 39; *Wiss. Abhandl.*, Vol. 3, p. 52.

(1883) 7. H. Hertz, «Versuche über die Glimmentladung» (Эксперименты с тлеющим разрядом), (a) *Wied. Ann. Physik*, Vol. 19. Также (b) *Ges. Werke* (Собрание сочинений), Vol. I, p. 242.

(1887) 8. H. Hertz, «Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung» (Влияние ультрафиолетового света на электрический разряд), *Sitz.-ber. Berl. Akad.*, 9-е июня. Более подробно в *Wied. Ann. Physik*, Vol. 31.

(1887–1888) 9. H. Hertz, *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft* (Исследование распространения электрической силы).

(1888) 10. O. Heaviside, «On electromagnetic waves» (Об электромагнитных волнах), *Phil. Mag.*, Ser. 5, Vols. 25 и 26. Далее: «On the electromagnetic effects due to the motion of electrification through

[1] Положение какой-либо публикации в этой последовательности определялось датой ее подачи в научное общество или датой ее принятия редактором научного журнала. В случае отсутствия этих дат, принималась дата публикации работы, насколько ее можно было определить.

a dielectric» (Об электромагнитных эффектах, вызванных движением электризации в диэлектрике), *Phil. Mag.*, Ser. 5, Vol. 27 (1889); «A charge suddenly jerked into motion» (Заряд, внезапно приведенный в движение), «Sudden stoppage of charge» (Внезапная остановка заряда), *The Electrician*, 1-е мая, 1891 г. Также *Electrical Papers*, Vol. 2, pp. 375, 504, и *Electromagnetic Theory*, Vol. I, p. 54.

— 11. W. Hallwachs, «Über den Einfluss des Lichtes auf elektrostatisch geladene Körper» (Влияние света на электростатически заряженные вещества), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 33.

(1889) 12. P. Lenard и M. Wolf, «Zerstäuben der Körper durch das ultraviolette Licht» (Дробление веществ под действием ультрафиолетового света), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 37.

(1890) 13. A. Schuster, «The discharge of electricity through gases» (Электрический разряд в газах), *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 47. (Получена 20-го марта.)

— 14. A. Righi, «Sulle traiettorie percorse nella convezione fotoelectrica,...» (Траектории, описанные при фотоэлектрической конвекции), *Atti Accad. Naz. Lincei*, Vol. 6 [2]. (Получена 3-го августа.)

(1892) 15. H. Hertz, «Über den Durchgang von Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten» (Прохождение катодных лучей через тонкие слои металла), *Wied. Ann. Phys*, Vol. 45. Также *Ges. Werke* (Собрание сочинений), Vol. I, p. 355.

— 16. P. Lenard, «Über die Elektricität der Wasserfälle» (Электричество водопада), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 46.

— 17. H. Helmholtz, «Elektromagnetische Theorie der Farbenzerstreuung» (Электромагнитная теория дисперсии света), (a) *Sitz.-her. Berl. Akad.*, 15-е декабря; (b) *Wied. Ann. Physik*, Vol. 48.; (c) *Wiss. Abhandl.*, Vol. 3, p. 505.

(1894) 18. P. Lenard, «Über Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vakuum» (Катодные лучи в газах при атмосферном давлении и в глубочайшем вакууме). (a) *Sitz.-ber. Berl. Akad.*, 12-е января 1893 г.; (b) более подробно: *Wied. Ann. Physik*, Vol. 51.

— 19. P. Lenard, «Über die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen»

(Отклонение катодных лучей под действием магнитного поля), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 52.

— 20. H. Hertz, *Die Principien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt* (Принципы механики, продемонстрированные в новом контексте.)

(1895) 21. P. Lenard, «Über die Absorption der Kathodenstrahlen» (Поглощение катодных лучей), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 56. (Опубликована в октябрьском номере.)

— 22. W. C. Röntgen, «Über eine neue Art von Strahlen» (Новый тип лучей), *Sitz.-ber. Würzburger Phys. Med. Ges.*, на декабрь. Перепечатано в *Wied. Ann. Physik*, Vol. 64.

(1896) 23. A. Righi, «Sulla propagazione dell' elettricità nei gas attraversati dai raggi di Röntgen» (Распространение электричества в газах, чере которые прошли рентгеновские лучи), *Mem. Accad. Sci. Bologna*, Ser. 5, Vol. 6 (Подана на рассмотрение 31 мая.)

— 24. P. Zeeman, «On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance» (О влиянии магнетизма на природу света, испущенного материей), *Comm. Phys. Lab. Leiden*, перевод из: *Verslag. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap.*, 31-е октября.

(1897) 25. J. J. Thomson, «Cathode rays» (Катодные лучи), *Phil. Mag.*, Ser. 5, Vol. 44. (Опубликована в октябрьском номере.)

— 26. E. Rutherford, «The velocity and rate of recombination of the ions of gases exposed to Röntgen radiation» (Скорость и темп рекомбинации ионов в газах, подвергнутых рентгеновскому излучению), *Phil. Mag.*, Ser. 5, Vol. 44. (Опубликована в ноябрьском номере.)

— 27. P. Lenard, «Über die elektrische Wirkung der Kathodenstrahlen auf atmosphärische Luft» (Электрическое воздействие катодных лучей на атмосферный воздух), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 63. (Опубликована 11 декабря.)

(1898) 28. P. Lenard, «Über die elektrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen» (Электростатические свойства катодных лучей), *Wied. Ann.*, Vol. 64. (Получена 2-го января.)

— 29. E. Wiechert, «Experimentelle Untersuchungen über die Geschwindigkeit und die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenscrahlen» (Экспериментальное изучение скорости катодных лучей и степени их отклонения под влиянием магнитного поля), *Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen* (Подана на рассмотрение 19-го марта.)

— 30. P. Lenard, «Über das Verhalten von Kathodenstrahlen parallel zu elektrischer Kraft» (Поведение катодных лучей, распространяющихся параллельно электрической силе), *Wied. Ann. Physik*, Vol. 65. (Получена 1-го мая.) Также опубликована в *Math. Naturw. Ber. Ungarn*, Vol. 16.

— 31. J. J. Thomson, «On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays» (Об электрическом заряде, переносимом ионами, созданными рентгеновским излучением), *Phil. Mag.*, Ser. 5, Vol. 46. (Опубликована в декабрьском номере.) Продолжена и впоследствии исправлена в *Phil. Mag.*, декабрьский номер за 1899 г. и мартовский номер за 1903 г.

(1899) 32. P. Lenard, «Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht» (Получение катодных лучей с помощью ультрафиолетового света), *Sitz.-ber. Kaiserl. Akad. Wiss. Wien* к 19 октября. Перепечатана в *Ann. Physik*, Vol. 2.

(1900) 33. V. Bjerknes, *Vorlesungen über hydrodynamische Fernkräfte nach C. A. Bjerknes' Theorie* (Лекции о гидродинамических дальнодействующих силах по теории К. А. Бьеркнеса).

— 34. H. Becquerel, «Contribution à l'étude du rayonnement du radium» (Вклад в изучения излучения из радия) и «Déviation du rayonnement du radium dans un champ électrique» (Отклонение излучения радия в электрическом поле), *Compt. Rend. (Paris)* к 29 января и 26 марта, соответственно.

— 35. P. Lenard, «Über Wirkungen des ultravioletten Lichtes aufgasförmige Körper» (Воздействие ультрафиолетового света на газообразные вещества), *Ann. Physik*, Vol. I. (Получена 6 февраля.)

— 36. P. и M. Curie, «Sur la charge électrique des rayons déviables du radium» (Электрический заряд отклоняемых лучей радия), *Compt. Rend. (Paris)* к 5 марта.

— 37. P. Curie и G. Sagnac, «Électrisation négative des rayons secondaires produits au moyen des rayons Röntgen» (Отрицательная электризация вторичных лучей, созданных посредством рентгеновских лучей), *Compt. Rend. (Paris)* 130, к 9 апреля.

— 38. E. Demarcay, «Sur le spectre du radium» (Спектр радия), *Compt. Rend. (Paris)* 131, к 25 июля.

— 39. M. Curie, «Sur le poids atomique du baryum radifère» (Атомный вес радий-содержащего бария), *Compt. Rend. (Paris)* 131, к 6 августа.

Также «Sur le poids atomique du radium» (Атомный вес радия), тот же журнал 21 июля, 1902 г.

— 40. P. Lenard, «Über die Elektrizitätszerstreuung in ultraviolet durchstrahlen Luft» (Рассеяние электричества в воздухе, облученном ультрафиолетовым светом), *Ann. Physik*, Vol. 3. (Получена 17 августа.)

— 41. E. Dorn, «Elektrostatische Ablenkung der Radiumstrahlen» (Электростатическое отклонение лучей радия), *Abhandl. Naturforsch. Ges. Halle*, Vol. 22.

— 42. E. Dorn, «Versuche über Sekundärstrahlen» (Эксперименты со вторичными лучами), *Arch. Néerl. Sci. (Haarlem)*, Ser. 2, Vol. 5.

(1901) 43. W. Kaufmann, «Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen» (Отклоняемость лучей Беккереля под действием магнитного и электрического полей и присоединенная масса электронов), *Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen*, Vol. 8, к 8 ноября.

(1902) 44. P. Lenard, «Über die lichtelektrische Wirkung» (Фотоэлектрический эффект), *Ann. Physik*, Vol. 8. (Получена 17 марта.)

— 45. P. Lenard, «Über die Elektrizitätsleitung in Flammen» (Электропроводность в пламени), *Ann. Physik*, Vol. 9. (Получена 18 августа.)

(1903) 46. P. Lenard, «Über die Beobachtung langsamer Kathodenstrahlen mit Hilfe der Phosphoreszenz und über Sekundärentstehung von Kathodenstrahlen» (Наблюдение медленных катодных лучей с помощью фосфоресценции и получение вторичных катодных лучей), *Ann. Physik*, Vol. 12. (Получена 28 июня.)

— 47. P. Lenard, «Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit» (Поглощение катодных лучей различной скорости), *Ann. Physik*, Vol. 12. (Получена 30 июля.)

— 48. E. Warburg, «Über die Ozonisierung des Sauerstoffs durch stille elektrische Entladungen» (Озонирование кислорода тихими электрическими разрядами), *Sitz.-ber. Berl. Akad.* к 11 ноября.

(1904) 49. P. Lenard, «Über sekundäre Kathodenstrahlung in gasförmigen und festen Körpern» (Вторичное катодное излучение в газообразных и твердых веществах), *Ann. Physik*, Vol. 15. (Получена 22 августа.)

— 50. P. Lenard и V. Klatt, «Über die Erdalkaliphosphore» (Щелочнозе-

мельные фосфоры), *Ann. Physik*, Vol. 15. (Получена 22 августа.) Отрывки также опубликованы в *Mat. Naturw. Ber. Ungam*, Vol. 22.

— 51. E. Rutherford, «Slow transformation products of radium» (Медленно преобразующиеся продукты радия), *Phil. Mag.*, Ser. 6, Vol. 8. (Опубликована в ноябрьском номере.)

(1905) 52. A. Becker, «Messungen an Kathodensstrahlen» (Измерения катодных лучей), *Ann. Physik*, Vol. 17. (Вступительная диссертация, представленная философскому факультету Кильского университета 1 марта.)

— 53. P. Lenard, «Über die Lichtemissionen der Alkalimetalldämpfe und Salze und über die Zentren dieser Emissionen» (Фотоэмиссии из паров и солей щелочных металлов и центры этих эмиссий), *Ann. Physik*, Vol. 17. (Получена 13 апреля.)

— 54. F. Himstedt и G. Meyer, «Über die Bildung von Helium aus der Radium-emanation» (Образование гелия из эманации радия), *Ber. Naturforsch. Ges. Freiburg i.B.*, к маю. Также *Ann. Physik*, Vol. 17.

(1906) 55. W. Kaufmann, «Über die Konstitution des Elektrons» (Строение электрона), *Ann. Physik*, Vol. 19. (Получено 3 января.)

Небезынтересно пронаблюдать по этому списку, как, в период с 1887 по 1894 гг., рассматриваемый предмет внезапно, а именно так это и произошло, стал областью самой обширной и самой успешной деятельности. Годы, предшествовавшие этому периоду, за исключением фундаментальной работы Фарадея и Максвелла, отмечены лишь случайными и отдельными признаками этой деятельности, а годы, последовавшие за этим периодом, вплоть до настоящего времени, характеризуются все более успешными исследованиями в этой области.

Биография

Филипп фон Ленард родился в Поцсони[1] (Прессбург) в Венгрии 7 июня 1862 года. Его семья происходила из Тироля. Физикой фон Ленард занимался в Будапештском, Венском, Берлинском и Гейдельбергском университетах под руководством Бунзена, Гельмгольца, Кенигсбергера и Квинке. В 1886 году он получил степень доктора философии в Гейдельберге.

[1]Ныне Братислава. — *Прим. ред.*

С 1892 года он работал приват-доцентом и ассистентом профессора Герца в Боннском университете, а в 1894 году был назначен внештатным профессором в университете Бреслау. В 1895 году фон Ленард стал профессором физики в Экс-ла-Шапель (Ахен), а в 1896 году — профессором теоретической физики в Гейдельбергском университете. В 1898 году его назначили на должность ординарного профессора в Кильском университете.

Свою первую работу Ленард проделал в области механики, когда опубликовал работу по колебанию падающих капель воды и родственным задачам, а в 1894 году он издал труд «Принципы механики», который оставил после себя Герц.

Вскоре фон Ленард заинтересовался явлениями фосфоресценции и люминесценции. Это произошло в результате развития таинственного притяжения, которое слабый свет, возникающий в темноте, вызывал в нем с детских лет, когда он вместе со своими товарищами нагревал кристаллы флюорита, чтобы вызвать их свечение. Теперь же он вместе с астрономом В. Вольфом занялся изучением свечения пирогалловой кислоты, которое возникает, когда ее смешивают со щелочами и бисульфитом для проявления фотографий. Он обнаружил, что это свечение связано с окислением пирогалловой кислоты. В то время он также занимался изучением магнетизма и висмута, и, в сотрудничестве с В. Клаттом, который был его первым учителем физики в родном городе, в Прессбургском Модерн-колледже, он начал изучать так называемые самосветящиеся вещества, такие как: сульфид кальция, с которым в течение нескольких лет работал Клатт. Вместе они обнаружили, что сульфид кальция после предварительного освещения светится в темноте, но только в том случае, если содержит в качестве остаточных элементов тяжелые металлы, например, медь или висмут, образующие кристаллы, от которых зависит цвет, интенсивность и продолжительность свечения; если же сульфид кальция достаточно чист, то он не светится. Эта совместная с Клаттом работа положила начало работе фон Ленарда в области, которая занимала его на протяжении следующих восемнадцати лет.

В 1888 году, работая в Гейдельбергском университете под руководством Квинке, Ленард проделал свою первую работу по катодным лучам. Он исследовал точку зрения, которую тогда поддерживал Герц, о том, что эти лучи аналогичны ультрафиолетовому свету, и провел эксперимент, чтобы выяснить, проходят ли катодные лучи, подобно ультрафиолетовому свету, через кварцевое окошечко в стенке разрядной трубки. Он обнаружил, что лучи этого не делают; однако позднее, в 1892 году,

когда он работал ассистентом Герца в Боннском университете, Герц позвал его, чтобы показать открытие, которое он сделал и которое состояло в том, что кусочек уранового стекла, накрытый алюминиевой фольгой и помещенный внутрь разрядной трубки, после попадания на него катодных лучей стал светиться под этой фольгой. Тогда Герц предположил, что, быть может, с помощью тонкой алюминиевой пластинки можно разделить два пространства: в одном из них, как обычно, будут создаваться катодные лучи, а в другом — их можно будет наблюдать в чистом виде, чего никогда ранее не делалось. Герц был слишком занят, чтобы проделать этот опыт, а потому он разрешил провести его Ленарду, и именно тогда последний открыл «окошко Ленарда».

Проведя множество экспериментов с алюминиевой фольгой различной толщины, в 1894 году он смог опубликовать результаты своего великого открытия: кварцевую пластинку, которая прежде использовалась для закрытия разрядной трубки, можно заменить тонкой пластинкой из алюминиевой фольги, которая должна иметь толщину, достаточную для поддержания вакуума внутри трубки, но при этом быть достаточно тонкой, чтобы пропускать катодные лучи. Таким образом, появилась возможность изучения катодных лучей, а также вызываемой ими флуоресценции вне разрядной трубки, и, проделав несколько экспериментов, Ленард заключил, что катодные лучи распространяются в воздухе на расстояние порядка дециметра, а в вакууме — на расстояние нескольких метров, ничуть не ослабевая при этом. Несмотря на то, что на первых порах Ленард вслед за Герцем предположил, что катодные лучи распространяются в эфире, впоследствии он отказался от этого мнения в результате работы Жана Перрена в 1895 году, сэра Дж. Дж. Томсона в 1897 году и В. Вина в 1897 году, которые доказали корпускулярную природу катодных лучей.

Затем Ленард распространил работу Герца на фотоэлектрический эффект. Работая в глубоком вакууме, он проанализировал природу этого эффекта, показав, что ультрафиолетовый свет, попадая на металл, высвобождает из металла электроны, которые затем распространяются в вакууме, где они могут ускориться или замедлиться электрическим полем, а их траектории могут быть искривлены магнитным полем. С помощью точных измерений он показал, что количество высвобожденных электронов пропорционально энергии падающего света, а их скорость, то есть кинетическая энергия, в принципе, не зависит от этого количества и изменяется только при изменении длины волны, увеличиваясь, когда последняя уменьшается. Эти факты противоречили существующей теории и не получили объяснения до 1905 года, когда Эйнштейн создал

свой количественный закон и разработал теорию световых квантов или фотонов, которую гораздо позже проверил Милликен. Но Ленард так никогда и не простил Эйнштейну этого открытия и называл этот закон своим именем.

В процессе своей работы Ленард, с целью увеличения скорости движения электронов и измерения их энергии, изобрел фотоэлемент, ставший первой моделью «трехэлектродной лампы», который в настоящее время играет важную роль в радиоэлектронике. Единственная разница между этими двумя элементами состоит в том, что в элементе Ленарда электроны высвобождаются с катода под действием света, тогда как в «трехэлектродной лампе» катодом является нить белого накала, которая способна посылать в вакуум токи гораздо более высокой интенсивности.

В 1902 году Ленард показал, что электрон должен обладать определенной минимальной энергией, прежде чем он сможет вызвать ионизацию газа, через который проходит.

В 1903 году он опубликовал свою концепцию атома как скопления того, что он назвал «динамидами», — очень маленькие частицы, разделенные большими пространствами; эти частицы имели массу и представлялись в виде электрических диполей, связанных двумя равными зарядами противоположного знака, а их количество равнялось атомной массе. Твердая материя в атоме, по его мнению, составляла около одной тысячемиллионной доли всего атома. Эта работа внесла большой вклад в теорию электронов Лоренца.

В более зрелые годы Ленард изучал природу и происхождение спектральных линий. Развивая труды Ридберга, Кайзера и Рунге, которые установили, что спектральные линии металла могут располагаться в виде двух или более серий и что между длинами волн в этих сериях существует явная математическая связь, Ленард показал, что в каждой серии произошло определенное изменение атома и что именно эти изменения определяют саму серию и отличаются друг от друга числом потерянных электронов.

Ленард был гениальным экспериментатором, но его способности к работе теоретика вызывают некоторое сомнения. Одни его открытия были великими, другие — очень важными, но он претендовал на такую их ценность, которой они, в действительности, не имели. Несмотря на то, что он получил множество наград (например, был назначен Почетным доктором университетов Христиании [теперь Осло] в 1911 году, Дрездена в 1922 году, Прессбурга в 1942 году; получил медаль им. Франклина в 1905 году, Орла от Немецкого Рейха (Eagle Shield of the German

Reich)[1] в 1933 году и в том же году был избран почетным гражданином Гейдельберга), он считал, что им пренебрегают, чем, вероятно, и объясняются его нападки на других физиков из многих стран. Он стал убежденным членом национал-социалистической партии Гитлера и не скрывал своей приверженности к ней. Партия ответил на его верность тем, что назначила Лидером арийских или немецких физиков. Среди его опубликованных трудов есть несколько книг: *Ueber Aether und Materie*[2] (второе издание в 1911 г.), *Quantitatives über Kathodenstralen*[3] (1918), *Ueber das Relativitätsprinzip*[4] (1918) и *Grosse Naturforscher*[5] (второе издание в 1930 г.)

Фон Ленард, который был женат на Катарине Шлехнер, умер 20 мая 1947 года в Мессехаузене.

[1]Награда, которая вручалась немцам, «интеллектуальные творения которых принесли благо немецкому народу». — *Прим. пер.*

[2]Об эфире и материи (нем.). —*Прим. пер.*

[3]Количественные опыты с катодными лучами (нем.). — *Прим. пер.*

[4]О принципе относительности (нем.). — *Прим. пер.*

[5]Великое исследование природы (нем.) — *Прим. пер.*

Джозеф Джон Томсон

«в знак признания его выдающихся заслуг в теоретических и экспериментальных исследованиях электропроводности газов»

Джозеф Джон Томсон

Носители отрицательного электричества

Нобелевская лекция, 11 декабря 1906 г.

Введение

В этой лекции мне хотелось бы сообщить о некоторых исследованиях, которые привели к выводу о том, что носителями отрицательного электричества являются частицы, которые я назвал корпускулами, имеющие массу, намного меньше массы атома любого известного химического элемента, и свойства этих частиц одни и те же, из какого бы источника ни было получено отрицательное электричество.

Впервые корпускулы были обнаружены в трубке с высокой степенью разрежения, через которую проходил электрический разряд. Когда электрический разряд посылают через сильно разреженную трубку, ее стенки светятся ярко-зеленым светом. То, что это вызвано чем-то, распространяющимся прямолинейно из катода, — электрода, через который в трубку попадает отрицательное электричество, — можно показать следующим образом (этот эксперимент много лет назад проделал сэр Уильям Крукс). Мальтийский крест, сделанный из тонкой слюды, помещают между катодом и стенками трубки. После прохождения разряда зеленая фосфоресценция уже не распространяется до самого конца трубки, как это происходило в отсутствие креста. Теперь в конце трубки на

фоне фосфоресценции ясно виден крест; слюдяной крест отбросил тень, форма которой доказывает, что фосфоресценция вызвана чем-то, что прямолинейно распространяется из катода и не может пройти через тонкую слюдяную пластинку. Зеленая фосфоресценция вызвана катодными лучами, и было время, когда о том, что касается природы этих лучей, шли жаркие споры. Превалировали, в основном, два мнения: одно, которое поддерживали, главным образом, английские физики, состояло в том, что лучи представляют собой отрицательно заряженные частицы, высвобожденные из катода и движущиеся с огромной скоростью; второе мнение, которое поддерживало большинство немецких физиков, заключалось в том, что лучи — это некая разновидность эфирных колебаний или волн.

Аргументы в пользу рассмотрения лучей как отрицательно заряженных частиц, в основном, состоят в том, что они отклоняются под действием магнита точно так же, как движущиеся отрицательно заряженные частицы. Мы знаем, что такие частицы при приближении к ним магнита испытывают действие силы, направление которой перпендикулярно направлению магнитной силы, а также направлению движения самих частиц.

Таким образом, если частицы движутся в горизонтальном направлении с востока на запад, а магнитная сила направлена горизонтально с севера на юг, то сила, действующая на отрицательно заряженные частицы, будет направлена вертикально вниз.

Когда магнит размещается так, что магнитная сила направлена вдоль направления движения частиц, то магнит не оказывает на частицу никакого воздействия.

На следующем этапе доказательства того, что катодные лучи являются отрицательно заряженными частицами, было показано, что при попадании этих частиц в металлический сосуд, они отдают ему заряд отрицательного электричества. Первым этот эксперимент проделал Перрен. В окончательной постановке этого эксперимента улавливающей сосуд помещался в стороне от траектории лучей, которые направлялись в него с помощью магнита. В результате сосуд приобретает отрицательный заряд.

Электрическое отклонение лучей

Если лучи заряжены отрицательным электричеством, то они должны отклоняться не только магнитом, но и наэлектризованным телом. В ранних экспериментах, проделанных с целью определения этого от-

клонения, таковое не наблюдалось. Причина этого состояла в том, что катодные лучи, проходя через газ, делают его проводником электричества, таким образом, если в сосуде, через который проходят лучи, осталось заметное количество газа, то последний становится проводником электричества; лучи оказываются, таким образом, окруженными проводником, который защищает их от внешних электрических сил подобно тому, как металлическая банка электроскопа защищает его от всякого электрического воздействия извне.

Откачав вакуумную трубку, до тех пор пока в ней не осталось лишь чрезвычайно малое количество воздуха, который мог стать проводником, я сумел избавиться от этого эффекта и добиться электрического отклонения катодных лучей. Направление этого отклонения указывает на отрицательный заряд лучей.

Таким образом, катодные лучи отклоняются как магнитными, так и электрическими силами, как это происходило бы с отрицательно заряженными частицами.

Однако Герц показал, что частицы катодных лучей обладают еще одним свойством, которое казалось противоречащим представлению о них как о материальных частицах. Он обнаружил, что эти частицы способны проникать сквозь очень тонкие металлические листы, например, через кусочки золотой фольги, и создавать видимое свечение находящегося под ними стекла. Представление о частицах, по величине равных молекулам газа, проходящих сквозь твердую пластинку, было несколько пугающим, что и заставило меня более тщательно исследовать природу частиц, образующих катодные лучи.

Я использовал метод, в основе которого лежит следующий принцип. Когда частица, несущая заряд e, движется со скоростью v сквозь магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны направлению движения частицы, то на нее будет действовать сила, равная Hev, где H — магнитная сила, и направленная перпендикулярно магнитной силе и направлению движения частицы. Если у нас есть также электрическое поле силы X, то на катодный луч будет действовать сила Xe. Если электрическое и магнитное поля располагаются перпендикулярно, то когда сила Hev, созданная магнитным полем, уравновесит силу Xe, созданную электрическим полем, зеленый участок фосфоресценции, созданной катодными лучами, ударяющимися о конец трубки, останется неизменным, так что мы имеем

$$Hev = Xe$$

или

$$v = \frac{X}{H}.$$

Таким образом, измерив (что несложно сделать) значения X и H, когда лучи не отклонены, мы можем определить величину v — скорость частиц. В очень сильно разреженной трубке эта величина может составить одну треть от скорости света или около 60 000 миль в секунду; в трубках, разреженных не столь сильно, она может оказаться не более 5 000 миль в секунду, но во всех случаях, когда катодные лучи создаются в трубках, их скорость намного превышает скорость любого другого знакомого нам движущегося тела. Она, к примеру, во много тысяч раз больше средней скорости движения молекул водорода при обычной температуре, да и при любой температуре, до сих пор реализованной.

Определение e/m

Определив скорость лучей, давайте теперь подвергнем их действию одного электрического поля. Тогда частицы, образующие лучи, попадают под действие постоянной силы, а задача напоминает задачу с пулей, выпущенной горизонтально со скоростью v и падающей под действием земного притяжения. Мы знаем, что за время t пуля упадет на высоту, равную $\frac{1}{2}gt^2$, где g — это ускорение свободного падения. В нашем случае ускорение, созданное электрическим полем, равно Xe/m, где m — масса частицы. Время $t = l/v$, где l — длина пути, а v — скорость движения частицы.

Таким образом, смещение участка фосфоресценции, где лучи ударяются о стекло, равно

$$\frac{1}{2}\frac{Xe}{m} \cdot \frac{l^2}{v^2}.$$

Мы легко можем измерить это смещение d и, таким образом, определить e/m из уравнения

$$\frac{e}{m} = \frac{2d}{X} \cdot \frac{v^2}{l^2}.$$

Результаты определения значений e/m, выполненного с помощью этого метода, очень интересны, так как обнаружилось, что, как бы ни создавались катодные лучи, мы всегда получаем одно и то же значение e/m для всех частиц этих лучей. Например, изменив форму разрядной трубки и давление газа в ней, мы можем сильно изменять скорость частиц,

но, пока скорость частиц не станет настолько огромной, что почти сравняется со скоростью света, когда следует принимать во внимание другие соображения, величина e/m останется постоянной. Значение e/m не просто не зависит от скорости. Еще более замечательно то, что оно не зависит от разновидности электродов, которые мы используем, а также от вида газа в трубке. Частицы, составляющие катодные лучи, должны исходить либо из газа в трубке, либо из электродов, но при этом мы можем использовать любое угодное нам вещество для электродов и наполнять трубку любым видом газа, значение e/m все равно не изменится.

Это постоянное значение, при измерении e/m в магнитных единицах СГС, равно примерно $1,7 \times 10^7$. Если сравнить это значение с величиной отношения массы к электрическому заряду, переносимому любой ранее известной системой, то обнаружится, что оно имеет совершенно иной порядок величины. До исследования катодных лучей заряженный атом водорода, с которым мы встречались в электролизе жидкостей, представлял собой систему с максимальным известным значением e/m, и в этом случае оно составляло всего 10^4, значит, для корпускул катодных лучей значение e/m в 1700 раз превышает значение соответствующей величины для заряженного атома водорода. Это несоответствие может возникнуть вследствие одной из двух возможных причин: либо масса корпускулы очень мала по сравнению с массой атома водорода, которая до недавнего времени считалась минимальной из всех масс, известных физикам, либо заряд корпускулы намного превышает заряд атома водорода. Но с помощью метода, который я вскоре опишу, уже было показано, что электрический заряд в обоих случаях практически одинаков. Следовательно, мы должны заключить, что масса корпускулы составляет всего около 1/1700 от массы атома водорода. Таким образом, атом не является конечным пределом дробления материи, мы можем пойти еще глубже и добраться до корпускулы, а корпускулы на данном этапе одинаковы, вне зависимости от источника, из которого они были получени.

Корпускулы распространены очень широко

Корпускулы можно получить не только из того, что можно счесть несколько искусственным и сложным источником, т.е. из катодных лучей. Когда корпускулы открыли, оказалось, что они встречаются очень часто. Их испускают металлы, нагретые до красного каления, да

и, в некоторой степени, любое нагретое вещество. Мы можем обнаружить их эмиссию из некоторых веществ, например, из рубидия и сплава натрия и калия, даже в холодном состоянии. Вероятно, можно предположить, что некоторая эмиссия происходит из всех веществ, хотя наши современные инструменты недостаточно чувствительны, чтобы обнаружить ее, если только она не является необычайно большой.

Корпускулы также испускают металлы, особенно щелочные, и другие тела, подвергнутые действию света.

Корпускулы в больших количествах и с очень большими скоростями непрерывно испускают радиоактивные вещества, такие как уран и радий. Они создаются в больших количествах при попадании солей в пламя, и есть веская причина предполагать, что корпускулы достигают нас от Солнца.

Таким образом, корпускулы распространены очень широко, но, где бы они ни находились, они сохраняют свою индивидуальность: отношение e/m всегда равняется некоторому постоянному значению.

Судя по всему, корпускула является частью всех разновидностей материи при самых разнообразных условиях, вследствие чего кажется естественным рассматривать ее как один из кирпичиков, составляющих атомы.

Величина электрического заряда, переносимого корпускулой

Сейчас я вернусь к доказательству того, что очень большая величина отношения e/m для корпускулы по сравнению с величиной этого же отношения для атома водорода вызвана малостью массы m, а не величиной заряда e. Это можно сделать, экспериментально измерив величину e и воспользовавшись для этой цели открытием Ч. Т. Р. Вильсоном того, что заряженная частица ведет себя как ядро, вокруг которого водяной пар конденсируется и образует капельки воды. Если взять насыщенный водяным паром воздух и охладить его, так что если бы не было осаждения влаги, то он стал бы пересыщенным; мы знаем, что если в нем присутствует пыль, то ее частицы действуют как ядра, вокруг которых конденсируется вода, и получается знакомое всем явление тумана и дождя. Если же воздух в достаточной мере очищен от пыли, мы можем весьма значительно охладить его без какого бы то ни было осаждения влаги. Ч. Т. Р. Вильсон показал, что в отсутствие пыли облако не формируется, пока температура не понизится до такой точки, что пересыщение

станет примерно восьмикратным. Однако по достижении этой температуры даже в обеспыленном воздухе образуется густой туман.

Вильсон показал, что когда в газе присутствуют заряженные частицы, то для создания тумана достаточно гораздо меньшей степени охлаждения: когда заряженными частицами являются те, которые появляются в газе, находящемся в электропроводящем состоянии, требуется всего лишь четырехкратное пересыщение. Каждая из заряженных частиц становится центром, вокруг которого образуется капля воды; капли образуют облако, вследствие чего заряженные частицы, какими бы маленькими они ни были, становятся видимыми и доступными для наблюдения.

Влияние заряженных частиц на образование облака можно очень ясно показать с помощью следующего эксперимента.

Сосуд, соприкасающийся с водой, насыщен паром при комнатной температуре. Этот сосуд сообщается с цилиндром, в котором вверх-вниз движется большой поршень. В начале эксперимента поршень находится в верхнем положении; при быстром откачивании воздуха из области под поршнем давление воздуха, создавшееся над ним, заставит поршень очень быстро двигаться вниз, и воздух в сосуде будет очень быстро расширяться. Однако, когда воздух расширяется, он при этом охлаждается; таким образом, воздух в сосуде, который ранее был насыщенным, теперь станет пересыщенным. Если воздух обеспылен, то осаждения влаги не произойдет, пока температура воздуха не понизится настолько, что количество влаги, необходимое для его насыщения, составит лишь около одной восьмой от реально присутствующего количества.

Степень охлаждения, и, следовательно, пересыщения, зависит от длины хода поршня: чем больше длина хода, тем больше охлаждение. Допустим, что длина хода поршня устанавливается такой, чтобы величина пересыщения являлась промежуточной между четырех- и восьмикратной. Теперь мы очищаем воздух от пыли, создавая в нем облако за облаком; по мере выпадения облака уносят с собой пыль подобно тому, как в природе дожди очищают воздух. Мы продолжаем делать это до тех пор, пока не обнаруживаем, что, создавая расширение, мы уже не видим облака.

Теперь газ нужно привести в электропроводящее состояние, для чего к сосуду подносят немного радия, который наполняет газ большим количеством положительно и отрицательно заряженных частиц. Теперь при расширении воздуха образуется чрезвычайно густое облако. То, что оно вызвано электризацией газа, можно показать с помощью следующего эксперимента.

Внутрь сосуда, параллельно его стенкам, помещаются две вертикальные изолированные пластины, которые можно наэлектризовать. Если эти пластины заряжены, они будут удалять из газа наэлектризованные частицы по мере их образования. Таким образом мы можем избавиться от некоторого количества наэлектризованных частиц в газе или, по крайней мере, сильно сократить его. Если теперь осуществить расширение воздуха с пластинами заряженными до принесения радия, то образуется очень маленькое облако.

Мы можем использовать капли, чтобы найти заряд частиц, так как, зная длину хода поршня, можно определить величину пересыщения, а следовательно, и количество воды, осажденной при образовании облака. Вода осаждается в виде нескольких маленьких капель одного размера. Таким образом, количество капель будет равно объему осажденной воды, поделенному на объем одной капли. Следовательно, найдя объем одной капли, мы сможем найти количество капель, образующихся вокруг заряженных частиц. Если этих частиц не слишком много, то вокруг каждой из них образуется капля, и мы сможем определить число наэлектризованных частиц.

Из скорости, с которой медленно падают капли, мы можем найти их размер. Вследствие вязкости или трения воздуха небольшие тела падают не с постоянным ускорением, а через короткое время достигают скорости, которая остается постоянной на протяжении всего падения, причем чем меньше тело, тем ниже эта скорость. Сэр Джордж Стокс показал, что v — скорость падения капли дождя — определяется формулой

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{ga^2}{\mu},$$

где a — радиус капли, g — ускорение свободного падения, а μ — коэффициент вязкости воздуха.

Если подставить значения g и μ, получим выражение

$$v = 1,28 \times 10^6 \cdot a^2.$$

Следовательно, измерив v, мы можем определить радиус капли a.

Таким образом мы можем найти объем капли, а затем, как объяснялось выше, вычислить количество капель и, следовательно, количество наэлектризованных частиц.

С помощью электрических методов несложно найти полное количество электричества, переносимое этими частицами, откуда, зная количество частиц, можно определить заряд каждой частицы.

Именно с помощью этого метода я впервые определил заряд частицы; с тех пор Х. А. Вильсон использовал для этого более простой метод, основанный на следующих принципах. Ч. Т. Р. Вильсон показал, что капли воды гораздо легче конденсируются на отрицательно заряженных частицах, нежели на положительно заряженных. Таким образом, регулируя расширение воздуха, можно получать капли воды только вокруг отрицательно заряженных частиц, исключая положительно заряженные; тогда при таком расширении все капли будут иметь отрицательный заряд. Размер этих капель, а следовательно, и их вес можно определить, как и ранее, измеряя скорость их свободного падения. Теперь допустим, что мы держим над каплями положительно заряженное тело. Тогда, поскольку капли заряжены отрицательно, они будут притягиваться к положительному электричеству, вследствие чего направленная вниз сила, действующая на капли, уменьшится, и они будут падать не так быстро, как делали это ранее, когда были свободны от электрического притяжения. Если мы отрегулируем электрическое притяжение так, что направленная вверх сила, действующая на каждую каплю, будет равна ее весу, капли вообще перестанут падать, но, подобно гробу Магомета, будут висеть между небесами и землей. Затем, если мы будем корректировать электрическую силу, пока капли не придут в состояние равновесия и не будут ни подниматься, ни падать, мы будем знать, что направленная вверх сила, действующая на каждую каплю, равна весу этой капли, который мы уже определили, измеряя скорость падения этой капли в отсутствие электрической силы. Если X — электрическая сила, e — заряд капли, а w — ее вес, то в состоянии равновесия мы имеем

$$Xe = w.$$

Поскольку X можно легко измерить, а w известна, мы можем воспользоваться этим отношением для определения e — заряда на капле. Значение e, найденное с помощью этих методов, составляет $3,1 \times 10^{-10}$ электростатических единиц или 10^{-20} электромагнитных единиц. Оно равно величине заряда, переносимого атомом водорода при электролизе разбавленных растворов, приблизительное значение которой известно уже давно.

Можно было бы возразить, что заряд, измеренный в ходе предыдущих экспериментов, является зарядом молекулы или совокупности молекул газа, а не зарядом корпускулы.

Однако это возражение не применимо к другой, испробованной мной разновидности того же эксперимента, где корпускулы приобретали заряд

не вследствие воздействия на газ радия, а при облучении ультрафиолетовым светом соприкасающейся с газом металлической пластинки. В этом случае, как показывают эксперименты, проведенные в очень глубоком вакууме, электризация, имеющая только отрицательный знак, высвобождается из металла в виде корпускул. В присутствии газа корпускулы ударяются о молекулы газа и прилипают к ним.

Таким образом, несмотря на то, что заряжены молекулы, заряд молекулы равен заряду корпускулы, и, когда мы определяем заряд молекулы с помощью методов, которые я только что описал, мы тем самым определяем заряд, переносимый корпускулой.

Величина этого заряда, полученная электризацией ультрафиолетовым светом равна его величине, полученной электризацией излучением радия.

Мы только что видели, что e, заряд корпускулы, в электромагнитных единицах равен 10^{-20}, а ранее мы определили, что отношение e/m, где m — масса корпускулы, равно $1,7\times10^{7}$; следовательно, $m = 6\times10^{-28}$ граммов.

Смысл этого легче осознать, выражая массу корпускулы через массу атома водорода.

Мы видели, что для корпускулы $e/m = 1,7\times10^{7}$. Если E — заряд, переносимый атомом водорода при электролизе разбавленных растворов, а M — масса атома водорода, то $E/M = 10^{4}$; следовательно, $e/m = 1\,700E/M$.

Мы уже говорили, что значение e, найденной с помощью предыдущих методов, полностью совпадает со значением E, приближенное значение которого уже давно известно. Таунсенд использовал метод, в котором величина отношения e/E измеряется непосредственно, и таким образом также показал, что e равно E. Следовательно, поскольку $e/m = 1\,700E/M$, мы имеем $M = 1\,700m$, т. е. масса корпускулы составляет лишь около 1/1 700 от массы атома водорода.

Во всех известных случаях появления в газах при очень низком давлении отрицательного электричества оно появляется в виде корпускул, крошечных частиц с неизменным зарядом и массой. В случае с положительным электричеством все происходит абсолютно иначе.

Биография

Джозеф Джон Томсон родился в Читем Хилл, пригороде Манчестера, 18 декабря 1856 года. В 1876 году он поступил в колледж Оуэна[1]

[1]Впоследствии Манчестерский университет. — *Прим. пер.*

в Манчестере, а в 1876 году — в Тринити-колледж в Кембридже на младший курс. В 1880 году он стал членом совета Тринити-колледжа, где занял второе место на экзамене по математике «Математический треножник» и получил вторую премию Смита. Членом этого колледжа Томсон оставался на протяжении всей своей жизни, став лектором в 1883 году и главой колледжа в 1918 году. В период с 1884 по 1918 г. он был кавендишевским профессором экспериментальной физики в Кембридже, где сменил на этом посту лорда Рэлея, а также почетным профессором физики в Кембридже и Королевском институте в Лондоне.

Ранний интерес Томсона к структуре атома отразился в его «Трактате о движении вихревых колец» (*Treatise on the Motion of Vortex Rings*), за который в 1884 году он получил премию Адамса. В 1886 году появился его труд «Приложение динамики в физике и химии» (*Application of Dynamics to Physics and Chemistry*), а в 1892 году он опубликовал свои «Записки о последних исследованиях электричества и магнетизма» (*Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism*). Последняя работа включала результаты, полученные после выхода в свет знаменитого «Трактата» Джеймса Клерка Максвелла, поэтому ее нередко называют «третьим томом Максвелла». Совместно с профессором Д. Г. Пойнтингом Томсон написал четырехтомный учебник физики «Свойства материи» (*Properties of Matter*), а в 1895 году выпустил труд «Элементы математической теории электричества и магнетизма» (*Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*), пятое издание которого появилось в 1921 году.

В 1896 году Томсон посетил Америку, чтобы в Принстонском университете прочитать курс из четырех лекций, обобщавших его текущие исследования. Впоследствии эти лекции были опубликованы под заголовком «Электрический разряд в газах» (*Discharge of Electricity through Gases*) (1897 г.) По возвращению из Америки он выполнил самый блестящий труд своей жизни — собственное исследование катодных лучей, кульминацией которого стало открытие электрона, о котором Томсон объявил во время своей вечерней лекции в Королевском институте 30 апреля 1897 года. Его книгу «Электропроводность газов» (*Conduction of Electricity through Gases*), опубликованную в 1903 году, лорд Рэлей называл обзором «великих дней, которые Томсон провел в Кавендишской лаборатории». Следующее издание этой книги, которое Томсон выпустил вместе со своим сыном, Джорджем, вышло в двух томах (1928 г. и 1933 г.).

В 1904 году Томсон вернулся в Америку, чтобы прочитать шесть лекций об электричестве и материи в Йельском университете. В этих

лекциях содержалось несколько важных предположений относительно структуры атома. Он обнаружил метод разделения различных видов атомов и молекул путем использования лучей положительного электричества. Впоследствии эту идею развили Астон, Демпстер и другие, что привело к открытию множества изотопов. Кроме уже упомянутых трудов, Томсон, среди множества других публикаций, также написал книги «Структура света» (*The Structure of Light*, 1907), «Корпускулярная теория материи» (*The Corpuscular Theory of Matter*, 1907), «Лучи положительного электричества» (*Rays of Positive Electricity*, 1913), «Электрон в химии» (*The Electron in Chemistry*, 1923), а также свою автобиографию «Воспоминания и размышления» (*Recollections and Reflections*, 1936).

Томсон, награжденный орденом «За заслуги», в 1908 году был посвящен в рыцари. В 1884 году его избрали членом Королевского общества, президентом которого он был в 1916–1920 гг. В 1894 году он получил медаль Лондонского Королевского общества, в 1902 году — медаль Хьюза, а в 1914 — медаль Копли. В 1902 году его наградили медалью Ходжкинса (Смитсоновский институт, Вашингтон); в 1923 году — медалью Франклина и медалью Скотта (Филадельфия); в 1927 году — медалью Маскара (Париж); в 1931 году — медалью Дальтона (Манчестер), а в 1938 году — медалью Фарадея (Инженерно-строительный институт). В 1909 году его избрали президентом Британской ассоциации (а в 1896 и 1931 годах президентом Секции А). Томсон был почетным доктором университетов Оксфорда, Дублина, Лондона, Виктории, Колумбии, Кембриджа, Дарема, Бирмингема, Геттингена, Лидса, Осло, Сорбонны, Эдинбурга, Рединга, Принстона, Глазго, Абердина, Афин, Кракова, Филадельфии, а также университета Джона Хопкинса.

В 1890 году Томсон женился на Розе Элизабет, дочери сэра Джорджа Э. Паджета, кавалера «Ордена бани» 2-й степени. У них родились сын, теперь сэр Джордж Паджет Томсон, заслуженный профессор физики в отставке Лондонского университета, который в 1937 году получил Нобелевскую премию по физике, и дочь.

Сэр Джозеф Томсон умер 30 августа 1940 года.

Альберт Абрахам Майкельсон

«за создание прецизионных оптических приборов и выполнение с их помощью спектроскопических и метрологических исследований»

Альберт Абрахам Майкельсон

Последние достижения в спектроскопии

Нобелевская лекция, 12 декабря 1907 г.

Слава Ньютона основана, главным образом, на его эпохальном открытии законов гравитационной астрономии, с помощью которых с величайшей точностью можно вычислить и проверить положение всех планет, их спутников, комет и других космических тел в нашей Солнечной Системе, а во многих случаях подобное вычисление и проверку можно распространить на системы солнц и планет, находящихся за пределами нашей Солнечной Системы.

Но ничуть не меньше мы обязаны этому гениальному ученому за столь же важный раздел астрофизики, в котором фундаментальную роль играет спектроскопия, благодаря которой мы в состоянии открывать физический и химический состав небесных тел, также как их положение и движение. Подобно тому как растет количество и сложность удивительных систем звездных миров, которые можно обнаружить с ростом оптической силы телескопа, так вместе с разрешающей способностью спектроскопа увеличивается количество свидетельств о наиболее глубинной молекулярной структуре материи. Если бы эксперимент Ньютона

по разделению цветов солнечного света был проведен в немного иных условиях, соответствующих современному этапу развития экспериментальной науки, то явление разделения цветов навело бы на мысль о создании спектроскопии даже абсолютного новичка.

Даже столь простого метода, как уменьшение апертуры, через которую проходит солнечный свет, прежде чем упасть на призму, расщепляющую его на составляющие цвета, оказалось бы достаточно, чтобы показать, что спектр пересекают темные линии, названные по имени их первооткрывателя фраунгоферовыми линиями солнечного спектра. Эти линии достаточно легко наблюдать, причем для этого не нужно ничего, кроме щели в ставнях, на которую смотрят через обыкновенную стеклянную призму. Фраунгофер во много раз увеличил мощность данной комбинации, наблюдая эти линии в телескоп, и эта простая комбинация, если пренебречь второстепенными деталями, составляет чудо современной науки — спектроскоп. Как оптическая сила телескопа измеряется близостью двойных звезд, которые он способен «разрешить», так разрешающую способность спектроскопа можно оценить близостью спектральных линий, которые он способен разделить. Чтобы составить представление о повышении разрешающей способности спектроскопов, давайте рассмотрим изображение солнечного спектра (рисунок 1).

Часть спектра, которая видна невооруженным глазом, простирается от фраунгоферовой линии A до линии H; но с помощью фотографии его можно проследить далеко в ультрафиолетовую область, а болометрические измерения показали, что он простирается намного дальше и в область, находящуюся за красной частью спектра. В желтой части спектра мы наблюдаем темную линию, обозначенную D, которая по своему положению совпадает с ярким светом, излучаемым натрием, например, когда поваренную соль помещают в пламя спиртовки. С помощью призмы со средней разрешающей способностью несложно показать, что эта линия является двойной, а с ростом мощности прибора расстояние между линиями этого дублета предоставляет очень удобную меру его разделяющей или разрешающей способности. Это разделение, конечно, можно было бы осуществить и простым увеличением, но само по себе оно не дало бы никакого эффекта, так как при обычном увеличении сами «линии» расширились бы в той же пропорции. Можно показать, что эффективная разрешающая способность зависит от материала призмы, который должен иметь максимально возможную дисперсию, а также от размера или количества используемых призм. Увеличивая их, удалось добиться «разложения» двойных линий, которые расположены в тридцать или сорок раз ближе друг к другу, нежели линии натрия. Меру

разрешающей способности R, достаточной для разделения двойной линии натрия, удобно принять равной 1 000. Тогда можно сказать, что предельная разрешающая способность призменных спектроскопов немногим выше 40 000.[1]

Это величина разрешающей способности, которая на практике получается при нормальных условиях. Теоретически, разрешающая способность не имеет предела за исключением того, который накладывают условия оптики, которым нужно удовлетворить, а особенно трудность получения больших масс преломляющего материала, имеющего достаточную однородность и высокую дисперсию. Очень может быть, что этот предел еще не достигнут.

Тем временем Фраунгофер изобрел другой прибор (1821) для разложения света на составляющие, который в настоящее время почти вытеснил призму, а именно, дифракционную решетку. Первая решетка Фраунгофера состояла из нескольких тонких равноудаленных друг от друга проволок, но потом он стал делать решетки, прорезая тонкие параллельные линии в золотой фольге, наклеенной на стеклянную пластинку и удаляя через одну полоски. Сейчас дифракционные решетки изготавливают, нанося алмазным резцом тонкие равноудаленные друг от друга линии на стеклянную или металлическую поверхность.

Разделение света на составляющие его элементы с помощью решетки зависит от ее действия на волны, из которых состоит свет.

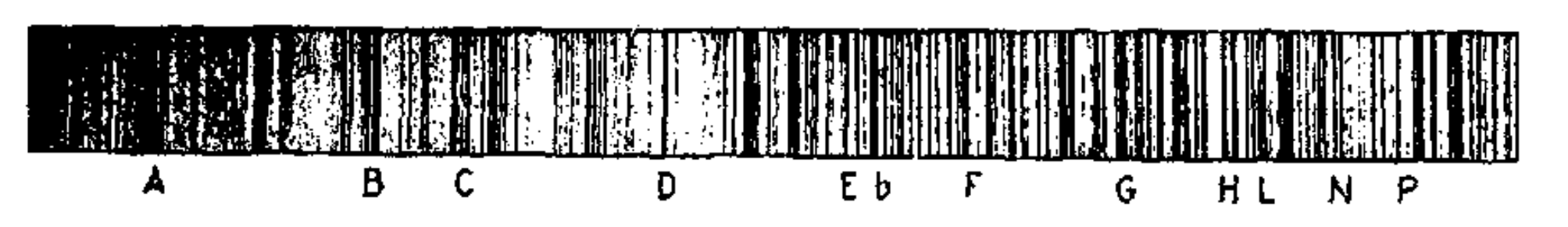


Рис. 1

Пусть рисунок 2 представляет сильно увеличенное поперечное сечение дифракционной решетки, на которую под прямым углом, как это показывают стрелки, падают плоские световые волны. Волновое движение пройдет через щели и продолжит распространяться в виде серии плоских волн, а если их сфокусировать при помощи телескопа, то появится изображение щелевого источника света, как если бы никакой решетки не было вообще (за исключением того, что этот источник будет несколько более тусклым, так как некоторая часть света отсекается

[1] Лорд Рэлей, используя призму из дисульфида углерода, получил результаты, которые обещают гораздо более высокую разрешающую способность.

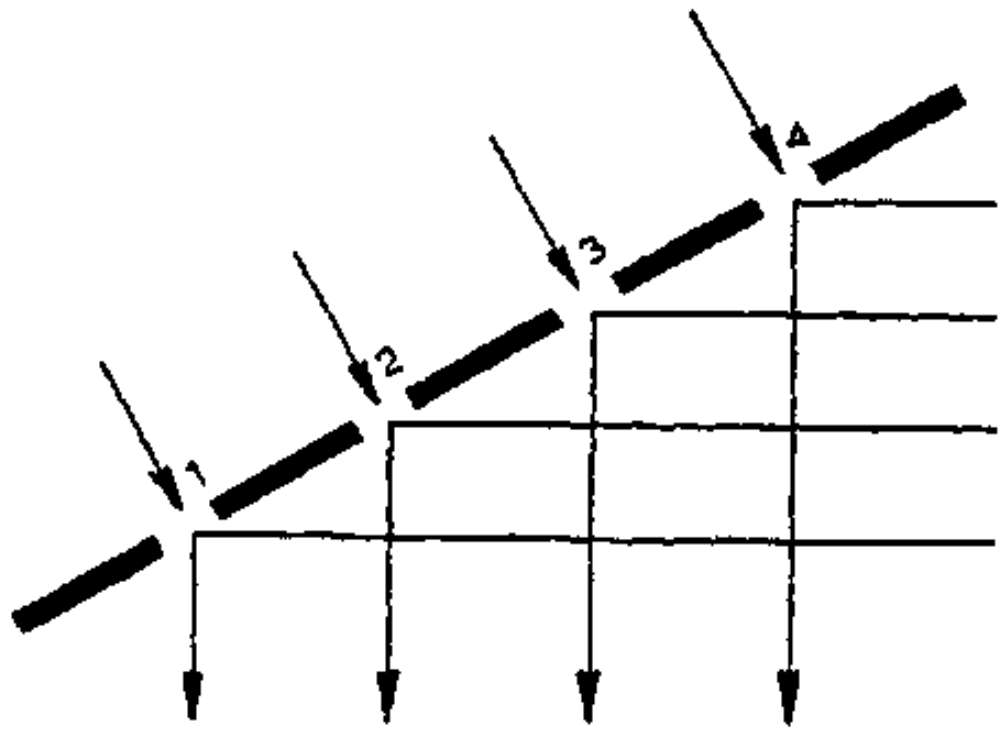


Рис. 2

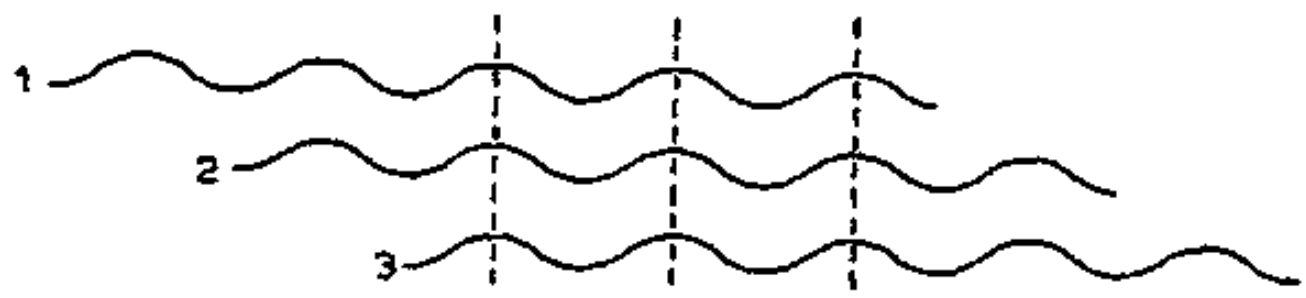


Рис. 3

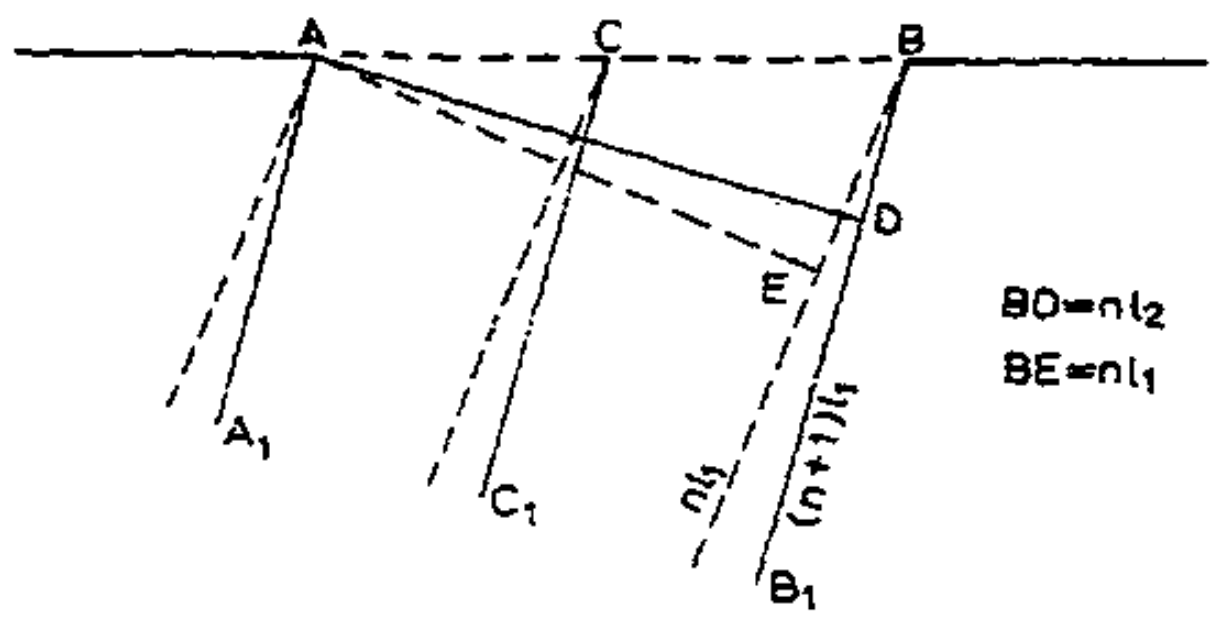


Рис. 4

непрозрачными участками решетки). Это изображение можно рассматривать как созданное сложением всех элементарных волн, выходящих из отдельных щелей, имеющих в точке наблюдения одинаковую фазу и таким образом усиливающих друг друга. Однако это может быть справедливо и при наклонном направлении, если следующие друг за другом волны запаздывают на одну (или любое целое число) длину волны, как

показано на рисунке 3, где изображены последовательные волны из щелей 1, 2, 3..., усиливающие друг друга, словно все они принадлежат одному цугу. Следовательно, в этом направлении также возникнет изображение щелевого источника света, причем само направление определяется отношением

$$\sin\theta = \frac{ml}{s},$$

где l — длина световой волны данного цвета, s — расстояние между щелями (постоянная решетки), а m — количество длин волн, укладывающихся в относительное запаздывание следующих друг за другом лучей (1, 2, 3 и т. д.). Но даже если дифрагированный таким образом свет является абсолютно однородным (т. е. состоит из бесконечного цуга волн с постоянной длиной волны), это не говорит о том, что весь свет дифрагирует в данном направлении; некоторая доля света уйдет в направлениях, немного отличающихся от данного, уменьшаясь, пока предельная разность хода лучей не составит (скажем) $n+1$ волн (вместо n, когда эта разность равна нулю).

На самом деле, если мы разделим сходящийся пучок лучей, имеющий это новое направление, на две равные части AC и CB, луч AA_1 будет на $n+\frac{1}{2}$ волны опережать луч CC_1, и фазы их колебаний окажутся противоположными, вследствие чего произойдет их взаимное гашение. То же самое относится к каждой паре лучей, взятой таким же образом, на всем протяжении решетки, в результате чего в этом направлении будет абсолютная темнота. Допустим, что мы исследуем двойную линию натрия. Разность между ее компонентами составляет около одной тысячной длины волны. С решеткой, имеющей n-линий, в направлении, соответствующем запаздыванию $(n+1)l$, будет абсолютная темнота. Пусть это направление соответствует самой яркой части изображения для второй линии натрия l_2, так что $(n+1)l = nl_2$, или $(l_2 - l) = l/n$. При этих условиях два изображения немедленно «разрешаются». Но для линий натрия $(l_2 - l)/l = 1/1\,000$, откуда $n = 1\,000$. Это значит, что решетка, имеющая тысячу линий, «разложит» линии натрия в спектре первого порядка, или $R = 1\,000$. В спектре второго порядка (где общее запаздывание составляет две длины волны) разрешающая способность в два раза больше или $2n$, а в спектре m-го порядка — в m раз больше. Следовательно, разрешающая способность есть произведение количества линий решетки и порядка спектра, то есть $R = mn$.

Следовательно, чтобы иметь высокую разрешающую способность, решетка должна содержать много линий, и по возможности следует

использовать спектр высокого порядка. Линии не обязательно должны располагаться чрезвычайно близко друг к другу, на практике было установлено, что на одном миллиметре достаточно иметь от 500 до 1 000 линий. Первые решетки были относительно малы и содержали всего несколько тысяч линий. Лучшие из этих решеток были сделаны Нобертом (1851 г.). Очень больших успехов добился Резерфорд из Нью-Йорка, который (в 1868 г.) разлиновал на металлическом зеркале решетки длиной в два дюйма, содержащие около 20 000 линий. По своей разрешающей способности эти решетки превосходили лучшие комбинации призм, которые использовались в то время. Следующее достижение принадлежит Роуланду из университета Джона Хопкинса. Роуланду удалось разлиновать решетки длиной в шесть дюймов (с ходом винта в два или три дюйма), имеющие около ста тысяч линий, благодаря чему он сумел (по крайней мере, теоретически) разложить в спектре двойные линии, расстояние между которыми составляло всего одну сотую от расстояния между линиями натрия. Эта величина является практически пределом разрешающей способности лучшей решетки Роуланда, которую я исследовал.

Разница между теоретической и практически изготовленной решетками вызвана отсутствием абсолютного равенства расстояний между линиями. Это связано с огромной сложностью производства винта, который должен быть совершенным на всей своей длине, — сложность, которая очень быстро возрастает по мере увеличения длины винта, так что многие предполагали, что этими решетками уже достигнут предел точности.

Огромная и быстро растущая важность спектрального анализа, — в частности, для определения распределения света в так называемых спектральных линиях в нормальных условиях, для разрешения сложных систем линий, исследования влияния температуры, давления и, особенно магнитного поля, — требовала применения гораздо бóльших решеток. В качестве примера достигнутых в этом направлении успехов я имею честь представить вам решетку с разлинованной поверхностью длиной в девять дюймов с ходом винта в четыре с половиной дюйма (220 × 110 мм). Эта решетка содержит сто десять тысяч линий и почти совершенна во втором порядке, так что ее разрешающая способность теоретически равна 220 000, причем это число очень близко к реализуемому в эксперименте.

Мы увидим, что эффект, создаваемый в фокусе телескопа, зависит от совпадения или противоположности фаз — в общем, от *интерференции*, — элементарных цугов световых волн. Первым наблюдением подобной интерференции мы опять-таки обязаны гению Ньютона, а срав-

нительно простая модификация знаменитого эксперимента с «кольцами Ньютона» приводит к третьему методу спектрального анализа, который, несмотря на косвенность и неудобство по сравнению с только что описанными методами, является *гораздо более мощным. Если две плоские* поверхности (скажем, внутренние поверхности двух стеклянных пластин) очень аккуратно выровнять до полной параллельности и под почти прямым углом направить на эту комбинацию свет пламени натрия, лучи этого света, отраженные от двух поверхностей, будут интерферировать, показывая серию концентрических колец, причем яркие кольца будут чередоваться с темными, в соответствии с относительным запаздыванием двух отраженных пучков света.

При изменении этого запаздывания (при медленном увеличении расстояния между поверхностями) в центре системы колец будет происходить чередование света и темноты. Количество этих чередований в точности соответствует числу волн, укладывающихся на двойном увеличении расстояния. Значит, длину волн любого монохроматического света можно измерить, сосчитав количество таких чередований на данном расстоянии. Такое измерение длины волны является одной из важнейших целей спектроскопического исследования.

Другой целью такого измерения является установление естественного эталона длины вместо ее произвольного эталона, который сейчас используется, — метра. Первоначально предполагалось, что эталоном должна быть одна десятимиллионная часть четверти меридиана Земли, но оказалось, что результаты измерений различаются настолько, что от этого определения отказались. Подобная судьба постигла предложение выбрать в качестве окончательного эталона длину маятника, совершающего на широте Парижа одно колебание в секунду.

Вскоре после появления превосходных решеток, сделанных Резерфордом, доктор Б. А. Гулд предложил сделать эталоном длину волны света натрия, но эта идея так и не была реализована. Можно показать, что она также не обеспечивает требуемой степени точности, и, действительно, было показано, что многие измерения, сделанные с помощью решетки Роуланда, отличаются примерно на одну тридцати тысячную. Однако современные условия требуют гораздо большей степени точности. Действительно, возможность замены произвольного эталонного метра каким-либо естественным эталоном будет вызывать сомнения, пока не удастся показать, что естественный эталон допускает реализацию в виде материального эталона, который невозможно отличить от оригинала.

Одной из самых серьезных трудностей, с которой сталкиваешься при попытке перенести на практику способ счета чередований света

и темноты в методе интерференции является недостаточная однородность используемого света. Это вызывает нечеткость интерференционных колец на расстоянии, превышающем несколько сантиметров. В этом отношении весьма отличается свет, испущенный различными видами газов и паров металлов, которые светятся в электрическом разряде. Систематическое исследование сорока или более излучений показало, что все они имеют недостатки, так как одни представлены спектром широких туманных «линий», а другие являются двойными, тройными или еще более сложными комплексами линий. Однако оказалось, что красный свет, испускаемый светящимся паром металлического кадмия, почти идеально подходит для этой цели. Тогда именно его и применили для опытов. Результаты трех независимых измерений количества световых волн красного света кадмия в эталонном метре, выполненных в разное время разными наблюдателями, оказались следующими:

I — 1 553 392,4

II — 1 553 393,2

III — 1 553 393,4.

Мы видим, что разность составляет менее одной полумиллионной доли, что не выходит за пределы точности сравнительных измерений материальных эталонов. За последний год подобное измерение осуществили Перо и Фабри, получив результат, не отличающийся от вышеприведенных. Отсюда следует, что теперь у нас есть естественный эталон длины — длина световой волны пара раскаленного кадмия, — с помощью которого можно изготовить материальный эталон, длина которого не будет отличаться от реального эталонного метра, так что, если в результате несчастного случая или с течением времени реальный эталонный метр изменится, потеряется или будет уничтожен, его можно будет заменить настолько точно, что разницу невозможно будет увидеть.

В поисках достаточно однородного излучения для использования его в качестве эталона стало очевидно, что из метода интерференции можно извлечь информацию о распределении света в приблизительно однородном источнике, тогда как все подобные наблюдения лежат за пределами возможностей лучших телескопов. В качестве примера предположим, что этим источником опять является двойное излучение паров натрия. Поскольку длины волн этих излучений отличаются примерно на одну тысячную, то при разности хода, равной пятистам волнам (около 0,36

мм), яркие интерференционные полосы одного цуга волн накроют темные полосы другого, так что если бы оба излучения имели равную интенсивность, то мы не увидели бы никаких следов интерференции. При увеличении этого расстояния в два раза эти следы появились бы, и так продолжалось бы до бесконечности, если бы эти излучения были абсолютно однородными. Но поскольку это не так, то постепенно уменьшалась бы четкость или видимость полос. Наоборот, если такие перемены наблюдаются в реальном эксперименте, мы делаем вывод, что имеем дело с источником двойного излучения. Далее, из расстояния между максимумами четкости мы можем определить (и чрезвычайно точно) отношение длин волн компонент; из отношения максимума к минимуму мы можем вывести отношение их интенсивностей, и, наконец, постепенное снижение четкости при увеличении расстояния дает точную информацию о «ширине» соответствующих спектральных линий.

Таким образом было найдено, что красная линия водорода является двойной, причем ее компоненты расположены на расстоянии, равном одной сороковой расстояния между линиями натрия. Таллий имеет очень яркое зеленое излучение, которое также является двойным, расстояние между его компонентами приблизительно равно одной шестидесятой расстояния между линиями натрия. Ртуть показывает ярко-зеленую линию, которая весьма сложна, но основным ее компонентом является дублет, линии которого отстоят друг от друга на расстояние, равное лишь семи сотым расстояния между линиями натрия. Интерференционные полосы по-прежнему видимы, даже когда разность хода составляет порядка пятисот миллиметров, что соответствует более чем миллиону световых волн; а соответствующая ширина спектральной линии составила бы менее тысячной доли расстояния между линиями натрия.

На рисунке 5 изображен реально используемый аппарат. Обычный призменный спектроскоп дает предварительное разложение света источника. Это разложение необходимо, потому что спектры большинства веществ состоят из множества линий. Например, спектр ртути содержит две желтые линии, одну очень яркую зеленую линию и менее яркую фиолетовую линию, так что если весь этот свет пропустить в интерферометр, то получится комбинация всех четырех цветов. Обычно лучше разделять различные излучения прежде, чем они попадут в интерферометр. Таким образом, свет из вакуумной трубки в *a* проходит через обыкновенный спектроскоп *b c*, а свет, соответствующий только одной из линий спектра, полученного таким образом, проходит через щель *d* в интерферометр.

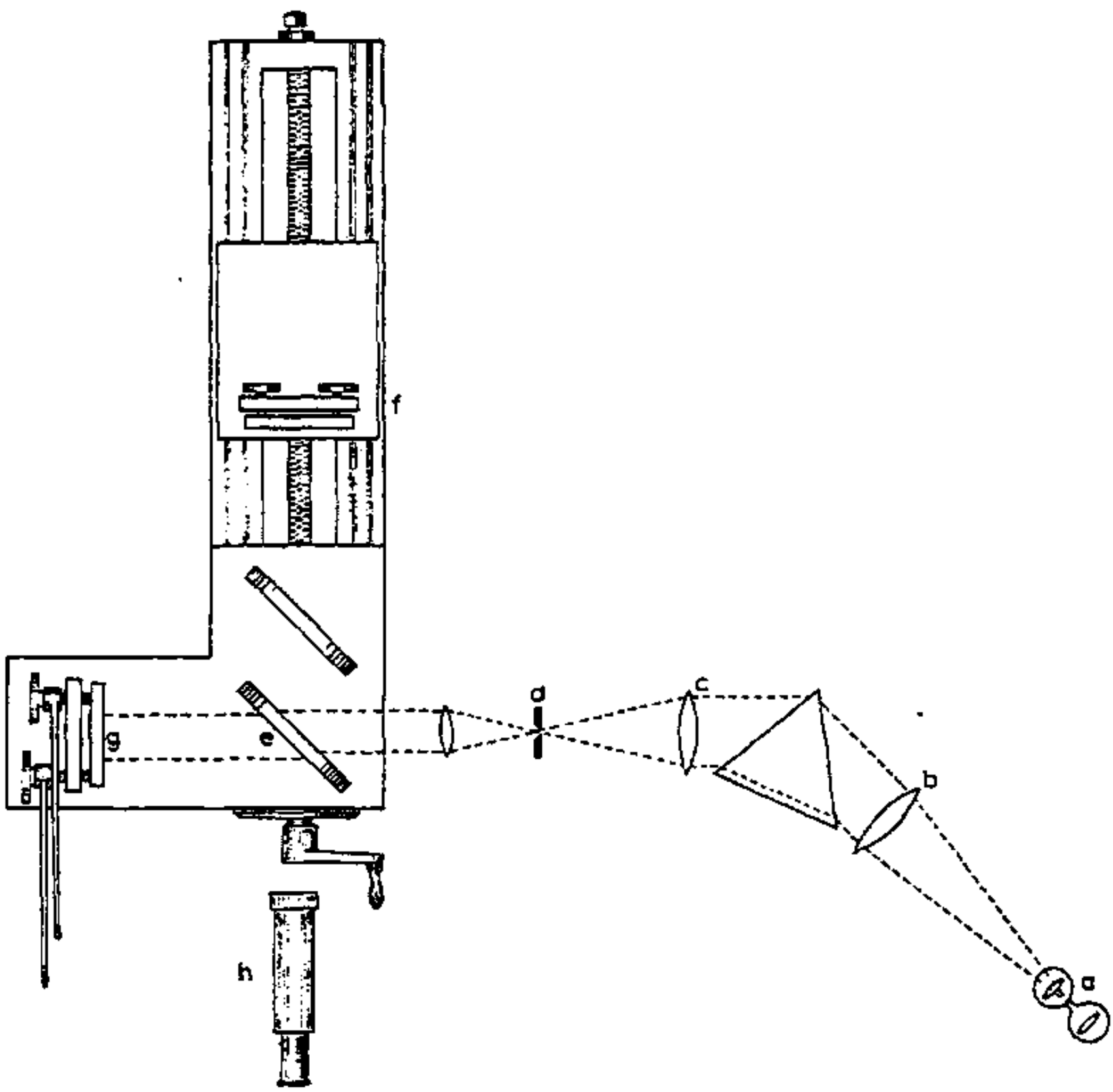


Рис. 5

Как уже объяснялось выше, свет разделяется на пластине *e*, одна его часть попадает на подвижное зеркало *f*, а другая проходит через пластину *e* к зеркалу *g*. Первый луч возвращается по траектории *f e h*. Второй возвращается в *e*, отражается и попадает в телескоп *h*.

Разрешающая способность интерферометра измеряется количеством световых волн в разности хода двух интерферирующих пучков лучей, и, поскольку эта разность не ограничена, интерферометр является самым мощным средством исследования спектральных линий или их групп. Однако его использование несколько затруднено тем, что исследование отдельной группы линий может потребовать значительного количества наблюдений, на что требуется определенное время, в течение которого может оказаться трудным предотвратить изменения в источнике све-

та. Тем не менее, с его помощью можно исследовать замечательное открытие Зеемана — влияние магнитного поля на характер излучения из источника, подвергнутого его воздействию; полученные таким образом результаты с тех пор были подтверждены изобретенными позднее методами.

Одним из этих методов является применение эшелона. В сущности, эшелон представляет собой дифракционную решетку, в которой высокая разрешающая способность достигается посредством использования спектра очень высокого порядка, в котором сконцентрирован практически весь свет. Количество его составляющих может быть довольно умеренным, поскольку разрешающая способность является произведением количества линий решетки и порядка спектра. Порядок спектра — это количество длин волн в запаздывании на каждом этапе. Это запаздывание (которое должно быть точно постоянным) обеспечивается при падении света на столбик из стеклянных пластин, которые оптически являются плоско параллельными и имеют одинаковую толщину, но каждая последующая немного шире предыдущей, как показано на рис. 6.

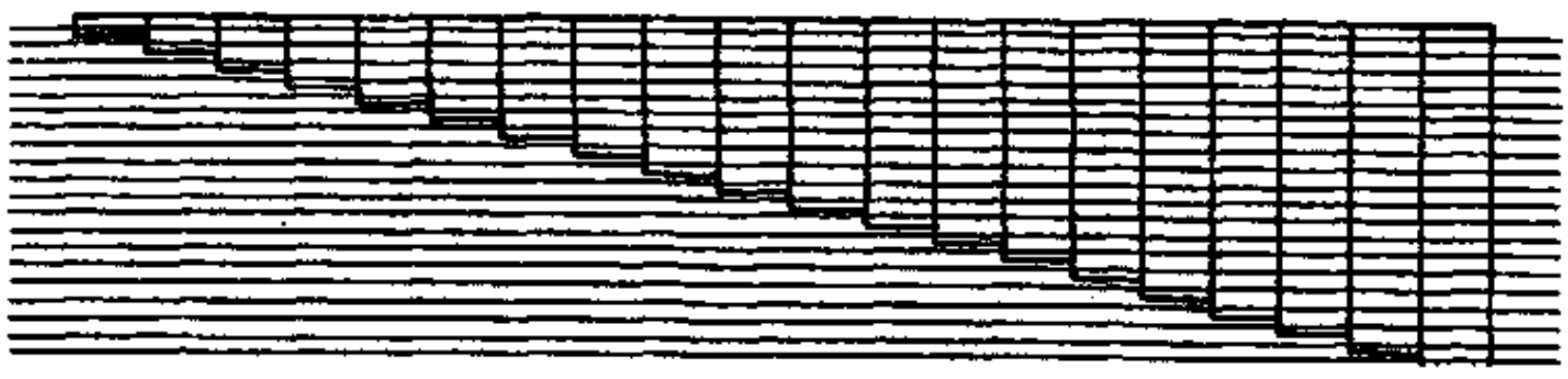


Рис. 6

Таким образом, если бы в этом столбике было сорок пластин, толщиной в один сантиметр каждая, то запаздывание составило бы около десяти тысяч световых волн, а разрешающая способность была бы в сорок раз больше разрешающей способности одной пластины, или четыреста тысяч, что примерно в четыре раза превышает разрешающую способность шестидюймовой дифракционной решетки обычного типа. Количество элементов можно было бы увеличивать до достижения предела поглощения света стеклом. Сложность, которая возникает задолго до достижения этого предела, вызвана потерей света при повторных его отражениях от многих поверхностей. Эту проблему очень оригинально решил мистер Твиман из фирмы «Хильгер энд кампани», который прижал пластины друг к друг так, чтобы возник реальный контакт, при котором отражения не происходит. В этих условиях эшелон, видимо,

можно использовать для отражения вместо прохождения (для этой цели пластинки серебрят), причем для того же количества пластин разрешающая способность увеличивается в четыре раза, а поглощение исключается вообще.

Иллюстрация эффективности эшелонного спектроскопа представлена следующими фотографиями спектра зеленого излучения паров ртути. На первом рисунке изображен спектр второго порядка, полученный с помощью дифракционной решетки, разлинованная поверхность которой равна девяти дюймам с ходом винта четыре с половиной дюйма — это самая большая существующая решетка. Второй спектр получен с помощью эшелона из тридцати пластин, толщиной семь миллиметров, а для третьего рисунка эшелон состоял из сорока пластин, каждая из которых имела толщину в дюйм с четвертью (30 мм). Соответствующие линии на всех трех рисунках обозначены одинаковыми буквами. Масштаб принят в ангстремах. Следует отметить, что на последнем рисунке средняя часть слабой компоненты приблизительно равна одной сотой ангстрема. Предел разрешения инструмента примерно вполовину больше, то есть его разрешающая способность больше миллиона (рис. 7, 8 и 9).

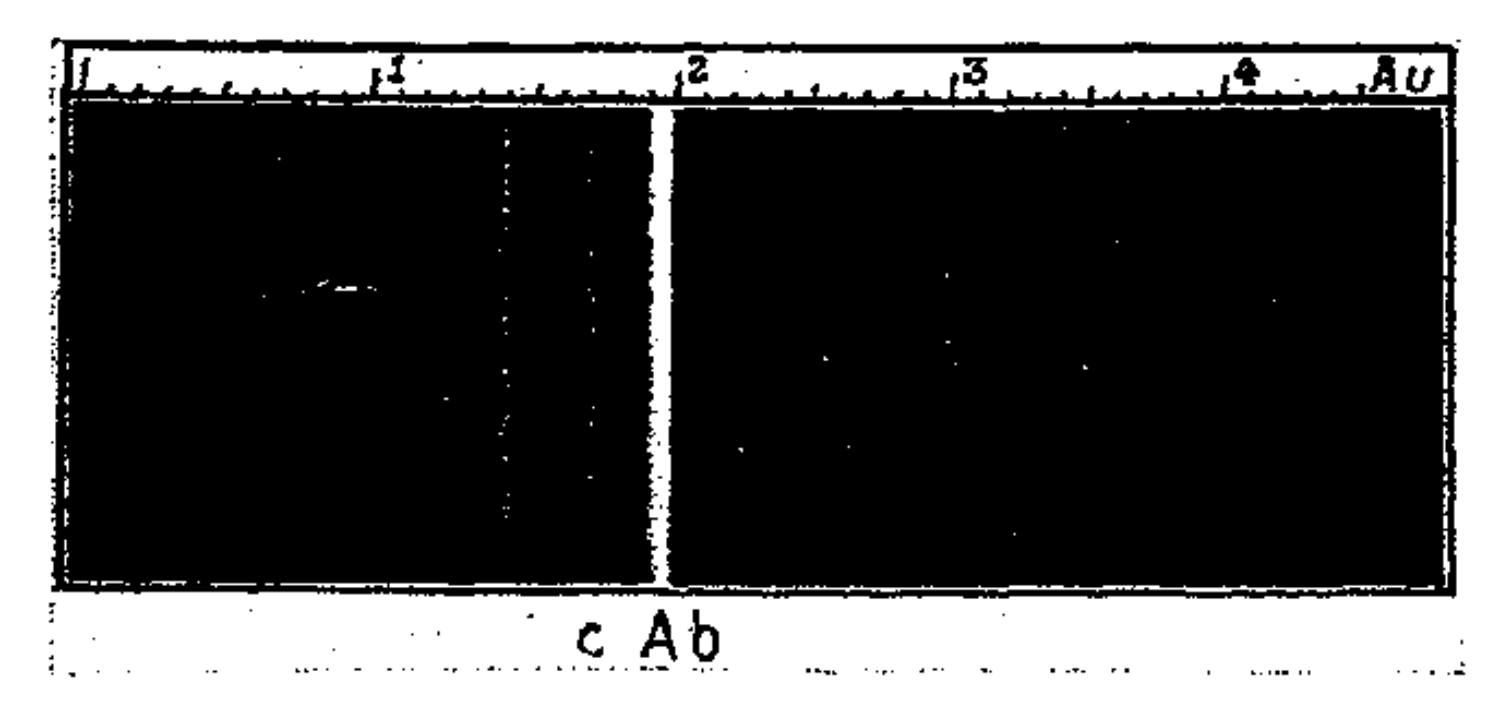


Рис. 7

Мы видим, что спектры, полученные с помощью эшелона, повторяются. Так, A_1 и A_2 представляют собой два последовательных спектра одной и той же линии. Это касается любого спектра, полученного с помощью решетки, а сложности, которые возникают вследствие наложения последовательных порядков спектра, можно преодолеть, разделяя их с помощью призмы, преломляющая кромка которой перпендикулярна линиям решетки. То же самое относится и к спектру, полученному с помощью эшелона — за исключением того, что порядок налагающихся

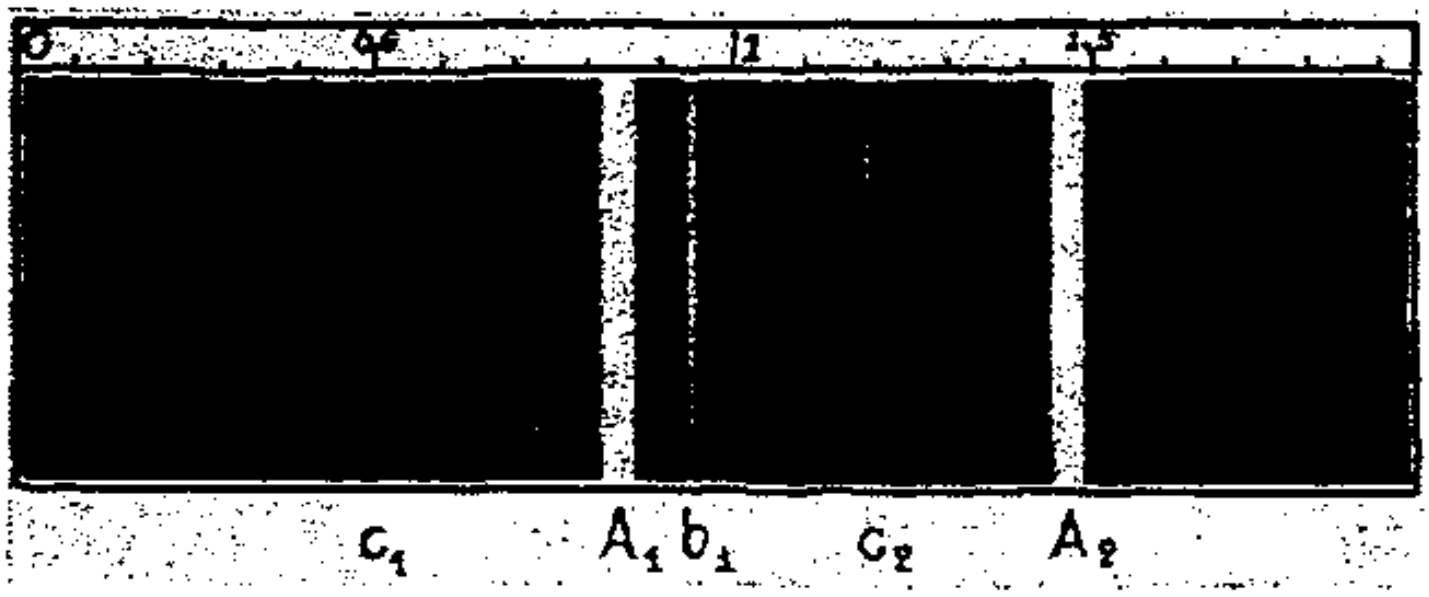


Рис. 8

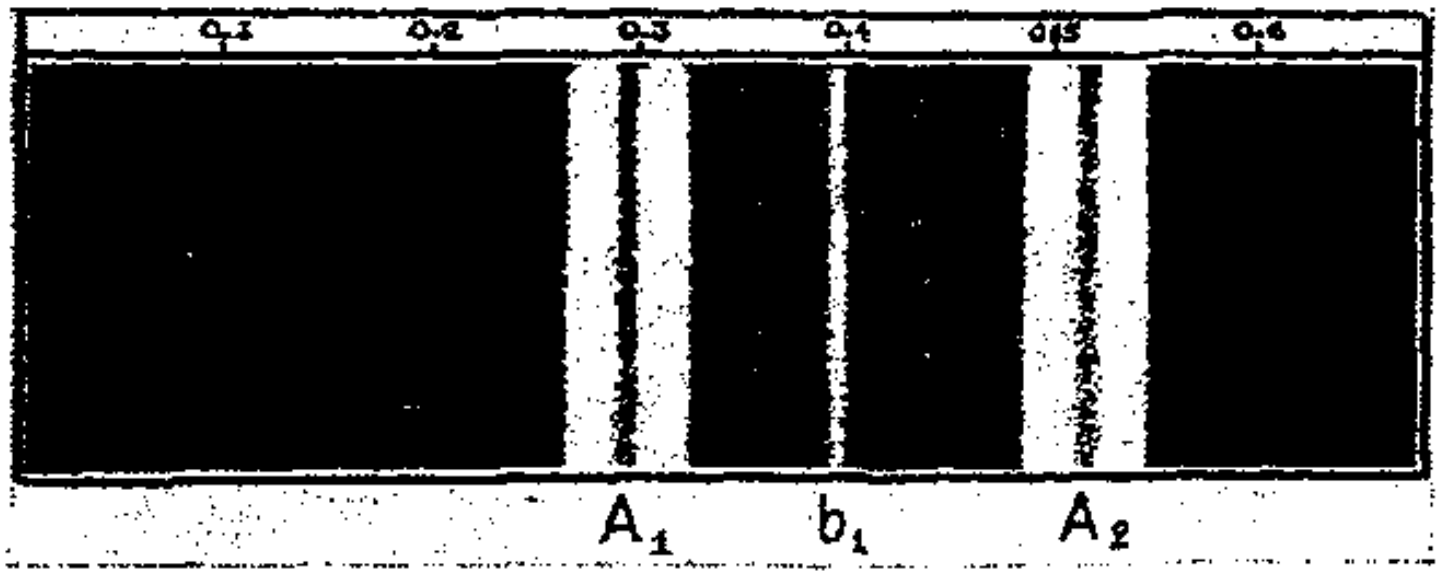


Рис. 9

спектров настолько высок, что призма вряд ли подойдет и необходимо вернуться к решетке, — с его плоскостью дифракции, перпендикулярной плоскости эшелона, как это показано на рис. 10.

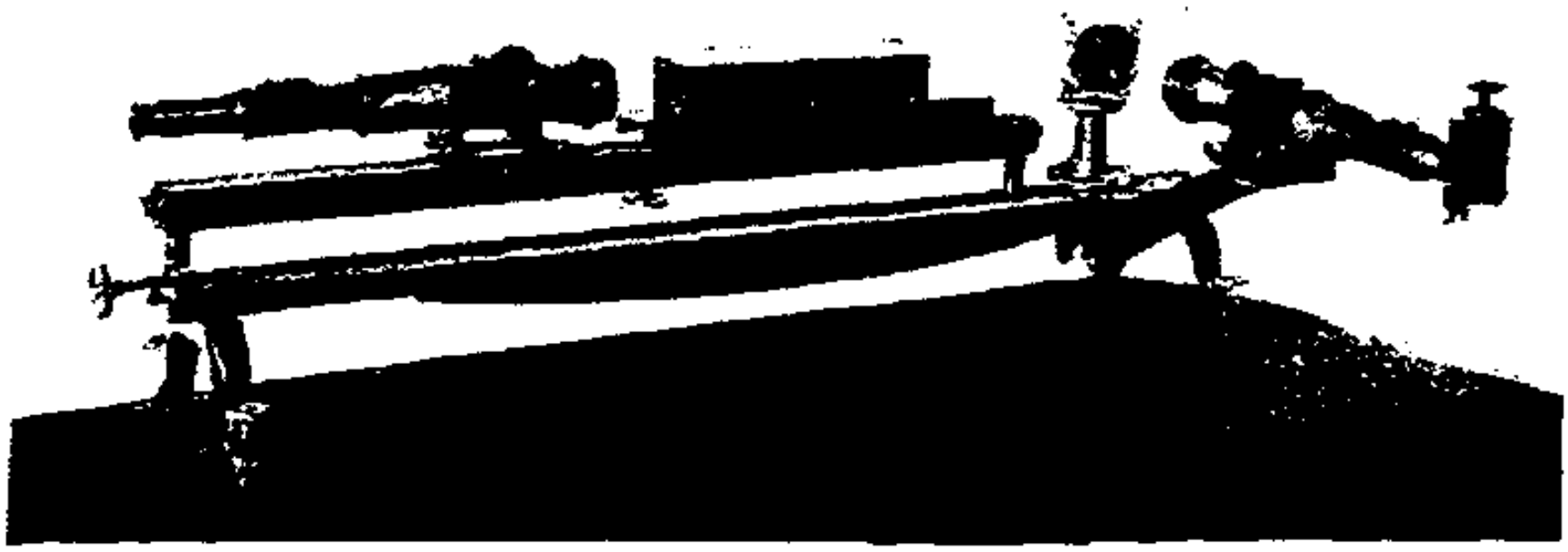


Рис. 10

С помощью этого устройства можно сфотографировать сразу большую часть спектра[1].

На рис. 11 показана такая фотография спектра железа. Можно отметить, что подобная комбинация решетки и эшелона дает возможность наблюдать как спектры поглощения, так и спектры ярких линий.

На рис. 12 приведена сделанная точно так же фотография солнечного спектра. Заметим, что спектральные «линии», как правило, слишком широки, чтобы оправдать использование прибора со столь высокой разрешающей способностью.

Наконец, можно заметить, что эта комбинация дает нам средство для сравнения длин волн спектральных линий с точностью, намного превосходящей точность дифракционной решетки.

Биография

Альберт Абрахам Майкельсон родился в Стрельно, в Пруссии, 19 декабря 1852 года. Два году спустя его семья эмигрировала в Соединенные Штаты и обосновалась в городе Вирджиния, в штате Невада, но впоследствии переехала в Сан-Франциско, где Майкельсон получил начальное образование в бесплатных школах, а в 1869 году был зачислен в среднюю школу. Президент Грант определил его в Военно-морскую академию США, окончив которую в чине лейтенанта в 1873 году и прослужив два года в Вест-Индии, он стал преподавать физику и химию в академии, которой руководил генерал Сэмпсон. В 1879 году его перевели в редакцию «Морского Альманаха», в Вашингтоне, на работу вместе с Саймоном Ньюкомом, но на следующий год он получил отпуск, чтобы продолжить учебу в Европе. Он учился в Берлинском и Гейдельбергском университетах, а также в Коллеж-де-Франс и Политехнической школе в Париже. Он подал в отставку во флоте и в 1883 году вернулся в Америку, чтобы стать профессором физики в Школе прикладных наук в Кливленде, в Огайо. В 1890 году Майкельсон согласился занять подобный пост в университете Кларка в Вустере, в Массачусетсе, а в 1892 году стал профессором физики и первым деканом факультета в новом Чикагском университете. Во время Первой мировой войны он вновь вступил в Военно-морской флот, а в 1918 году вернулся в Чикаго, где в 1925 году его признали первым профессором, отличившимся

[1]Если бы свет подвергся предварительному разложению до его попадания в щель эшелонного спектроскопа, то можно было бы исследовать одну, максимум несколько линий одновременно.

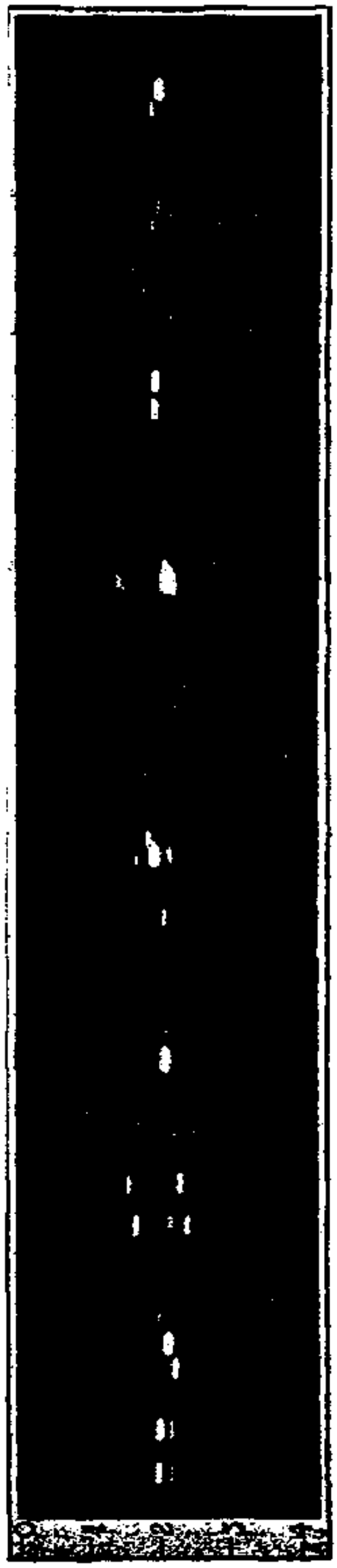


Рис. 11

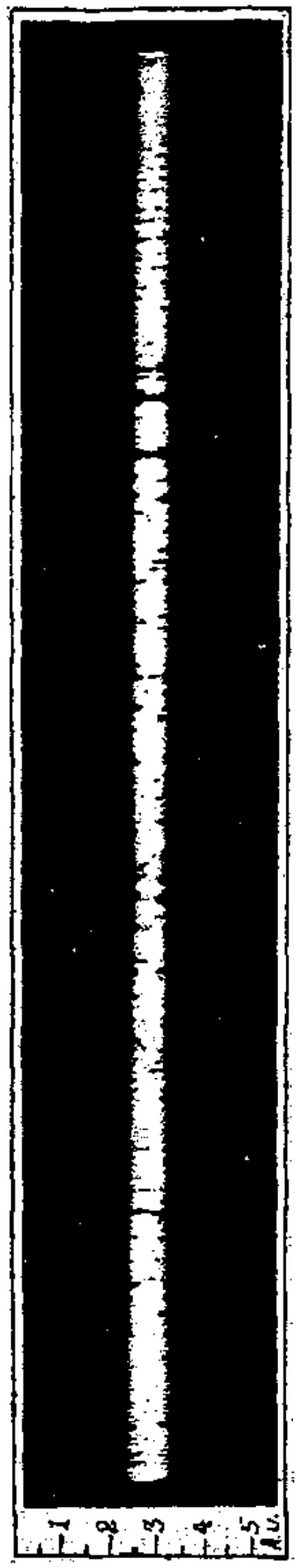


Рис. 12

на службе. В 1929 году Майкельсон вышел в отставку, чтобы работать в Маунт-Вилсоновской обсерватории в Пасадене.

За время своей карьеры Майкельсон затрагивал многие разделы физики, но, быть может, благодаря особому инстинкту, которым он, судя по всему, обладал, он преуспел в оптике. Он выполнил первые измерения скорости света с поразительной точностью, а в 1881 году, стремясь открыть влияние движения Земли на наблюдаемую скорость, изобрел свой интерферометр. Вместе с профессором Морли, используя интерферометр, Майкельсон показал, что свет распространяется с постоянной скоростью во всех внутренних системах отсчета. Этот инструмент также дал возможность измерять расстояния с большей точностью с помощью длины световых волн. По просьбе Международного комитета весов и мер Майкельсон измерил эталонный метр через длину волны света кадмия. Он изобрел эшелонный спектроскоп, а во время войны, когда он служил на флоте, он занимался исследовательской работой по приборам, используемым на кораблях. Он сконструировал дальномер, который был принят в состав оснащения Военно-морского флота США. По возвращении к гражданской жизни Майкельсон заинтересовался астрономией и в 1920 году, с помощью интерференции света и усовершенствованного варианта своего раннего изобретения, он измерил диаметр звезды Бетельгейзе. Это было первое измерение размера звезды, которое можно было считать точным.

Майкельсон написал множество работ для многих научных журналов, причем его самые значительные работы стали классикой: «Скорость света» (*Velocity of Light*, 1902), «Световые волны и их использование» (*Light Waves and their Uses*, 1899–1903) и «Оптические исследования» (*Studies in Optics*, 1927).

Майкельсон был удостоен членства во многих научных обществах по всей Америке и в десяти европейских странах. Он был награжден почетными научными и юридическими степенями десяти американских и иностранных университетов. Он был президентом Американского физического общества (1900 г.), Американской ассоциации продвижения науки (1910–1911) и Национальной академии наук (1923–1927). Он также был членом Королевского астрономического общества, Лондонского Королевского общества, Оптического общества, членом-корреспондентом Французской академии наук. Среди многих полученных им наград — медаль Маттеучи (Итальянского научного общества), 1904 г.; медаль Копли (Королевского общества), 1907 г.; медаль Э. Грессона (института Франклина), 1912 г.; медаль Дрэпера (Национальной академии наук США), 1916 г.; медаль Франклина (института Франклина) и медаль Ко-

ролевского астрономического общества, 1923 г.; медаль Даддела (Физического общества), 1929 г.

Майкельсон женился на Эдне Стэнтон из Лейк-Форест, Иллинойс, в 1899 году. У них родился сын и три дочери. Майкельсон умер в 1941 году.

Габриэль Липман

«за разработку метода цветной фотографии, основанного на явлении интерференции»

ГАБРИЭЛЬ ЛИПМАН

Цветная фотография

Нобелевская лекция, 14 декабря 1908 г.

Проблема прямой цветной фотосъемки стояла перед нами с начала прошлого века. Первое решение, как известно, дал Эдмон Беккерель, хотя оно было несовершенным. Беккерель показал, что цвета изображения темной комнаты отпечатываются на слое фиолетового хлорида серебра. Ценкер объяснил наблюдение Беккереля явлением интерференции. Эксперимент показывает, что это объяснение не верно и что теория Ценкера не подходит для хлорида серебра. Однако отпечатки Беккереля остались тем, чем они и были: незакрепленными и выцветающими на свету. Потом Отто Винер зафиксировал с помощью фотографии снимок интерференционных полос, которые обнаруживаются вблизи серебряного зеркала. Однако этот физик не рассматривал получение цветов с помощью метода интерференции. Но я больше не буду подробно рассказывать о происхождении опытов и идей, предшествовавших методу, о котором сегодня я имею честь вам рассказать и который обеспечивает цветное изображение объектов.

Этот метод очень прост. Пластинка покрывается светочувствительным прозрачным слоем, который наносится равномерно и однородно,

без зернышек. Все это помещается в наполненный ртутью держатель. Соприкасаясь со светочувствительным слоем, ртуть образует зеркало. После экспозиции пластинка проявляется, как обычно. После высыхания пластинки появляются цвета, видимые при отражении и на этот раз закрепленные.

Этот результат получается вследствие явления интерференции, которое происходит внутри светочувствительного слоя. В процессе экспозиции между лучами падающего света и лучами, отраженными зеркалом, происходит интерференция, вследствие чего образуются интерференционные полосы, удаленные друг от друга на расстояние в половину длины волны. Эти полосы отпечатываются на всю толщину пленки и образуют форму для световых лучей. Когда снимок подвергают действию белого света, цвет появляется вследствие селективного отражения. В каждой своей точке пластинка возвращает глазу лишь простой отпечатанный цвет. Другие цвета гасятся при интерференции. Таким образом, в каждой точке глаз воспринимает лишь составляющий цвет изображения. Это всего лишь явление селективного отражения, которое мы наблюдаем в случае с мыльным пузырем или перламутром. Сам отпечаток образуется из бесцветной материи, подобной перламутру или мыльной пленке.

Это объяснение можно проверить с помощью эксперимента, который мы вам покажем. Здесь изображен спектр, спроецированный на экран. Вы видите яркие цвета. Мы смачиваем пластинку и снова проецируем ее на экран. Цвета отсутствуют. Желатин разбух, и промежутки между изображениями интерференционных полос (слоями Ценкера) увеличились в два или три раза. Подождем одну минутку, пока высохнет вода. Мы видим, что цвета появляются вновь в соответствии и со скоростью процесса высыхания. Они вновь появляются в порядке, который можно предсказать. Красный цвет, соответствующий самой большой длине волны, появляется первым, за ним следуют оранжевый, зеленый, голубой и фиолетовый.

Воспроизведение простых цветов спектра было достигнуто проще всего. Фотография составных цветов внешних объектов оказалась более сложной задачей. На первый взгляд ее можно было счесть неразрешимой. Действительно, в случае простого света интерференционные максимумы — это равноудаленные плоскости, разделенные промежутками, равными половине длины волны. В случае составного света для бесконечно слабых максимумов должно быть получено бесконечно много систем и бесконечно много величин промежутков, их разделяющих, то есть эти максимумы непрерывным образом заполняют всю толщину

чувствительного слоя. Промежутки, существующие в случае с простым светом и позволяющие сравнить фотопластинку с рядом тонких слоев, исчезли. Таким образом, возникла необходимость в новой формулировке теории данного явления в более широких пределах. Прежде всего, следует отметить, что амплитуда, являющаяся следствием интерференции, изменяется как непрерывная функция даже в случае простого света. Общий случай был выведен с помощью анализа, основанного на одном из рядов Фурье. Таким образом, можно продемонстрировать возможность фотографии составных цветов.

После того как были оговорены все теоретические условия, оставалось преодолеть еще и технические сложности, касающиеся изохроматизма пленок. Я получил достаточно хорошие результаты, используя белковые пластинки. Позднее Валента в Вене и братья Люмьер в Лионе нашли способ покрытия пластинок беззернистым желатином, благодаря чему они стали достаточно изохроматическими и гораздо лучше белковых пластинок. Доктор Нейгаусс в Берлине довел изохроматизм до совершенства. Благодаря работе господ Мите, Крона, Г. Лемана и других, именами которых я не стану вас отвлекать, цветная фотография была усовершенствована. Позвольте мне показать вам слайды с изображением полученных результатов.

(Ряд слайдов — натюрморты, вазы с цветами, виды Фонтенбло, озера Аннеси, Биаррицы, Церматта, Венеции и детские портреты).

Фотографии, которые вы видите, подвергались экспозиции на солнечном свете в течении примерно минуты. Вся последовательность операций: проявка, промывка, окончательное просушивание, — занимает около четверти часа. Большая часть этих фотографий, сделанных во время поездок, проявлялась на каминной доске в отеле, что доказывает простоту вышеописанного метода.

Тем не менее, некоторые моменты данного метода еще требуют совершенствования. Продолжительность экспозиции (одна минута на солнечном свете) по-прежнему слишком длинна для портрета. Однако в начале моей работы она составляла пятнадцать минут. Прогресс может продолжиться. Жизнь коротка, а прогресс движется медленно.

Биография

Габриэль Липман родился во французской семье, жившей в Холлерихе (Люксембург), 16 августа 1845 года. Затем семья переехала в Париж, и начальное образование мальчик получил дома. В 1858 году он

поступил в Лицей Наполеона (Lycée Napoléon), а десять лет спустя был зачислен в Нормальную школу (École Normale). Его учеба в школе не была особенно успешной, так как он занимался исключительно тем, что его интересовало, и пренебрегал тем, что был ему не по вкусу, вследствие чего не смог сдать экзамен на получение квалификации учителя. В 1873 году его назначили в Правительственную научную миссию, которая отправилась в Германию для изучения методов обучения науке: он работал с Куном и Кирхгофом в Гейдельберге и с Гельмгольцем в Берлине.

В 1878 году Липман начал работать на факультете естественных наук в Париже, а в 1883 году его назначили профессором математической физики. Три года спустя он стал профессором экспериментальной физики, сменив на этом посту Жамена, и был назначен директором исследовательской лаборатории, которую впоследствии перевели в Сорбонну. Этот пост он занимал на протяжении всей жизни.

Липман, человек с оригинальным и свободным мышлением, сделал много ценных и важных вкладов в различные области физики, а особенно в электричество, термодинамику, оптику и фотохимию. В Гейдельберге он изучал связь электрических и капиллярных явлений, что привело к созданию, помимо прочих приборов, чрезвычайно чувствительного капиллярного электрометра.

В 1886 году профессор Липман разработал общую теорию своего процесса фотографического воспроизведения цвета, но ее практическая реализация столкнулась с огромными трудностями. Однако по истечении нескольких лет упорных и искусных экспериментов в 1891 году он смог рассказать об этом процессе Академии наук, несмотря на то, что фотографии имели некоторые недостатки из-за изменяющейся светочувствительности фотопленки. В 1893 году он смог представить Академии фотографии, сделанные Огюстом и Луи Люмьерами. Цвета на этих фотографиях были воспроизведены с идеальным ортохроматизмом. Полную теорию Липман опубликовал в 1894 году.

В 1895 году Липман, используя фотозапись, разработал метод исключения уравнения наблюдателя при измерениях времени и изучил подавление нерегулярностей в маятниковых часах, придумав метод сравнения времени колебания двух маятников, имеющих почти равный период. Он внес свой вклад и в астрономию, так как изобрел целостат — прибор, который делает неподвижным изображение звезды и окружающих ее звезд, что дает возможность сфотографировать их. Он также изобрел еще более хитроумные устройства и усовершенствовал стандартные приборы, использующиеся во многих областях физики.

Его труд зафиксирован, главным образом, в сообщениях Парижской академии наук, где его работы выделяются краткостью и оригинальностью. Его метод воспроизведения цветов в фотографии, основанный на явлении интерференции, в 1908 году принес ему Нобелевскую премию.

В 1883 году профессор Липман стал членом Парижской академии наук, а в 1912 году — ее президентом. Он был членом Совета бюро географических долгот и иностранным членом Лондонского Королевского общества.

В 1888 году Липман женился на дочери писателя В. Шербюлье, члена Французской академии.

Он умер в море 13 июля 1921 года, возвращаясь из поездки в Северную Америку, куда он ездил в качестве члена миссии, возглавляемой маршалом Файоллем.

Гульельмо Маркони
Карл Фердинанд Браун

«в знак признания их вклада в развитие беспроволочной телеграфии»

Гульельмо Маркони

Беспроволочная телеграфная связь

11 декабря 1909 г.

Открытие, связанное с распространением электрических волн на большие расстояния, и практическое применение телеграфии для передачи сообщений через пространство, которым я обязан высокой честью получить часть Нобелевской премии по физике, в большой степени были следствиями друг друга.

Применение электрических волн для беспроволочной телеграфной связи между удаленными друг от друга точками Земли и эксперименты, которые мне, к счастью, удалось провести в бо́льшем масштабе, нежели тот, что позволяет обыкновенная лаборатория, сделали возможным исследование явлений и появление результатов, зачастую новых и неожиданных.

На мой взгляд, многие факты, связанные с передачей электрических волн на большие расстояния, все еще не получили удовлетворительного объяснения, и я надеюсь, что в данной лекции мне удастся рассказать

о некоторых наблюдениях, которые, судя по всему, требуют внимания физиков.

Рассказывая об истории моей связи с радиотелеграфией, я мог бы упомянуть, что никогда не изучал физику или электротехнику на систематической основе, хотя в детстве я весьма серьезно интересовался этими предметами.

Однако я все же прослушал один курс лекций по физике, который вел покойный профессор Роза в Ливорно, так что, по-моему, я могу сказать, что был достаточно хорошо знаком с публикациями того времени, связанными с научными предметами, включая работы Герца, Бранли и Риги.

В начале 1895 года у себя дома, неподалеку от Болоньи, в Италии, я начал проводить исследования и эксперименты, чтобы определить, можно ли с помощью волн Герца передавать телеграфные знаки и символы на расстояние без участия соединяющих проволок.

Проведя несколько предварительных экспериментов с волнами Герца, я очень скоро убедился, что если бы эти или подобные им волны можно было надежно передавать и принимать через значительные расстояния, то в нашем распоряжении появилась бы новая система связи, обладающая огромными преимуществами перед методами, использующими фонари и оптику, успешное использование которых в большой степени зависит от ясности атмосферы.

Свои первые исследования я провел, используя обыкновенный осциллятор Герца, а в качестве детектора — когерер Бранли, но скоро я понял, что когерер Бранли слишком нестабилен и ненадежен для практической работы.

Проведя несколько экспериментов, я обнаружил, что когерер, изображенный на рисунке 1 и состоящий из никелевых и серебряных опилок, помещенных в трубке в небольшой зазор между двумя серебряными пробками, показал себя замечательно чувствительным и надежным. Это усовершенствование вместе с включением когерера в электрическую цепь, настроенную на длину волны передаваемого излучения, позволило мне мало-помалу увеличить примерно до мили расстояние, на котором я мог воздействовать на приемник.

Другая, теперь хорошо известная схема, которую я применил, состояла в подключении когерера в цепь, содержащую гальванический элемент и чувствительное телеграфное реле, возбуждающее другую цепь, состоявшую из телеграфного ключа или тремблера и записывающего устройства. Телеграфный ключ Морзе, помещенный в одну из цепей осциллятора или передатчика, обеспечил возможность излучения длинных

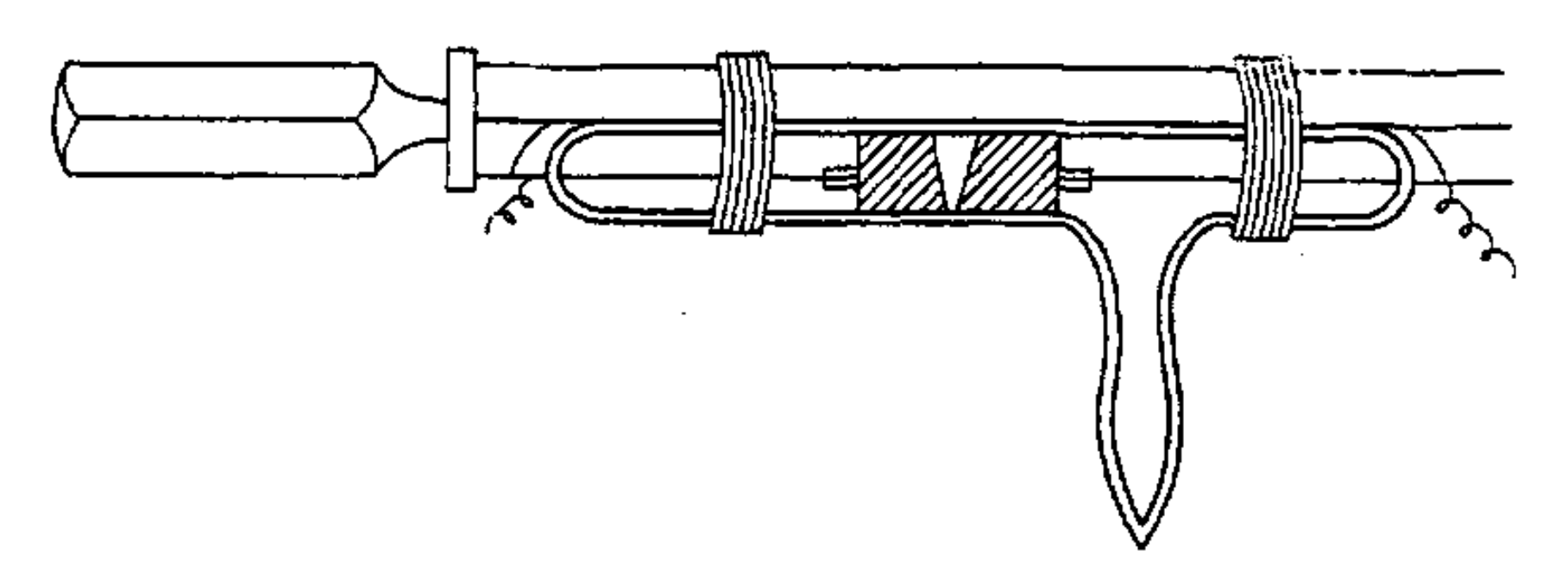


Рис. 1

или коротких последовательностей электрических волн, которые воздействовали на приемник, расположенный на некотором расстоянии, и точно воспроизводили телеграфные знаки, переданные осциллятором через пространство.

С помощью этого устройства мне удалось передать сообщение на расстояние около полумили.

Дальнейшие усовершенствования были сделаны, благодаря использованию отражателей как в цепи передатчиков, так и в цепи приемников, причем передатчиком в этом случае был осциллятор Риги.

Эта схема позволила посылать сигналы в одном определенном направлении, но она не работала, если между передатчиком и приемником встречались холмы или любые большие препятствия.

В августе 1895 года я придумал новое устройство, которое не только намного увеличило расстояние передачи сообщения, но и, судя по всему, обеспечило независимость передачи от влияния встречающихся препятствий.

Это устройство (рис. 2 и 3) заключалось в соединении одного контакта осциллятора Герца, или источника искры, с землей, а другого — с проводом или емкостной площадью, подвешенной высоко над землей, а на приемнике — в соединении одного контакта когерера с землей, а другого — с проводником, поднятым над землей.

Тогда я начал исследовать связь расстояния, на котором передатчик мог воздействовать на приемник, с высотой расположения емкостных площадей над землей, и очень скоро я точно установил, что чем выше располагаются проводники или емкостные площади, тем больше то расстояние, на которое можно передать сообщение.

Таким образом, я обнаружил, что при использовании в качестве поднятых над землей проводников или емкостных элементов оловянных

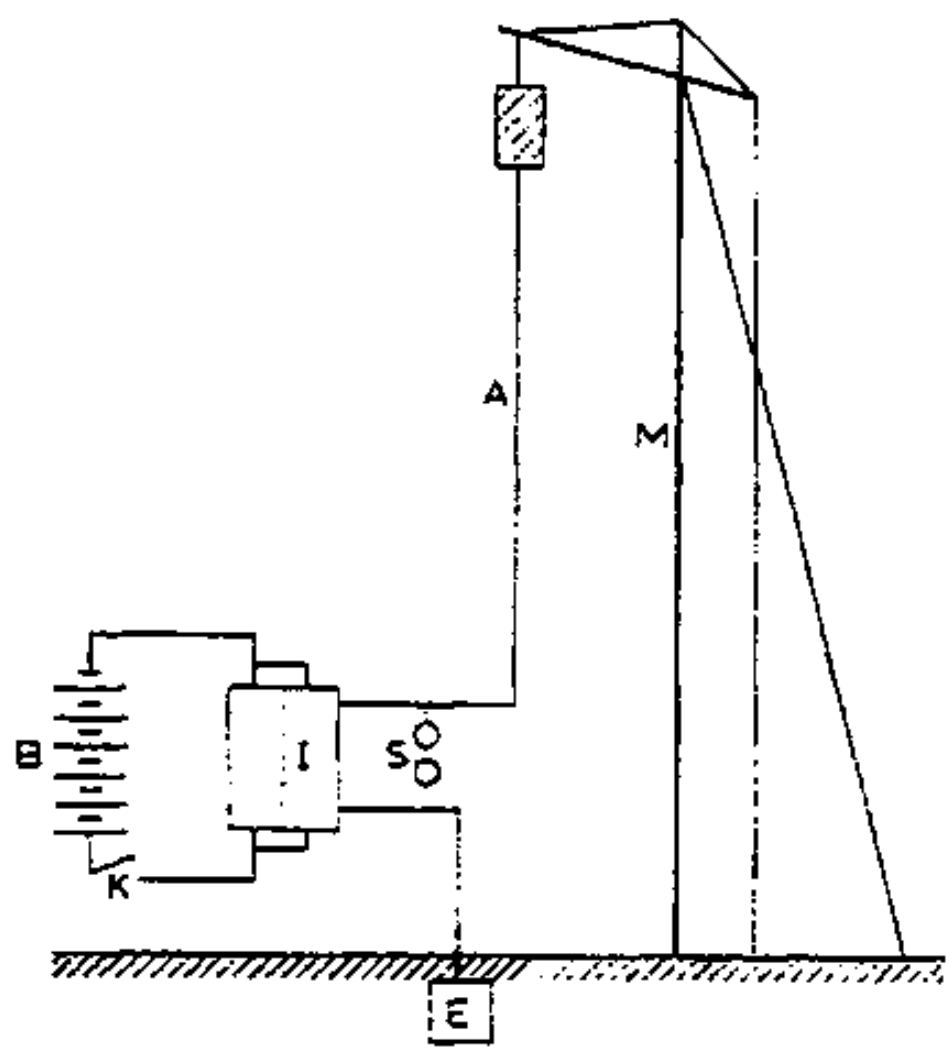


Рис. 2

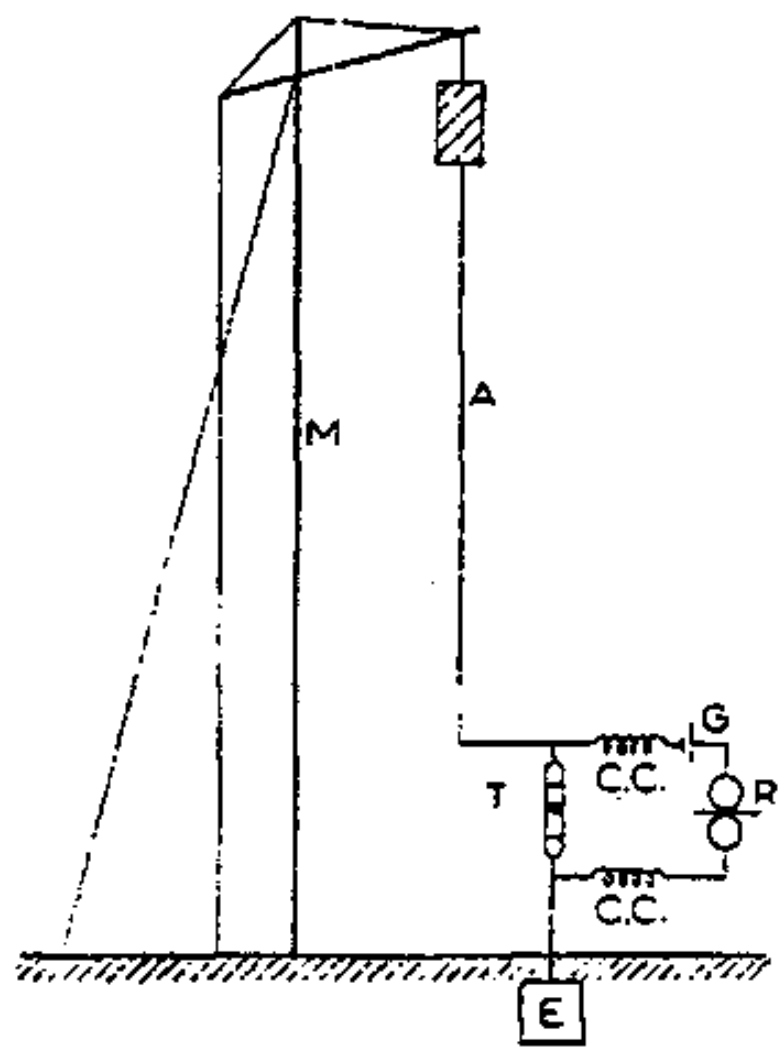


Рис. 3

кубов со стороной, равной примерно 30 см, размещенных на вершине столбов высотой два метра, я могу принимать сигналы на расстоянии 30 метров, при помещении этих же кубов на высоту четырех метров — на расстоянии 100 метров, а при использовании высоты в восемь метров — на расстоянии в 400 метров. При использовании бóльших кубов со стороной 100 см, закрепленных на высоте восьми метров, сигналы удавалось передать на расстояние в 2400 метров в любую сторону[1].

Эти эксперименты были продолжены в Англии, где в сентябре 1896 года во время опытов, проводимых для Британского правительства в Солсбери, было достигнуто расстояние в $1\frac{3}{4}$ мили. В марте 1897 года расстояние, на которое удавалось передать сообщение, увеличилось до четырех миль, а в мае того же года — до девяти миль. Вашему вниманию представлены отпечатанные сообщения, полученные в ходе этих опытов и подписанные присутствовавшими при этом представителями Британского правительства[2].

Во всех этих экспериментах использовалась очень малая электрическая энергия, а ток высокого напряжения создавался обыкновенной катушкой Румкорфа.

Полученные результаты привлекли значительное внимание общественности, так как столь длинные расстояния связи в то время считались поразительными.

Как я уже объяснил, основная особенность моей системы состояла в использовании подвешенных над землей емкостных площадей или антенн, соединенных с одним полюсом высокочастотных осцилляторов и приемников, другой полюс которых был заземлен.

Практическую ценность этого новшества многие физики[3] не понимали в течение довольно длительного времени, и полученные мной результаты некоторые ошибочно рассматривали как вызванные исключительно эффективностью деталей конструкции приемника и использованием большого количества энергии.

Но были и те, кто не пропустил факт введения радикального изменения, когда эти подвешенные над землей емкости и земля были сделаны неотъемлемой частью высокочастотных осцилляторов и приемников.

Профессор Асколи из Рима создал очень интересную теорию способа действия моих передатчиков и приемников в августовском номере *Elettricista (Rome)* за 1897 год, в которой он правильно объяснил полученные результаты использованием подвешенных над Землей проводников или антенн.

Профессор А. Слаби из Шарлоттенбурга, после того как в 1897 году увидел мои эксперименты в Англии, пришел к похожим выводам[4].

Однако многие авторы утверждали, что емкость, расположенная на верхнем конце вертикальной проволоки, не обязательна.

Это действительно так, если длина или высота антенны достаточно велика, но поскольку для передачи на данное расстояние эту высоту можно уменьшить, используя емкостную площадь, то гораздо более экономично использовать такие емкости, которые сейчас обычно состоят из нескольких проволок, расходящихся из вершины вертикального проводника.

Некоторые ученые подвергали сомнению необходимость или полезность связи с землей, но, на мой взгляд, ни одну практическую систему беспроволочной телеграфии невозможно реализовать, если ее составляющие не будут соединены с землей.

Говоря «соединены с землей», я не обязательно имею в виду обыкновенное металлическое соединение, которое используется в обычных проволочных телеграфах.

Проволока заземления может последовательно соединяться с конденсатором или с тем, что действительно эквивалентно заземлению, — емкостной площадью, расположенной у поверхности земли (рис. 4).

В настоящее время хорошо известно, что конденсатор, если он достаточно большой, не препятствует прохождению высокочастотных ко-

лебаний, а потому в этих случаях земля соединяется с антеннами для всех практических целей.

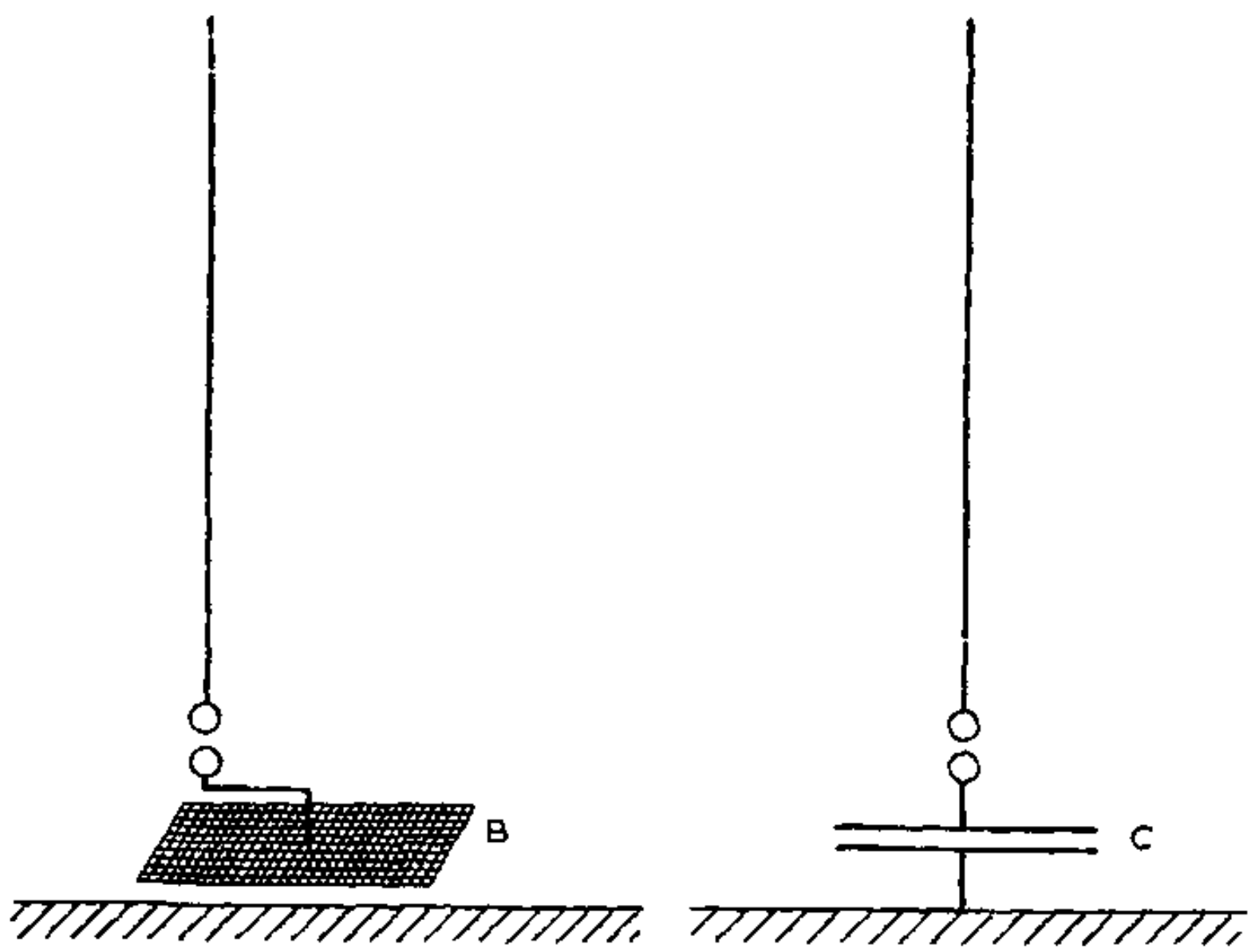


Рис. 4

После многочисленных испытаний и показов в Италии и Англии передачи на расстояния, варьирующиеся до сорока миль, в марте 1899 года впервые удалось установить сообщение между Англией и Францией[5] через *Ла-Манш* (рис. 5).

С самого начала 1898 года я практически отказался от системы связи, изображенной на рисунке 2, и вместо соединения когерера или детектора напрямую с антенной и землей я вставил его между концами вторичной обмотки подходящего трансформатора колебаний, содержащего конденсатор и настроенного на период колебаний принимаемых электрических волн. Первичная обмотка этого трансформатора колебаний была связана с подвешенной антенной и с землей (см. рис. 6).

Это устройство позволяло осуществлять некоторую настройку, так как изменяя период колебаний передающей антенны, можно было посылать сообщения на настроенный приемник, не мешая другим, настроенным иначе[6].

Как это хорошо известно сейчас, передатчик, состоящий из вертикального проводника, разряжающегося через искровой промежуток, не

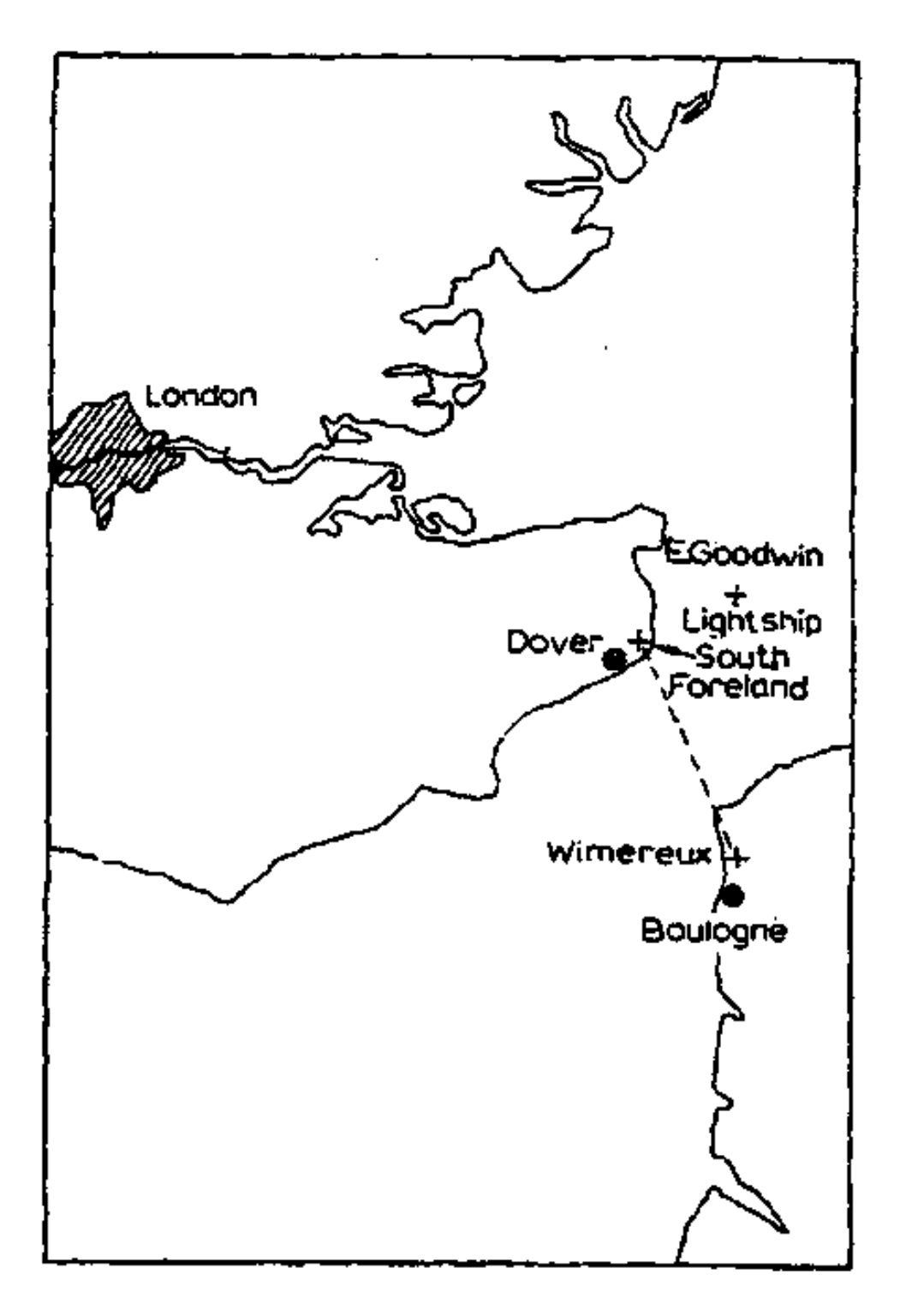


Рис. 5

является особенно устойчивым осциллятором, так как радиоизлучение, которое он создает, в значительной степени затухает. Его электрическая емкость настолько мала, а способность излучения энергии так велика, что колебания очень быстро уменьшаются или затухают. В этом случае приемники или резонаторы значительно отличающегося периода или высоты вряд ли попадут под его воздействие.

В начале 1899 года мне удалось усовершенствовать эффекты резонанса, который возникает при увеличении емкости подвешенных проволок, путем расположения рядом с ними заземленных проводников и последовательного включения в цепь антенн подходящих индукционных катушек[7].

При этом возросла энергонакопительная емкость антенны, а ее способность излучать уменьшилась, в результате чего энергия, приведенная в движение, разрядом, образовала ряд или последовательность слабо затухающих колебаний.

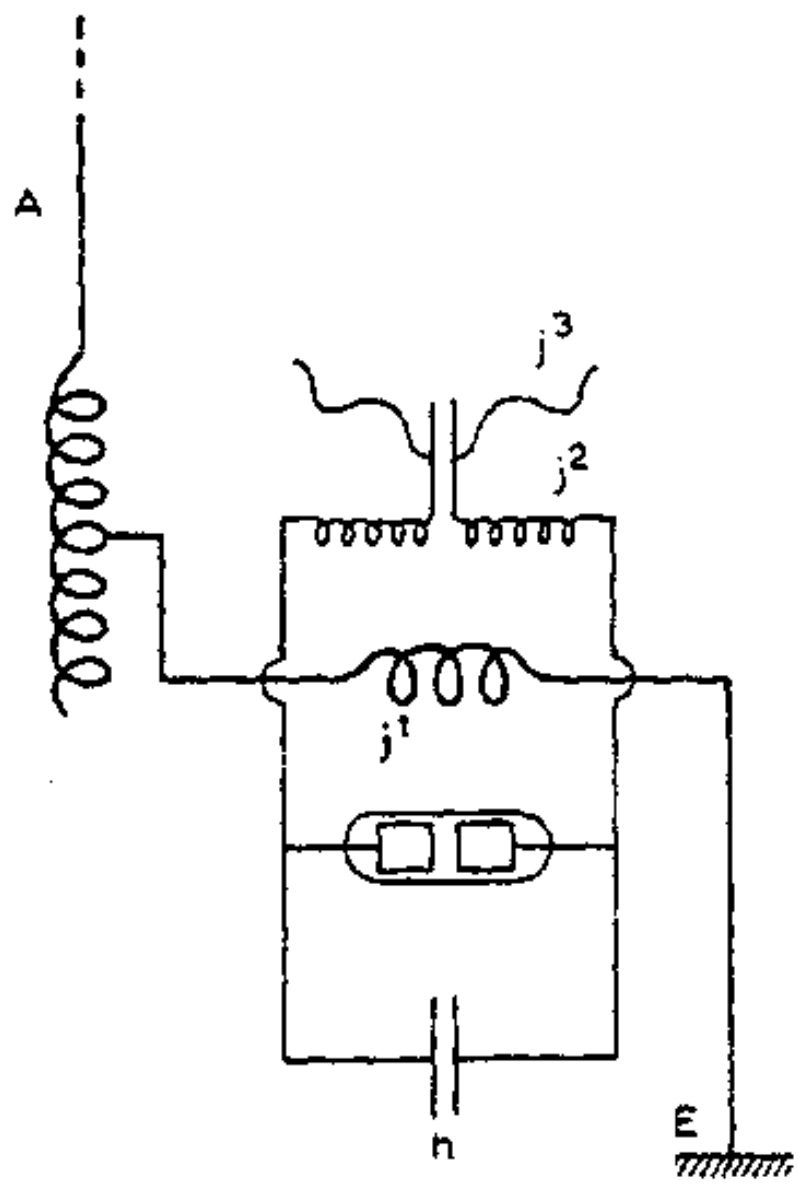


Рис. 6

Модификация этого устройства, с помощью которого были получены отличные результаты, изображена на на рисунке 7.

В 1900 году я сконструировал и запатентовал полную систему передатчиков и приемников[8], которая состояла из обычного типа подвешенной емкостной площади и заземления, но они были индуктивно связаны с колебательным контуром, содержащим конденсатор, катушку индуктивности и искровой разрядник, или детектор. Для эффективности этого устройства я счел необходимыми такие условия: периоды электрических колебаний подвешенной проволоки или проводника должны быть настроены или находиться в резонансе с периодами колебания емкостного контура; а два контура приемника должны находиться в электрическом резонансе с контурами передатчика (рис. 8).

Цепи, состоящие из колебательного контура и излучающего контура, были более или менее тесно «связаны» изменением расстояния между ними. Посредством настройки индуктивности, вставленной в подвешенный проводник, а также изменением емкости контура конденсатора два контура приводились в состояние резонанса — условие, которое, как я уже сказал, я счел необходимым для получения эффективного излучения.

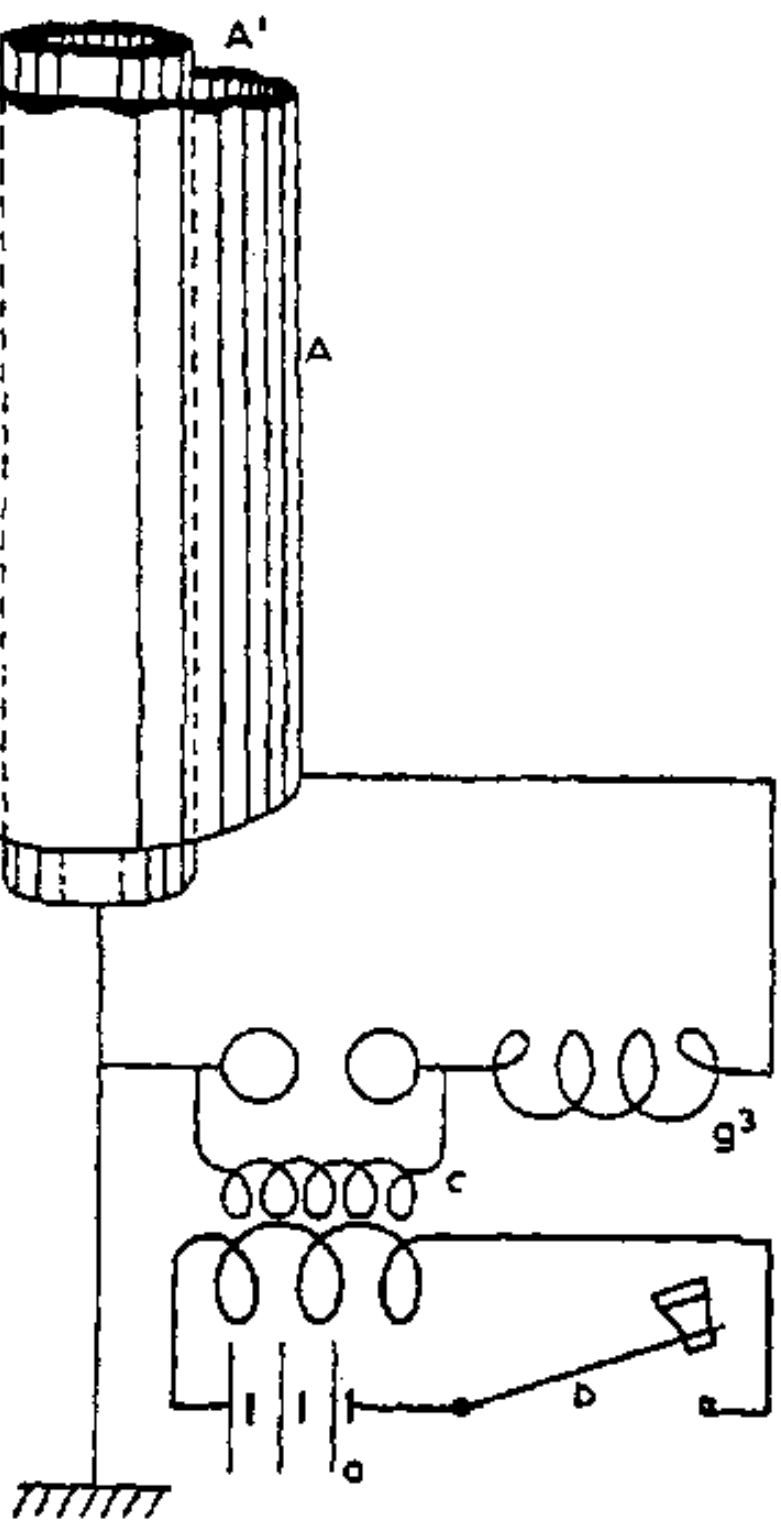


Рис. 7

Та часть моей работы, которая была связана с использованием емкостных контуров, соединенных с излучающими антеннами, проводилась одновременно с работой профессора Брауна, хотя ни один из нас в то время ничего не знал об аналогичной работе другого.

Настраиваемый приемник уже был показан на рис. 6 и состоит из вертикального проводника или антенны, соединенной с землей через первичную обмотку трансформатора колебаний, вторичная обмотка которого включает конденсатор и детектор, причем необходимо, чтобы контур, содержащий антенну, и контур, содержащий детектор, находились в электрическом резонансе друг с другом и также были настроены на период электрических волн, передаваемых со станции.

Таким образом удалось использовать слабо затухающие электрические волны и заставить приемник усилить действие сравнительно слабых, но должным образом синхронизированных электрических колебаний так, как это происходит в акустике, когда два камертона, настроен-

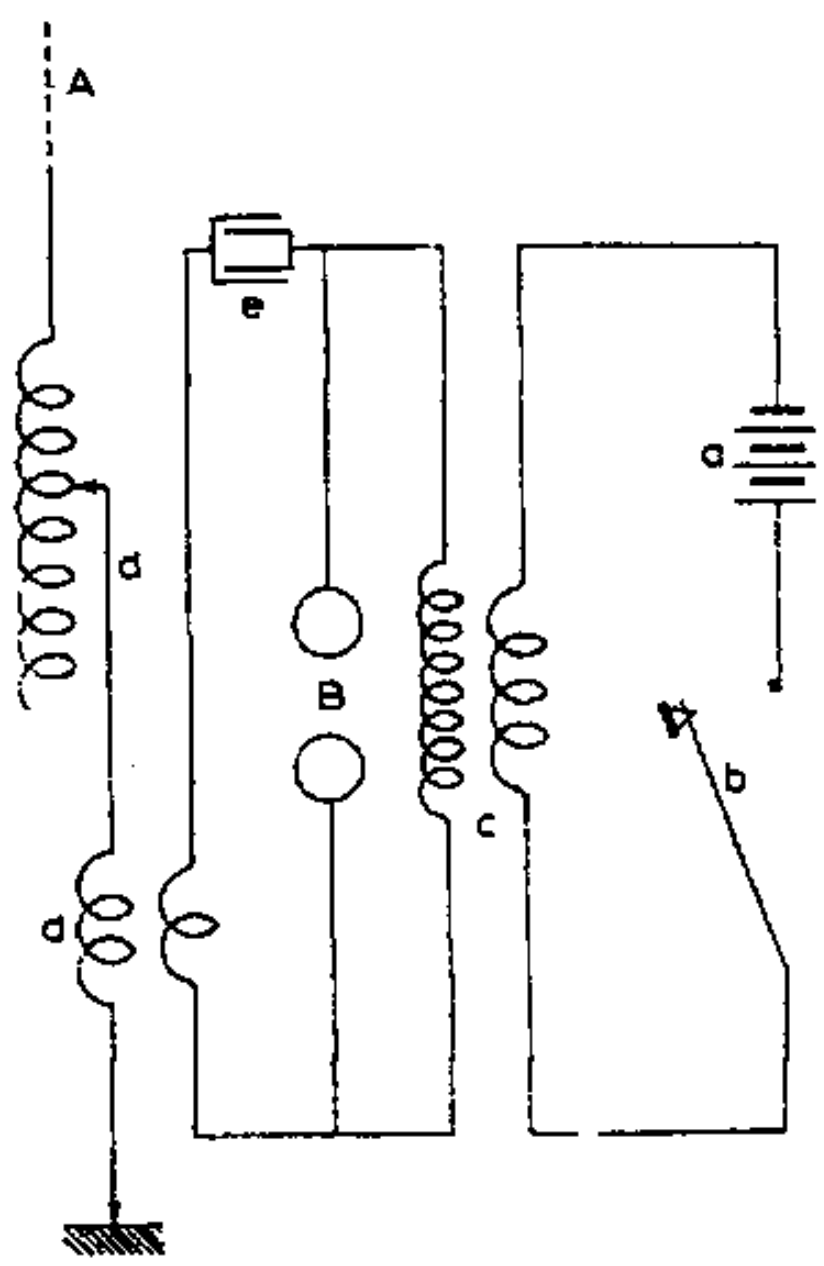


Рис. 8

ные на один период колебаний, начинают воздействовать друг на друга на коротком расстоянии.

Можно также присоединить к одному передающему проводнику несколько по-разному настроенных передатчиков, а к принимающей антенне несколько различных приемников, как это показано на рис. 9 и 10. Тогда каждый индивидуальный приемник будет реагировать только на излучения передатчика, с которым он находится в резонансе[9].

В то время (двенадцать лет назад), когда с помощью телеграфии впервые была установлена связь между Англией и Францией, имело место множество дискуссий и размышлений о том, можно ли применить беспроволочную телеграфию для более длинных расстояний, чем эти. Тогда превалировало отчасти общее мнение, что кривизна Земли стала бы непреодолимым препятствием для передачи сообщений на большие расстояния точно так же, как она препятствовала и продолжает препятствовать передаче на значительные расстояния сигнала, посланного с помощью световой вспышки.

Кроме того, некоторые сложности ожидались в отношении возможности управления большим количеством энергии, которое, как казалось, будет необходимо для передачи сигнала на большие расстояния.

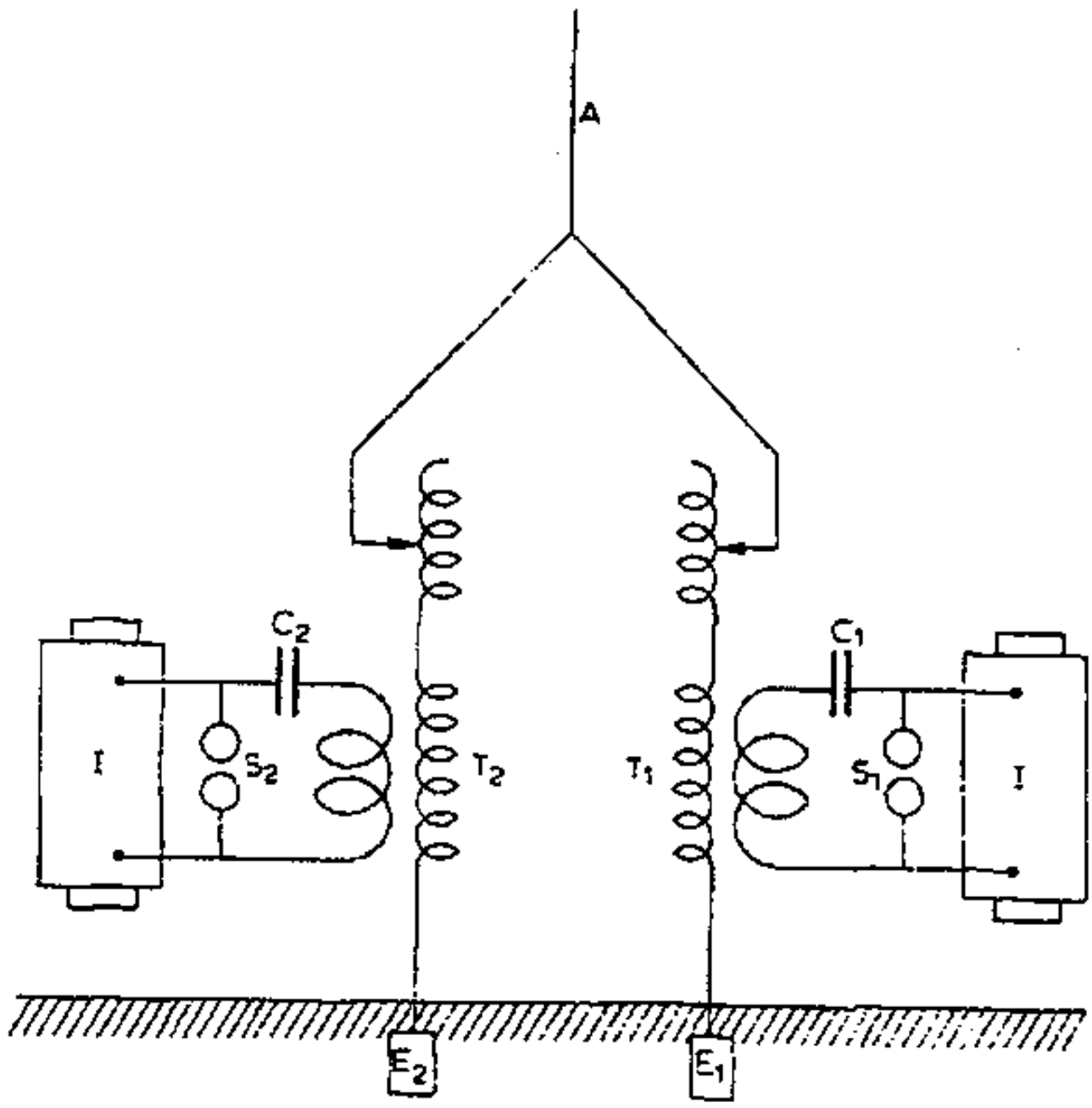


Рис. 9

Однако в случае радиотелеграфии повторилось то, что нередко случается в новаторской работе: ожидаемые препятствия или трудности были либо абсолютно мнимыми, либо вообще легко преодолимыми, но их место занимали неожиданные помехи, вследствие чего в последнее время работа была направлена, главным образом, на решения проблем, вызванных трудностями, которых, конечно, никто не ожидал и не предсказывал при первой попытке передать сообщение на большое расстояние.

Что касается предполагаемого препятствия, вызванного кривизной Земли, я полагаю, что те, кто предвидел трудности, которые могут возникнуть из-за формы нашей планеты, в недостаточной степени учли конкретное влияние связи Земли с передатчиком и приемником, а эта связь с Землей вводит эффекты проводимости, на которые в то время никто не обратил внимания.

Судя по всему, в течение длительного времени физики считали, что беспроволочная телеграфия зависит только от эффектов свободного излучения волн Герца и их распространении в пространстве, поэтому лишь через многие годы начали должным образом рассматривать или

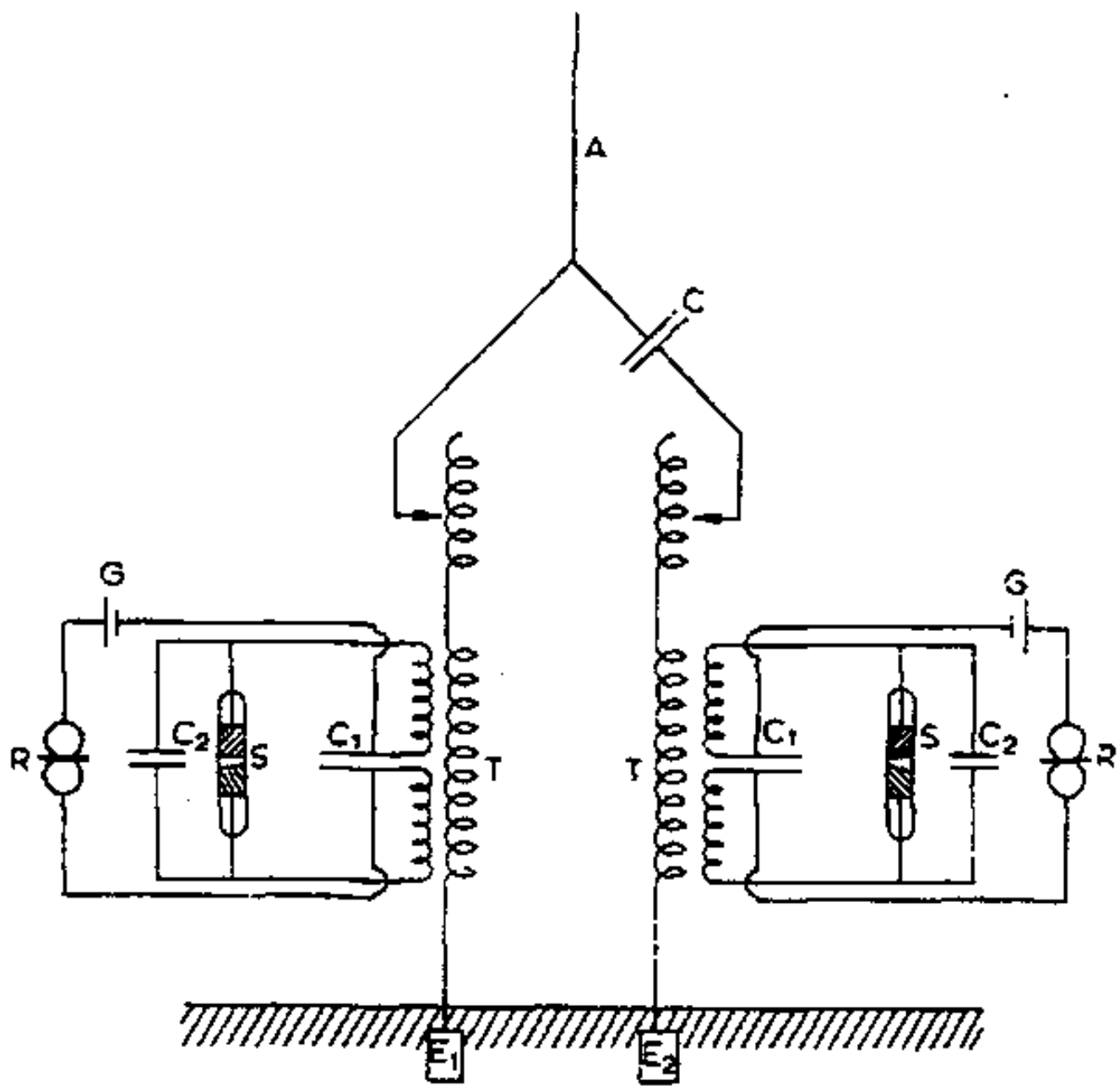


Рис. 10

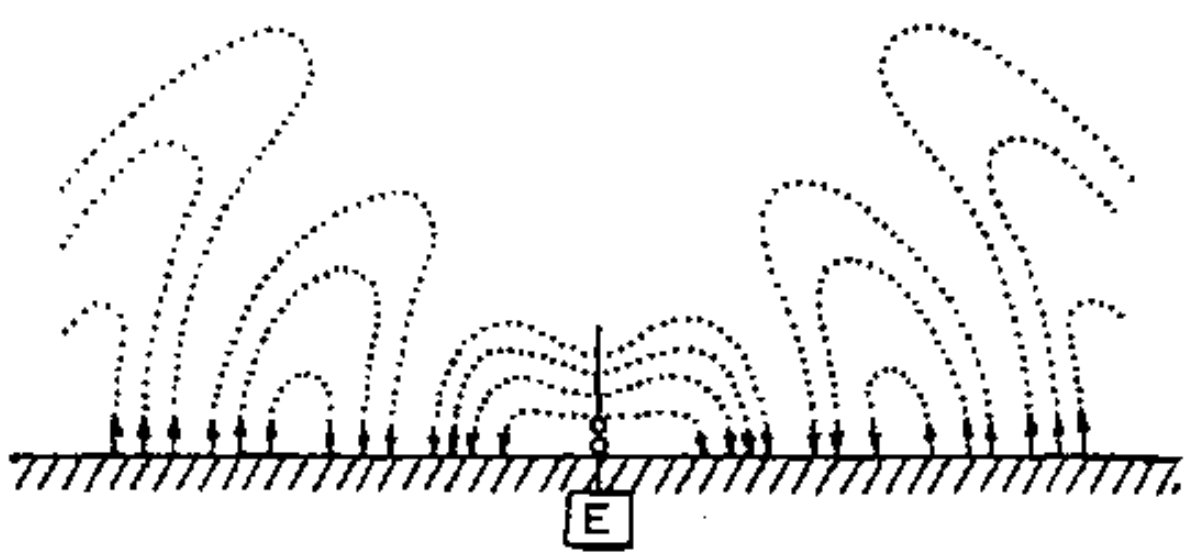


Рис. 11

обсуждать вероятное воздействие проводимости Земли между радиостанциями.

Говоря от трансатлантической телеграфии, Лорд Рэлей в мае 1903 года сказал: «Замечательный успех Маркони при передаче сигнала через Атлантический океан говорит о более явном изгибании или дифракии вокруг Земли, нежели можно было ожидать, что придает огромный интерес теоретической проблеме»[10].

Профессор Дж. А. Флеминг, в своей книге «Принципы электроволновой телеграфии» (*The Principles of Electric Wave Telegraphy*)[11] приводит диаграммы, изображающие то, что сейчас считается диаграммным представлением отделения полупетель электрического напряжения от простого вертикального проводника (рис. 11). Как мы увидим, эти волны не распространяются так же, как это делает свободное излучение классического осциллятора Герца, а скользят вдоль поверхности Земли.

Далее в вышепроцитированной работе профессор Флеминг утверждает: «В данном случае мы придерживаемся такого мнения, что концы полупетель электрической силы, которые располагаются перпендикулярно Земле, не могут двигаться вдоль нее, пока в самой Земле не возникнет движение электронов, соответствующее движению волн над ней. С точки зрения электронной теории электричества, каждая электрическая силовая линия в эфире должна быть либо замкнутой линией, либо ее концы должны заканчиваться на электронах противоположного знака. Если конец линии напряжения упирается в Землю и движется, то между атомами должен происходит обмен электронами, или электроны должны двигаться в линии. Имеется много причин, чтобы заключить, что вещества, которые мы называем проводниками, — это вещества, в которых может происходить свободное движение электронов. Следовательно, движению полупетель электрической силы наружу от заземленного осциллятора или антенны Маркони препятствует плохая проводимость поверхности Земли и способствует поверхность достаточно хорошего электролита, например, морской воды».

Профессор Ценнек[12] тщательно исследовал эффект заземленных передающих и принимающих антенн и попытался математически показать, что, когда электрические силовые линии, составляющие волновой фронт, проходят вдоль поверхности, имеющей низкую диэлектрическую проницаемость, каковой является Земля, они наклоняются вперед, так что их нижние концы запаздывают из-за сопротивления проводника, с которым они связаны.

Следовательно, мы, судя по всему, установили, что действие беспроволочной телеграфии, как она практикуется в настоящее время, на большие расстояния зависит от проводимости Земли и что разности проводимости поверхности моря и поверхности суши достаточно, чтобы объяснить увеличение расстояния передачи сообщения, которого можно достичь с одинаковым количеством энергии при связи над морем по сравнению со связью над сушей.

В 1902 году в Пуле, в Англии, я провел несколько экспериментов между радиостанцией, находящейся на берегу, и кораблем, чтобы по-

лучить некоторые данные по этому вопросу, и заметил, что на равных расстояниях ощутимое снижение энергии принимаемых волн происходило всегда, когда корабль располагался так, что между ним и станцией на суше находилась отмель шириной порядка одного километра.

Поэтому я считаю, что не было безосновательным столь часто критикуемое заявление, которое я сделал в своем первом английском патенте от 2 июня 1896 года в отношении того эффекта, что при передаче через землю или через воду я соединял один конец передатчика и один конец приемника с землей.

В январе 1901 года были проведены несколько успешных экспериментов[13] между двумя точками Южного побережья Англии, отстоящими друг от друга на расстояние 186 миль, а именно: мысом св. Катерины (о-в Уайт) и мысом Лизард (п-ов Корнуолл) (рис. 12).

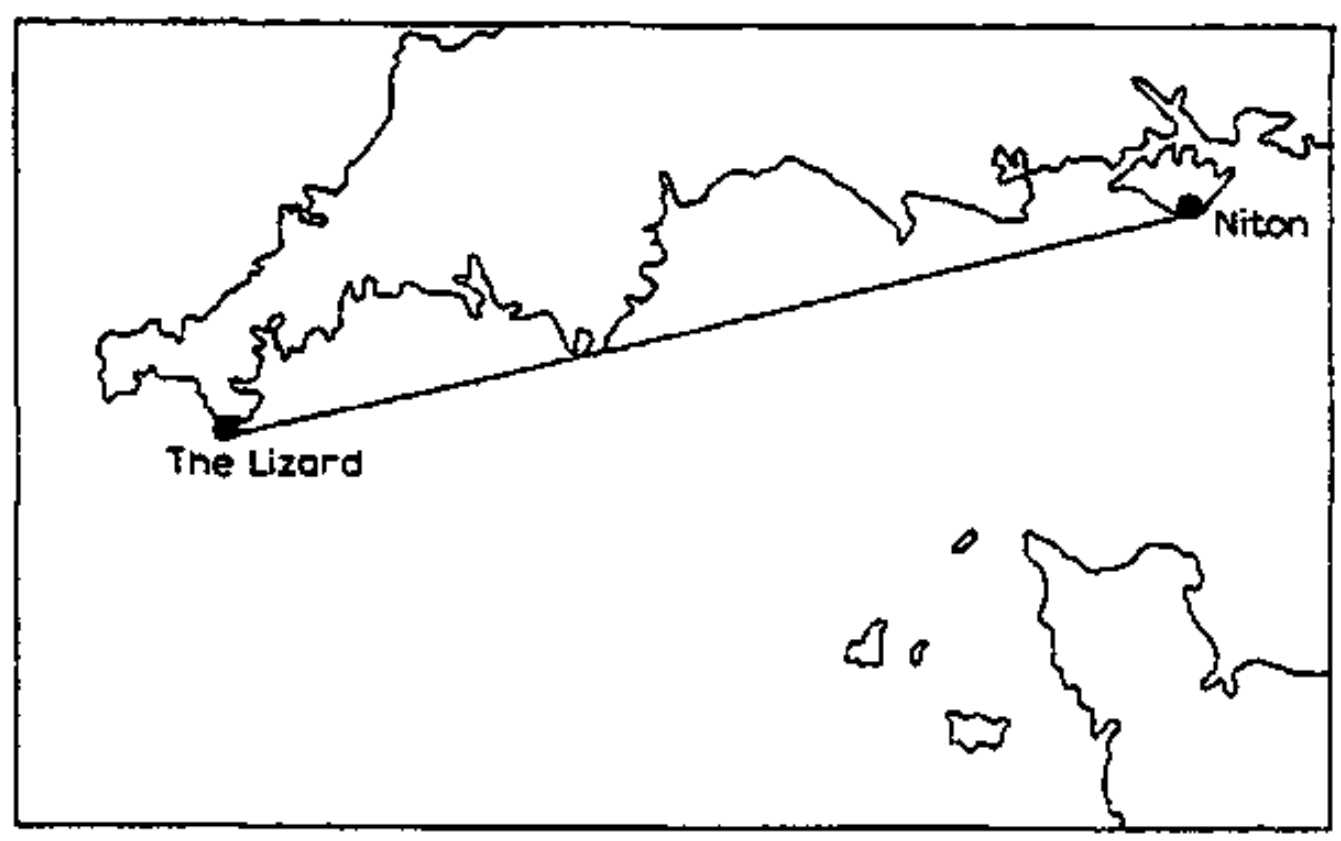


Рис. 12

Общая высота этих станций над уровнем моря не превышала ста метров, тогда как для того чтобы освободиться от влияния кривизны Земли, понадобилась бы высота более 1 600 метров на каждом конце.

Результаты этих опытов, проведенные на рекордном для того времени расстоянии, судя по всему, указывали на то, что электрические волны, созданные принятым мной способом, скорее всего, могут огибать Землю и что даже на таких больших расстояниях, как те, которые разделяют Америку и Европу, фактор кривизны Земли не является непреодолимым препятствием для распространения телеграфии в пространстве.

Убежденность в том, что кривизна Земли не помешает распространению волн, и успешное предотвращение взаимных помех, достигнутое с помощью синтонических методов, привели к тому, что в 1900 году

я решил попытаться провести эксперимент с целью проверки, можно ли обнаружить электрические волны на расстоянии 4 000 километров, который, в случае успеха, немедленно доказал бы возможность беспроволочной телеграфии между Европой и Америкой.

На мой взгляд, этот эксперимент имел огромную важность для науки, и я был убежден, что открытие возможности передачи электрических волн через Атлантический океан, а также точное знание реальных условий применения телеграфии на такие расстояния во многом усовершенствовали бы наше понимание явлений, связанных с беспроволочной передачей.

Передатчик, установленный в Полду, на побережье Корнуолла, в принципе, был аналогичен тому, о котором я уже рассказывал, но по своим размерам он намного превышал передатчики, которые использовались когда-либо ранее[14].

Мощность генераторной установки составляла примерно 25 киловатт.

Впервые получить электрические колебания такой мощности и управлять ими было не просто. В своей работе я получил ценную помощь от профессора Дж. А. Флеминга, мистера Р. Н. Вивиана и мистера В. С. Энтвистла.

Мои предыдущие опыты убедили меня в том, что при попытке увеличения расстояния связи недостаточно было просто увеличить мощность электрической энергии передатчика, нужно было также увеличить площадь или высоту передающих и принимающих проводников.

Поскольку использовать очень длинные вертикальные проводники было бы слишком дорого, я решил увеличить их количество и емкость, что, как мне казалось, должно обеспечить эффективное использование больших количеств энергии.

Передающая антенна, которая использовалась в Полду, показана на рис. 13. Она состояла из проводников, расположенных в виде веера на изолированной опоре между мачтами, высота которых составляла всего 48 метров, а расстояние между ними было всего 60 метров. Эти проводники сходились внизу и соединялись с передающим аппаратом, находящимся в здании.

Для этого эксперимента неподалеку от Нью-Йорка, на мысе Код была возведена мощная станция, но завершение оборудования этой станции было отложено из-за шторма, который уничтожил мачты и антенны.

Тогда я решил провести эксперименты с помощью временной станции, построенной на о-ве Ньюфаундленд, куда примерно в конце ноября 1901 года я и отправился с двумя своими ассистентами.

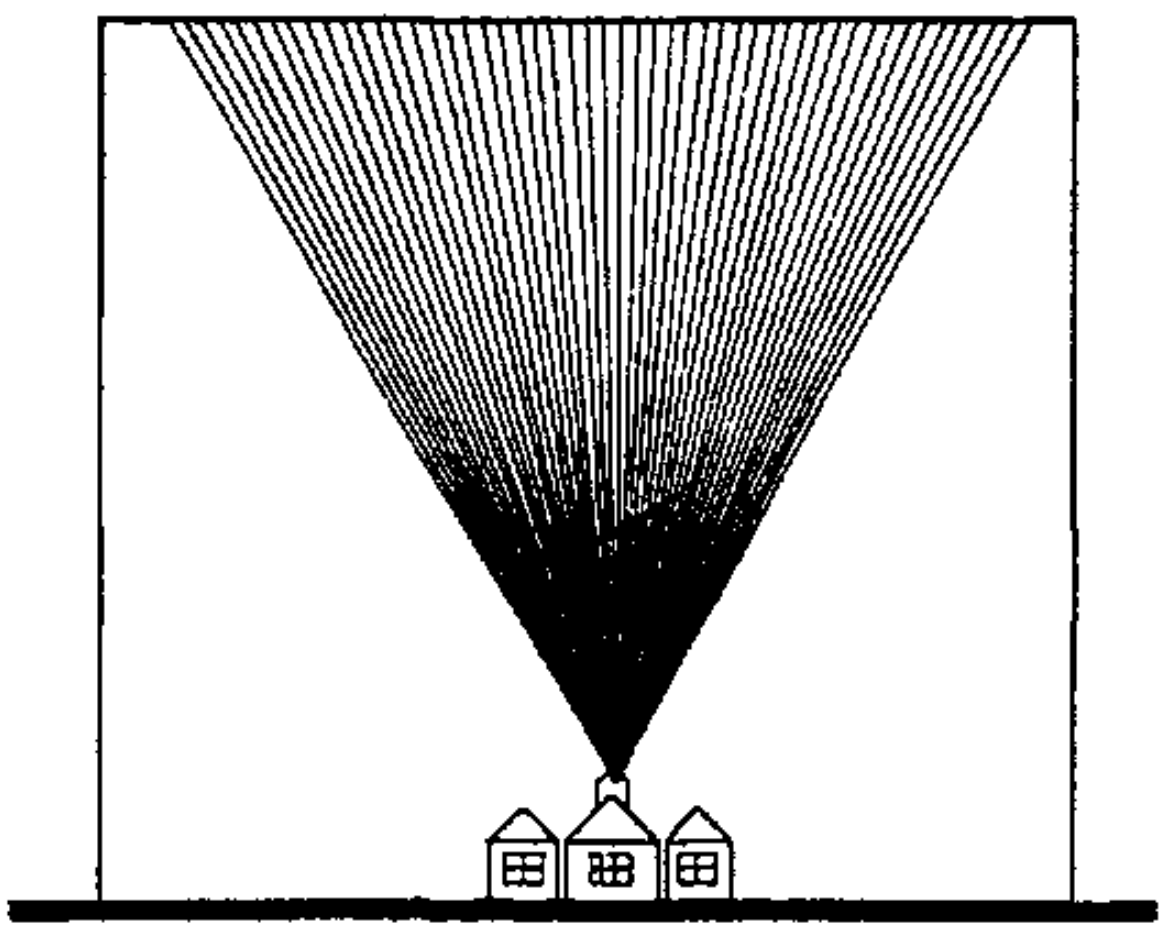


Рис. 13

Опыты начались в самом начале декабря 1901 года, и 12 числа этого месяца сигналы, переданные из Англии, были ясно и четко приняты на временной станции, находящейся в Сент-Джонсе (Ньюфаундленд).

Подтверждающие опыты были проведены в феврале 1902 года, когда передача производилась между Полду и принимающей станцией, расположенной на пароходе «Филадельфия» Американской пароходной линии. На борту этого корабля с помощью записывающего устройства были приняты читаемые сообщения, переданные на расстояние в 1551 милю, а контрольные буквы на расстояние до до 2099 миль от Полду (рис. 14).

Ленты с записью, полученные на «Филадельфии» на различных расстояниях от Полду, были чрезвычайно ясными и четкими, как это можно увидеть на представленных образцах.

Этих результатов, достигнутых с несовершенной аппаратурой, оказалось достаточно, чтобы я и мои ассистенты убедились, что с помощью постоянных станций и при использовании достаточной мощности можно было бы передавать сообщения через Атлантический океан точно так же, как мы передавали их на более короткие расстояния.

Опыты невозможно было продолжать в Ньюфаундленде по причине враждебности кабельной компании, которая заявила о своих правах в этой колонии на любую телеграфию, в том числе и беспроволочную.

Интересный, с точки зрения науки, результат, который я впервые заметил во время опытов на пароходе «Филадельфия» и который является

самым важным фактором для радиотелеграфии на большие расстояния, состоял в очень выраженном отрицательном воздействии дневного света на распространение электрических волн на большие расстояния: ночью эти волны могли распространяться на расстояние, более чем в два раза превышающее расстояние, которого можно было достичь днем[15].

Я думаю, что это воздействие до сих пор не получило удовлетворительного исследования или объяснения. Когда я проводил опыты, я полагал, что оно может происходить вследствие потери энергии на передатчике, вызванной разрядкой под действием солнечного света сильно заряженного передающего подвешенного проводника.

Теперь же я склоняюсь к тому, что поглощение электрических волн в дневное время суток вызвано электронами, которые посылает в пространство Солнце. И если они согласно гипотезе профессора Аррениуса непрерывно «орошают» Землю, значит часть атмосферы Земли, обращенная к Солнцу, будет содержать больше электронов, нежели оставшаяся ее часть, вследствие чего она может оказаться менее проницаемой для электрических волн.

Сэр Дж. Дж. Томсон показал в очень интересной работе, опубликованной в *Philosophical Magazine*, что если электроны распределены в пространстве, через которое проходят электрические волны, то последние будут стремиться двигать электроны в направлении волны, вследствие чего часть энергии волны будет поглощаться. Значит, как подчеркнул в своих Канторовских лекциях, прочитанных в Обществе искусств, профессор Флеминг, среда, в которой присутствуют электроны или ионы, действует по отношению к длинным электрическим волнам как несколько замутненная[16].

Ясно, что и длина волны, и амплитуда электрических колебаний весьма сильно связаны с этим интересным явлением, причем длинные волны небольшой амплитуды подвержены влиянию дневного света в гораздо меньшей степени, нежели короткие волны большой амплитуды.

Согласно профессору Флемингу[17] действие дневного света должно быть более выраженным по отношению к длинным волнам, однако мой собственный опыт убеждает меня в обратном. Действительно, в ходе некоторых недавних экспериментов, где использовались волны длиной порядка 8000 метров, энергия, которая получалась днем, обычно превышала энергию, полученную ночью.

Однако остается еще и тот факт, что яркий солнечный свет и чистое небо, которое превосходно пропускает свет, действуют как своего рода туман на сравнительно короткие волны, подобные тем, что используются для связи между кораблями. Следовательно, погодные условия,

преобладающие в Англии и, быть может, в этой стране[1], в большинстве случаев подходят для беспроволочной телеграфии.

В течение 1902 года я провел еще несколько экспериментов по передаче сообщений между станцией в Полду и принимающей установкой, расположенной на итальянском крейсере «Карло Альберто», любезно предоставленном в мое распоряжение Его Величеством, королем Италии (см. рис. 15[18]).

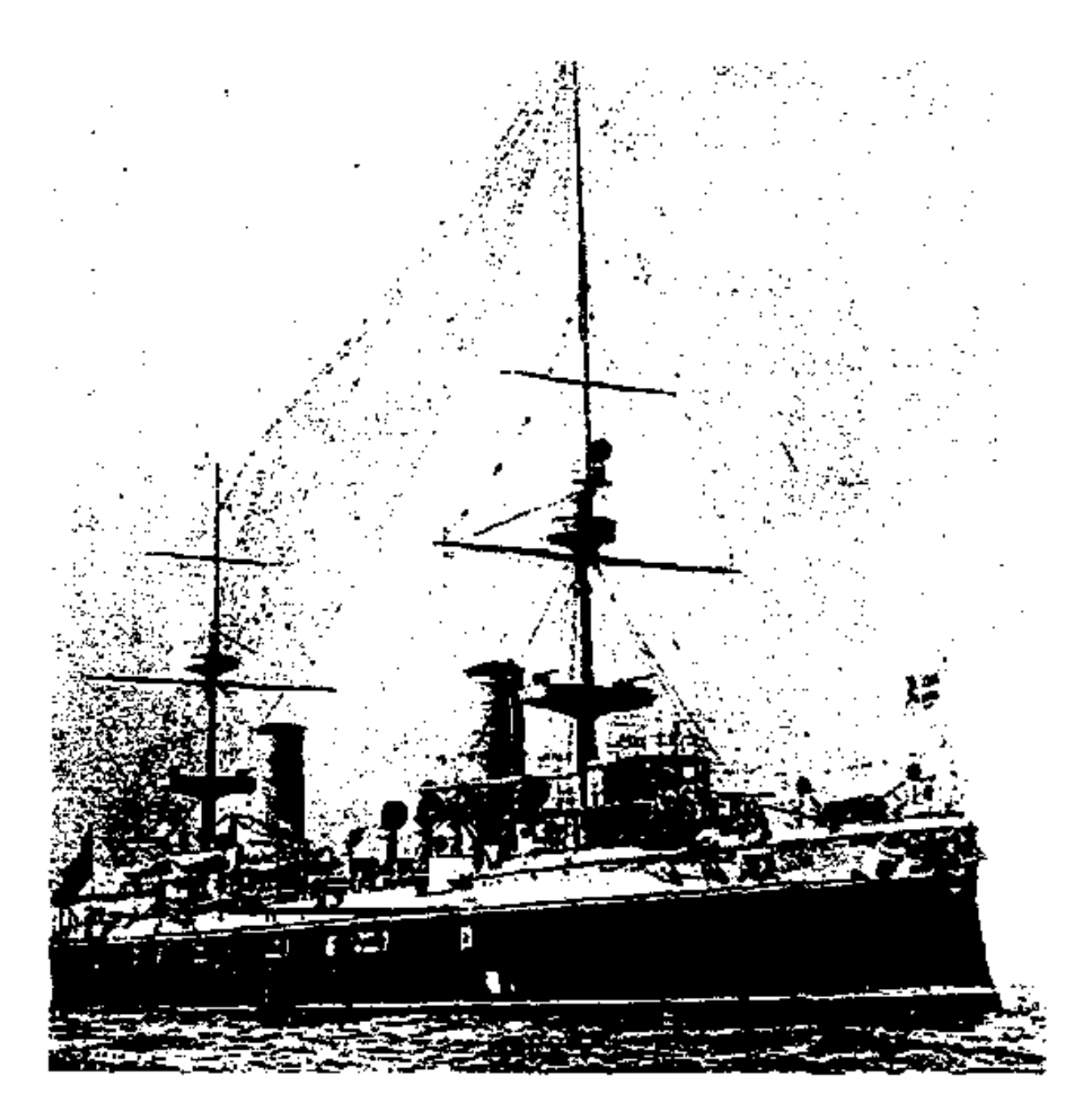


Рис. 15

В ходе этих экспериментов я наблюдал один интересный факт: даже при использовании коротких волн, не превышающих 1000 футов, горные цепи, например, Альпы или Пиренеи, которые оказывались на пути распространяющихся волн, в ночное время суток практически не уменьшали расстояние, на которое удавалось передать сообщение. В дневное время суток эти горы очень сильно уменьшали дальность действия передатчика, если только не использовались более длинные волны и бóльшая мощность.

[1]Швеции. — *Прим. перев.*

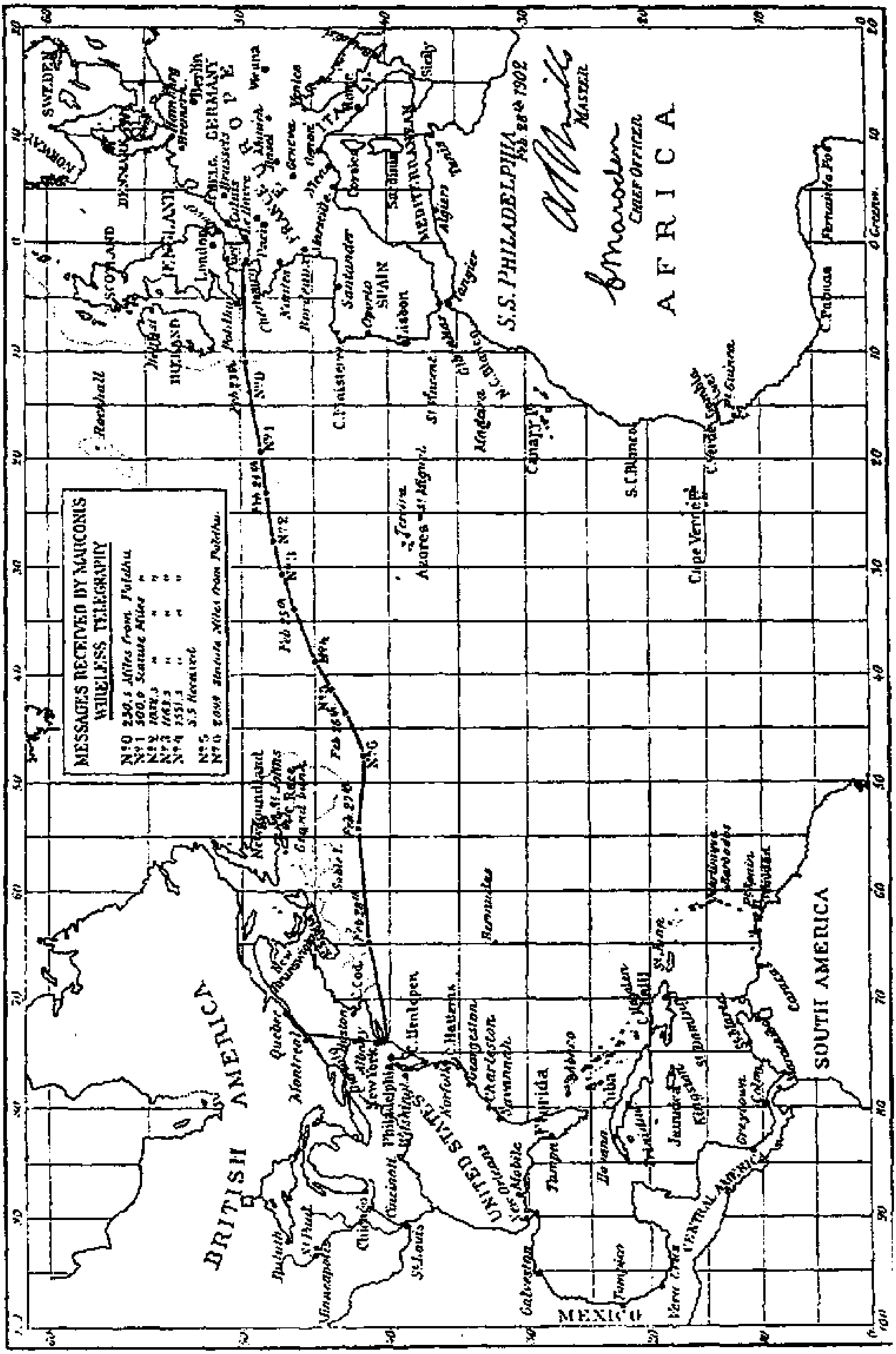

MESSAGES RECEIVED BY MARCONIS
WIRELESS TELEGRAPHY
S.S. PHILADELPHIA
Feb. 28th 1902
MASTER
CHIEF OFFICER
AFRICA
SOUTH AMERICA
BRITISH AMERICA
UNITED STATES
MEXICO
CENTRAL AMERICA

Рис. 14

Сообщения и депеши значительной длины были получены из Полду в точках, отмеченных на карте, которая представляет собой уменьшенную копию карты, сопровождающей официальный отчет об экспериментах (рис. 16).

При активном участии и финансовой поддержке Канадского правительства, в Глейс-Бей (п-ов Новая Шотландия) была построена радиостанция большой мощности, чтобы я смог продолжить свои испытания по передаче сообщений на большие расстояния с тем, чтобы установить коммерческую радиотелеграфную связь между Англией и Америкой[19].

16 декабря 1902 года между расположенными по разные стороны Атлантического океана станцией в Полду и станцией в Глейс-Бей произошел обмен первыми официальными сообщениями (рис. 17 и 18).

Вскоре после этого были проведены следующие испытания по обмену сообщениями с другой отдаленной станцией, расположенной на мысе Код в Соединенных Штатах Америки, в результате которых обнаружилось, что при благоприятных условиях можно передавать сообщения в удаленный на 3000 миль Полду с расходом электроэнергии, не превышающим 10 киловатт.

Весной 1903 года была сделана попытка с помощью радиотелеграфии передать сообщения средств массовой информации из Америки в Европу, и Лондонская газета «Таймс» всю вторую половину марта и первую половину апреля того года публиковала новости, полученные от своего корреспондента в Нью-Йорке и отправленные через Атлантику без участия кабелей.

Однако пробой изоляции аппарата, находившегося в Глейс-Бей, вынудил приостановить данную услугу, а последующие аварии, к сожалению, сделали передачу сообщений неопределенной и ненадежной.

В результате данных и опыта, которые я получил благодаря этим и другим экспериментам, которые я проводил для Британского правительства между Англией и Гибралтаром, мне удалось соорудить новую станцию в Клифдене в Ирландии и усилить станцию в Глейс-Бей в Канаде, чтобы в октябре 1907 года получить возможность установить коммерческую связь между Англией и Канадой через Атлантику.

Несмотря на то, что станции в Клифдене и в Глейс-Бей пришлось пустить в эксплуатацию, когда они еще не были полностью закончены, радиотелеграфная связь через Атлантику не претерпела ни одного серьезного перерыва за почти два года, пока из-за пожара, который случился в Глейс-Бей этой осенью, ее не пришлось приостановить на три или четыре месяца.

Однако эту приостановку нельзя считать явной неприятностью, так

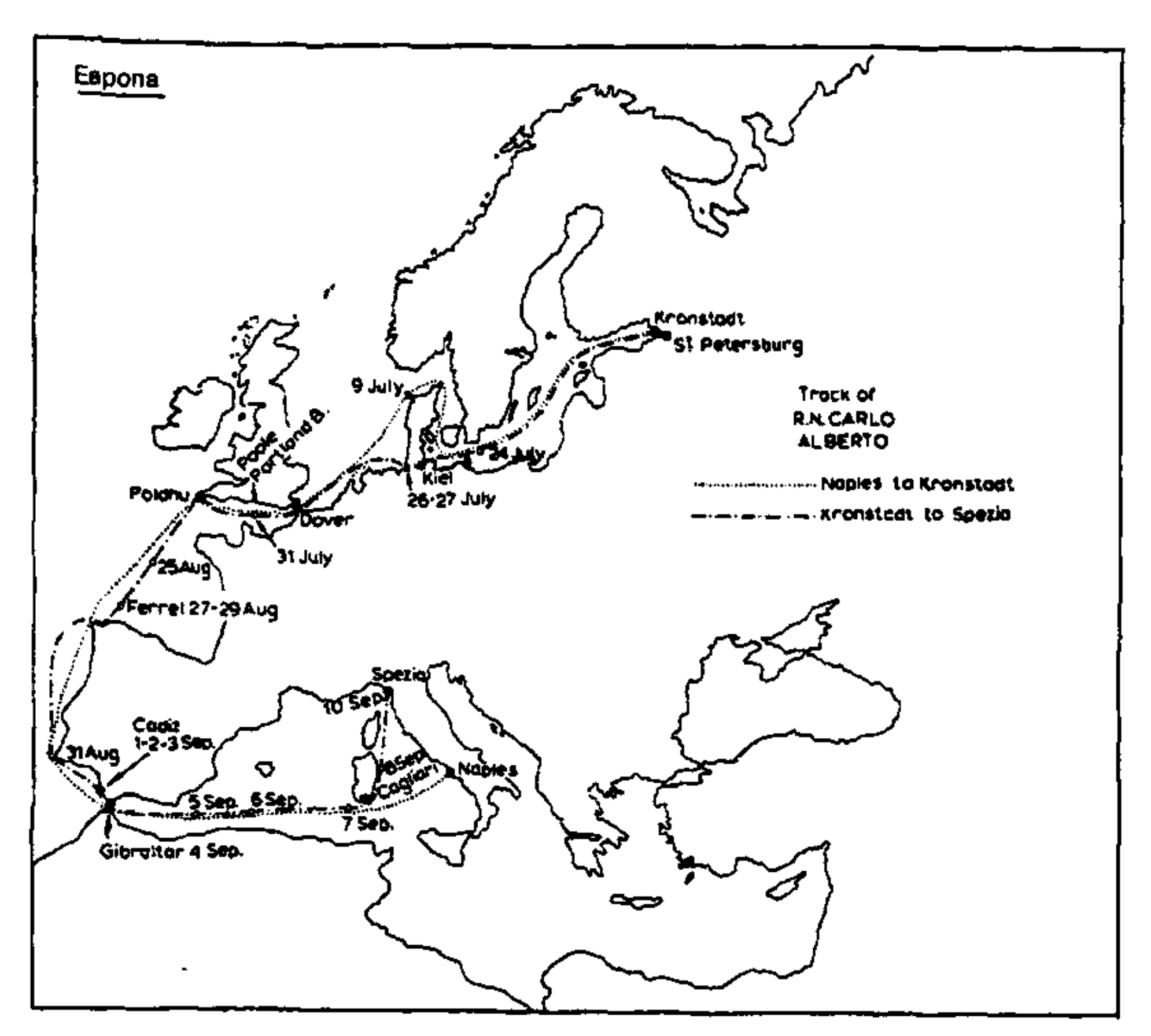


Рис. 16

как она дала мне возможность установить более эффективное и современное оборудование.

Устройства подвешенных проводников или антенн, которые я опробовал[20] в ходе экспериментов передачи сообщений на большие расстояния, изображены на рисунках 19, 20, 21.

Антенна, показанная на рис. 21, состояла из почти вертикального участка посредине, 220 футов высотой, опирающегося на четыре башни и на вершине соединенного с почти горизонтальными двумястами проводниками, каждый из которых имел длину в 1000 футов. Эти проводники располагались радиально по кругу и на высоте в 180 футов от земли опирались на внутренний круг из восьми и наружный круг из шестнадцати мачт.

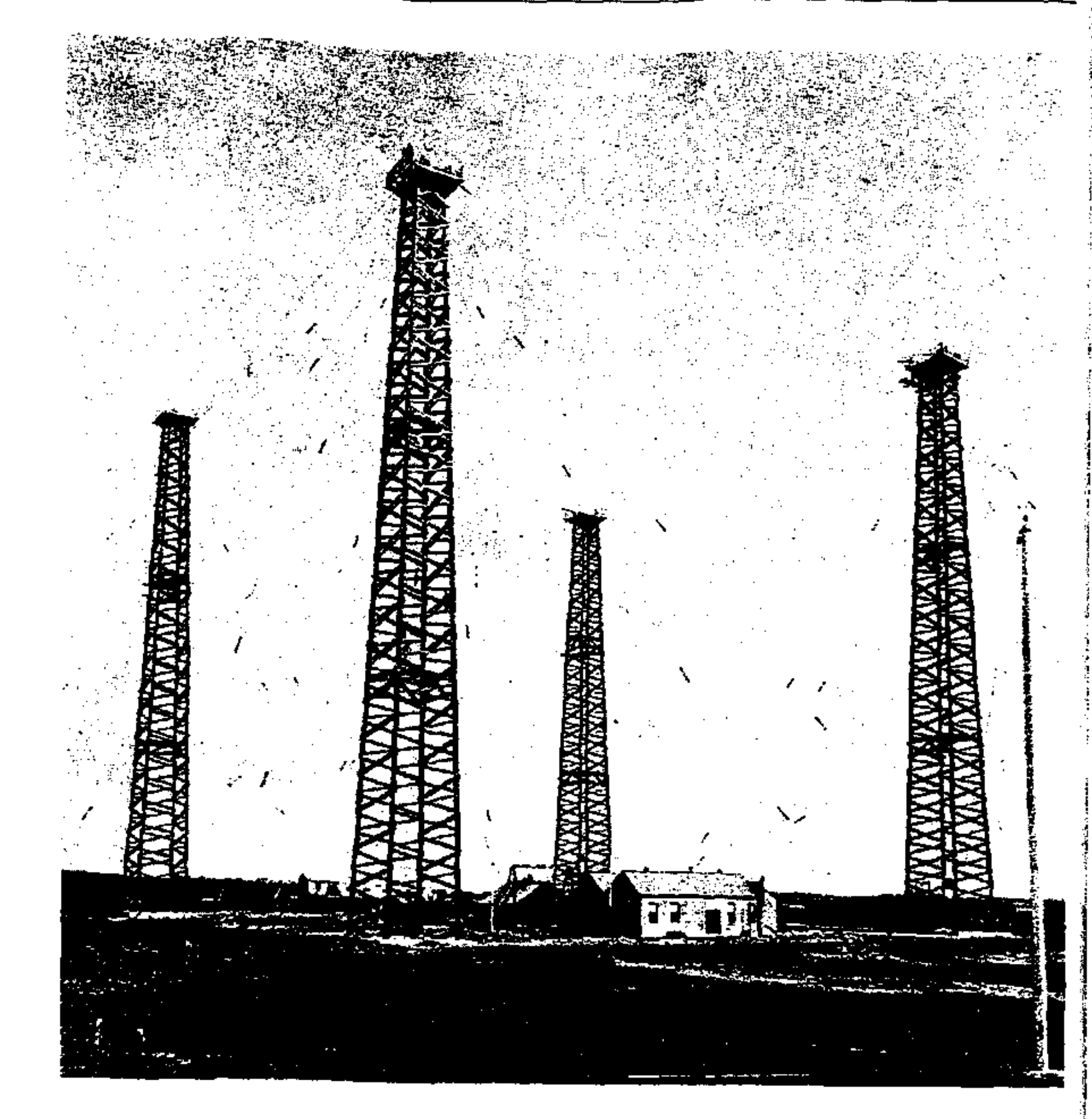


Рис. 17

Естественный период колебания этой радиосети обеспечивал длину волны в 12 000 футов. В 1905 году с этой установкой провели несколько экспериментов, которые показали, что при длине волны в 12 000 футов через Атлантику можно было принимать сигналы, хотя и очень слабые, как днем, так и ночью.

Радиосеть, которую я, в конечном счете, принял для станций, передающих на большие расстояния, показана на рис. 22. Это устройство не только дает возможность эффективно излучать и принимать волны

любой желаемой длины, но и стремится ограничить основную часть радиоизлучения данным направлением. Ограничение передачи одним направлением определено не слишком остро, но результаты, полученные при использовании антенны такого типа, тем не менее, оказались чрезвычайно полезными.

В отношении методов ограничения направления радиоизлучения множество предложений было сделано различными авторами, а особенно: профессором Ф. Брауном, профессором Артомом и господами Бельни и Този.

В докладе[21], прочитанном перед Лондонским Королевским обществом 21 марта 1906 года, я показал, как с помощью горизонтальных антенн можно ограничить испускаемое радиоизлучение, главным образом, направлением их вертикальной плоскости, обращенным в сторону, противоположную их заземленному концу.

Точно также можно направить и посылающую станцию.

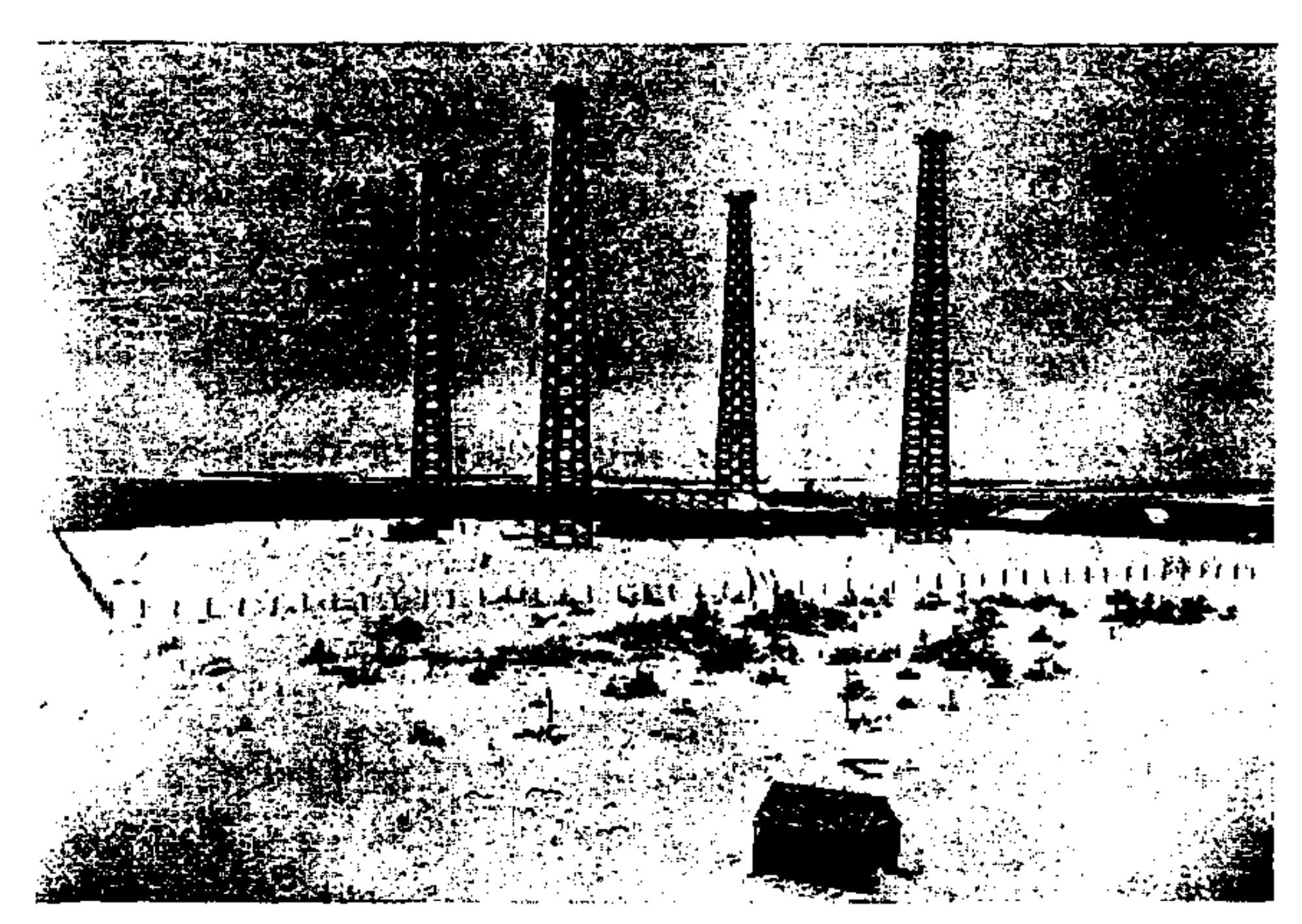


Рис. 18

Передающие контуры станций, осуществляющих связь на большие расстояния, расположены согласно сравнительно новой системе создания

непрерывных или слабо затухающих колебаний, о которой я рассказывал на лекции в Королевском институте Великобритании 13 марта 1908 года.

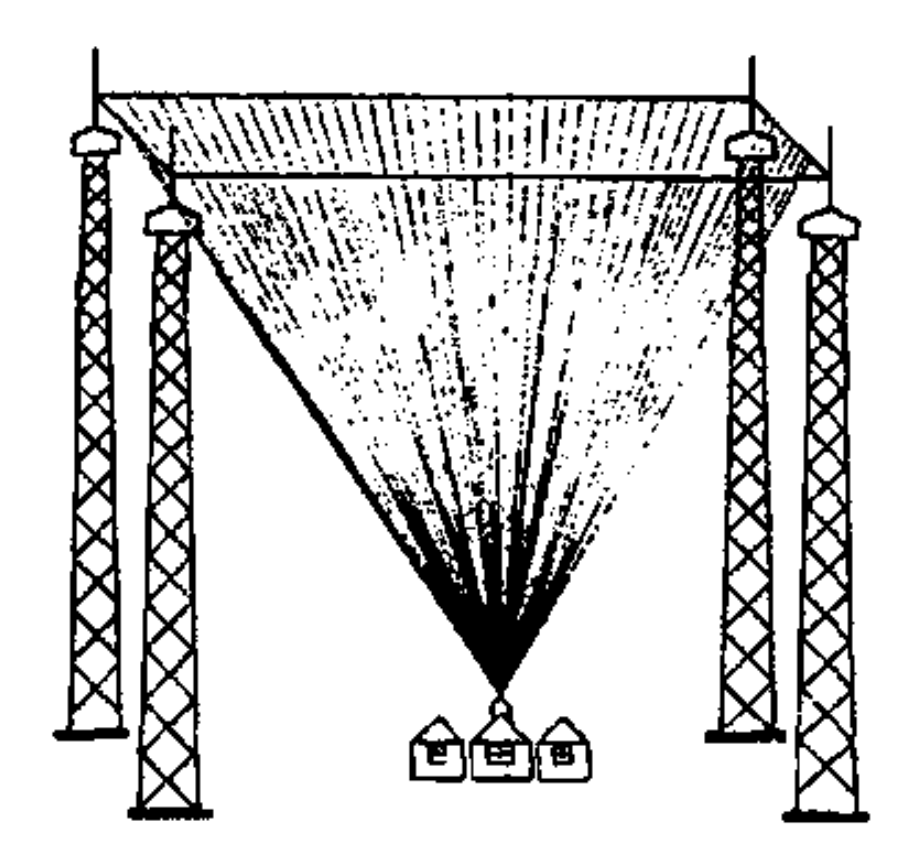


Рис. 19

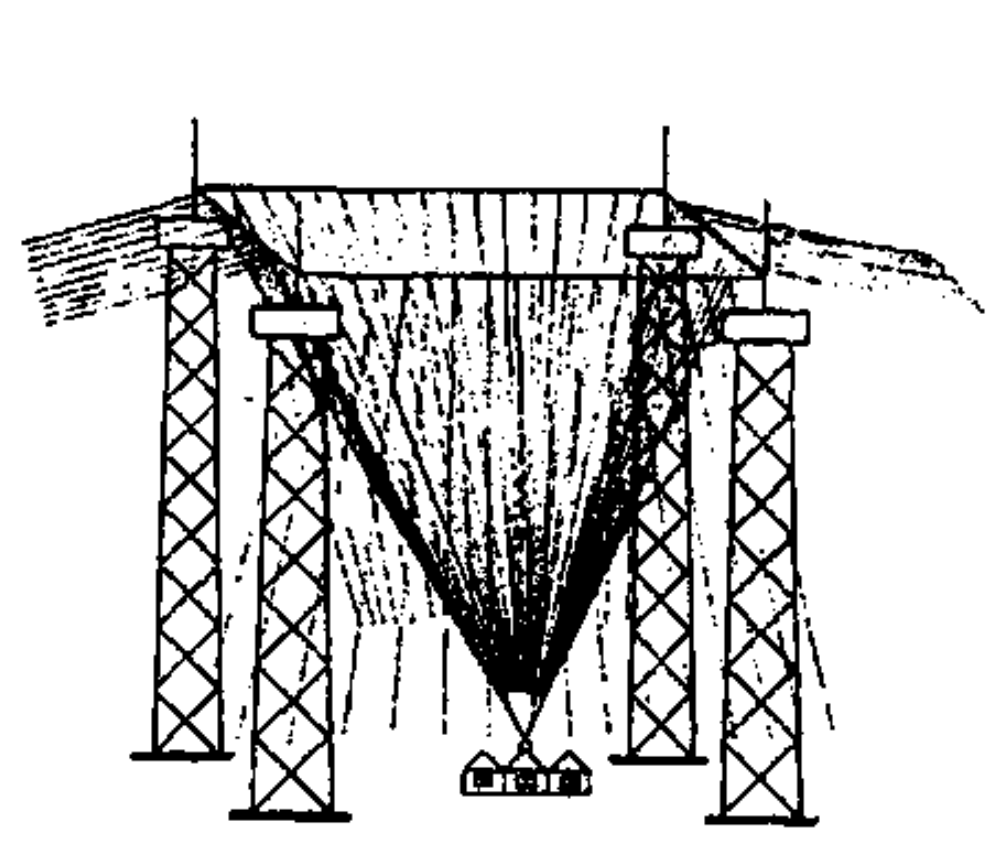


Рис. 20

Рис. 21

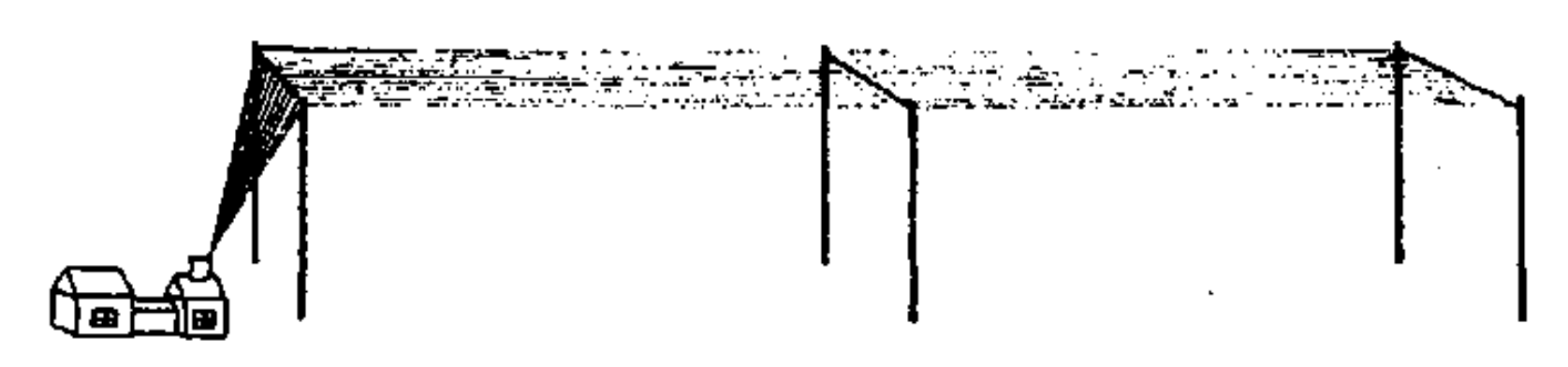


Рис. 22

Изолированный металлический диск A (см. рис. 23) приводится во вращение с большой скоростью электродвигателем или паровой турбиной. Рядом с этим диском, который я назову средним, расположены два других диска C' и C'', которые можно назвать полярными и которые тоже вращаются. Окружности этих полярных дисков находятся очень

близко к поверхности или кромке среднего диска. Два полярных диска связаны щеточным контактом с внешними концами двух последовательно соединенных конденсаторов K, которые, в свою очередь, посредством соответствующих щеток связаны с выводами генератора постоянного тока высокого напряжения.

На среднем диске также обеспечивается щеточный контакт. Между этим контактом и средней точкой двух конденсаторов вставлен колебательный контур, состоящий из конденсатора E, последовательно соединенного с катушкой индуктивности, которая индуктивно связана с радиоизлучающей антенной.

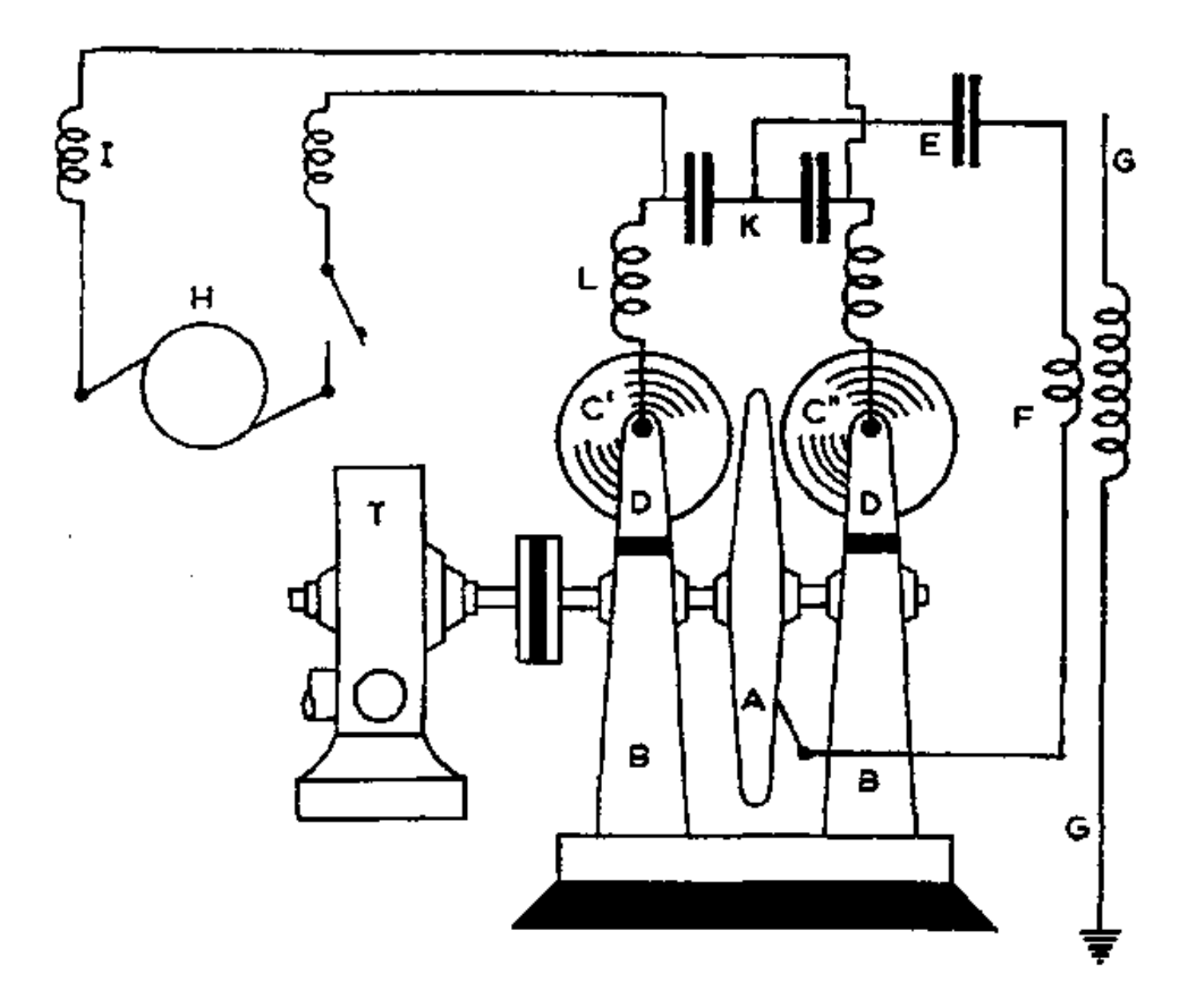


Рис. 23

Вероятно, данный аппарат работает следующим образом.

Генератор заряжает двойной конденсатор, вследствие чего потенциал диска C' становится, скажем, положительным, а потенциал диска C'' — отрицательным. Потенциал, если он достаточно высок, вызовет разряд, который пройдет через один из искровых промежутков, скажем, между C' и A. В результате этого конденсатор E получит заряд через индуктивность F и начнет колебания в контуре. Заряд F при отклонении назад перейдет от A к C'', потенциал которого противоположен потенциалу A по знаку. Тем временем быстрое движение диска, отво-

дящее ионизированный воздух, восстановит электрическую прочность диэлектрика между C' и A.

Следовательно, конденсатор E разряжается и вновь заряжается поочередно в обратных направлениях, причем этот процесс продолжается, пока генератор H подает энергию на конденсаторы K.

Ясно, что разряды между C', C'' и A никогда не происходят одновременно, так как в этом случае центральный электрод не становился бы поочередно то положительным, то отрицательным.

Однако наилучшие результаты были получены при использовании устройства, изображенного на рис. 24, в котором активная поверхность среднего диска не однородна, а состоит из нескольких равномерно расположенных ручек или втулок, на концах которых через равные промежутки времени происходят разряды. Я обнаружил, что при использовании такой схемы каждый цуг колебаний может иметь декремент, не превышающий 0,02.

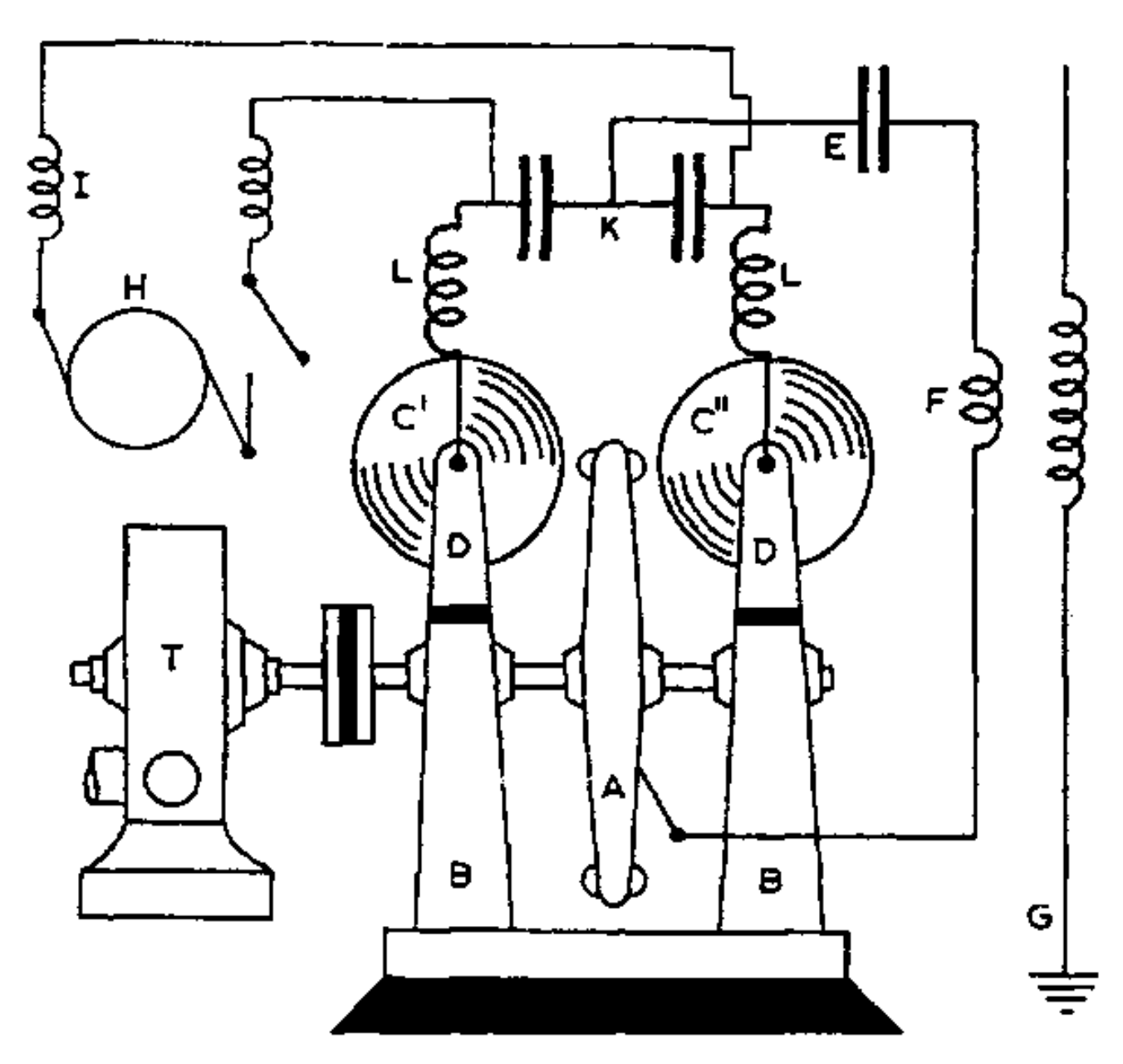


Рис. 24

С помощью этой схемы можно также создать группы колебаний, испущенных для воспроизведения высокой и чистой музыкальной ноты в приемнике, облегчая тем самым выделение сигналов, испущенных передающей станцией, из шумов, вызванных электрическими разрядами

в атмосфере. С помощью этого метода в должным образом спроектированных приемниках можно также создать очень эффективный резонанс.

Что касается используемых приемников, в них тоже произошли важные перемены. Безусловно, большая часть электроволновой телеграфии еще несколько лет назад проводилась с помощью того или иного когерера или переменного контакта, который требовал либо ответвления, либо вообще самовосстановления.

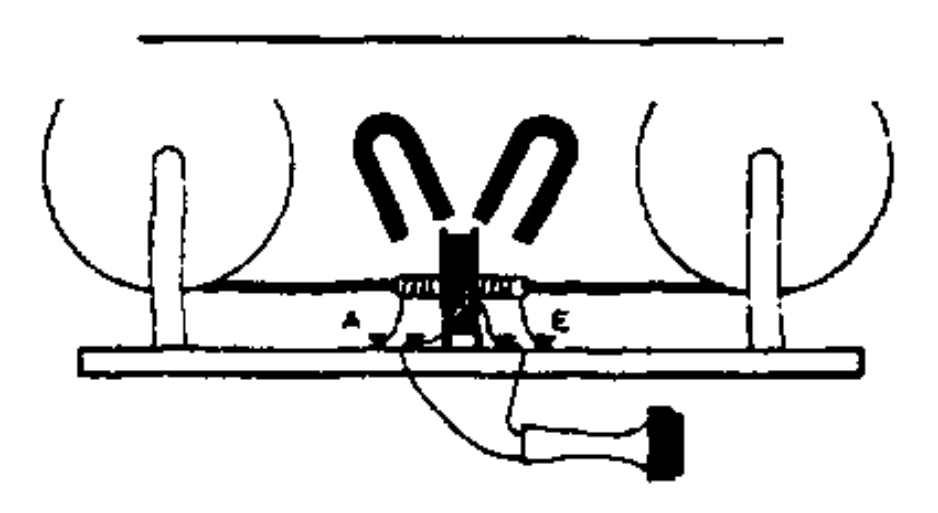


Рис. 25

Однако я могу утверждать, что в настоящее время на всех станциях, которыми управляет моя компания, применяется почти исключительно мой *магнитный приемник*[22] (рис. 25). Этот приемник основан на уменьшении магнитного гистерезиса, которое происходит в железе, когда при определенных условиях этот металл подвергается воздействию электрических волн высокой частоты.

Недавно обнаружилось, что можно повысить чувствительность этих приемников и применить их в соединении с высокоскоростными реле, чтобы записывать сообщения с большой скоростью.

Что касается передатчиков, то существует один замечательный факт, который известен далеко не всем: ни одна из схем, содержащих конденсаторы, по своей эффективности не превышает плоскую подвешенную антенну или вертикальный проводник, разряжающийся в землю через искровой промежуток, который я использовал в своих первых экспериментах (см. рис 2 и 3).

Недавно мне также удалось доказать высказывание, которое профессор Флеминг сделал в своей книге «Принципы электроволновой телеграфии» (1906 г.) на странице 555: используя в антенне мощность, равную восьми ваттам, можно осуществлять связь на расстояния более 100 миль.

Я также обнаружил, что с помощью этого метода, используя большие антенны, можно посылать сигналы на 2 000 миль через Атлантику

с меньшими затратами энергии, нежели применяя любой другой известный мне метод.

Единственный недостаток данного устройства состоит в том, что если только не будут использоваться очень большие антенны, то количество энергии, которое можно эффективно использовать, ограничивается потенциалом, за пределами которого щеточные разряды и сопротивление искрового промежутка начинают рассеивать большую долю энергии.

С помощью искровых промежутков в сжатом воздухе и добавления индукционных катушек, помещенных между антенной и землей, от системы можно добиться испускания очень чистых и слабо затухающих волн, исключительно подходящих для тонкой настройки.

Что касается общего использования беспроволочной телеграфии, то широко распространенное применение данной системы и множественность станций весьма и весьма облегчили наблюдение фактов, которые не поддаются легкому объяснению.

Так, было замечено, что обыкновенная станция, расположенная на корабле и использующая около полукиловатта электрической мощности, с нормальным диапазоном, не превышающим 200 миль, время от времени будет передавать сообщения на расстояние более 1 200 миль. Нередко бывает, что корабль не может связаться с ближайшей станцией, но очень легко передает сообщения на отдаленную станцию.

Прошлой зимой было зафиксировано много случаев, когда пароход «Карония» линии Кунарда, на котором установлена станция, использующая около полукиловатта мощности, находясь в Средиземном море, неподалеку от побережья Сицилии, не смог получить сообщение с итальянских станций, но без труда передавал и получал сообщения с побережий Англии и Голландии, хотя их станции находились на расстоянии, намного превышающем 1 000 миль, а между ними и кораблем располагалась большая часть Европейского континента и Альпы.

Несмотря на то, что для связи через Атлантику сейчас используются очень мощные электростанции и сообщения можно посылать как ночью, так и днем, по-прежнему ежедневно бывают короткие периоды, во время которых сложно передать сообщение из Англии в Америку или наоборот. Так, утром и вечером, когда вследствие разности географической долготы, свет или темнота распространяется только на часть пути через океан, принимаемые сигналы очень слабы или вообще прерываются. Все это выглядит почти так, как если бы электрические волны, переходя из темного пространства в освещенное, и наоборот, отражались таким образом, что отклонялись бы от своей нормальной траектории.

Вполне вероятно, что такие сложности не возникли бы при телеграфии на равные расстояния к северу или к югу примерно на одном и том же меридиане, так как в этом случае переход от света к темноте происходил бы почти одновременно на всем расстоянии между двумя точками.

Другой любопытный результат, относительно которого сотни наблюдений, продолжавшиеся на протяжении нескольких лет, не оставляют ни малейшего сомнения, состоит в том, что регулярно, в течение коротких промежутков времени, при восходе и закате солнца, и иногда в другое время суток, можно обнаружить более короткую волну, переданную через Атлантику, а не более длинную волну, которая обычно применяется.

Так, в Клифдене и Глейс-Бей, при отправлении сообщения с обыкновенного связанного контура, способного излучать одновременно две волны: одну длиной 12 200 футов, а другую — 14 700 футов, — примерно через три часа после заката солнца в Клифдене и за три часа до восхода солнца в Глейс-Бей, в течение примерно одного часа, с удивительной интенсивностью принималась только короткая волна, хотя обычно на другой стороне океана принимается более длинная волна.

Этот эффект происходил настолько регулярно, что в вышеупомянутое время операторы постоянно настраивали свои приемники на более короткую волну.

Что касается полезности беспроволочной телеграфии, нет никаких сомнений что она необходима для безопасности кораблей, так что ввиду помощи, которую она оказала в случаях опасности, все основные лайнеры, а также военные корабли уже оснащены ею, а ее распространение на менее важные корабли — это лишь вопрос времени.

Кроме того, растет применение беспроволочной телеграфии как средства связи между отдаленными островами, а также как средства обыкновенной телеграфной связи между городами и деревнями, особенно в колониях и недавно развившихся странах.

Какой бы огромной ни была важность беспроволочной телеграфии для кораблей и флота, я считаю, что не менее важна она и для обеспечения эффективной и экономичной связи между отдаленными частями мира, а также для связи европейских стран с их колониями и с Америкой. Кстати, сейчас я строю новую радиостанцию очень большой мощности для Итальянского правительства в Кольтано с целью обеспечения связи с итальянскими колониями в Восточной Африке и с Южной Америкой.

Несмотря на все настоящие недостатки и дефекты беспроволочной телеграфии, не может быть сомнений в том, что беспроволочная телегра-

фия — особенно на большие расстояния — появилась, чтобы остаться, и не просто останется, но и продолжит развиваться.

Если станет возможно передавать волны вокруг всего мира, может обнаружиться, что электрическую энергию, распространяющуюся вокруг всех частей земного шара, можно сконцентрировать на диаметрально противоположных точках посылающей станции. Таким образом, быть может, однажды мы получим возможность посылать сообщения в весьма далекие земли, затрачивая очень малое количество электрической энергии и, соответственно, небольшие средства.

Но я уже перехожу из области фактов в область теории, которая, однако, при том знании, что мы получили в отношении данного предмета, обещает дать как полезные, так и поучительные результаты.

Не имея удовольствия знать шведский язык, я, будучи итальянцем, все же счел наилучшим прочитать эту лекцию на английском языке, так как мне известно, что английский здесь понимают значительно лучше, чем итальянский.

1. G. Marconi, *Brit. Patent* No. 12 039, June 2, 1896.

2. *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, 28 (1899) 278.

3. См. письмо доктора Лоджа в *The Times (London)*, June 22, 1897.

4. A. Slaby, *Die Funkentelegraphie*, Verlag von Leonhardt Simion, Berlin, 1897; см. также A. Slaby, «The New Telegraphy», *The Century Magazine*, 55 (1898) 867.

5. *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, 28 (1899) 291.

6. *Brit. Patent* No. 12 326, June 1, 1898; *Brit. Patent* No. 6 982, April 1, 1899.

7. A. Blondel и G. Ferrie, «État actuel et Progrès de la Télégraphie sans Fil», read at the Congres International d'Electricite, Paris, 1900; см. также *J. Soc. Arts*, 49 (1901) 509.

8. *Brit. Patent* No. 7 777, April 26, 1900; см. также *J. Soc. Arts*, 49 (1901) 510-11.

9. См. письмо профессора Д. А. Флеминга в *The Times (London)*, October 4, 1900.

10. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 72 (May 28, 1903).

11. J. A. Fleming, *The Principles of Electric Wave Telegraphy*, Longmans, Green & CO., London, 1906, p. 348.

12. J. Zenneck, *Ann. Physik*, [4], 23 (Sept. 1908) 846; *Physik. Z.*, 9 (1908) 50, 553.

13. *J. Soc. Arts*, 49 (1901) 512.

14. G. Marconi, Lecture before the Royal Institution of Great Britain, June 13, 1902.

15. G. Marconi, «A Note on the Effect of Daylight upon the Propagation of Electro-magnetic Impulses», *Proc. Roy. Soc. (London)*, 70 (June 12, 1902).

16. See also J. J. Thomson, «On Some Consequences, etc.», *Phil. Mag.*, [6] 4 (1902) 253.

17. См. сноску 11, стр. 618.

18. *Riv. Marittima (Rome)*, October 1902.

19. G. Marconi, Paper read before the Royal Institution of Great Britain, March 3, 1905.

20. См. также G. Marconi, Lecture before the Royal Institution of Great Britain, March 13, 1908.

21. G. Marconi, «On Methods whereby the Radiation of Electric Waves may be mainly confined, etc.», *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 77 (1906).

22. G. Marconi, «Note on a Magnetic Detector of Electric Waves», *Proc. Roy. Soc. (London)*, 70 (1902) 341.

Биография

Гульельмо Маркони родился 25 апреля 1874 года в Болонье, в Италии. Он был вторым сыном Джузеппе Маркони, итальянского землевладельца, и Энни Джеймсон, дочери Эндрю Джеймсона, владельца замка Дефни, расположенного в ирландском графстве Уэксфорд. Он получил частное образование в Болонье, Флоренции и Ливорно. Еще будучи ребенком, он живо интересовался физикой и электричеством и изучал труды Максвелла, Герца, Риги, Лоджа и других. В 1895 году он начал лабораторные эксперименты в поместье своего отца в Понтеччио, где ему удалось передать беспроволочные сигналы на расстояние полутора миль, тем самым став изобретателем первой практической системы беспроволочной телеграфии.

В 1896 году Маркони привез свой аппарат в Англию, где его представили мистеру (впоследствии сэру) Уильяму Прису, главному инженеру почты. Позднее в том же году Маркони получил первый в мире патент

на систему беспроволочной телеграфии. Он успешно продемонстрировал свою систему в Лондоне, на Солсберийской равнине и через Бристольский канал, а в июле 1897 года основал «The Wireless Telegraph & Signal Company Limited» (которую в 1900 году переименовали в «Marconi's Wireless Telegraph Company Limited»). В том же году в Специи он провел демонстрацию для Итальянского правительства, во время которой беспроволочные сигналы передавались на расстояние двенадцати миль. В 1899 году он установил беспроволочную связь между Англией и Францией через Ла-Манш. Он соорудил постоянные беспроволочные станции в Нидлсе, о-в Уайт, в Борнмуте, а впоследствии и в Хейвен Хоутеле, Пуле, Дорсете.

В 1900 году Маркони получил свой знаменитый патент No. 7777 на «резонансную или синтоническую[1] телеграфию» и в исторический декабрьский день 1901 года, вознамерившись доказать, что беспроволочные волны не подвержены влиянию кривизны Земли, он использовал свою систему для передачи первых беспроволочных сигналов через Атлантику из Полду (Корнуолл) в Сент-Джонс (Ньюфаундленд), на расстояние в 2100 миль.

В период между 1902 и 1912 гг. он запатентовал несколько новых изобретений. В 1902 году во время поездки на американском лайнере «Филадельфия» он впервые продемонстрировал «влияние дневного света» на беспроволочную связь и в том же году запатентовал свой магнитный детектор, который в течение многих лет оставался стандартным приемником. В декабре 1902 года он передал первые полные сообщения в Полду со станции, расположенной в Глейс-Бей, п-ов Новая Шотландия, а позднее с мыса Код (Массачусетс). Эти первые эксперименты достигли своего пика в 1907 году, когда была открыта первая трансатлантическая коммерческая линия связи между Глейс-Бей и Клифденом (Ирландия), после того как между Бари (Италия) и Авидари (Черногория), которые разделяло меньшее расстояние, уже была создана первая общественная линия беспроволочной телеграфии. В 1905 году Маркони запатентовал свою горизонтальную направленную антенну, а в 1912 году — систему генерирования постоянных волн, основанную на «синхронных искрах».

В 1914 году Маркони призвали в итальянскую армию в чине лейтенанта, впоследствии повысили до капитана, а в 1916 году перевели во флот, присвоив звание капитана третьего ранга. Он входил в состав итальянской правительственной миссии в Соединенные Штаты Америки

[1]Синтоническая телеграфия — телеграфия, использующая взаимно настроенные приемник и передатчик. — *Прим. ред.*

в 1917 году, а в 1919 году был назначен полномочным представителем Италии на Парижской мирной конференции. В знак признания его военных заслуг в 1919 году Маркони был награжден Военной медалью Италии.

Во время военной службы в Италии Маркони вернулся к исследованию коротких волн, которые он использовал в своих первых опытах. После дальнейших испытаний, проведенных его коллегами в Англии, в 1923 году был сделан ряд попыток установить связь между станцией в Полду и яхтой Маркони «Элеттра», которая курсировала в Атлантическом океане и Средиземном море, что привело к созданию радиолучевой системы связи на большие расстояния. Британское правительство приняло предложение использовать эту систему в качестве средства Имперской связи, и в 1926 году открылась первая радиолучевая станция, связывающая Англию и Канаду, а в следующем году появились и другие станции.

В 1931 году Маркони начал исследовать характеристики распространения еще более коротких волн, что привело к открытию в 1932 году первой сверхвысокочастотной радиотелефонной линии между Ватиканом и летней резиденцией Папы римского в замке Гандольфо. Два года спустя в Сестри-Леванте он продемонстрировал свой сверхвысокочастотный радиомаяк для судовой навигации, а в 1935 году, опять в Италии, Маркони на практике показал принципы радиолокатора, появление которого он впервые предсказал в 1922 году, в Нью-Йорке, на лекции в Американском радио-инженерном институте.

Маркони получил степень почетного доктора нескольких университетов, а также много других международных знаков отличия и наград, среди которых: Нобелевская премия по физике, которую он в 1909 году разделил с профессором Карлом Брауном; медаль Альберта Королевского общества искусств, медаль Джона Фритца и медаль Кельвина. Русский царь наградил Маркони орденом Святой Анны, Король Италии назначил его Командором Ордена Святого Мориса и Святого Лазаря, а в 1902 году наградил Большим Крестом Ордена итальянской короны. Кроме того, Маркони получил особые привилегии гражданина города Рима в 1903 г. и титул Кавалера Гражданского Ордена Савойи в 1905 году. За этими наградами последовало множество подобных отличий. В 1914 году его избрали в Сенат Италии и сделали Почетным Рыцарем Большого Креста Королевского Викторианского Ордена в Англии. В 1929 году Маркони присвоили потомственный титул маркиза.

В 1905 году Маркони женился на достопочтенной Беатрисе О'Брайен, дочери четырнадцатого барона Инчикуина. Этот брак был расторгнут

в 1927 году, после чего он женился на графине Бецци-Скали из Рима. От первого брака у него родились сын и две дочери, а от второго — одна дочь. Он увлекался охотой, а также ездой на велосипеде и автоспортом.

Маркони умер 20 июля 1937 года в Риме.

Карл Фердинанд Браун

Электрические колебания и беспроволочная телеграфия

Нобелевская лекция, 11 декабря 1909 г.

Имея сегодня великую честь и привилегию обращаться к членам Академии, которая, несмотря на свой почтенный возраст, постоянно обновляется и вдохновляется вкладом свежих сил и энергии, я надеюсь на ваше снисхождение и понимание, так как мне думается, что моя задача состоит не в том, чтобы рассказать вам о беспроволочной телеграфии вообще. Мне показалось более уместным ограничить себя более узкой областью деятельности, в которой мне удалось достичь успеха, принимая некоторое участие в развитии целого.

Я не стану останавливаться на своих экспериментах по распространению электрических волн в воде, которые я провел летом 1898 года, и сразу перейду к экспериментам, которые были описаны и понимались в то время как доказавшие распространение электрических волн в воздухе.

Прежде всего я должен упомянуть следующее. Насколько мне известно, Маркони начал свои эксперименты в поместье своего отца в 1895 году и продолжил их в Англии в 1896 году. Его эксперименты в гавани Специи, наряду с другими, были проведены в 1897 году; в ходе этих экспериментов было достигнуто расстояние передачи в 15 км. Осенью того же года Слаби, используя почти такую же схему, достиг расстояния в 21 км по суше, но лишь с помощью воздушных шаров, к которым крепились проволоки длиной 300 метров. Но почему, возникает вопрос, было так сложно увеличить расстояние? Если вся схема удовлетворительно функционировала на расстоянии в 15 км, почему бы не удвоить или не

увеличить достигнутое расстояние еще больше, повышая начальное напряжение, раз для этого существуют средства? Однако, судя по всему, нужны были еще бо́льшие антенны? Именно с таким впечатлением, — я не стану останавливаться на том, правильно или нет описали мои эксперименты печатные издания, — я обратил свое внимание на данный предмет осенью 1898 года. Я поставил перед собой задачу достижения более сильного действия передатчика.

Если я хочу описать вам общие мысли и идеи, которые мной руководили, то я должен просить вас вернуться вместе со мной к тому положению, в котором находилось в то время наше знание. Какие факты были в нашем распоряжении, и какие выводы можно было из них сделать? Уже тогда было известно, насколько чувствительны колебания Герца к качеству искры, а также то, что удлинение искры приводит к вредному влиянию, из-за которого искра становится «неактивной». Уже в своей первой работе Герц обратил внимание на сильное затухание осцилляторов и сравнил их электрические колебания с нечеткими звуковыми колебаниями деревянных стержней. В 1891 году Бьеркнесу удалось измерить затухание и найти логарифмический декремент (который, как известно, и является мерой затухания) для линейного осциллятора. Он оказался равным 0,26 при использовании лишь крошечного искрового промежутка. Однако при увеличении искрового промежутка до 5 мм декремент возрос до 0,40. Это, а также ряд других фактов говорило о существовании сильного искрового затухания. Все известные факты становились понятными, если мы допускали, что при низких емкостях искра поглощает большую долю энергии, поэтому, чем длиннее искра, тем бо́льшая доля энергии поглощается. С другой стороны, уже давно было известно, что разряд бо́льших емкостей в обычных электрических дугах всегда является колебательным и, (при отсутствии излучения) очевидно, затухает гораздо слабее. На самом деле Феддерсен еще в 1862 году сфотографировал до 20 полупериодов колебаний. Я ухватился за этот факт.

Учитывая большие количества энергии, которую можно накопить в конденсаторах и сохранить в подходящей для эксперимента форме, когда-нибудь можно ожидать высвобождения из них энергии излучения. В общем, я пришел к выводу, что если бы можно было с помощью контура, содержащего лейденскую банку большой емкости, возбудить в *безискровой* антенне электрические колебания относительно среднего значения, равного начальному заряду передатчика Маркони, то у нас появился бы более эффективный передатчик. Оставались некоторые сомнения относительно того, как этого достичь. Более того, в экспериментах с действием на расстоянии нужно было решить, не

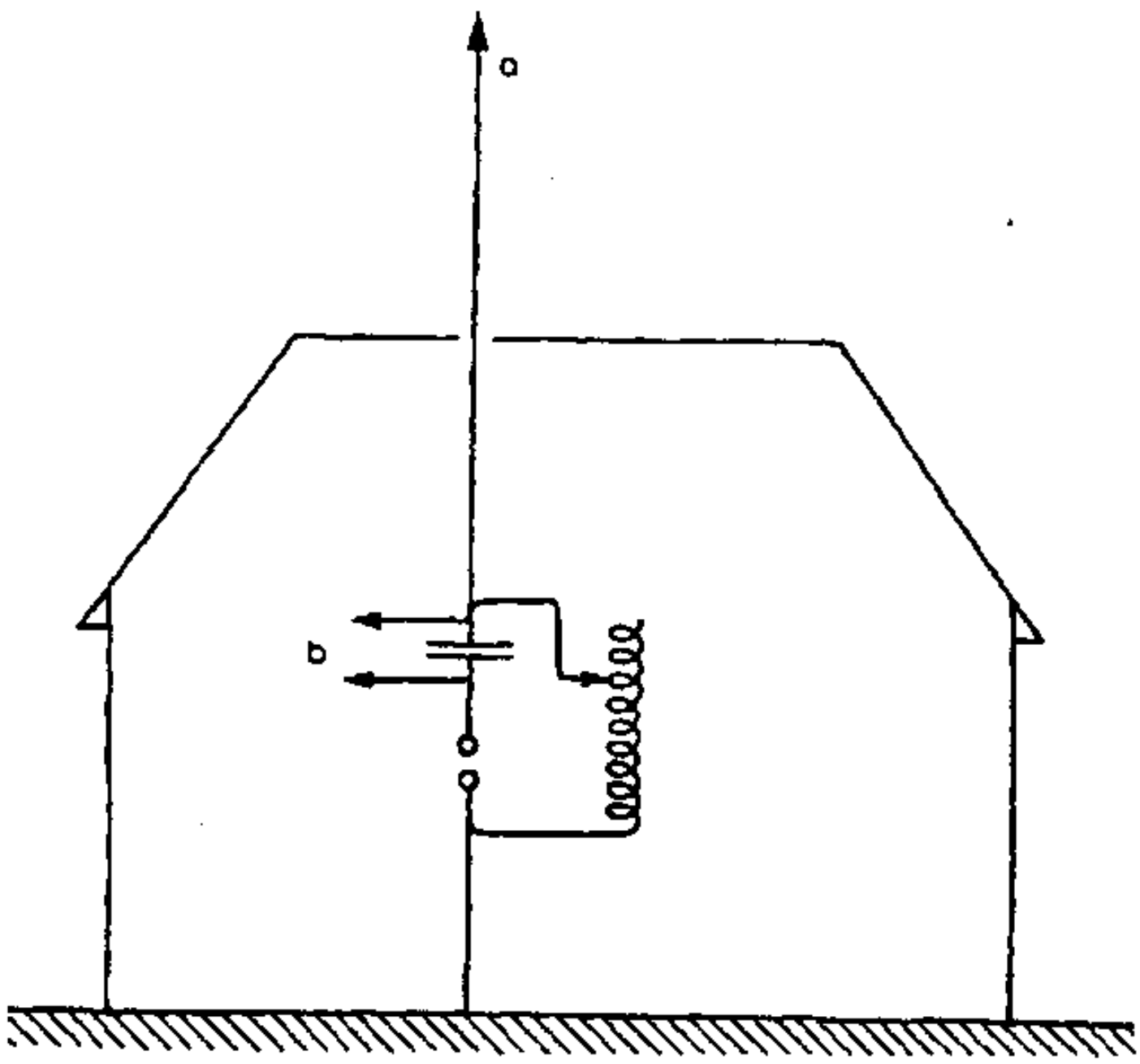


Рис. 1

пропустили ли мы в этих соображениях какой-то возмущающий фактор. При подходящих размерах возбуждающего контура была найдена возможность выполнить первое требование, а сравнительные эксперименты по действию на большие расстояния оказались в пользу новой схемы.

Это привело к созданию трех контуров: контуры для индуктивного и прямого возбуждения передатчика, а также смешанный контур, сочетающий в себе предыдущие. На рис. 1 изображен прямой контур. Передатчик заземлен. На рис. 2 показан индуктивный контур, в котором прямое заземление Маркони заменяется «симметричным проводником». Это название подошло бы абсолютно, если бы весь передатчик парил в свободном пространстве (например, на воздушном шаре). Тогда передатчик образовывал бы полуволну, и точка возбуждения, которая должна лежать на пучности тока, оказалась бы посредине. Рисунок 2 показывает, как этот контур адаптируется к подвижной станции. Из-за близости земли эта схема перестает быть симметричной. Симметричный проводник можно закоротить, нагружая его конец емкостью. Такая схема известна под названием противовеса. Он полностью исчезает, если

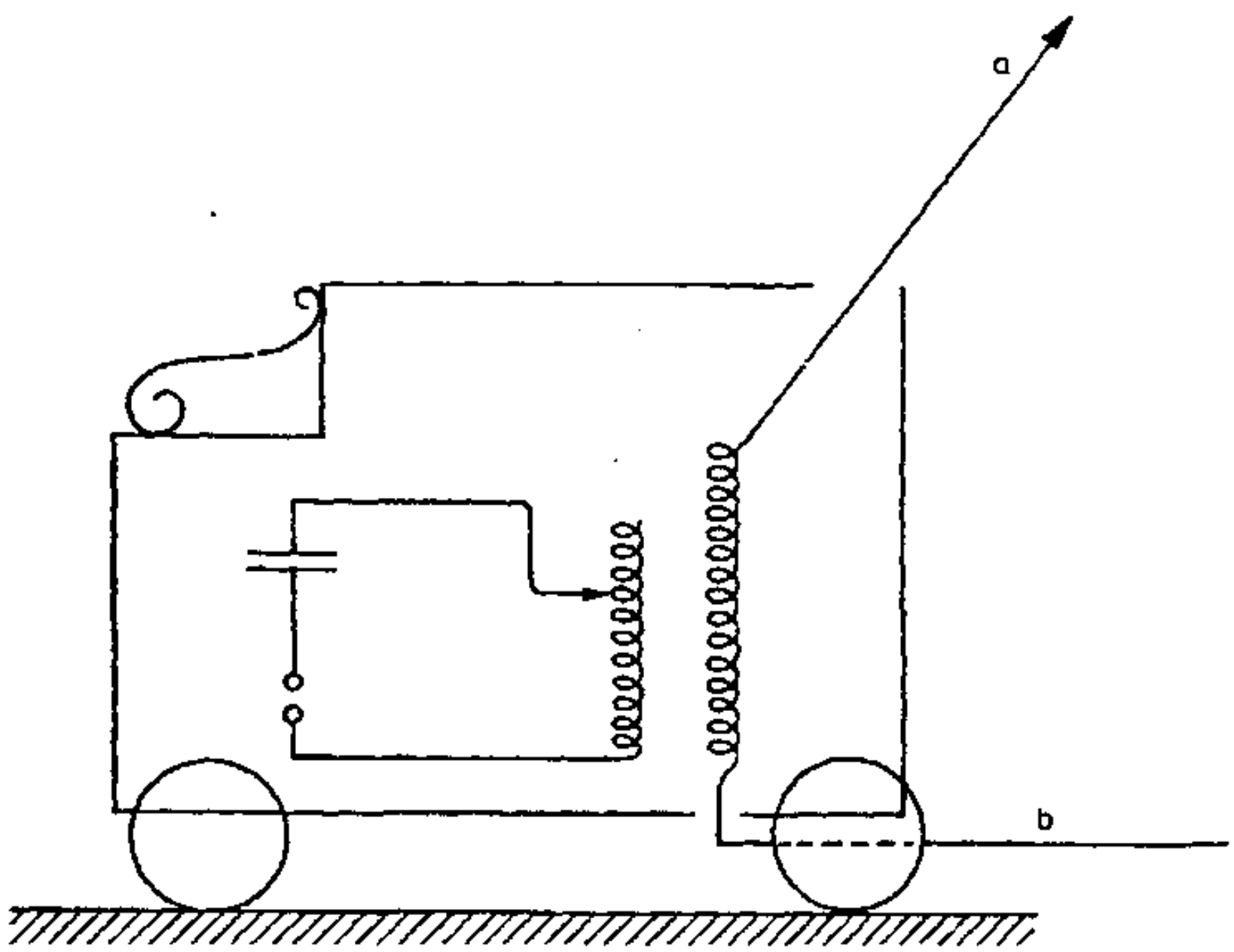


Рис. 2

присоединенная емкость бесконечно велика, то есть, когда точка возбуждения находится на хорошо проводящей земле.

С помощью подходящей конструкции контура, содержащего лейденскую банку, в передатчике достигаются значительно бо́льшие напряжения, нежели зарядное напряжение контура лейденской банки. У меня существовало подозрение, что большие емкости с искрами большей длины будут вести себя так же, как малые емкости. В то время об этом мало что было известно. Результаты более поздних экспериментов частично противоречили друг другу, так как не учитывались другие потери, которые появляются при высоких напряжениях. Однако в том, что касается сопротивления искры, мои страхи, как недавно показал М. Вин, оказались беспочвенными. Но поскольку мне хотелось предусмотреть любую случайность, я спросил себя, а нельзя ли еще увеличить мощность, например, соединяя *несколько* контуров с *одной и той же* частотой колебаний в контур возбуждения передатчика. Сложность состояла в том, чтобы соединить такие контуры вместе так, что все они начинали бы разряжаться одновременно, например, в пределах точно $\frac{1}{10}$ миллионной доли секунды. Эта задача занимала меня вновь и вновь. Одно решение,

которое было найдено несколько отличным способом и к которому я пришел в ходе своих экспериментов, показано здесь (рис. 3). Его описывали как «связь энергии». Позже я коснусь преимуществ, которыми обладает эта схема, оставшаяся в употреблении, несмотря на полученные Вином результаты.

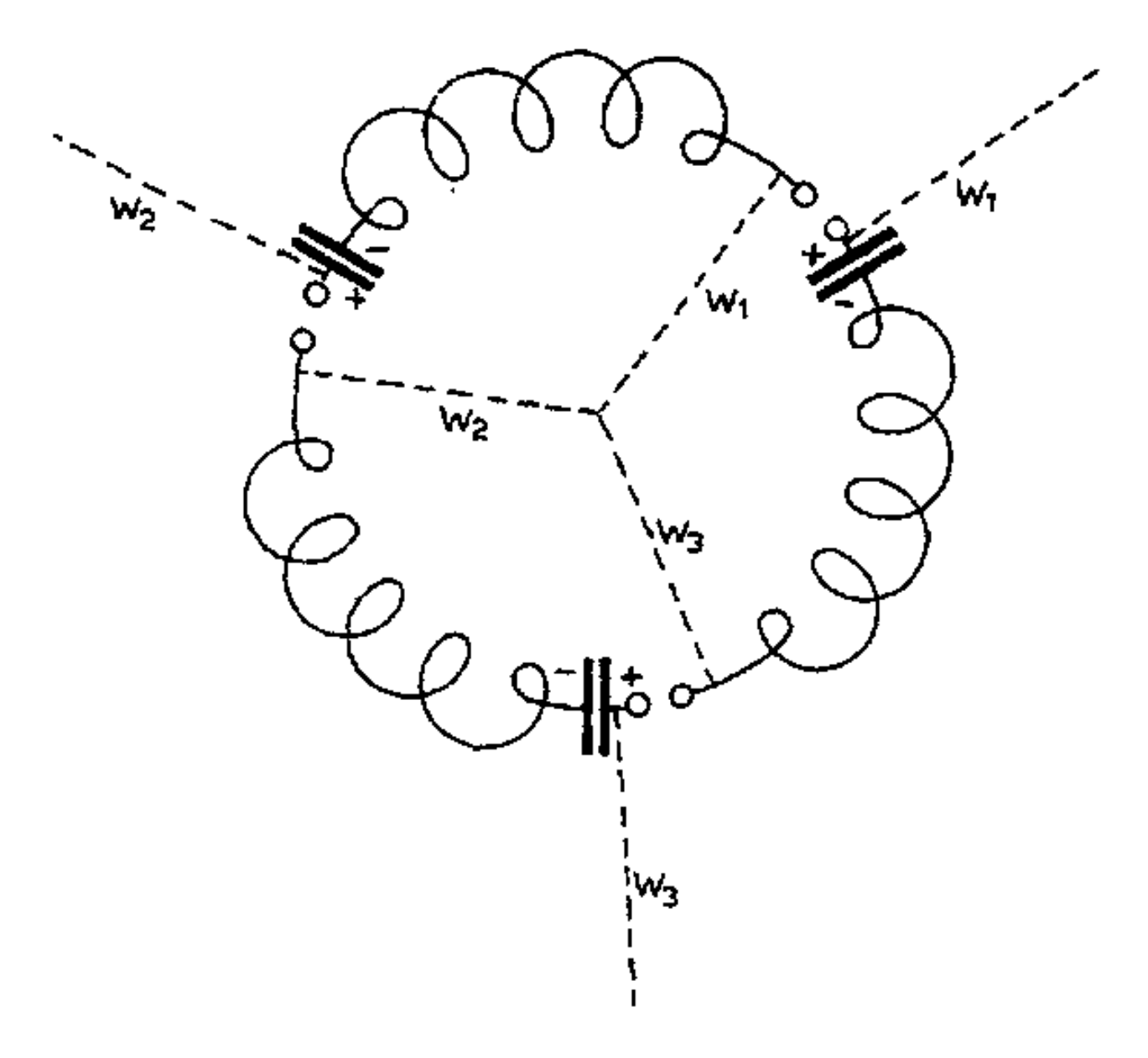


Рис. 3

Эксперименты должны были продолжиться на практике после пасхи 1899 года. Выбор места для их проведения пал на Кукскхавен. Помимо основной поставленной задачи существовало еще и почти непреодолимое давление других родственных опытов и задач, например: как работает когерер, особенно в реальных условиях? Является ли он сопротивлением, ведет ли себя как емкостной элемент или проявляет свойства обоих? Можно ли его заменить чем-то более определенным, и, по возможности, более информативным с количественной точки зрения? Как действуют на антенну близлежащие здания или скопления металла типа мачт и опор, которые на практике играют столь важную роль? Было еще много других проблем, связанных с конкретным принимающим аппаратом. И все эти проблемы влияли на общее решение, так что все их нужно было решать почти одновременно. Из-за своих профессиональных обязанностей мне удавалось посвящать экспериментам лишь очень

малое время, поэтому до осени 1900 года все они проводились двумя моими ассистентами. Я уже описывал способ, с помощью которого на практике при использовании систематических методов были обнаружены наиболее благоприятные условия.

Шестнадцатого ноября 1900 года я прочитал свою первую публичную лекцию по данному предмету в Обществе естественных наук в Страсбурге. В ней я описал, помимо всего прочего, преимущества, которыми обладают мои контуры для резонансной телеграфии и которые Маркони к тому времени тоже признал. Первого февраля следующего года я продемонстрировал перед тем же Обществом методы, которые легли в основу настройки приемника. Более или менее похожие опыты я проводил и в Ассамблее исследователей естественных наук в Гамбурге осенью того же года, а также демонстрировал практические результаты на станции в Хелиголенд.

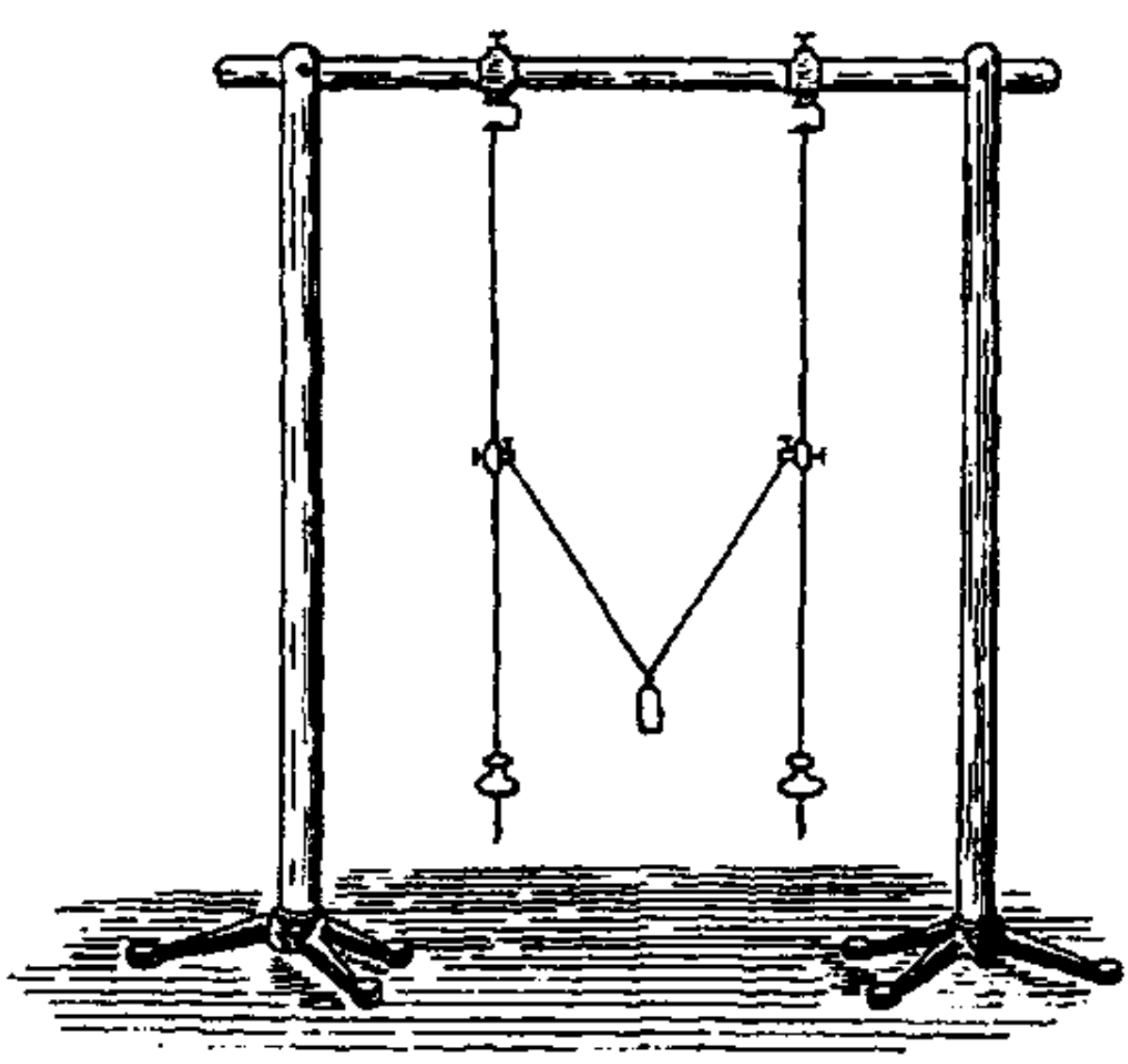


Рис. 4

Самой важной характеристикой приемника также является емкостной контур, который напрямую связан с антенной и который, по моему выражению, наилучшим образом лишенный каких бы то ни было потерь, собирает энергию, излучаемую в направлении приемника, локализует ее и тем самым передает к детектору в наиболее подходящей форме.

Вместе с моими схемами во всю систему беспроволочной телегра

фии были введены так называемые *связанные* системы, и сейчас мы можем кратко исследовать их свойства. В качестве иллюстрации я предпочел использовать модель маятника Обербека, хотя она и не совсем соответствует электрическим условиям. Я воспроизвел ее на рис. 4. Два маятника, имеющие одинаковую частоту, «связаны» нагруженной нитью. Я отвожу первый маятник из положения покоя и отпускаю его. Он передает свою энергию второму маятнику, энергия которого возрастает за счет первого, возбуждающего, маятника. Через некоторое время вся энергия переходит ко второму маятнику. Однако теперь процесс повторяется в обратной последовательности. Если я сделаю первый маятник тяжелым, а второй — легким, я смогу добиться того, что амплитуда колебаний второго маятника будет больше амплитуды колебаний первого. Первый маятник представляет собой контур лейденской банки, а второй — передатчик, к которому (в этом случае) переходит вся энергия контура лейденской банки. Напряжение можно увеличить (или, в случае необходимости, уменьшить) в соответствии с отношением емкостей.

В 1895 году Обербек с помощью расчета показал следующее. Если емкостной контур получает возможность индуктивно действовать на второй контур, имеющий *такую же* собственную частоту, то в обоих контурах появляются, что удивительно, *два* колебания, причем частота одного выше, а другого — ниже собственной частоты колебаний. Чем теснее связь, т. е. чем быстрее энергия переходит от первого контура ко второму, тем дальше друг от друга лежат получившиеся частоты. Только в случае бесконечно слабой связи частоты двух полученных колебаний примерно равны собственной частоте, то есть становятся равными друг другу.

Этот результат имеет место и для механических систем, в число которых входят наши маятники. Если два одинаково настроенных маятника связаны, то каждый из них должен проявлять *две* разные частоты колебания. Полученный результат перестает удивлять, если данное явление рассматривать не с математической точки зрения, а пронаблюдать на практике своими глазами. Его характеристика такова: колебания второго маятника, начинаясь с нуля, постепенно возрастают, затем опять уменьшаются, и наоборот. В движении каждого маятника мы замечаем то, что в акустике известно под названием «биения». Сейчас я напомню вам метод графического представления акустического биения (рис. 5). Колеблющийся камертон несет стеклянную пластинку, покрытую сажей (черным углем). Второй камертон пишет на этой колеблющейся стеклянной пластинке небольшим штырьком, двигаясь при этом по пластине. *Один* камертон описал бы кривую постоянной амплитуды (рис. 6). Ко-

лебания же двух камертонов складываются алгебраически. И когда оба камертона имеют разные частоты, как в данном случае, получается кривая, изображенная на рис. 7.

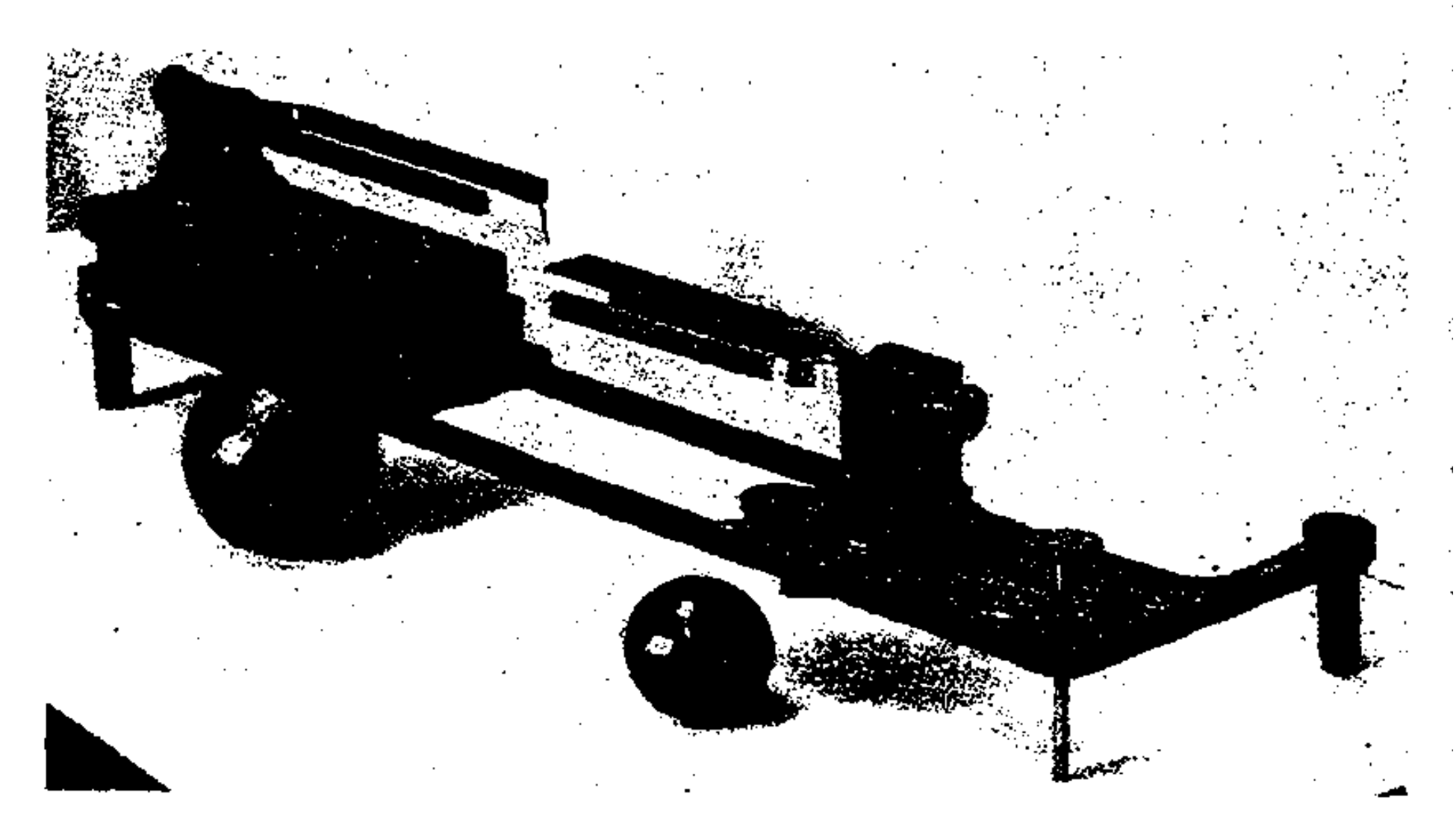


Рис. 5

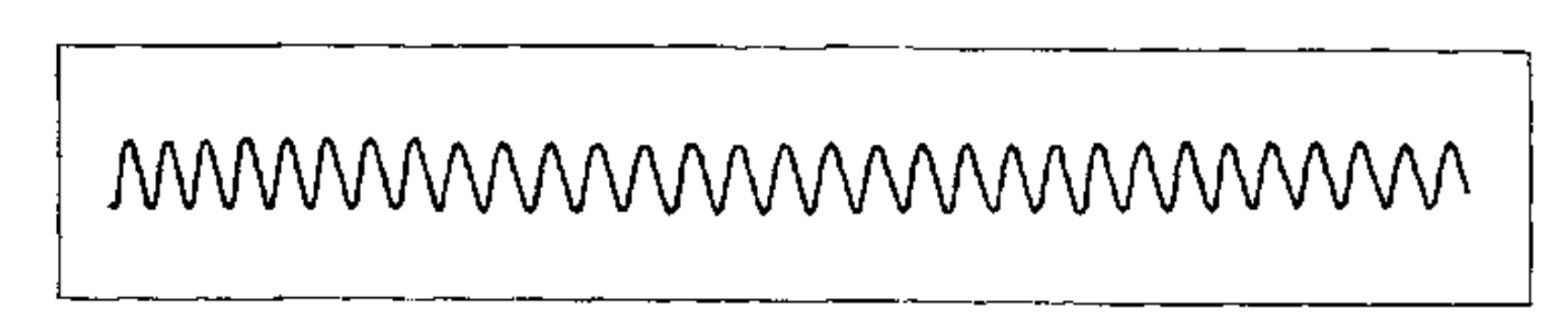


Рис. 6

Для краткости я назову такие колебания «бьющими или пульсирующими». Именно такие кривые появились бы, если бы мы позволили своему *маятнику* писать на движущейся пластине. Если бы возбуждающий маятник нарисовал верхнюю кривую, *a*, то возбужденный маятник нарисовал бы нижнюю кривую, *b*.

Каждое *подобное* пульсирующее колебание, исходя из элементарных законов тригонометрии, можно рассматривать как возникающее из суперпозиции двух гармонических колебаний различной частоты, например, n_1 и n_2.

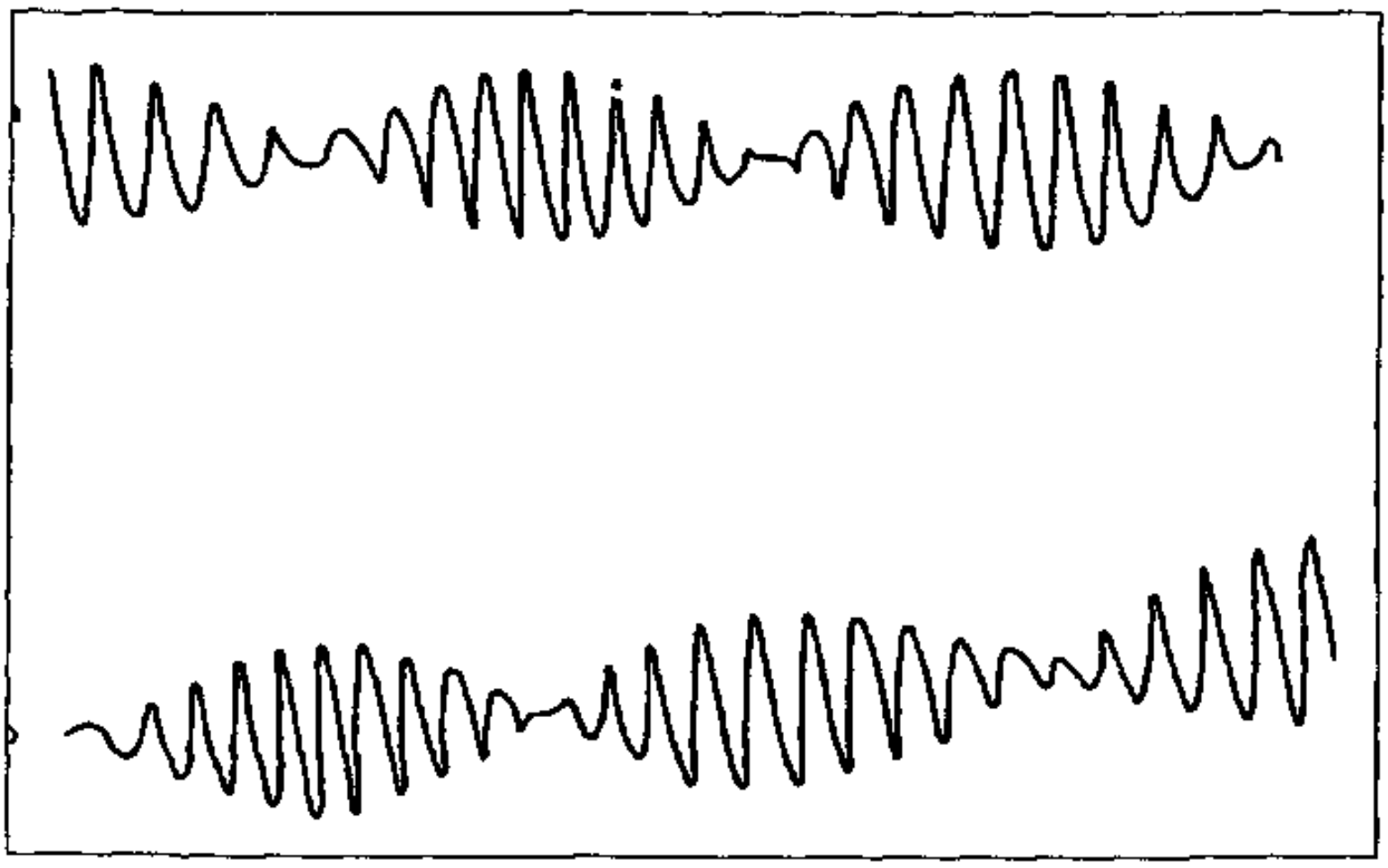


Рис. 7

Несмотря на математическую возможность этого, опыт учит нас тому, что если это пульсирующее колебание приложить к структуре, способной совершать колебания с собственной частотой, соответствующей той или иной из частот n_1 или n_2, тогда в ней будут возбуждаться колебания собственной частоты. Она выбирает одну из фиктивных гармонических составляющих, тем самым наделяя ее независимым существованием. Тело, возбужденное таким образом, называется резонатором, а само явление известно как резонанс.

Это очень легко понять на примере камертона. Мы наблюдали бы пульсации в пространстве, но резонаторы разделили два тона камертонов. Применение нашей модели маятника также очевидно. Каждая часть системы осуществляет пульсирующие колебания, а резонаторы реагируют на два различных гармонических колебания[1]. Если мы пожелаем (здесь я вновь возвращаюсь к примеру, связанному с электричеством) с помощью резонаторов записать колебания радиоизлучения, испущенного в пространство антенной, то мы должны настроить резонатор на одно из двух колебаний.

Эти электрические колебания можно разделить с помощью контура

[1]Если бы у меня было достаточно времени, то я смог бы продемонстрировать оба этих колебания «аналитически» с помощью модели маятника. Эта вторая модель, введенная доктором Мандельштамом и представляющая прямую связь через ее правильный механический аналог, позволяет увидеть каждую деталь.

переменной емкости, так называемого резонансного контура лейденской банки (к которому я вернусь позднее), *пока обеспечивается требо вание*, что, насколько это возможно, контур не имеет обратной связ с исследуемой системой. Результат, полученный Обербеком, относилс к тому случаю, когда обе составляющие системы имели *замкнутые* кон туры тока (с квазистационарным потоком) и соединялись индуктивно Теперь несложно показать, что оба колебания также существуют и в от крытом контуре тока антенны, вне зависимости от того, возбуждаетс ли она непосредственно или индуктивно (я не принимаю во вниманиі высшие гармоники).

Летом 1902 года мне удалось построить две экспериментальны станции в двух фортах Страсбурга с целью более тщательного изуче ния данного вопроса. Задача, которую я поставил перед нами, заклю чалась в определении наиболее благоприятных условий для приемника Мы выбрали резонансный контур, в котором известные емкости сочета лись с рассчитанными самоиндуктивностями, чтобы обе части систем передатчика имели одну и ту же собственную частоту колебаний. Точн также мы зафиксировали два колебания, возникающие вследствие связі и начали искать их с помощью приемника. Результат нашего опыта н тот момент показался нам удивительным, и вы это увидите из пример Если посредством катушки в цепи приемника колебания передавалис индуктивно на вторую катушку, расположенную в настроенном конту ре, содержащем индикатор (параллельно небольшому конденсатору), достигалась не только острота резонанса, но и, — что как раз бы удивительным, — *интенсивность* возбуждения повышалась, как толь две катушки *отодвигали* друг от друга. Итак, интенсивность возраста при увеличении расстояния между катушками, хотя обычно по дост жении некоторого предельного расстояния она снова начинала падат Говоря повседневным языком, эффективность возрастала с *ослаблени* связи. Результат, полученный для приемника, *не* был подвержен подо ной слабой связи в передатчике.

Эти эксперименты дали два важных результата: (a) большую св боду от помех в приемнике и (b) ценный измерительный инструмент д техники беспроволочной связи. Когда доктор Франк из компании «С менс и Гальске» (который работал с нами) увидел эти эксперименты, предложил положить их в основу технического оборудования. До то времени резонансный контур собирали из существующих деталей и тог что попадет под руку, и подгоняли под конкретные требования. Комбин цией градуированного переменного вращающегося конденсатора Кепс ля и нескольких рассчитанных самоиндуктивностей был создан аппар

который удобно и непрерывно охватывал большой диапазон длин волн. «Действие тока» измерили с помощью воздушного термометра Рисса, который я уже давно использовал для измерения интенсивности колебаний. Техническая подготовка пришлась на долю мистера Денитца. Так появился описанный им волномер, который обычно называют его именем, — аппарат, который, используя теорию, разработанную уже в 1891 году Бьеркнесом, позволил одновременно измерять *демпфирование* или затухание электрических волн — величину, численное значение которой всегда было чрезвычайно необходимым. Существуют другие волномеры с открытыми контурами токов; они проще, но, несмотря на это, аппарат, основанный на замкнутом контуре, в силу своих преимуществ занял в данной области основное место. Этот инструмент заложил основы измерительных технологий для беспроволочной телеграфии. Очень скоро он вытеснил наше громоздкое лабораторное оборудование и весьма помог нам в наших научных исследованиях, так как стал необходим для рациональной технической работы в области электрических колебаний.

Летом 1902 года была опубликована работа Макса Вина по теоретическому изучению передатчика на связанных колебательных контурах. К эффекту затухания эта работа имела особое отношение. С помощью расчета Вин показал разнообразие свойств такого передатчика. Количественные результаты своей работы он обобщил в следующем предложении: «В соответствии с типом связи можно достичь мощного, но быстро затухающего возбуждения, которое распространяется на большое расстояние, или, наоборот, медленно ослабевающего цуга волн, способного, проходя мимо всех других, возбудить настроенный на ту же частоту резонатор, — пушка, которая выстрелила так, что звук выстрела будет слышен далеко далеко, или мягкий, медленно ослабевающий звук камертона».

Это теоретическое исследование оказалось наиболее эффективным для прояснения сущности данной проблемы, а потому оно навсегда останется в ее основе. Однако мы еще не видели, насколько близко данные, выбранные для численных примеров, соответствуют реальной практике. В отношении затухания мы располагали лишь несколькими вычисленными цифрами и несколькими цифрами, измеренными в лаборатории. Начало открываться поле измерений, имеющих отношение к практике. С этого момента и далее работа расширялась все больше и больше, разделяясь, с одной стороны, на исследования в научных лабораториях, а с другой стороны, на перенос полученных результатов на практику с ее сложными условиями и многочисленными требованиями. Успехом,

который был достигнут в последнем, мы обязаны графу Арко и мистеру Рендалю.

Обстоятельства, которые более десяти лет назад привели мен к введению емкостного контура, тем временем весьма изменились. В на ше время контур, содержащий лейденскую банку, по-прежнему необхо дим в беспроволочной телеграфии. Однако мне следует упомянуть дв характеристики, которых я еще не касался:

1) При равных значениях мощности легче создать индуктор, чтоб использовать его с большими зарядными емкостями и низкими на пряжениями, нежели наоборот. В то время для упомянутого ране энергетического контура этот фактор был определяющим, каким о остался и для данной схемы.

2) В контуре с лейденской банкой практически не существует трудно стей с изоляцией, однако в контуре антенны наблюдается обратное Например, если изоляторы в связанном проводнике влажные, т передатчик все равно работает, но при этом может оказаться невоз можным зарядить его при нулевой или низкой частоте.

Последний момент я проиллюстрировал в своей лекции в ноя бре 1900 года с помощью следующего эксперимента. Я обеспечил инду тивное действие передатчика на соседний приемник, тем самым создава в последнем ток, который ярко зажигал раскаленную лампу. Я прикаса ся к антенне передатчика влажной связывающей нитью, которая соед нялась с землей. Это не возымело никакого эффекта на действие в слу чае с передатчиком на связанных контурах, однако передатчик с прямо зарядкой индуктора переставал работать, как только к нему прикасала влажная нить.

Прежде чем оставить вопрос связанных систем, мне, наверное, сле дует упомянуть об одном вспомогательном средстве, которое было вес ма полезно как для меня, так и для других экспериментаторов. Я гово рю об электронно-лучевой трубке, которую я описал в 1897 году. Он предоставила наглядную форму кривых тока и напряжения до 100 кГц и явилась средством, с помощью которого можно было исследовать ка период, форму колебания, интенсивность, а следовательно, и затухани так и относительные фазы.

Одним из первых применений этой трубки был метод Кнута Ан стрема, с помощью которого он непосредственно показал кривую гист резиса. Аналогичным образом в Страсбургском институте была исслед

вана проницаемость железа вплоть до 130 кГц/с, а также были изучены несколько других проблем, связанных с электрическими колебаниями.

Три осциллограммы, сделанные с помощью этой трубки, послужат для того, чтобы показать ее применение. Они иллюстрируют форму тока первичной обмотки в индукторе, который нас интересует, и важность присутствия в нем конденсатора.

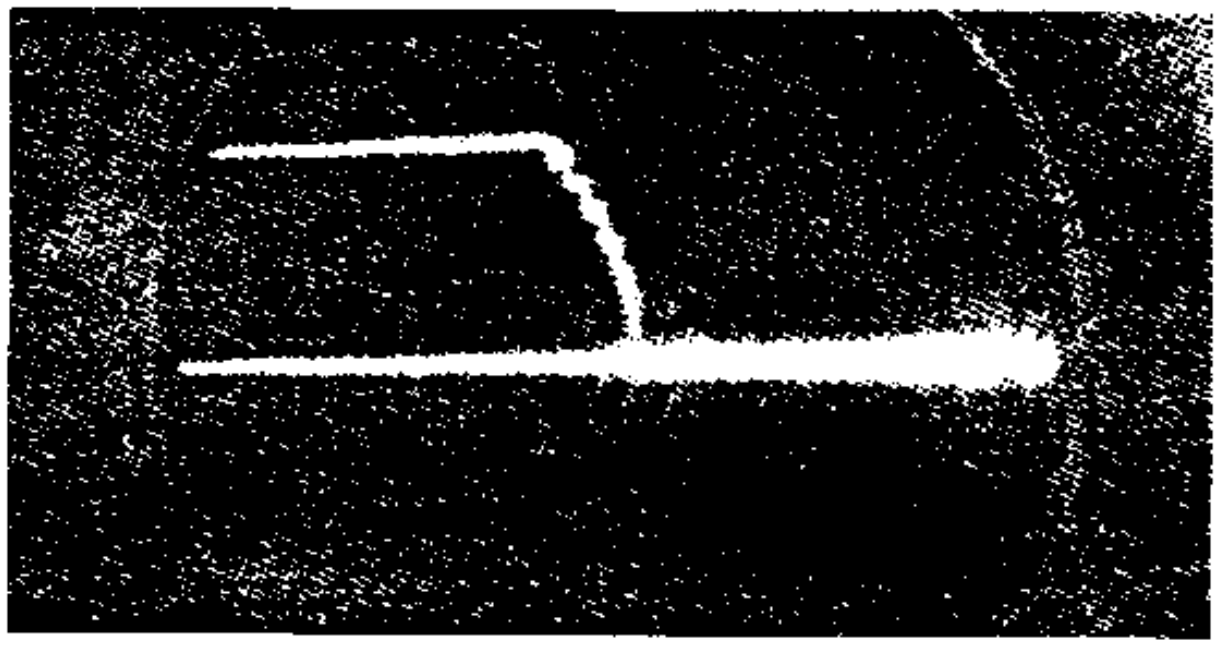


Рис. 8

На рисунке 8 первичный ток в неемкостном контуре при разрыве этого контура достаточно медленно уменьшается. С другой же стороны, при включении в контур конденсатора (рис. 9) при разрыве контура происходят *колебания*. Ток снижается гораздо сильнее, по более крутой линии, и почти на двойную величину. Вторичная обмотка была незамкнута. Если этот индуктивный контур замкнуть (рис. 10), колебания станут быстрее и будут затухать еще сильнее.

В хорошо известной книге Ценнека приводится множество применений такой трубки. Сейчас я покажу вам только колебания тока в двух связанных (но сильно затухающих) емкостных контурах. Вы увидите, что трубки действительно показывают реальные пульсирующие колебания (рис. 11).

И еще в одном месте беспроволочная телеграфия привела меня к исследованиям, проведенным мной ранее; на этот раз это была работа, которой я занимался в юности. В 1874 году я обнаружил, что материалы типа галенита, колчедана, пиролюзита, тетраэдрита и т. п. не подчиняются закону Ома, особенно когда электрод контактирует с малой площадью поверхности. Эти материалы очень меня интересовали, поскольку они проводят электричество без электролиза, несмотря на то, что представляют собой двойные соединения. Казалось, что сопротив-

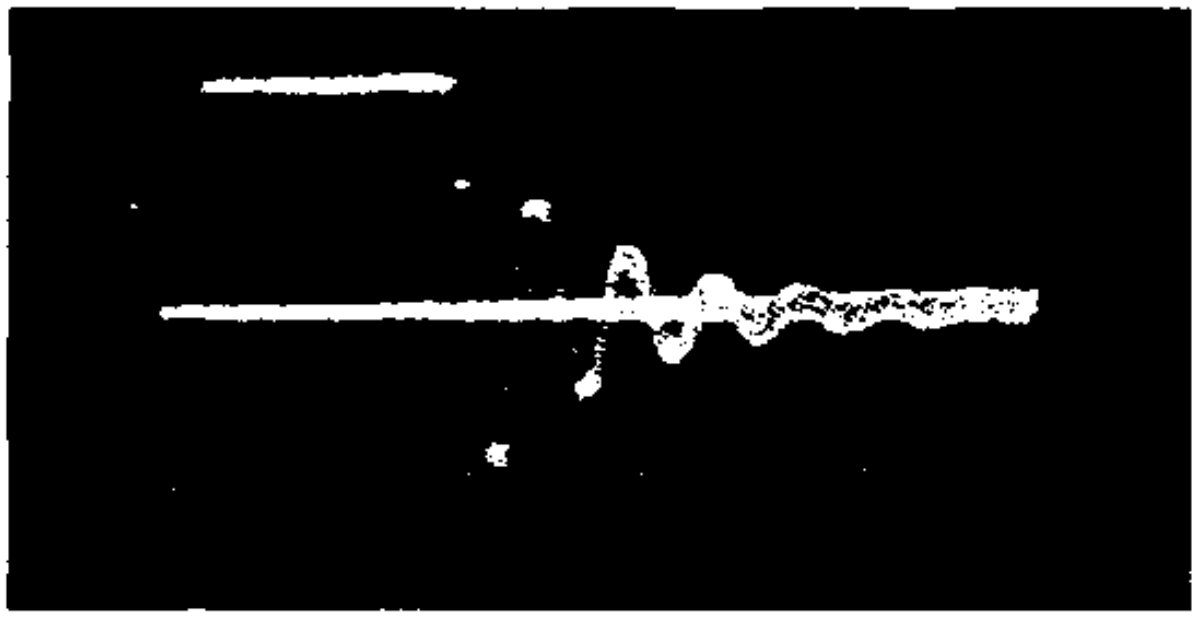


Рис. 9

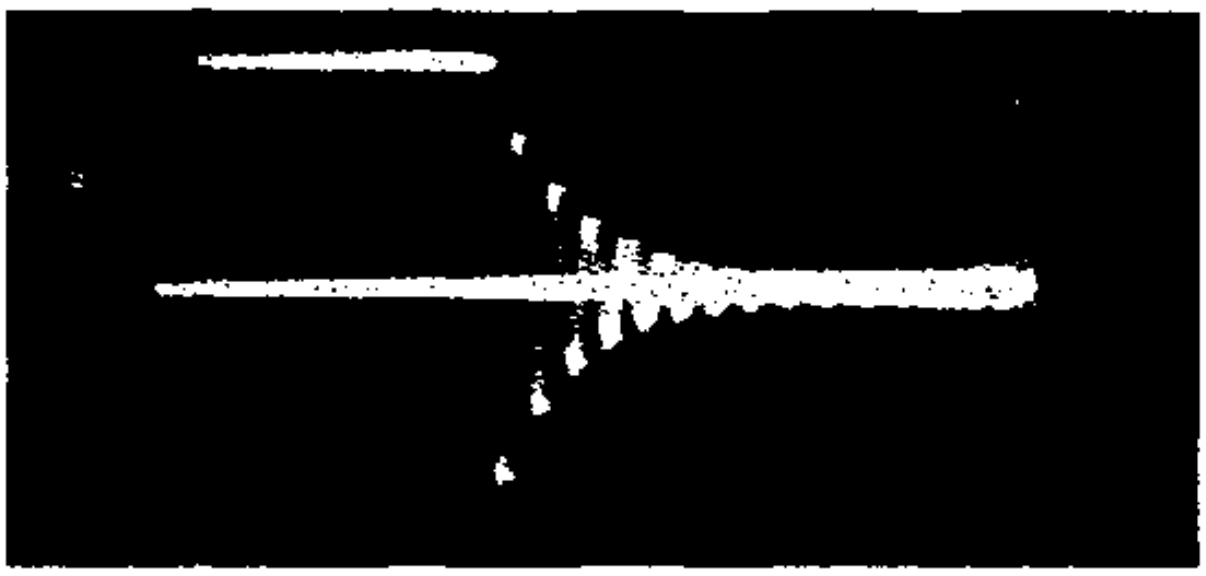


Рис. 10

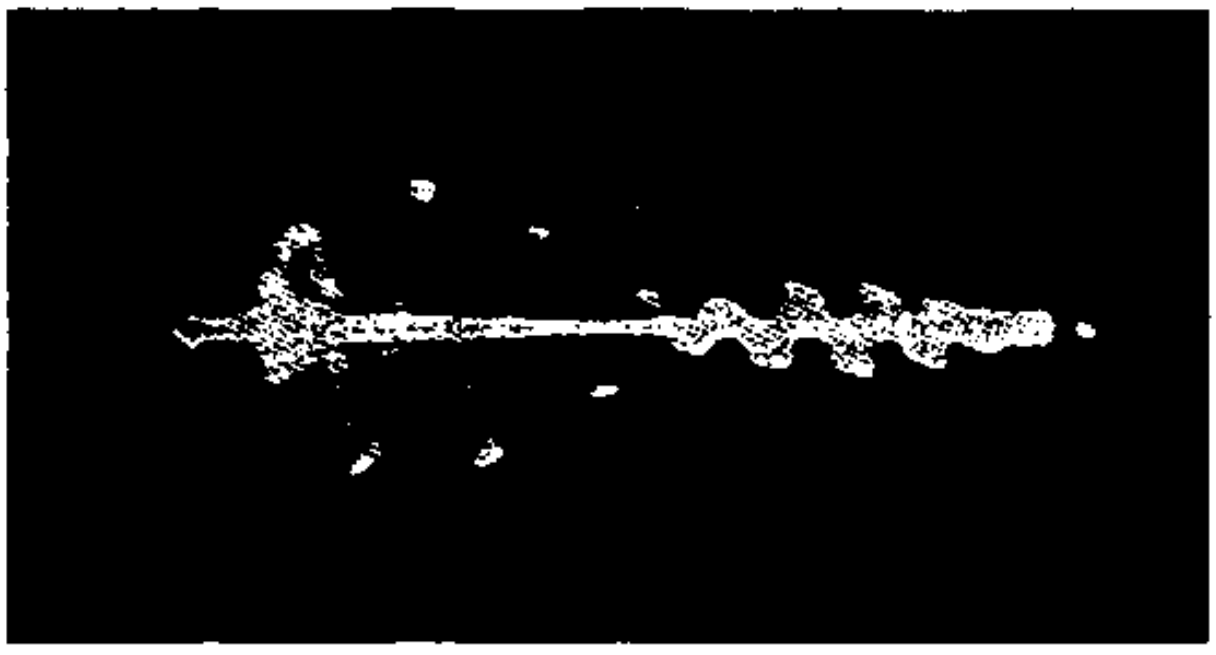


Рис. 11

ление зависит от направления и силы тока, так что я мог, к примеру, разделить с помощью этих материалов токи замыкания и отключения небольшого индуктора так же, как это происходит в трубке Гейсслера

Мне не удалось «объяснить» данные явления, например, какая асимметрия материала соответствует электрическим асимметриям (которые, несомненно, существуют). Мне пришлось удовольствоваться тем, что я показал, что наблюдаемые явления возникают не вследствие вторичных эффектов типа нагревания. Я сумел показать, что это свойство появляется — по крайней мере, количественно, — даже за 1/500 секунды, и был убежден, что, — может быть, в самой отдаленной степени, — здесь идет речь о безынерционном процессе. Это мнение поддержал Э. Кон, который провел несколько экспериментов и обнаружил, что несимметричное сопротивление постоянному току может следовать за колебаниями тока с частотой 25 кГц. Но меня не покидало чувство неудовлетворенности, а вместе с ним и смутное воспоминание, которое, судя по всему, продолжало дремать в глубинах моего разума. Когда в 1898 году я начал заниматься беспроволочной телеграфией, то опять инстинктивно пришел к этому эффекту клапана (с помощью которого я много раз, хотя и тщетно, пытался получить постоянный ток из световых колебаний). Элементы проявляли ожидаемый эффект детектора, но *в то время* не дали никаких преимуществ над когерером. Когда произошел переход к принятию сообщений на слух, я вернулся к этим материалам и в 1901 году понял, что они могут оказаться полезными для этой цели. В 1905 году *Gesellschaft für drahtlose Telegraphie* (Компания беспроволочной телеграфии), исходя из моей рекомендации, решила начать технический проект в этой сфере деятельности. Сегодня эти детекторы, включая и другие комбинации подобного рода, распространены очень широко. Пирс с помощью электронно-лучевой трубки продемонстрировал для медленных колебаний почти полное разделение положительной и отрицательной составляющих тока в случае молибденита. Мне кажется, что вопрос о том, происходит ли то же самое и для быстрых колебаний, по-прежнему остается открытым.

Сейчас я перейду к другой серии экспериментов.

Мне всегда казалось наиболее желательным передавать волны, преимущественно, в одном направлении. Я не стану касаться успешных опытов такого рода, которые были проведены в фортах Страсбурга в 1901 году, так как впоследствии оказалось, что подобные предложения уже были сделаны другими учеными.

В 1902 году я обнаружил, что антенна, наклоненная под углом несколько меньше 10° к горизонту, образует своего рода направленный приемник. Чувствительность показывала четко определенный максимум

для волн, проходящих через вертикальную плоскость, в которой располагалась антенна. Результаты были опубликованы в марте 1903 года.

Направленный *передатчик* делают следующим образом (рис. 12). Считается, что антенны A и B, расположенные в углах равностороннего треугольника, равны по фазе, но *запаздывают* на четверть периода колебания по отношению к антенне C, расположенной в третьем углу. Высота CD треугольника должна быть четвертью длины волны. Тогда излучение пойдет в направлении CD. Волна, исходящая из C, достигнет AB в тот момент, когда A и B начнут совершать колебания.

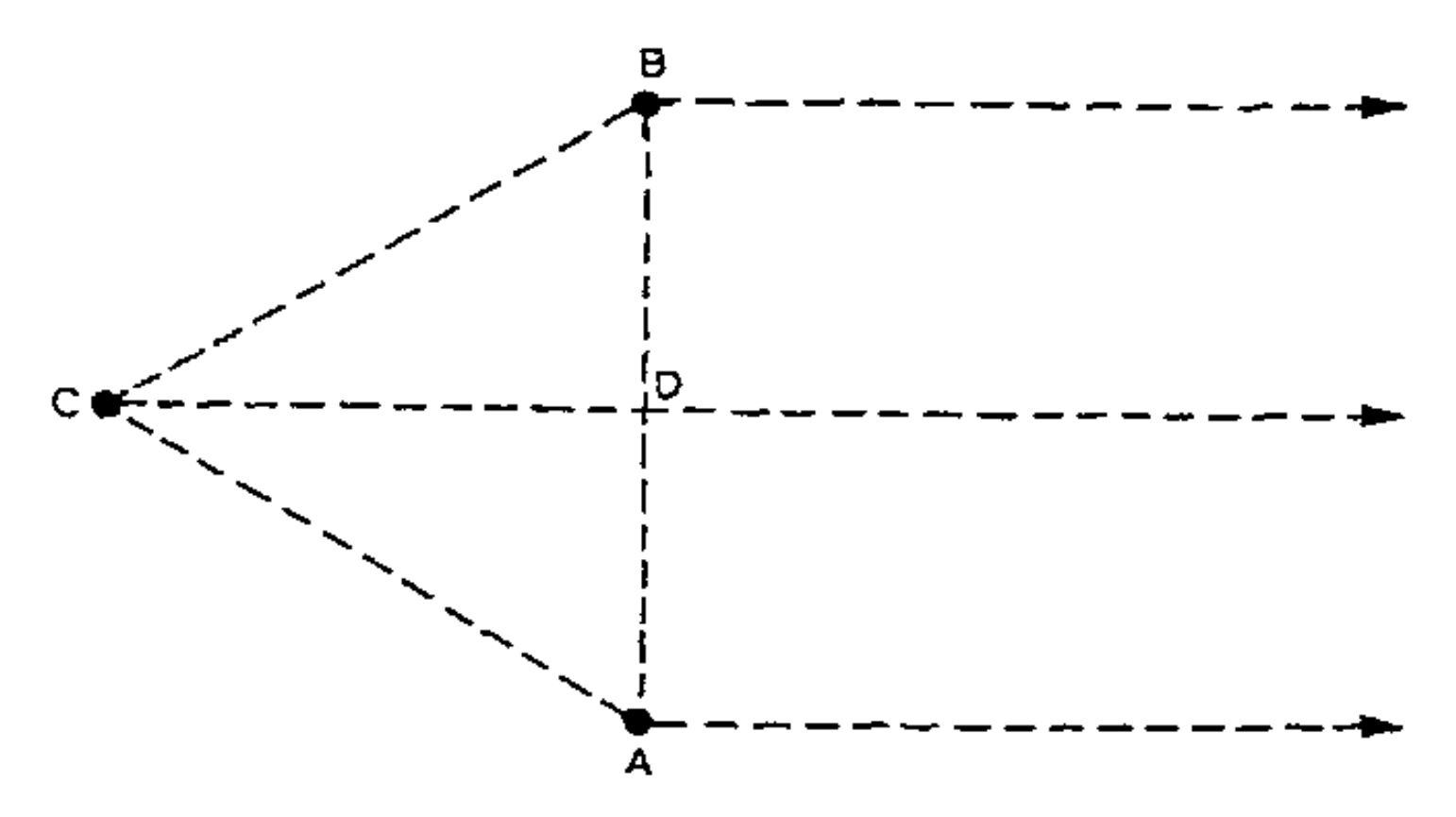


Рис. 12

Тогда возникла задача достичь такой же разности фаз для быстрых колебаний, а предварительно измерить эту разность. Метод измерения был найден легко, это был метод, доказавший себя на практике. Решение другой задачи не особенно продвигалось при использовании придуманной мной схемы. Однако два моих ассистента, которые после моего предложения взялись за эту работу в Страсбургском институте, нашли оригинальное решение. Эксперименты были проведены на большом учебном плацу неподалеку от Страсбурга (весной 1905 года).

На рисунке 13 схематически показана использованная компоновка. Поле измерялось на достаточно большом расстоянии, то есть в так называемой волновой зоне. Теория и практика в достаточной степени соответствовали друг другу, а результаты были проверены множеством различных способов. Затем было показано, что экспериментальная установка действует в желаемом направлении. Путем соответствующего распределения амплитуд в трех передатчиках было вычислено поле, как на

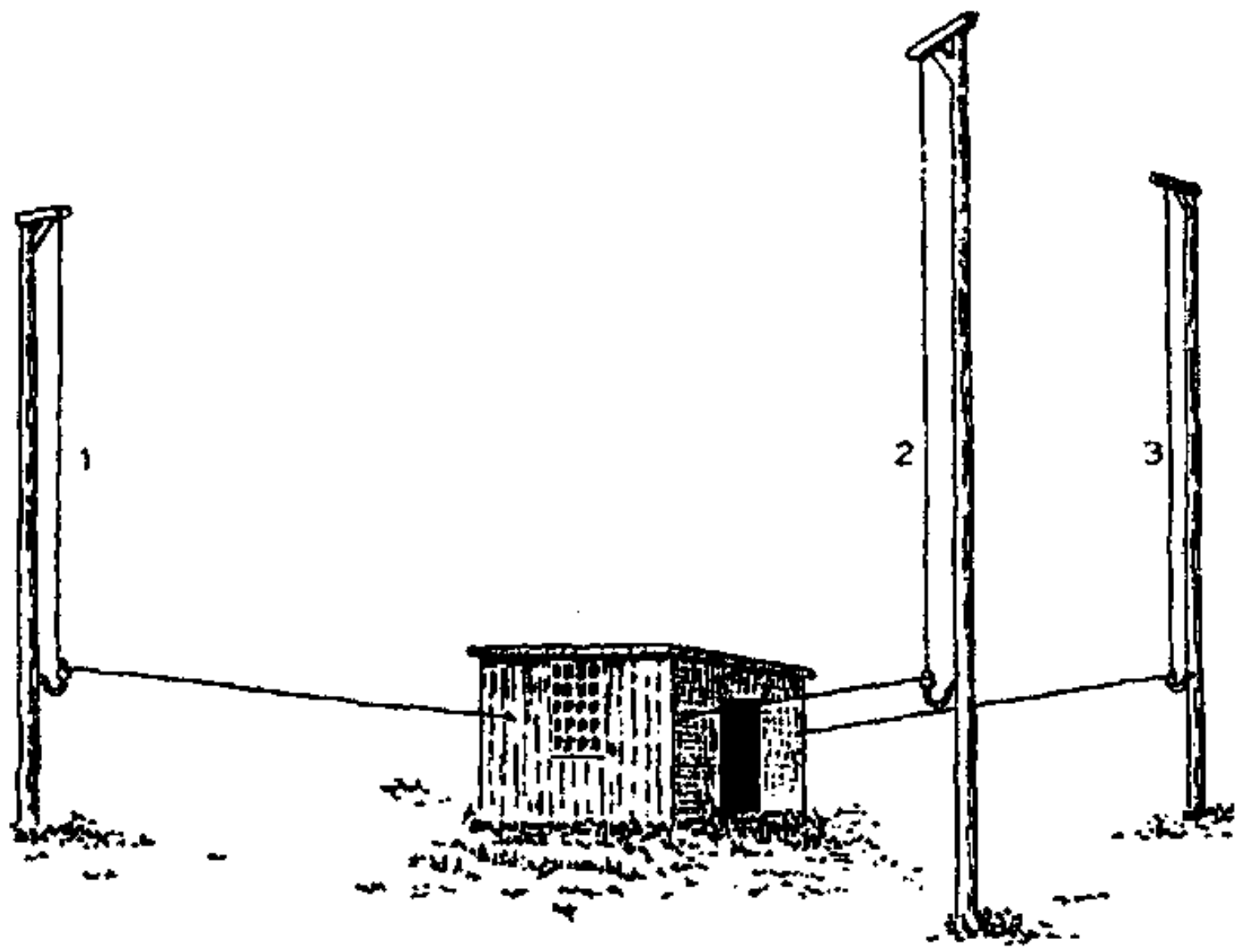


Рис. 13

рис. 14 (пунктирная кривая — это измеренное поле). Радиальные векторы представляют диапазон действия. Если три передатчика поменяются ролями — простым переключением ключа — желаемое направление может повернуться на 120° или 60°.

Кажется, будет интересным отметить, что привело к заключению о том, что излучение передатчика здесь ослабляется сдвинутыми по положению и фазе колебаниями его соседа, — выводу, который можно доказать экспериментально.

Если в наше время оптические явления объясняют действием электрических молекулярных резонаторов, то электрические процессы, продемонстрированные здесь на одном простом примере, можно также связать с оптическими явлениями, хотя в данной области это вряд ли можно подтвердить экспериментально.

В данном случае изучение электрических колебаний дополняет изучение оптических колебаний, а поскольку наше положение таково, что мы должны решать проблему, существующую в любой области, по аналогии с явлением, которое уже понято в другой области, первый подход к проблеме можно сделать с позиций электричества или оптики, в зависимости от того, где существует более легкая для понимания концепция.

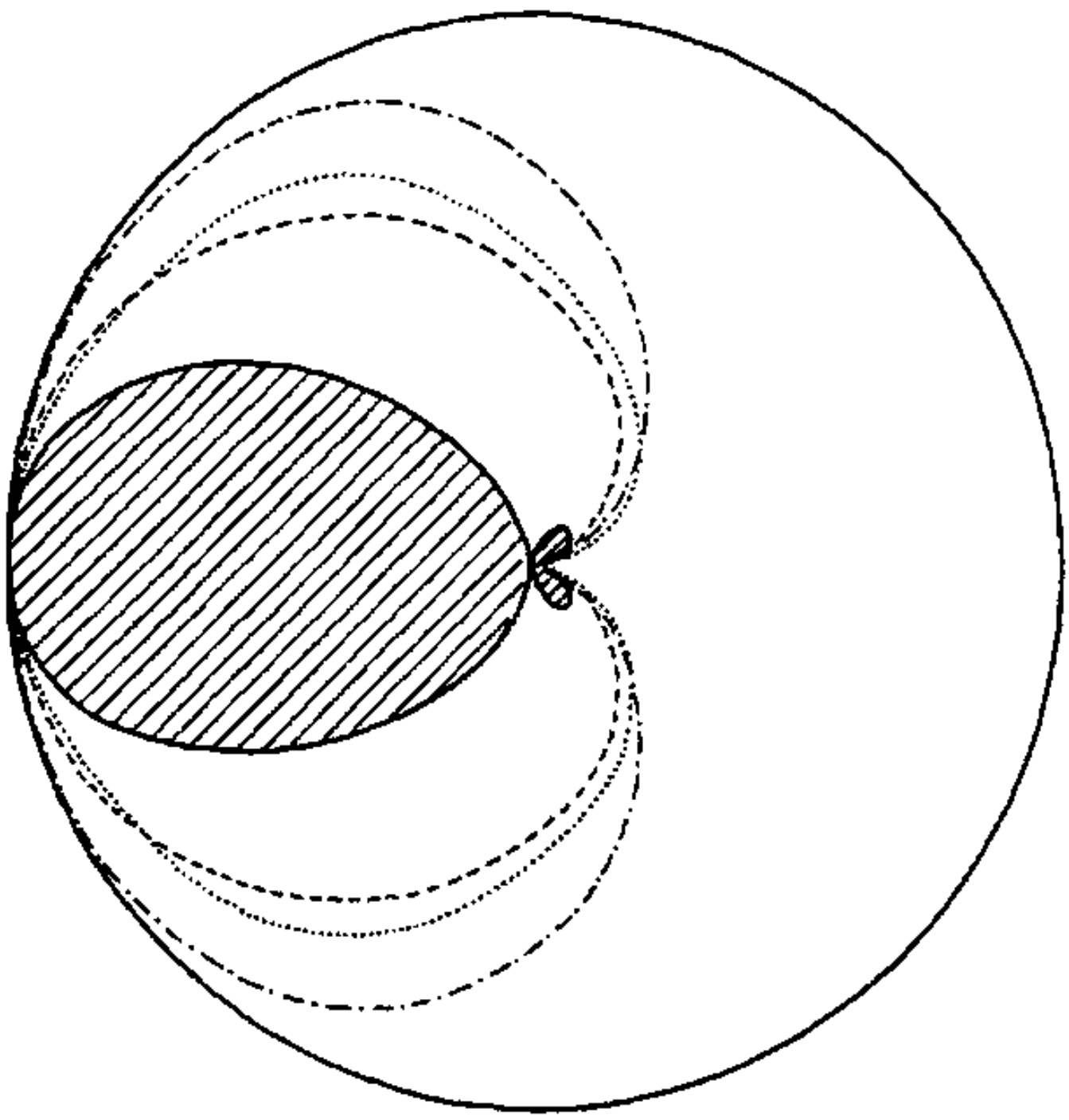


Рис. 14

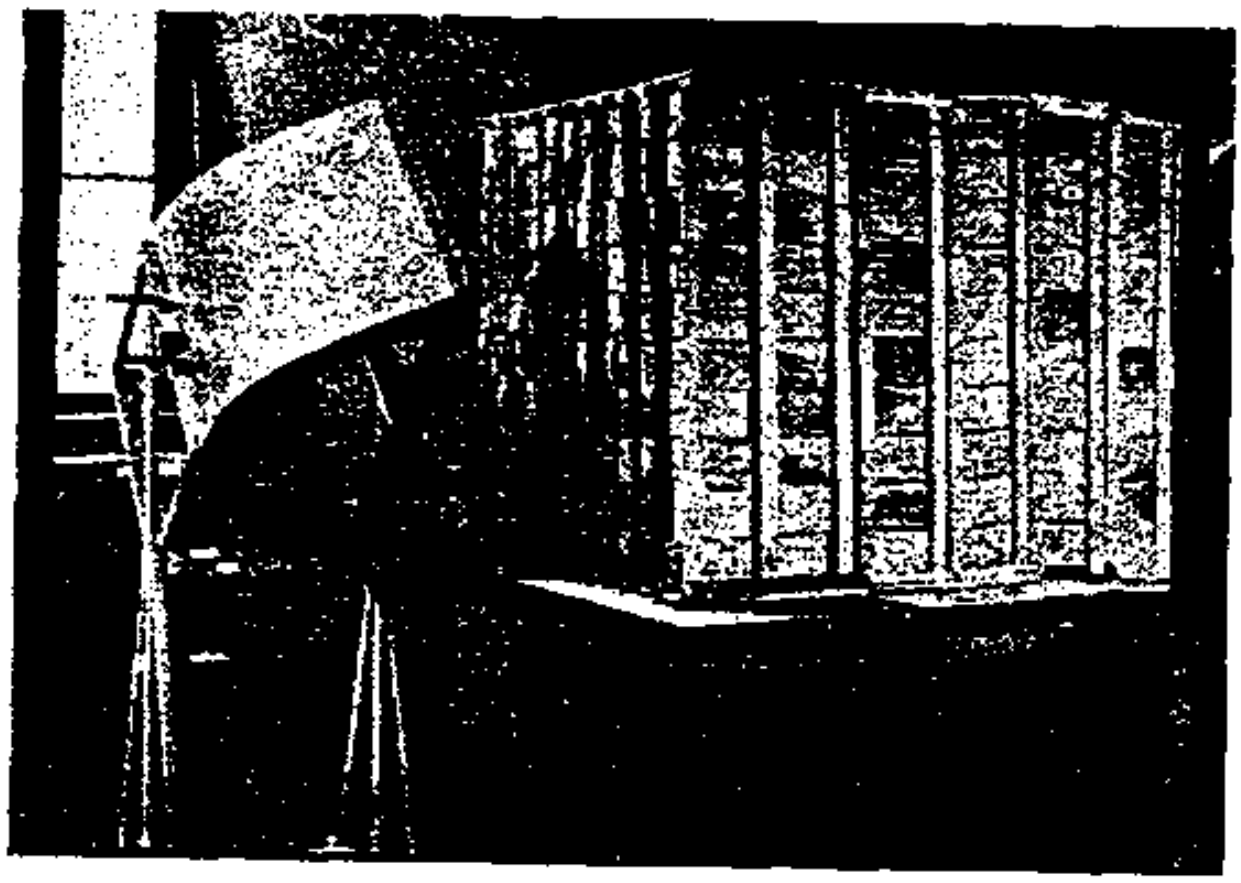


Рис. 15

Быть может, мне удастся продемонстрировать это на двух подготовленный примерах.

Элементарные размышления привели меня к выводу о том, что среда, состоящая из слоев с различными значениями диэлектрической постоянной, должна вести себя как одноосный кристалл, если допустить, что толщина слоя представляет собой только долю длины волны. Этот вывод мне удалось подтвердить с помощью следующего опыта (рис. 15). Рефлектор Герца испускает пучок практически параллельных электрических лучей. Он ударяется о конструкцию, сделанную из кирпичей, которые лежат слоями, разделенными воздушными промежутками равной ширины. Эти промежутки открыты для коротких волн, но если длина волны в 12, или около того, раз больше толщины промежутка, то кирпичная решетка ведет себя по отношению к этой волне как пространственно *однородное* тело, но проявляет двойное лучепреломление. Электрические колебания линейно поляризуются и падают под азимутом в 45° на слои кирпича. Кирпичная конструкция, которая примерно в два с половиной раза толще одного кирпича, оказывает эффект четвертьволновой слюдяной фольги, а линейно падающий луч появляется поляризованным по кругу, как следует из экспериментов с резонатором Риги. Допустим, что луч поляризуется по кругу в правую сторону. Если теперь толщину воздушного слоя удвоить, появляющаяся волна будет опять линейно поляризована, хотя и в другом квадранте. Таким образом, постоянно увеличивая толщину слоя, мы можем преобразовывать исходный луч в луч, поляризованный по кругу в левую сторону, и, наконец, обратно в луч, который поляризуется линейно и параллельно падающему лучу. Двойное лучепреломление кирпичной решетки превосходит преломление кальцита. Оптически эта кирпичная конструкция соответствовала бы крошечному кристаллу с длиной кромки в несколько тысячных миллиметра, но электрически она имеет толщину в два с половиной метра, весит 4 000 килограммов, а сырье, из которого она изготовлена, стóит около 200 марок. Позднее я также продемонстрировал и аналогичное оптическое явление.

Это явление двойного лучепреломления не зависит от использования твердых материалов. Таким образом, вопрос, является ли двойное лучепреломление в поперечнополосатых мышцах следствием подобной слоистой структуры, тесно связан с вышерассмотренным.

Мы рассмотрели неизвестное в электричестве, но хорошо знакомое в оптике явление и обнаружили, что оба они существуют. Следующий пример демонстрирует новое оптическое явление, соответствующее известному электрическому. Мне показалось интересным воспроизве-

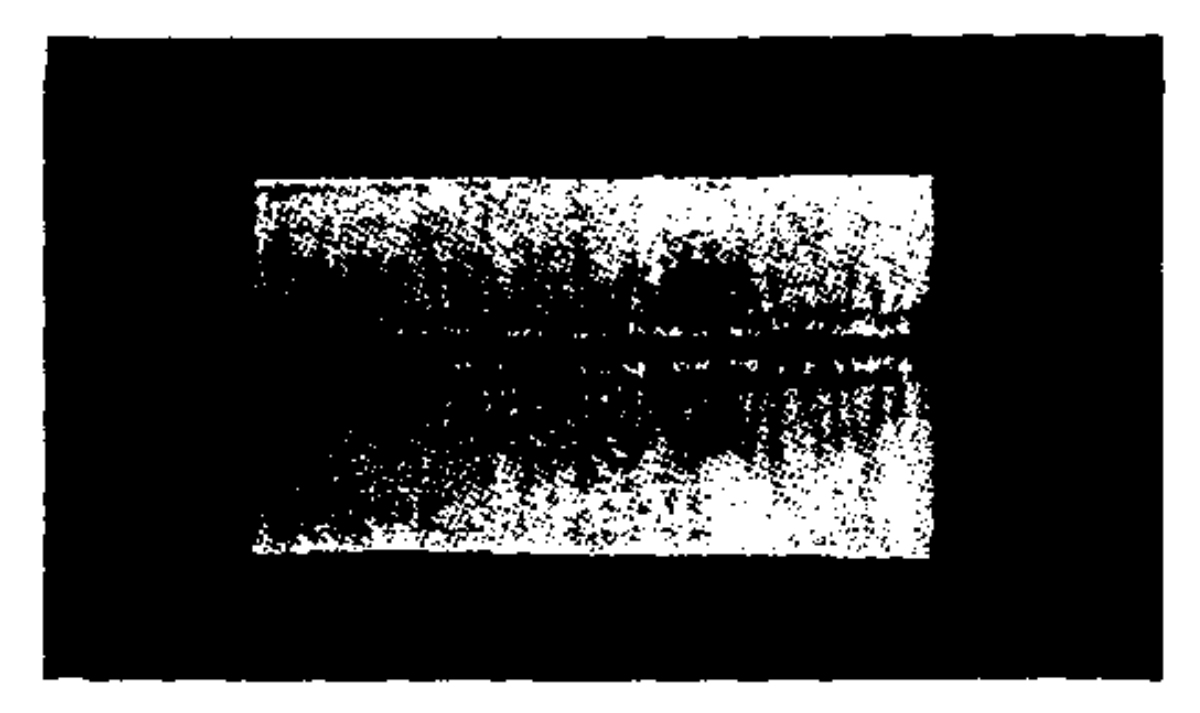


Рис. 16

сти эксперимент с сеткой Герца в области видимых лучей. Для этого очень тонкую сетку, состоящую из параллельных металлических проводов и содержащую от 10 000 до 100 000 тоненьких проволок, разделенных воздушными промежутками, нужно было разместить на ширине в 1 мм. Изготовить такую сетку с помощью механических методов невозможно, но ее можно сделать следующим образом. Если через тонкую металлическую проволоку, которая лежит на стеклянной пластинке, проходит мощный разряд, то происходит хорошо известный эффект распыления или испарения, как видно из рис. 16. Металлическая проволока испаряется (подсчитаны температуры до 30 000°). Металлический пар распространяется под давлением, создаваемым взрывным действием (рис. 17), а затем вновь осаждается на стекло, очевидно, в виде сеточной структуры. Если мы направим на подготовленную таким образом поверхность линейно поляризованный свет, то, если его колебания параллельны линиям сетки, они будут сильно отражаться и сильно поглощаться — подготовленная поверхность окажется темной (рис. 18). Если плоскость колебаний повернуть перпендикулярно линиям решетки, металлический слой становится прозрачным (рис. 19). Итак, мы имеем полный оптический аналог сетки Герца, сделанной из умеренно хороших проводников.

Этот эксперимент дает возможность дальнейшего развития. Если представить, что в организованной ткани, типа мышечной ткани или растительного волокна, существует подобная тонкая сеточная структура в виде тончайших канальцев, тогда, если бы нам удалось наполнить их металлом, данный препарат имел бы оптический эффект сетки Герца. В 1896 году Г. Амброн, обрабатывая вышеупомянутые вещества солями золота или серебра, обнаружил явления, которые я объяснил таким образом. При глубоком исследовании данного вопроса я везде находил

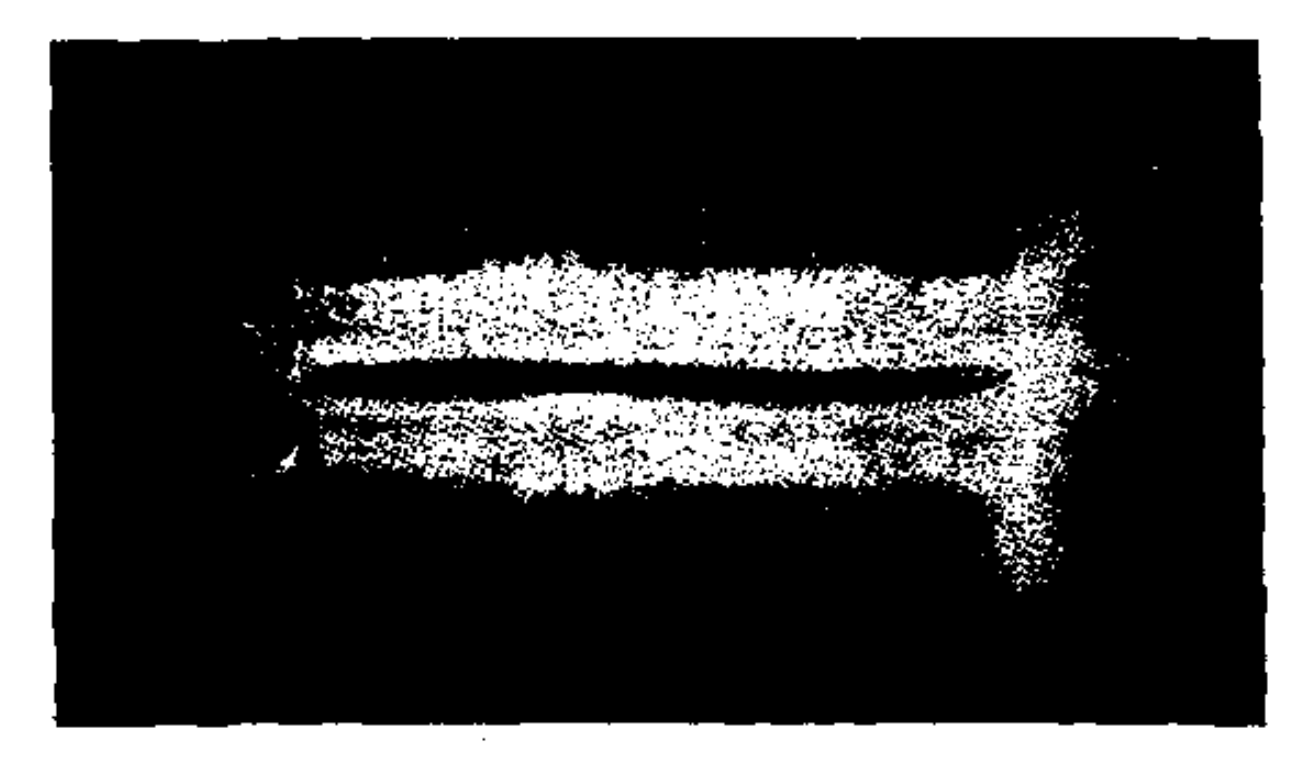


Рис. 17

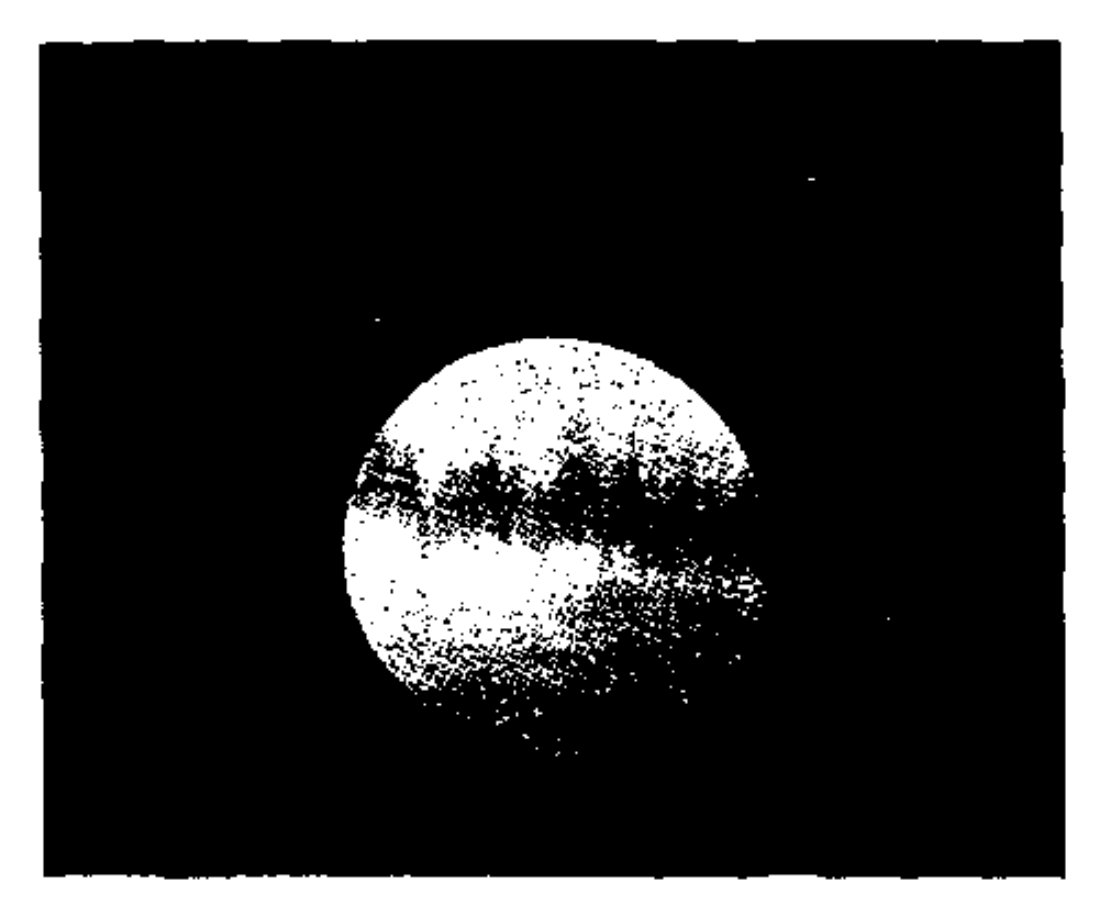


Рис. 18

только подтверждение своей концепции и не обнаружил ни одного противоречия. И, тем не менее, из-за важности его следствий было бы желательно найти прямое и неопровержимое доказательство. Ибо если моя мысль правильна, а мне кажется, что это именно так, то таким образом мы не только открыли бы субмикроскопические решетки, но в результате электрической имитации мы даже смогли бы, в некоторой степени, создать картину материальной структуры, которая пока не видима человеческому глазу. Этот метод только усилил бы те, что пока существуют, сделав их весьма ценными, ибо он возможен именно там, где микроскоп и — из-за плотности частиц — даже ультрамикроскоп достигает предела своей оптической силы.

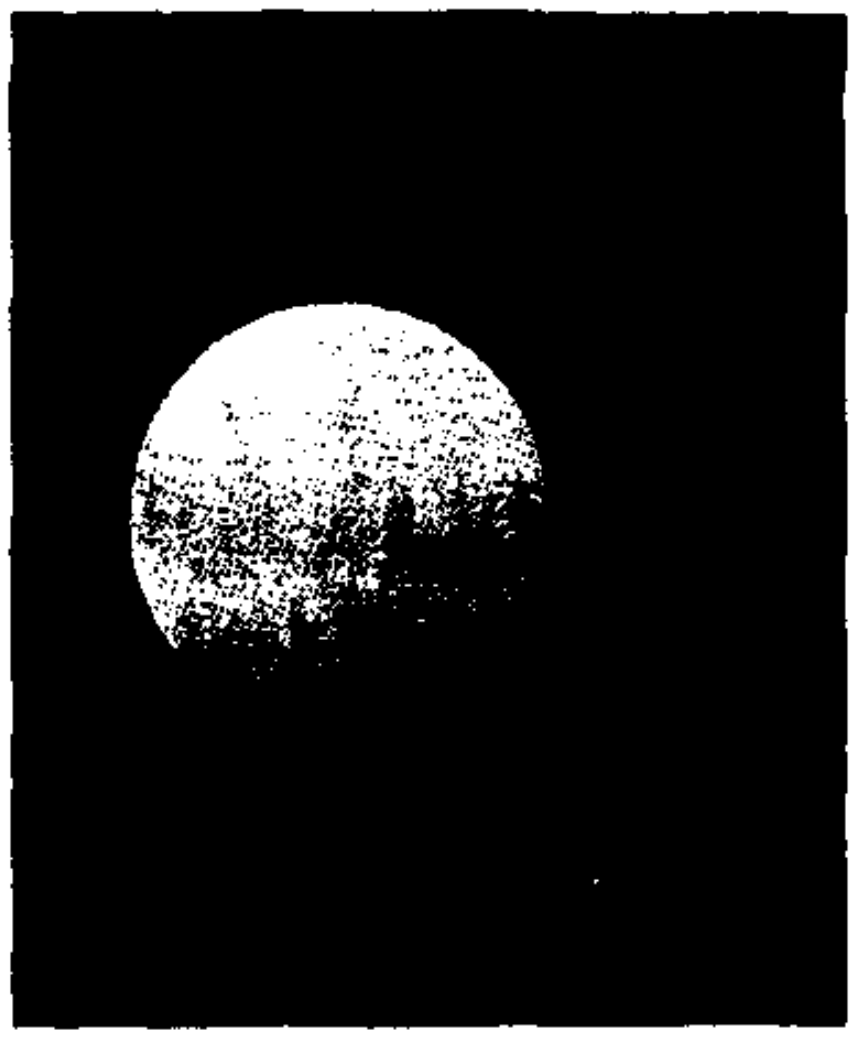


Рис. 19

Итак, я должен заканчивать свое выступление. Эксперименты по распылению опять вернули меня к контуру, содержащему лейденскую банку. В течение долгого времени я преследовал цель автоматического отключения контура, содержащего лейденскую банку, от колебательного контура сразу после передачи всей его энергии вторичному проводнику. Я попробовал сделать это следующим образом. Тонкая проволока соединялась с контуром лейденской банки, и я надеялся, что в нужный момент первичный контур отключится в результате испарения проволоки. При использованных мной частотах эксперимент не получился, видимо, потому что сильно нагретый металлический пар слишком долго оставался ионизированным. Однако эту проблему решили Макс Вин, используя так называемую затухающую искру, и Рендаль, используя ртутный искровой промежуток. Открытие Вина было усовершенствовано на практике. Из этого возникла, а благодаря работе Рендаля и Арко укрепилась так называемая звуковая искра. Маленькие шипящие или тлеющие искры Вина сами удовлетворяют условиям, которые я надеялся создать искусственным путем. Контур, содержащий лейденскую банку, отключается в самый подходящий момент, и тогда бóльшая часть первичной энергии совершает колебания в контурах высокой проводимости передатчика с его собственной частотой колебаний.

Свою первую лекцию в ноябре 1900 года я закончил такими словами: «Беспроволочную телеграфию иногда называют искровой телегра-

фией и до сих пор не удавалось обойтись без искры в том или ином случае. Здесь, однако, она сделана максимально безвредной. Это очень *важно*, так как искра, создающая волны, также и уничтожает их, как уничтожил своих собственных детей Сатурн. То, к чему мы стремились, правильнее следовало бы назвать *безыскровой телеграфией*».

Заканчивая лекцию этими словами, как и в прошлый раз, мне радостно думать, что с помощью средств, которые я описал, мы весьма близко подошли к этой цели, тем самым сделав передатчик на связанных контурах еще более эффективным.

Биография

Карл Фердинанд Браун родился 6 июня 1850 года в Фульде, где получил образование в местной гимназии (средней школе). Он учился в Марбургском и Берлинском университетах, а в 1872 году закончил учебу, написав работу по колебаниям упругих струн. Браун работал ассистентом профессора Квинке в Вюрцбургском университете, а в 1874 году принял назначение на должность преподавателя гимназии Св. Фомы в Лейпциге. Два года спустя его назначили внештатным профессором теоретической физики в Марбургском университете, а в 1880 пригласили занять подобный пост в Страсбургском университете. В 1883 году Браун стал профессором в Высшей технической школе в Карлсруэ, а в 1885 году его, наконец, пригласили в Тюбингенский университет, где одной из его задач было создание нового Физического института. Через десять лет, в 1895 году, он вернулся в Страсбург, где был назначен директором Физического института и остался работать, несмотря на приглашение Лейпцигского университета стать преемником Г. Видемана.

Первые исследования Брауна были связаны с колебаниями струн и упругих стержней, а особенно с влиянием амплитуды и окружения стержней на их колебания. Другие работы Брауна касались принципов термодинамики, например, влияния давления на растворимость твердых тел.

Однако самые важные достижения Брауна относятся к области электричества. Он опубликовал статьи по отклонениям от закона Ома и по расчету электродвижущей силы обратимых гальванических элементов, основанных на термических эффектах. Его практические опыты привели к изобретению того, что сейчас называется электрометром Брауна, а также электронно-лучевого осциллографа, созданного в 1897 году.

В 1898 году он начал заниматься беспроволочной телеграфией, пытаясь передать сигналы Морзе в воде с помощью токов высокой частоты. Затем он ввел в беспроволочную телеграфию замкнутый колебательный контур и одним из первых начал посылать электрические волны в определенных направлениях. В 1902 году ему удалось принять сообщения, переданные в определенном направлении, с помощью наклоненных лучевых антенн.

Работы Брауна по беспроволочной телеграфии были опубликованы в 1901 году в виде брошюры под названием *Drahtlose Telegraphie durch Wasser und Luft* (Беспроволочная телеграфия в воде и воздухе).

После начала Первой мировой войны Брауна вызвали в Нью-Йорк, где он должен был выступить как свидетель в судебном процессе по иску, связанному с патентом. Из-за невозможности работать в своей лаборатории, а также из-за болезни он не смог продолжить заниматься научной работой. Таким образом, последние годы своей жизни Браун мирно прожил в Соединенных Штатах, где и умер 20 апреля 1918 года.

Йоханнес Дидерик Ван дер Ваальс

«за его работу над уравнением состояния газов и жидкостей»

Йоханнес Дидерик Ван дер Ваальс

Уравнение состояния газов и жидкостей

Нобелевская лекция, 12 декабря 1910 г.

Сейчас, когда я имею честь выступать перед таким представительным собранием с рассказом о моих теоретических исследованиях природы газов и жидкостей, мне необходимо преодолеть свое смущение, чтобы поведать вам о себе и о своей работе. И все же мысль о том, что вы вправе ожидать этого, позволяет надеяться на то, что вы простите меня, если я буду излагать свои взгляды в данной области с абсолютной убежденностью даже в отношении тех аспектов, которые еще не стали общеизвестными и пока не получили всеобщего признания. Итак, я намерен рассмотреть следующие моменты:

1) основные особенности моего уравнения состояния, и как я его получил;

2) каким было и остается мое отношение к этому уравнению;

3) как в течение четырех последних лет я искал объяснения противоречий, которые существуют между экспериментальными результатами и этим уравнением;

4) как я также пытался объяснить поведение двойных и тройных смесей с помощью уравнения состояния.

1) Первый стимул к этой работе всей моей жизни появился у меня, когда, после учебы в университете, я познакомился с трактатом Клаузиуса (1857 г.) о природе движения, которое мы называем теплотой. В этом научном труде, который с незначительными изменениями сейчас используется в качестве учебника в каждом высшем учебном заведении Голландии, он показал, как можно очень просто вывести закон Бойля, исходя из допущения, что газ состоит из материальных точек, которые движутся с очень большой скоростью, имеющей порядок скорости звука и возрастающей пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры. Впоследствии выяснилось, что это лишь корень из среднего квадрата скорости и, как утверждал Максвелл, ошибочно полагавший, что он доказал это, существует закон распределения скоростей, известный как закон Максвелла. Первое правильное доказательство этого закона распределения скоростей дал Больцман. Трактат Клаузиуса стал для меня настоящим откровением, несмотря на то, что тогда же я подумал: если газ в чрезвычайно разреженном состоянии (когда объем настолько велик, что молекулы можно рассматривать как точки) состоит из маленьких движущихся частиц, очевидно, что его состояние не изменится и при уменьшении объема; в действительности оно должно оставаться таковым вплоть до максимального сжатия, а также и в жидкостях, которые можно рассматривать как исключительно сжатые газы при низкой температуре. Таким образом, у меня возникла мысль о том, что между газообразным и жидким состояниями материи нет существенной разницы, что те факторы, которые, помимо движения молекул, определяют давление при изменении плотности и, быть может, температуры, следует рассматривать как количественно различные, но это должны быть те же факторы, которые оказывают свое влияние всегда. Так мне пришла в голову мысль о непрерывности. Тогда я также задумывался о том, как ведет себя твердое состояние. Хотя я еще не вдавался в этот вопрос серьезно, я все же думаю, что в аморфном состоянии близость молекул препятствует их взаимному перемещению. Совершенно определенно, что кристаллическое состояние ведет себя несколько иначе. На самом деле мне пока вообще не следует говорить на эту тему. Тем не

менее, сейчас вряд ли можно сомневаться, что между двумя другими агрегатными состояниями существует непрерывность.

Как вам уже известно, два фактора, которые я определил в качестве причин того, почему достаточно плотный ансамбль движущихся частиц не подчиняется закону Бойля — это, во-первых, притяжение между этими частицами, а, во-вторых, их собственный объем. Обращаясь сначала ко второму фактору, мне бы хотелось отметить следующее. Сначала мне казалось, что для того, чтобы найти объем, оставшийся для движения, нужно просто вычесть общий объем молекул из общего объема газа. Но при более внимательном рассмотрении я убедился, что все далеко не так просто. К своему собственному удивлению, я понял, что величина, на которую должен уменьшиться объем, является переменной, что в сильно разреженном состоянии эта величина, которую я обозначил через b, в четыре раза превышает молекулярный объем, но при с уменьшением внешнего объема она постепенно падает примерно до половины своего первоначального значения. Но закон, которому подчиняется это уменьшение, до сих пор не был определен. Именно этот момент оказался самым сложным при изучении уравнения состояния. Впоследствии над ним работали Кортевег, Лоренц, Больцман, Джинс, а из моих учеников — Ван Лаар, мой сын и Констамм. Я полагал, что изучаемая проблема состоит в том, как уменьшается средняя длина свободного пробега между столкновениями молекул, которые являются следствием конечности их размеров, то есть того факта, что они должны рассматриваться не как материальные точки, а как малые частицы, имеющие подобно всем известным нам телам реальный объем. Таким образом я пришел к следующей формуле:

$$b = b_g \left\{ 1 - \alpha \frac{b_g}{v} - \beta \left(\frac{b_g}{v} \right)^2 \quad \text{и т. д.} \right\}, \qquad (A)$$

где b_g — это четырехкратный молекулярный объем.

Однако Больцман показал, что эта формула неудовлетворительна, а впоследствии Констамм доказал, что она будет гораздо более сложной и что для b/b_g получится отношение двух рядов по степеням b_g/v. Коэффициенты α, β и т. д. определить настолько сложно, что Ван Лаар был вынужден выполнить ужасно длинный расчет для определения второго коэффициента β по моему методу (коэффициент α создал гораздо меньше проблем). Это помешало мне продолжить свою работу. Я подошел к слабому месту в изучении уравнения состояния. Я все еще размышляю над тем, есть ли способ лучше. Фактически, этот вопрос постоянно

преследует меня, я не могу от него освободиться, он не покидает меня даже во сне.

Что касается другой причины, лежащей в основе нарушения закона Бойля в реальных газах и жидкостях, т. е. взаимного притяжения молекул, здесь дела обстоят несколько лучше, несмотря на то, что последнее слово опять-таки еще не сказано. Пользуясь методом, который Лаплас использовал в своей теории капиллярности, я в своей теории непрерывности свел это притяжение, действующее в целом объеме, к поверхностной силе, которая действует в направлении внутрь объема и тем самым вместе с внешним давлением удерживает движущиеся молекулы вместе. Лаплас фактически рассматривал свою жидкость как континуум; тогда он еще не знал о молекулах. И если бы мы работали с неподвижными молекулами, было бы недопустимо сводить силы притяжения, действующие внутри объема, к одной поверхностной силе. Но поскольку молекулы движутся, каждая точка внутреннего объема наверняка не будет заполнена материей в каждый момент времени. Однако пространство можно рассматривать как постоянно заполненное материей средней — нормальной — плотности. Однако я еще вернусь к этому моменту, когда буду говорит о своих исследованиях последних лет. Вышеприведенные соображения привели меня к следующей формуле:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}, \quad (B)$$

которая стала общеизвестной лишь благодаря усилиям Эйлхарда Видемана.

2) Подойдя ко второй части своей лекции я сейчас должен сказать о своем собственном отношении к этому вопросу. Из моего предыдущего рассказа абсолютно ясно, что я никак не ожидал, что это уравнение с постоянными значениями a и b даст результаты, которые будут количественно согласоваться с результатами эксперимента, и все же люди почти всегда считают, что мое мнение было именно таким. Это удивляет меня, так как в своем трактате 1873 года я не только подчеркивал переменность b, но и приводил ряд значений b из эксперимента Эндрюса, в котором для маленьких объемов вычислено изменение b в зависимости от объема. Для углекислого газа я перешел от предельного значения $b_g = 0,0023$ к значению $b = 0,001565$. В этом ряду значений объемы жидкости опускаются даже ниже предельного значения b_g для бесконечно разреженного состояния.

Возможно, причину того, почему мое мнение, что b — величина переменная, редко считали серьезным, нужно искать в способе вычис-

ления мной критических параметров. В этом вычислении мне пришлось принять b в качестве неизменной величины. Но я сделал это, поскольку надеялся, что установленные Эндрюсом значения b в критическом объеме все еще соответствуют их предельным значениям b_g. Однако, как я показал впоследствии, это была ошибка; значение b в критическом объеме, конечно, несколько меньше. Чтобы определить критический объем при b, зависящем от объема, нужно знать первую и вторую производные $\partial b/\partial v$ и $\partial^2 b/\partial v^2$. Для определения критического объема, как я показал позднее, мы получаем уравнение:

$$\frac{v}{v-b}\left(1-\frac{\partial b}{\partial v}\right)+\frac{1}{2}\frac{v\dfrac{\partial^2 b}{\partial v^2}}{1-\dfrac{\partial b}{\partial v}}=\frac{3}{2}. \quad (C)$$

Только когда мы пренебрегаем $\partial b/\partial v$ и $\partial^2 b/\partial v^2$, мы находим $v_k = 3b$. И из этого уравнения опять-таки можно увидеть, что то, что я назвал слабым местом своей теории, фактически представляет собой невозможность точного теоретического вычисления критического объема. Используя приблизительную формулу для b, мне удалось определить, что v_k примерно равна $2,2b_g$. Это уравнение для определения критического объема я привел и применил в свое работе в честь Больцмана; частично оно также повторилось в моих трактатах от 1910 года. Осознав это большое отклонение критического объема, я стал опасаться появления больших отклонений и в других критических параметрах, то есть противоречий с формулами

$$RT_k=\frac{8}{27}\frac{a}{b_g} \quad \text{и} \quad p_k=\frac{1}{27}\frac{a}{b_g^2}. \quad (D)$$

Однако к своей великой радости и удивлению я обнаружил, что эти два уравнения, по которым из критических данных были вычислены a и b, остаются без изменений. Такой вывод я сделал из результатов замечательных экспериментов Сидни Юнга по измерению объемов сосуществующих фаз пара и жидкости и давления насыщения при различных температурах. Я недавно показал это в труде, о котором еще скажу в этой лекции. Однако сейчас я могу дать такое объяснение. Помимо прочего Сидни Юнг определяет значение

$$\frac{pv}{RT} \quad (D')$$

в критической точке и находит его равным 1/3,77. Если p и T имеют те же значения, что и в моей теории, при условии, что b считается постоянной, отличие от $\frac{3}{8}$, величины, которую я нашел для pv/RT, можно полностью приписать объему. И мы можем утверждать, что это совершенно правильно. Критический объем равен не $3b_g$, а $(3/\sqrt{2})b_g = 2,125b_g$ (приблизительно). Тогда произведение pv/RT равно не $\frac{3}{8}$, а $\frac{3}{8\sqrt{2}}$. Для величины

$$\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T}\right)_k - 1$$

мое уравнение дает a/pv^2. Из экспериментов Сидни Юнга для нее было найдено значение, примерно равное 6. Значит, для p_k мы имеем значение: $p_k = a/6v_k^2$, а поскольку $v_k = (3/\sqrt{2})b_g$, то для p_k снова получается значение $p_k = (1/27)a/b_g^2$, которое уже было определено ранее.

Таким образом, ясно, что я никогда не мог считать, что последнее слово об уравнении состояния уже сказано, поэтому, даже занимаясь другими исследованиями, я постоянно к нему возвращался. Уже в 1873 году я признал, что существует возможность изменения a и b с температурой. Кроме того, все знают, что Клаузиус даже предполагал, что величина a обратно пропорциональна абсолютной температуре. Поэтому он смог получить уравнение

$$\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T} - 1\right)_k = 6,$$

правая часть которого вдвое меньше, когда a и b остаются постоянными. Вышеупомянутые замечания говорят о том, что это значение возникает не вследствие изменения a с температурой, а исключительно вследствие изменения b с объемом.

В течение длительного времени я искал определенную характеристику, которая помогла бы мне понять: достаточно ли просто сделать b переменной, чтобы достичь полного соответствия моего уравнения и эксперимента, а в том, что касается оставшихся несоответствий, необходимо ли принять возможность изменения a и b с температурой. Вот теперь я подошел к своим последним исследованиям по уравнению состояния.

3) В 1906 году в Королевской академии наук Амстердама я прочитал лекцию, озаглавленную *псевдо-ассоциация*. Однако в то время я удовольствовался устным сообщением. Но один из моих учеников, доктор

Халло, сделал его стенограмму, и впоследствии доктор Ван Рий включил ее в свою инаугурационную диссертацию и развил данную тему. В своей лекции в качестве критерия того, достаточно ли свойства величины b изменяться с объемом, чтобы привести мою формулу в соответствие с экспериментально определенными Юнгом объемами жидкости и пара, я использовал принцип Клапейрона, который, если b изменяется только с v, но не с T, а a — постоянная, приводит к уравнению

$$\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T}-1\right)p=\frac{\frac{a}{v_1}-\frac{a}{v_2}}{v_2-v_1}=\frac{a}{v_1v_2},$$

или

$$\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T}-1\right)pv_1v_2=a.$$

Чтобы убедиться, что в уравнение входят только те параметры, которые можно определить непосредственно в ходе эксперимента, мы также можем записать

$$\frac{\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T}-1\right)pv_1v_2}{\left(\frac{T}{p}\frac{\partial p}{\partial T}-1\right)_k p_kv_k^2}=1. \quad (E)$$

Все параметры левой части этого уравнения были аккуратно определены Сидни Юнгом для ряда веществ. При критической температуре левая часть уравнения, конечно, равна единице; но каково ее значение при температурах, которые составляют лишь некоторую долю T_k? Здесь, судя по всему, по мере понижения температуры значение левой части уравнения возрастает, сначала очень быстро, а потом с незначительной скоростью.

Эксперименты Сидни Юнга доходят только до значения $T/T_k = \frac{2}{3}$. Затем правая часть уравнения увеличилась до 1,4 и, судя по всему, асимптотически приближается к значению 1,5. Значение правой части уравнения можно очень точно представить эмпирической формулой

$$1+\sqrt{1-m}-\frac{1-m}{2}, \quad (F)$$

где $m = T/T_k$.

При температуре, очень близкой к критической, например, $m = 0,99$, увеличение этого выражение (по сравнению с единицей) равно 0,1, тогда как в отсутствии квадратного корня из $1 - m$ оно было бы в десять раз меньше.

Тогда мне пришлось исследовать, может ли допущение о том, что a или b зависят от температуры, правильно объяснить это увеличение правой части уравнения, и не тот ли это случай, когда данное увеличение можно объяснить с помощью другого выражения для внутреннего давления, которое я всегда записывал как a/v^2. В результате этого исследования было найдено, что каждая функция температуры для a и b, совместимая с таким быстрым начальным увеличением правой части уравнения, должна содержать $\sqrt{1-m}$. При температуре, выше критической, это выражение дало бы мнимые значения для a и b и, очевидно, противоречило бы поведению газов в целом. Кроме того, казалось, что ни одно другое допущение для внутреннего давления не может привести к столь быстрому начальному росту, каким является рассматриваемый. Нельзя забывать, что критическая температура в действительности не является особой. При этой температуре сосуществующие плотности равны по величине. Уже одно только это придает этой температуре смысл, которого у нее нет при всех остальных условиях. Резкий скачок, быстрое увеличение либо a, либо b, сделало бы температуру достаточно специальной при любой степени сжатия, и тогда ее можно было бы определить при любой плотности. В действительности, результат, грубо говоря, был бы таким: уравнение состояния, совместимое с экспериментальными данными, абсолютно невозможно. Это уравнение невозможно, пока не будет добавлено что-то еще, а именно, то, что молекулы объединяются и образуют большие комплексы. Поэтому в этом году я представил Академии наук в Амстердаме два трактата по этой возможной ассоциации. Я назвал ее «псевдо-ассоциацией», чтобы отличить ее от ассоциации химического происхождения. Возможное образование больших молекулярных комплексов, особенно в жидком состоянии, нередко подчеркивалось и ранее, так что теперь, когда оказалось, что это допущение необходимо для достижения согласования между уравнением состояния и экспериментом, оно не должно казаться удивительным. К сожалению, мое исследование до сих пор не завершено. Я нахожу его крайне сложным, так как мне приходится использовать каждую возможную частичку доказательства, чтобы получить что-то конкретное. Тем не менее, уже появилось столь много всего, что следует допустить необходимость огромного количества отдельных молекул для образования

новой группы, которая является целой и при молекулярном движении ведет себя как новая единица большего размера.

Но каково происхождение этого комплекса, этой псевдо-ассоциации? Я был вынужден допустить ее существование, потому что оно казалось мне единственным способом сделать уравнение состояния — каким бы оно ни было — совместимым с результатами измерений. Однако после замечания Дебая в *Annalen der Physik* за прошлый месяц я вспомнил одну фразу Больцмана. Когда несколько лет назад я имел честь провести с ним несколько дней, среди многих тем, которые мы обсуждали, он мимоходом сказал мне, что ему не удалось свести силы притяжения молекул к поверхностной силе. В тот момент я не осознал важности этого замечания Больцмана и полагаю, что только сейчас сумел оценить то, что он имел в виду. Еще в своем трактате от 1873 года я пришел к выводу, что притяжение молекул с увеличением расстояния уменьшается чрезвычайно быстро, а в действительности притяжение молекул имеет ощутимую величину только на расстояниях, близких к размеру молекул. В то время это даже подтолкнуло меня к утверждению, что в случае газов только столкновения ответственны за проявление сил притяжения. Так что Больцман, должно быть, считал, что принимать процедуру Лапласа и поверхностную силу как следствие притяжения можно лишь при условии, что сила притяжения не уменьшается так быстро[1]. Замечание Дебая подразумевало, что Больцман предсказал образование комплекса. Таким образом, с теоретической точки зрения допущение псевдо-ассоциации, на мой взгляд, было оправдано. А теперь, я полагаю, что могу рассказать, как я развивал эту тему в своем последнем трактате, который появился в ноябре этого года. Псевдо-ассоциация отличается от истинной ассоциации тем, что последняя является результатом действия новых химических сил, которые возникают лишь тогда, когда молекулы объединяются, чтобы образовать, например, двойные молекулы, тогда как псевдо-ассоциацию можно полностью отнести к действию обычных молекулярных сил. Из столь быстрого уменьшения этих сил следуют два факта. Во-первых, образуется комплекс, но это еще не все. Во-вторых, создается поверхностное давление, хотя и более низкое. Но именно это я был вынужден принять в своих вычислениях, чтобы получить хоть какую-то перспективу объяснения вышеописанных различий. Тогда я попытался объяснить это следующим образом. Пусть число молекул, объединившихся в комплекс, будет настолько велико, что можно говорить о центральной молекуле, окруженной отдельным слоем, содер-

[1]Ср. L. Boltzmann, *Gastheorie*, II, p. 176.

жащим почти столько других молекул, сколько можно содержать одновременно. Тогда по отношению к окружающим молекулам направленное внутрь притяжение действует лишь для того, чтобы поддерживать комплекс; так что эта часть его притяжения утрачена для поверхностного давления. Таким образом, только силы, действующие от этих молекул наружу, могут внести вклад в создание внутреннего давления. Но для псевдо-ассоциации, как и для истинной ассоциации, количество образованных комплексов увеличивается с уменьшением температуры и объема. Поэтому я был вынужден заключить, что в критической точке в виде комплексов присутствует лишь очень малая часть общей массы.

Если в некотором веществе существует псевдо-ассоциация, значит, оно состоит, по крайней мере, из двух типов молекул: простых и сложных. Я говорю «по крайней мере», потому что нельзя допустить, что все комплексы имеют одинаковый размер. Но на первом этапе я допустил существование только двух типов: простых молекул и n-кратных молекул. Ясно, что для настоящего научного исследования было бы необходимо допустить, что возможны все значения n и искать закон распределения этих величин. Однако пока я ограничился тем, что принял всего один тип комплекса. Тогда мы имеем двойную смесь. Мне повезло, что в течение многих лет я серьезно занимался изучением законов двойных смесей, что теперь приводит меня к четвертому разделу моей лекции. Чтобы не требовать от вас слишком долгого внимания, я обещаю быть достаточно кратким.

4) Я уже не могу точно вспомнить, когда у меня впервые возникла идея об использовании своего уравнения для изучения свойств двойных смесей. Но уже 20 лет назад, по настоянию моего друга Камерлинг-Оннеса, я смог опубликовать полную теорию двойных смесей. Моя «Théorie moléculaire d'une substance composée de deux matière différentes» (Молекулярная теория вещества, состоящего из двух различных компонентов) появилась в *Archives Néerlandaises* за 1890 год. Я написал этот труд на голландском языке, но мой глубокоуважаемый друг Босха выполнил сложную задачу перевода этой работы на французский язык — задачу, которая была еще более обременительна, поскольку работа была написана в чрезвычайно сжатой форме, а математическая обработка приводила к особым точкам (точкам полного смешения частично смешивающихся жидкостей) и особым кривым, которые в то время крайне редко рассматривались подробно. Однако ранее мой друг Кортевег, которому я в общих чертах описал результаты своих исследований, изучил математические свойства этих точек и кривых, и его ра-

бота часто очень и очень мне помогала. Причин того, почему я так долго думал над публикацией своей работы, было немало, и перечислять их здесь, я полагаю, не стóит. Но одна из причин, которая важна для науки, заключалась в вопросе, который я не переставал себе задавать: есть ли смысл применять к смесям уравнение состояния, если его изучение еще не завершено? Я заранее учитывал, что, поскольку мне не известен закон изменения b и я был вынужден предполагать, что при изменении объема b остается постоянным, то результаты для многих параметров дадут значения, которые численно будут намного отличаться от их значений, определенных экспериментально. Тем не менее, поскольку даже при постоянном b моя теория оказалась не бесполезной для простого вещества, я мог надеяться получить качественное объяснение многих явлений и для смесей, если ввести подходящие значения для a и b. Для меня было очень важно познакомиться с научными трудами Гиббса по равновесию гетерогенных веществ, которые он прислал мне сразу же после их выхода из печати. Между прочим, я использовал принцип о том, что для данного количества вещества равновесие в нем устанавливается, если при данной температуре и объеме свободная энергия достигает минимума. В честь Гиббса я назвал поверхность равновесия для двойной системы ψ-поверхностью, так как свободную энергию, значение которой для равновесия Гиббс понял первым, он всегда обозначает символом ψ.

В действительности эти явления не сложны в случае простого вещества, так что создать их общую картину не составляет труда. А потому очень удивительно, что в простой двойной смеси они становятся настолько сложными, что их часто сравнивают с лабиринтом. Это особенно проявляется в случае тройной точки. И теперь стало ясно, что они, по крайней мере качественно согласуются с «Théorie moléculaire, etc.», из которой их можно вывести, а зачастую и предсказать. Благодаря множеству экспериментальных исследований, которые это породило, я нередко находил возможность подробного обсуждения этого явления в частных беседах. Таким образом, в период с 1907 по 1909 годы в трудах Академии наук Амстердама появилось около 15 научных трудов такого характера. Это число выглядело бы еще внушительнее, если бы я перечислил имена физиков и химиков, которые, руководствуясь этой теорией, изучали и по-прежнему изучают двойные смеси. Это список начинается с Кюнена и заканчивается доктором Джином Тиммермансом из Бельгии, исследования которого еще не завершены, но уже частично опубликованы.

И если сейчас мне позволено оглянуться на пройденный мной путь, я должен признаться, что будет справедливо назвать его окольным. Как только я уяснил необходимость предположения об ассоциации, я по аналогии распространил свое уравнение состояния на формулу для двойной смеси и ввел новый параметр — степень ассоциации. Эта степень ассоциации определяется уравнением Гиббса, о котором я уже говорил. Определенная таким образом степень ассоциации должна быть включена в уравнение состояния. И я признаю, что это окольный путь. Быть может, существует и прямая дорога. И то, что эту дорогу действительно искали, я знаю от людей, которые общаются непосредственно со мной. Необходимым проводником для поисков прямого пути будут «Основные принципы статистической механики» (*Elementary Principles of Statistical Mechanics*) Гиббса. В этой лекции я дал лишь историю возникновения и дальнейшего развития моих теоретических исследований, а потому мне пришлось рассказать о трудностях, которые нужно было преодолевать, и не удалось, или удалось, но очень мало, рассмотреть, каким образом они помогли правильно понять эти явления. Один из главных выводов, который я назвал «Законом соответственных состояний» стал, я могу это сказать, общеизвестным. Я не успел рассказать, каким образом этот закон стал мощным содействующим фактором при нахождении Дьюаром метода получения жидкого водорода, и, особенно, как он помог Камерлинг-Оннесу найти метод получения жидкого гелия. Я также воздержался от подробного рассказа о температуре, при которой, если говорить на языке Реньо, газ начинает вести себя как «pluperfect gas» (gaz plus que parfait[1]), температура которого имеет значение $(27/8)T_k$, а температура, при которой можно утверждать, что происходит инверсия эффекта Джоуля – Кельвина, равна $(27/4)T_k$.

Не успел я сказать и о своих, быть может, несколько поспешных попытках найти уравнение состояния самой молекулы. Я даже не сказал, почему я решил, несмотря на все трудности, определить соотношение между p, v и T для вещества. Формулы термодинамики эффективны, и их можно применить ко всем задачам, включая даже определение термических параметров, только когда известно это соотношение. В противном случае эти формулы можно рассматривать как *одно* уравнение с двумя неизвестными. Я четко выразил это в книге, посвященной Камерлинг-Оннесу и опубликованной в 1904 году.

Но я и не намеревался рассматривать все это, да и времени у меня

[1]Plus que parfait (фр.) — давно прошедшее время. В данном случае — «идеальный». — *Прим. пер.*

было явно недостаточно. И все же мне кажется не чрезмерным, а, быть может, даже необходимым, высказать одно общее замечание. Абсолютно ясно, что во всех своих исследованиях я был убежден в реальном существовании молекул и что я никогда не считал их ни плодом своего воображения, ни просто силовыми центрами. Я рассматривал их как реальные тела, поэтому то, что мы называет «телом» в повседневной речи, лучше называть «псевдо-телом». Это скопление тел и пустого пространства. Нам не известна природа молекулы, состоящей из одного химического атома. Было бы опрометчиво искать ответ на этот вопрос, однако признание того, что нам она не известна, ни в коей мере не уменьшает веру в ее реальное существование. Когда я начинал свои исследования, мне казалось, что я почти один придерживаюсь такого мнения. И, когда, как уже случилось в моем научном труде от 1873 года, я определил количество этих молекул в одном грамм-моле, их размер и природу их действия, я только укрепился в своем мнении. Но передо мной попрежнему нередко вставал вопрос, а не является ли молекула, да и вся молекулярная теория в конечном счете лишь плодом воображения. А теперь я не сочту преувеличением сказать, что реальное существование молекул принято всеми физиками. Многие ученые, которые не соглашались с существованием такой теории, в конечном счете сдались, и, быть может, моя теория внесла в нашу победу свой вклад. И именно это я считаю шагом вперед. Любой, кто знаком с трудами Больцмана и Уилларда Гиббса, признает, что очень авторитетные физики считают, что сложные явления теории теплоты можно интерпретировать только таким образом. Мне очень приятно, что все большее и большее число молодых физиков обретают вдохновение для своей работы в изучении молекулярной теории. Увенчание моих исследований премией уважаемой Шведской Королевской академии наук дает мне удовлетворение и наполняет меня благодарностью, которую я не смею назвать вечной, поскольку, будучи в столь преклонном возрасте, я не могу даже обещать, что она будет долгой, но, быть может, именно поэтому моя благодарность становится еще сильнее.

Биография

Йоханнес Дидерик Ван дер Ваальс родился 23 ноября 1837 года в Лейдене, в Нидерландах. Он был сыном Якобуса Ван дер Ваальса и Элизабет Ван ден Бург. Получив среднее образование в родном городе, он стал преподавать в школе. Несмотря на то, что он не знал

классических языков, а потому не мог сдавать экзамены, в 1862–65 гг. в свободное время он продолжал учиться в Лейденском университете. Таким образом он получил лицензии на право преподавания математики и физики.

В 1864 году его назначили преподавателем в среднюю школу в Девентере, а в 1866 году он переехал в Гаагу, получив сначала место преподавателя, а потом и директора одной из школ этого города.

Новое законодательство, которое освобождало студентов, занимавшихся естественными науками, от условия предварительного знания классических языков, дало Ван дер Ваальсу возможность сдать университетские экзамены. В 1873 году он получил степень доктора, защитив диссертацию под названием *Over de Continuïteit van den Gas- en Vloeistoftoestand* (О непрерывности газообразного и жидкого состояния), которая тут же поставила его в один ряд с наиболее выдающимися физиками. В этой диссертации Ван дер Ваальс привел «уравнение состояния» как для газообразного, так и для жидкого состояния. Ему удалось продемонстрировать, что оба этих агрегатных состояния не только переходят друг в друга непрерывным образом, но и имеют одинаковую природу. О важности этого вывода, который Ван дер Ваальс сделал в своей первой работе, можно судить из замечаний Джеймса Клерка Максвелла, опубликованных в журнале *Nature*, о том, «что имя Ван дер Ваальса очень скоро, несомненно, станет одним из самых выдающихся в молекулярной науке» и что «эта статья направила внимание многих интересующихся на изучение нижнеголландского языка, на котором она написана» (вероятно, Максвелл имел в виду нижненемецкий язык, однако это тоже было бы неправильно, так как голландский является самостоятельным языком). После этого в *Proceedings of the Royal Netherlands Academy Of Sciences* и в *Archives Néerlandaises* было опубликовано множество работ по этой и родственным ей темам, которые также перевели и на другие языки.

Когда в 1876 году был принят новый закон о высшем образовании, согласно которому старый Амстердамский Атенеум Иллюстре получил статус университета, Ван дер Ваальс был назначен первым профессором физики. Вместе с Вант-Гоффом и генетиком Хуго Де Фризом он прославил свой университет и остался верен ему на протяжении всей жизни, несмотря на заманчивые предложения, которые часто получал.

Непосредственной причиной интереса Ван дер Ваальса к теме своей диссертации был научный труд Р. Клаузиуса, где теплота рассматривается как явление движения, что привело его к поискам объяснения экспериментов Т. Эндрюса (1869 г.), показывающих существование «кри-

тических температур» в газах. Именно благодаря своему гению Ван дер Ваальс осознал необходимость учета объемов молекул и межмолекулярных сил («сил Ван дер Ваальса», как их теперь называют) при установлении отношения между давлением, объемом и температурой газов и жидкостей.

Второе великое открытие, которое Ван дер Ваальс сделал после длительной и тяжелой работы, было опубликовано в 1880 году, когда он провозгласил закон соответственных состояний. Этот закон показал, что если давление выражается как простая функция критического давления, объем — как простая функция критического объема, а температура — как функция критической температуры, то получается уравнение состояния общего вида, которое можно применить ко всем веществам, поскольку три постоянные a, b и R, которые присутствуют в уравнении и могут быть выражены через критические величины данного вещества, исчезнут. Именно этот закон послужил проводником в ходе экспериментов, которые, в конечном счете, привели Дж. Дьюара к получению жидкого водорода в 1898 году, а Х. Камерлинга-Оннеса к получению жидкого гелия в 1908 году. Камерлинг-Оннес, который в 1913 году получил Нобелевскую премию за изучение низких температур и получение жидкого гелия, в 1910 году написал, «что труды Ван дер Ваальса всегда считались волшебной палочкой для проведения опытов и что под влиянием его теорий в Лейдене развилась криогенная лаборатория».

Десять лет спустя, в 1890 г., в *Archives Néerlandaises* появился первый научный труд по «Теории двойных растворов» — еще одно великое достижение Ван дер Ваальса. Связывая свое уравнение состояния со вторым законом термодинамики в том виде, в каком его впервые предложил У. Гиббс в своих трудах по равновесию гетерогенных систем, он смог графически представить его математические формулировки в виде поверхности, которую он назвал ψ-поверхностью в честь Гиббса, выбравшего греческую букву ψ для обозначения свободной энергии, которая, как он понял, важна для равновесия. Теория двойных смесей породила многочисленные циклы опытов; один из первых провел Дж. П. Кюнен, который обнаружил, что характеристики критических явлений можно полностью предсказать, исходя из теории. Впоследствии лекции по данному предмету были собраны в *Lehrbook der Thermodynamik* (Учебник по термодинамике) Ван дер Ваальса и Ф. Констамма.

Также следует упомянуть и о термодинамической теории капиллярности Ван дер Ваальса, которая в общем виде появилась в 1893 году. В этой теории он принял существование постепенного, хотя и очень быстрого изменения плотности в граничном слое между жидкостью и па-

ром — взгляд, который отличался от взгляда Гиббса, принявшего внезапный переход плотности жидкости в плотность пара. В противовес Лапласу, который ранее сформировал теорию этих явлений, Ван дер Ваальс считал, что молекулы находятся в быстром и непрерывном движении. Эксперименты, связанные с явлениями в непосредственной близости от критической температуры дали результаты, подтверждающие концепции Ван дер Ваальса.

Ван дер Ваальс получил множество наград и знаков отличия, из которых отдельно стóит упомянуть следующие. Ему была присвоена степень почетного доктора Кембриджского университета; его сделали почетным членом Московского Императорского естественнонаучного общества, Ирландской королевской академии наук и Американского философского общества, а также членом-корреспондентом Французского института и Берлинской королевской академии наук; кандидатом в члены Бельгийской королевской академии наук и иностранным членом Лондонского химического общества, Национальной академии наук США и Римской Академии деи Линчеи.

В 1864 году Ван дер Ваальс женился на Анне Магдалене Смит, которая умерла очень рано. Больше он никогда не женился. У них было три дочери и сын. Его дочерьми были Анна Мадлен, которая после ранней смерти матери вела хозяйство и ухаживала за отцом; Жаклин Элизабет, которая стала преподавателем истории и известной поэтессой, и Джоанна Дидерика, которая стала преподавателем английского. Сын, Йоханнес Дидерик младший, в 1903–08 гг. был профессором физики в Гронингенском университете, а впоследствии сменил отца на кафедре физики Амстердамского университета.

Основными развлечениями Ван дер Ваальса были прогулки, особенно в сельской местности, и чтение. Он умер в Амстердаме 8 марта 1923 года.

Вильгельм Вин

«за открытия в области законов, управляющих тепловым излучением»

Вильгельм Вин

О законах теплового излучения

Нобелевская лекция, 11 декабря 1911 г.

Любезное признание, которое моя работа по тепловому излучению получила по мнению вашей старинной и знаменитой Академии наук, дарит мне особое удовольствие говорить с вами об этом предмете, который из-за сложности входящих в него проблем вновь привлекает внимание всех физиков. Как только мы выходим за установленные рамки чистой термодинамической теории, мы тут же попадаем в неисследованную область, ставящую препятствия, с которыми порой не могут справиться даже умнейшие из нас.

Если, как это принято, мне предстоит говорить, главным образом, о своих собственных исследованиях, я должен сказать, что мне повезло, так как я обнаружил, что общая термодинамическая теория излучения объединяет еще не всю информацию. Оказалось, что используя известные физические законы, можно вывести общий закон теории излучения, который мои коллеги назвали законом смещения. Применяя термодинамику к теории излучения, мы используем идеальные процессы, которые нашли столь широкое применение во всех других областях.

Это мысленные эксперименты, реализовать которые на практике часто невозможно, но которые, тем не менее, дают надежные результаты. Подобным размышлениям можно предаваться лишь тогда, когда известны все процессы, на которых основываются мысленные эксперименты, управляемые некоторыми законами, чтобы можно было аккуратно и полно установить влияние любого изменения. Затем, чтобы получить возможность идеализации, мы должны пренебречь всеми несущественными вторичными явлениями, рассматривая лишь то, что неразрывно связано с исследуемыми процессами. Этот метод доказал свою чрезвычайно высокую эффективность в приложении к механической теории теплоты. Гельмгольц использовал его в теории концентрационных потоков, а Вант-Гофф — в приложении термодинамики к теории растворов. В ходе таких размышлений необходимо предположить существование так называемой полупроницаемой мембраны, которая пропускает растворитель, но препятствует прохождению растворенного вещества. Несмотря на то, что изготовить мембраны, строго удовлетворяющие этому требованию, невозможно, в идеальных процессах мы можем принять их как возможные, потому что законы природы не накладывают ограничений на приближение к полунепроницаемости. Выводы, сделанные из этих допущений, во всех случаях согласовывались с опытом. В теории излучения можно заниматься аналогичными рассуждениями, если допустить, что в идеальных процессах возможны идеально отражающие тела. Кирхгоф использовал их, чтобы доказать свою знаменитую теорему о постоянстве отношения излучательной и поглощательной способностей. Эта теорема, утверждающая существование определенного температурного равновесия для излучения, стала одной из основных теорем теории излучения. Согласно этой теореме, в полости, окруженной телами, имеющими равную температуру, должно существовать излучение, энергия которого не зависит от природы этих тел. Если в стенках, окружающих эту полость, прорезать узкое отверстие, через которое выходит излучение, мы получим излучение, не зависящее от природы излучающего тела и полностью определяемое температурой. Такое же излучение испускало бы тело, которое не отражает лучи и вследствие чего называется абсолютно черным, а само излучение называется излучением черного тела.

Теорема Кирхгофа не ограничивается излучением, вызванным тепловыми процессами. Судя по всему, она справедлива для большинства, если не для всех световых процессов. То, что концепцию температуры можно применить ко всем световым процессам, не вызывает ни малейшего сомнения. Поскольку с помощью горячих тел мы можем создать все виды света, значит, мы можем приписать температуру горячих тел

излучению, которое находится в тепловом равновесии с этими телами, а следовательно, любое излучение, даже то, которое испускает фосфоресцирующее тело, имеет определенную температуру для каждого цвета. Однако эта температура никак не связана с температурой самого тела, да и пока невозможно сказать, как, например, фосфоресцирующее тело приходит в равновесие с излучением. Эти условия не могут быть простыми, особенно в случае тел, которые преобразуют поглощенное излучение и испускают его через длинный промежуток времени.

И опять, используя идеальные процессы и предполагая наличие давления излучения, которое в то время было выведено из электромагнитной теории света, Больцман вывел из термодинамики закон, который ранее эмпирически сформулировал Стефан, о том, что энергия излучения черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Однако на этом выводы, которые предстояло сделать из термодинамики, не закончились. Оставалось еще определить изменения, которые испытывают присутствующие в излучении цвета при изменении температуры. Вычисление этого изменения опять основано на идеальном процессе. Для этого мы должны принять возможность существования полностью отражающих тел, которые рассеивают все падающее излучение и которые вследствие этого можно описать как абсолютно белые. Если мы пропустим излучение абсолютно черного тела в такое пространство, оно, в конце концов, распространится в точности так, как если бы сами стенки этого пространства излучали и имели ту же температуру, что и черное тело. Тогда, если мы полностью исключим черное тело из белого пространства, мы получим нереализуемый случай излучения, которое будет постоянно совершать возвратно-поступательное движение между зеркальными стенками. Мы продолжаем мысленный эксперимент. Представим, что объем нашего пространства сокращается благодаря движению стенок так, чтобы все излучение сосредоточивалось в меньшем пространстве. Поскольку излучение прикладывает к стенкам, о которые оно ударяется, некоторое давление — давление света, — значит, на уменьшение размера должна была быть затрачена какая-то работа, как если бы мы сжимали газ. Из-за низкой величины давления света эта работа очень мала, однако ее можно точно вычислить, а в рассматриваемом случае только это имеет значение. Согласно принципу сохранения энергии эта работа не может быть потеряна, она превращается в излучение, которое увеличивает концентрацию излучения. Такое изменение плотности излучения, вызванное движением белых стенок, — далеко не единственное изменение, которое испытывает излучение. Когда луч света отра-

жается движущимся зеркалом, он изменяет свой цвет, определяемый частотой колебаний. Это изменение, которое происходит согласно так называемому принципу Допплера, играет существенную роль в астрофизике. Спектральная линия, испущенная приближающимся небесным телом, кажется смещенной в направлении более коротких волн на отношение собственной скорости этого тела к скорости света. То же самое происходит, когда луч отражается движущимся зеркалом, за исключением того, что происходит в два раза большее изменение. Следовательно, мы можем вычислить полное изменение, которому подверглось излучение в результате движения стенок. Давление света, которое существенно для этих рассуждений, продемонстрировали гораздо позднее, и первым это сделал Лебедев. Аррениус использовал его для объяснения образования хвостов комет. А до этого давление света представляло собой лишь вывод, следующий из электромагнитной теории Максвелла. Теперь мы вычисляем изменение плотности излучения, созданное движением стенок и волнами различной длины. Из этого мысленного эксперимента мы можем сделать важный вывод. Из второго закона механической теории теплоты мы можем заключить, что спектральный состав излучения, который мы изменили сжатием пространства зеркальными стенками, ничем не отличается от того спектрального состава, который мы получили бы, если бы увеличили плотность излучения, повысив температу́ру, потому что в противном случае мы с помощью цветных фильтров могли бы создать неравные значения плотности излучения в двух пространствах и генерировать работу теплоты без компенсации. Поскольку мы можем вычислить изменение длин отдельных волн, вызванное сжатием, мы также можем вывести закон, согласно которому спектральный состав излучения черного тела изменяется в зависимости от температуры. Не останавливаясь на рассмотрении этого расчета подробно, я приведу лишь его результат: энергия излучения определенной длины волны изменяется с температурой так, что произведение температуры и длины волны остается постоянным.

Используя этот закон смещения, несложно вычислить распределение интенсивности теплового излучения по различным длинам волн для любой температуры, если только оно известно для одной температуры.

В частности, смещение максимума излучения можно наблюдать непосредственно. Поскольку длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, также определяет главную область длин волн, в которой излучение при данной температуре наиболее интенсивно, мы можем, изменяя температуру, сместить главную область излучения в направлении коротких или длинных волн любой желаемой

величины. Из остальных следствий закона смещения я упомяну только следствие, полученное Х. А. Лоренцом. Если мы представим, что в электромагнитных уравнениях Максвелла все пространственные размеры изменяются во времени в одном и том же отношении, эти уравнения предсказывают уменьшение электромагнитной энергии пропорционально четвертой степени смещения. Поскольку согласно закону Стефана – Больцмана энергия увеличивается пропорционально четвертой степени абсолютной температуры, линейные размеры должны изменяться обратно пропорционально абсолютной температуре. Каждая характеристическая длина должна изменяться в этом отношении, из которого следует закон смещения.

Из закона смещения мы можем вычислить температуру Солнца, если только мы допустим, что излучение Солнца следует приписывать теплу, и если мы знаем положение максимума энергии солнечного излучения. Различные наблюдатели дают для этого положения различные цифры, например, 0,532 мкм согласно Вери, 0,433 мкм согласно Эбботу и Фаулеру. В зависимости от использованной цифры температура Солнца равна 5 530°C и 6 790°C. Однако, какая бы ни получалась разница у наблюдателей, не может быть сомнения, что максимум солнечного излучения расположен в диапазоне видимых волн. Это все равно, что сказать, что температура Солнца — наиболее благоприятное использование энергии излучения черного тела для освещения Земли и что в наших искусственных источниках света, которые используют тепловое излучение, мы должны стремиться к достижению этой температуры, от которой мы пока, судя по всему, далеки.

Мне бы хотелось рассмотреть еще одно применение закона смещения, т. е. возможность вычисления длины волны рентгеновского излучения. Как нам известно, рентгеновские лучи создаются при ударе электронов о твердые тела, так что длина их волны должна быть функцией скорости электронов. Согласно кинетической теории газов средняя кинетическая энергия молекулы является мерой абсолютной температуры. Если допустить, как это делается в теории электронов, что это правило имеет место и для кинетической энергии электронов, то электрическая энергия катодных лучей стала бы мерой их температуры. Если вычисленную таким образом температуру подставить в закон смещения, то получится, что длина волны максимума интенсивности указывает на тот участок волн, где расположены рентгеновские лучи, что согласуется с длинами волн, найденными с помощью других доказательств. Кто-нибудь может возразить, что электронам нельзя приписывать температуру. Однако допустимость нашей процедуры можно обосновать, обращая

вышеприведенное доказательство. Излучение в замкнутом пространстве должно непременно высвобождать электроны, скорость которых согласно закону Эйнштейна пропорциональна частоте колебаний. Энергетический максимум излучения производит электроны, скорость которых настолько огромна, что их кинетическая энергия становится очень близка к температуре, при которой энергия достигает своего максимума.

Закон смещения целиком и полностью исчерпывает те выводы, которые можно сделать из чистой термодинамики в отношении теории излучения. Все эти выводы подтвердились на опыте. Отдельные цвета, присутствующие в излучении, являются абсолютно взаимно независимыми. Но из термодинамики невозможно определить, как при данной температуре интенсивность излучения распределяется по отдельным длинам волн. Для этого необходимо детально исследовать механизм процесса излучения. Похожие условия получаются и в теории газов. Термодинамика ничего не может сказать нам о величине удельной теплоемкости газов; для этого нужно исследовать молекулярное движение. Однако кинетическая теория газов, основанная на вероятностных расчетах, достигла гораздо больших успехов, нежели соответствующая теория излучения. Статистическая теория газов поставила перед собой задачу объяснить также и законы термодинамики. Сейчас я не хочу обсуждать степень, в которой эту задачу можно считать решенной, и то, имеем ли мы право рассматривать сведение второго закона термодинамики к вероятности как абсолютно удовлетворительную теорию. В любом случае она была очень успешной, в частности, с тех пор как было найдено теоретическое объяснение отклонений от термодинамического состояния равновесия, так называемых флуктуаций, например, в броуновском движении. Но ни одна из статистических теорий излучения еще даже не пыталась вывести ни закон Стефана – Больцмана, ни закон смещения, которые всегда и в любую теорию приходится вводить извне. Так что мы пока все еще далеки от удовлетворительной теории, которая объяснила бы распределение энергии излучения по отдельным длинам волн.

Я сам сделал первую попытку продвинуться в этом направлении. Я попытался обойти проблему применения вероятностного расчета к теории излучения, представляя излучение как испускаемое молекулами газа, движущимися согласно вероятностным законам. Вместо этого также можно было представить электроны, испускающие излучение при столкновениях с молекулами. Для дальнейшего существенно предположение, что такая частица будет испускать излучение только определенной длины волны, определяемой скоростью, и что распределение скоростей частиц подчиняется закону Максвелла. С помощью законов излучения,

выведенных из термодинамики, мы получаем закон излучения, который хорошо согласуется с опытом для обширного диапазона длин волн, т. е. для диапазона, в котором произведение температуры и длины волны не слишком велико́.

Какой бы несовершенной ни была эта попытка, мне все же удалось получить формулу, которая серьезно расходится с практикой только для волн большой длины. Но поскольку наблюдения устанавливают эти отклонения совершенно точно, мне было абсолютно ясно, что формула требует корректировки.

Лорд Рэлей первым посмотрел на эту проблему с совершенно иных позиций. Он попытался применить к проблеме излучения очень общую теорему статистической механики — теорему равномерного распределения энергии по степеням свободы системы в состоянии статистического равновесия. Смысл этой теоремы заключается в следующем.

В состоянии равновесия все движения молекул настолько беспорядочны, что не существует такого движения, которое было бы предпочтительнее любого другого. Положение движущихся частиц можно определить геометрическими параметрами, которые являются взаимно независимыми и в направлении которых происходит движение. Такие параметры называются степенями свободы системы. Что касается кинетической энергии движения, то ни одна степень свободы не является более предпочтительной по сравнению с другой, так что каждая из них содержит одно и то же количество полной энергии.

Излучение, присутствующее в пустом пространстве, можно представить как имеющее некоторое количество степеней свободы. Если волны зеркально отражаются стенками, то устанавливается система стоячих волн, соответствующих расстояниям между этими стенками. Это проще всего понять, если рассмотреть колеблющуюся струну, которая может совершать любое произвольное количество отдельных колебаний, но половины длин волн этих колебаний должны равняться длине струны, поделенной на целое число.

Возможные отдельные стоячие волны в совокупности определяют протекающий процесс и имеют смысл степеней свободы. Если мы присвоим каждой степени свободы соответствующее ей количество энергии, то получим закон излучения Рэлея, согласно которому эмиссия излучения данной длины волны прямо пропорциональна абсолютной температуре и обратно пропорциональна длине волны, возведенной в четвертую степень. Этот закон согласуется с наблюдениями именно там, где вышеописанный закон был неадекватен, поэтому сначала его сочли законом излучения с ограниченной областью применения. Но если процесс излу-

чения подчиняется общим законам электромагнитной теории или теории электронов, то, как это показал Лоренц, мы должны непременно прийти к закону излучения Рэлея. Однако если его рассматривать как общий закон излучения, то он противоречит всему накопленному опыту, потому что согласно этому закону энергия должна аккумулироваться в большей мере на коротких волнах. Возможность того, что на практике мы имеем не истинное состояние равновесия излучения, а лишь состояние, которое очень постепенно приближается к такому состоянию, когда вся энергия присутствует только в коротких волнах, также противоречит опыту. В случае видимых лучей, к которым формула Рэлея при достижимых температурах более неприменима, мы, согласно закону Кирхгофа, без труда можем вычислить, что состояние равновесия должно достигаться за кратчайшее время, а исходя из закона Рэлея, что это состояние остается весьма отдаленным. Итак, мы получаем некоторое представление о чрезвычайных сложностях, которые препятствуют правильному определению формулы излучения. Знание того, что современная общая электромагнитная теория недостаточна, а теория электронов неадекватна для объяснения одного из самых распространенных явлений — излучения света, пока остается чисто отрицательным. Мы знаем только то, как этого сделать нельзя, но нам недостает указаний, которые помогли бы нам найти свой путь. Тем не менее нам известно, что ни одна из моделей, основанных на чисто электромагнитных принципах, не может привести к правильным результатам.

Заслугой Планка явилось введение новой гипотезы, которая позволяет нам обойти закон излучения Рэлея. Для длинных волн этот закон несомненно верен, поэтому правильная формула излучения должна иметь такой вид, чтобы для очень длинных волн она переходила в закон Рэлея, а для коротких волн в закон, сформулированный мной. Соответственно, Планк в качестве отправной точки оставляет распределение энергии по степеням свободы системы, но ограничивает это распределение энергии, вводя знаменитую гипотезу об элементах энергии, согласно которой энергия не является бесконечно делимой, а может быть только распределена на достаточно большие и далее уже неделимые порции. Вероятно, эта гипотеза была бы принята без особых проблем, если бы речь в ней шла о неизменяемых частицах, например, об атомах энергии. Это допущение оказалось неизбежным для материи и электричества, что и было доказано. Однако элементы энергии Планка не являются атомами энергии; напротив, закон смещения требует, чтобы они были обратно пропорциональны длине волны данного колебания. Это представляет огромную сложность для понимания данных элементов энергии. Как

только мы принимаем эту гипотезу, мы приходим к совершенно другому распределению энергии по излучающим центрам, если мы ищем их в соответствии с вероятностными законами. Однако все это не приводит нас к закону излучения. Мы знаем только то, каким количеством энергии в среднем обладают излучающие молекулы при определенной температуре, но нам не известно, сколько энергии они испускают. Чтобы найти эмиссию при данной энергии, нам нужна определенная модель, которая испускает излучение. Такую модель можно построить лишь на основе известных электромагнитных законов, так что уже на этом раннем этапе в теории возникают трудности. С одной стороны, мы отказываемся от электромагнитных законов, вводя элементы энергии, а с другой стороны, именно эти законы мы используем, чтобы определить соотношение между эмиссией и энергией. Вероятно, можно поспорить, что электромагнитные законы справедливы исключительно для средних величин, взятых по протяженным периодам времени, тогда как элементы энергии относятся к самому элементарному процессу излучения. Осциллятор, излучающий согласно электромагнитным законам, действительно, будет мало похож на реальные атомы. Тем не менее, Планк справедливо утверждает, что это не имеет очень важного значения, потому что излучение в состоянии равновесия не зависит от природы излучающих тел. Но даже для такого излучения потребуется модель, символизирующая реальные атомы, чтобы не была пропущена ни одна из характеристик рассматриваемого события. Каждое тело, испускающее тепловые лучи, способно преобразовывать тепловые лучи с одной длиной волны в тепловые лучи с другой длиной волны. Именно на этом и основана возможность удельного спектрального состава, который всегда устанавливается в излучении. Осциллятор Планка не имеет такой способности, так что неизбежны сомнения относительно того, можно ли его надлежащим образом использовать для установления соотношения между энергией и эмиссией. Этой трудности можно избежать, если мы, вместе с Дебаем, разложим энергию излучения в полом кубе на элементы энергии Планка и в соответствии с вероятностными законами распределим их по частотам колебаний стоячих волн, образованных в кубе. Тогда логарифм этой вероятности будет пропорционален энтропии, а закон излучения будет найден, если мы найдем максимум этой энтропии. Этот результат является доказательством чрезвычайно общей природы идей Планка.

Однако на этом трудности не заканчиваются. Элементы энергии увеличиваются при уменьшении длины волны, а осциллятору, подвергшемуся действию падающего излучения низкой интенсивности понадобит-

ся очень длительное время, прежде чем он поглотит полный элемент энергии. Что произойдет, если падающее излучение прекратится прежде, чем будет поглощен полный элемент энергии? Сложности, скрытые в ответе на этот вопрос, недавно привели Планка к новой формулировке своей исходной теории. Теперь он допускает, что эмиссия может происходить исключительно целыми элементами энергии. Что касается поглощения, то оно, согласно новой теории, происходит постоянно и в соответствии с электромагнитными законами, а запас энергии осциллятора имеет значения, способные к непрерывному изменению. Таким образом действительно можно избежать сложности, связанной с длительным временем поглощения. С другой стороны, мы отказываемся от тесной связи между эмиссией и поглощением в элементарном процессе, и это отношение теперь становится справедливым лишь статистически. Следовательно, каждый атом, который испускает только целые элементы энергии и непрерывно поглощает, в случае эмиссии внезапно расходовал бы энергию из своих собственных запасов, а в случае облучения короткими волнами пополнял бы свой запас, но лишь в малом количестве. Таким образом, необходимо сформулировать специальную гипотезу о том, что в конечном итоге поглощенная энергия, взятая в целом для многих атомов в стационарном состоянии, становится равной испущенной. Тогда как в первоначальной теории Планка введение гипотезы об элементах энергии оказалось достаточным для выведения законов излучения, новые теории содержат неопределенности, которые можно устранить только путем введения новых гипотез. С другой стороны, новая фундаментальная гипотеза обеспечивает возможность дальнейшего применения этой теории, например, к эмиссии электронов.

Из нескольких наблюдений, которые я могу предложить вашему вниманию в данном контексте, вы увидите, насколько велики те трудности, которые по-прежнему присутствуют в теории излучения. Но ссылка на эти трудности, подчеркнуть которые является долгом научного подхода, не должна помешать нам отдать должное великим положительным достижениями, которые уже присутствуют на счету теории Планка.

Благодаря этой теории появился закон излучения, который согласуется со всеми экспериментальными данными и включает формулу Рэлея и мою собственную формулу в качестве предельных случаев. Кроме того, эта теория совершенно неожиданно пролила свет на абсолютно другой предмет — теорию удельных теплоемкостей.

Уже давно было известно, что удельные теплоемкости не строго подчиняются закону Дюлонга–Пти и что они уменьшаются при низких температурах. Алмазы же не подчиняются закону Дюлонга–Пти даже

при нормальных температурах. Этот закон можно вывести из теоремы распределения кинетической энергии по степеням свободы. Он гласит, что в твердых телах каждый атом обладает (в соответствии со своими тремя степенями свободы) тройным количеством энергии, а из-за потенциальной энергии общим количеством энергии, в шесть раз превышающем энергию одной степени свободы. Однако, если применить распределение энергии по элементам энергии Планка, мы согласно Эйнштейну получаем формулу для удельной теплоемкости, которая, на самом деле, показывает падение с температурой. Этот результат характеризует теорию Планка. Теория удельных теплоемкостей выводится не из формулы излучения, а из формулы для средней энергии осциллятора, которая основана непосредственно на гипотезе об элементах энергии. К сожалению, здесь начинают появляться некоторые сложности. Точные измерения удельных теплоемкостей при низких температурах, сделанные в лаборатории Нернста, показали, что формула Эйнштейна не согласуется с наблюдениями. Формула, удовлетворяющая экспериментальным данным, кроме целых элементов энергии содержит их половинки, что пока невозможно правильно интерпретировать. Однако не может быть сомнения в том, что теория излучения Планка является первым шагом на пути к теории удельных теплоемкостей.

То, что теория во многих отношениях должна оставаться незаконченной и предварительной, содержится в природе проблемы, которая, быть может, является наиболее сложной из всех, что когда-либо стояли перед физиками-теоретиками. В данном случае нужно забыть о законах теоретической физики, которые получили подтверждение в результате прямых наблюдений и применялись исключительно в прошлом, и вступить в те области, которые недосягаемы для прямого наблюдения.

Сложности, которыми преисполнена теория излучения, также появляются и при совершенно другом подходе. Эйнштейн исследовал флуктуации, которые в результате нерегулярности тепловых процессов постоянно испытывает излучение даже в состоянии равновесия. Если представить небольшую пластинку в полости, заполненной излучением, то эта пластинка будет подвергаться давлению излучения, которое, в среднем, будет одинаковым на обеих сторонах этой пластинки. Поскольку это излучение должно содержать нерегулярности, давление попеременно будет бóльшим то на одной, то на другой стороне пластинки, так что пластинка будет совершать маленькие беспорядочные движения, напоминающие броуновское движение частицы пыли, подвешенной в жидкости. Эти флуктуации можно вывести из вероятностных расчетов. Согласно теореме Больцмана энтропия и вероятность свя-

заны простым отношением. Энтропия излучения известна из закона излучения, так что вероятность состояния тоже известна, а следовательно, можно вычислить и флуктуации. Математическое выражение для этих флуктуаций состоит из двух членов. Первый несложно понять: он вызван нерегулярностями, возникающими в результате взаимного влияния множества независимых лучей, которые сходятся в одной точке. Там, где плотность излучения высока, доминирует только этот член; он соответствует диапазону излучения, подчиняющемуся закону Рэлея.

Другое слагаемое, которое волновая теория не способна объяснить непосредственно, доминирует при низкой плотности энергии излучения, когда излучение подчиняется сформулированному мной закону. Все было бы понятно, если бы оно состояло из элементов энергии Планка, которые были бы локализованы даже в пустом пространстве. Однако мы не можем следовать этой линии размышления. Мы не можем отказаться от волновой теории света, которая представляет собой одну из наиболее прочно установленных конструкций всей физики. Более того, это слагаемое следует объяснять самостоятельно не существующими локализованными элементами энергии и *a priori* невозможно ввести в оптику дуальный переход, например, принять одновременно волновую теорию Гюйгенса и корпускулярную теорию Ньютона. Все, что мы можем сделать, — это отказаться от метода Больцмана, согласно которому к этому типу флуктуаций нужно применять вероятностные расчеты, или принять, что в процессе отражения в излучение вносится новая нерегулярность.

Ввиду величины сложностей совершенно естественно, что мнения относительно пути, которому нужно следовать, должны очень и очень отличаться. Некоторые полагают, что следует изменить основные принципы электродинамики. И все же предыдущая теория охватывает огромный диапазон фактов, она объясняет даже то, что происходит при самом быстром движении бета-лучей, она подтвердилась при самых точных оптических измерениях. На мой взгляд, все говорит о том, что отклонения от современной теории вызваны тем, что происходит внутри атома. Ни один процесс, в котором принимают участие внутренние составляющие атома, невозможно объяснить с помощью современной теории.

Зоммерфельд попытался пойти в следующем направлении. Он приписал постоянной h из закона излучения, которая вместе с частотой колебаний определяет величину элемента энергии, простое значение для внутренней области атома. Она должна определять период, за который

электрон, входящий в атом, остановится, как функцию скорости этого электрона. Согласно этому мнению постоянная h выражает универсальную характеристику атомов. Эта теория позволяет вычислить длину волны рентгеновских лучей и связывает две ранее независимых попытки, которые я сделал, чтобы осуществить это вычисление. Один метод основан на теории Планка об элементах энергии в том, что он допускает, что энергия так называемых вторичных электронов, высвобожденных рентгеновскими лучами, определяется элементом энергии. Второй метод основан на теории электронов, с помощью которой вычисляется энергия, испущенная в рентгеновских лучах при внезапном торможении электрона. Определив энергию катодных и рентгеновских лучей, мы можем вычислить тормозной путь электронов, а следовательно, и длину волны рентгеновских лучей. Теория Зоммерфельда связывает две вышеописанные теории. Она имеет огромное преимущество, так как объясняет образование рентгеновских лучей с помощью электромагнитной теории. Соответственно, из нее можно сделать несколько выводов, которые будут полностью соответствовать наблюдению, например, относительно поляризации рентгеновских лучей, различной эмиссии и жесткости в разных направлениях.

Теория Зоммерфельда имеет еще одно большое преимущество, так как она пытается придать физический смысл универсальной постоянной h теории излучения Планка. Однако она имеет и недостаток, состоящий в том, что пока она применялась лишь к эмиссии и поглощению электронов, но не к решению проблемы теплового излучения.

Мы должны признать, что результат теории излучения пока не особенно хорош для теоретической физики. Как мы видели, до настоящего момента удовлетворительными были только общие термодинамические теории. Теория электронов потерпела неудачу в отношении проблемы излучения, а теория Планка еще не обрела определенную форму. Исследования сталкиваются с исключительными трудностями, и мы не знаем, когда и как нам удастся их преодолеть. В науке спасительная идея нередко появляется из совершенного другого направления, исследования в абсолютно иной области зачастую проливают свет на темные аспекты нерешенных проблем. В будущем мы должны основывать свою надежду на ожидании того, что современная эпоха, которая оказалась столь плодотворной для физики, не завершится, так и не дав полного решения проблемы теплового излучения. Нам придется заставить работать новые и далеко идущие мысли, но результат будет значителен, потому что мы получим глубокое понимание мира атома и элементарных процессов, которые в нем происходят.

Биография

Вильгельм Вин родился 13 января 1864 года в Фишхаузене в Восточной Пруссии. Он был сыном землевладельца Карла Вина, и, казалось, что ему на роду написано вести жизнь помещика. Однако экономический кризис вкупе с его личными тайными пристрастиями привели юношу к учебе в университете. В 1866 году его родители переехали в Драхштайн, расположенный в Растенбургском районе Восточной Пруссии. В 1879 году Вин пошел в школу сначала в Растенбурге, а затем в городскую школу в Гейдельберге, где он учился в 1880–82 гг. После окончания школы в 1882 году Вин поступил в Геттингенский университет, чтобы изучать математику и естественные науки, и в том же году он поступил еще в Берлинский университет. С 1883 по 1885 г. Вин работал в лаборатории Германа фон Гельмгольца, а в 1886 году получил степень доктора, защитив диссертацию по экспериментальным исследованиям дифракции света на сечениях металлов и влияния различных материалов на цвет преломленного света.

Затем ему пришлось прервать свою учебу из-за болезни отца, и вплоть до 1890 года Вин помогал отцу управлять имением. Однако за это время ему удалось провести один семестр с Гельмгольцем, и в 1887 году он проделал опыты по проницаемости металлов для световых и тепловых лучей. После продажи имения отца Вин вернулся в лабораторию Гельмгольца, который оттуда уехал, и стал президентом Физико-технического института (Physikalisch-Technische Reichsanstalt), основанного для изучения промышленных проблем. Здесь он оставался до 1896 года, когда был назначен профессором физики в Экс-ля-Шапель (Ахен), сменив на этом посту Филиппа Ленарда. В 1899 году Вина назначили профессором физики в Гессенский университете. В 1900 году он стал профессором этого же предмета в Вюрцбурге, приняв этот пост от В. К. Рентгена, и в том же году Вин опубликовал свой *Lehrbuch der Hydrodynamik* (Учебник гидродинамики).

В 1902 году его пригласили на освободившееся место профессора физики, которое ранее занимал Людвиг Больцман, в Лейпцигском университете, а в 1906 году стать преемником Друде на посту профессора физики в Берлинском университете; однако Вин отклонил оба приглашения.

В 1920 году его назначили профессором физики в Мюнхене, где он работал на протяжении всей оставшейся жизни.

Кроме ранних мест работы, о которых мы уже упоминали, Вин также работал в Физико-техническом институте с Холборном над методами измерения высоких температур с помощью термопар Ле Шателье и в то же время занимался теоретической работой по термодинамике, особенно по законам, которым подчиняется излучение тепла.

В 1893 году он открыл закон, который гласит, что длина волны изменяется с температурой. Именно этот закон впоследствии стал законом смещения.

В 1894 году Вин опубликовал статью о температуре и энтропии излучения, в которой он распространил термины «температура» и «энтропия» на излучение в пустом пространстве. В этой работе он пришел к определению идеального тела, которое полностью поглощает любое излучение и которое он назвал черным телом. В 1896 году он опубликовал формулу Вина, которая появилась в результате работы, проделанной для нахождения формулы состава излучения такого черного тела. Впоследствии было доказано, что эта формула справедлива только для коротких волн, но работа Вина дала Максу Планку возможность решить проблему излучения при тепловом равновесии с помощью теории квантов. За эту работу в 1911 году Вин был награжден Нобелевской премией по физике. Интересный момент здесь состоит в том, что эта теоретическая работа была проделана в институте, созданном для решения технических проблем, и привела к созданию новых методов освещения и измерения высоких температур.

Когда, в 1896 году, Вин переехал в Экс-ля-Шапель (Ахен), чтобы занять освободившееся после ухода Ленарда место профессора физики, он обнаружил там лабораторию, оборудованную для изучения электрических разрядов *в вакууме*, и в 1897 году начал изучать природу катодных лучей. Используя трубку с окошком Ленарда, внутри которой создавался очень глубокий вакуум, он подтвердил открытие, которое два года назад сделал Жан Перрен, что катодные лучи состоят из быстро движущихся частиц, несущих отрицательный заряд (электронов). А затем, почти одновременно с сэром Дж. Дж. Томсоном, который работал в Кембридже, но с помощью другого метода он измерил отношение электрического заряда этих частиц к их массе и нашел, как и Томсон, что эти частицы примерно в две тысячи раз легче атомов водорода.

В 1898 году Вин изучил каналовые лучи, открытые Гольдштейном, и сделал вывод, что они являются положительным эквивалентом отрицательно заряженных катодных лучей. Он измерил отклонение этих лучей под действием магнитного и электрического полей и заключил, что они

состоят из положительно заряженных частиц, масса которых ни в коем случае не превышает массу электронов[1].

Метод, который использовал Вин, примерно через двадцать лет привел к масс-спектроскопии, которая обеспечила возможность точного измерения масс различных атомов и их изотопов, необходимых для расчета энергии, высвобождающейся при ядерных реакциях.

В 1900 году Вин опубликовал теоретическую работу о возможности постановки механики на электромагнитную основу. После этого он продолжал заниматься исследованием каналовых лучей и в 1912 году показал, что если давление не является чрезвычайно слабым, то эти лучи в процессе движения при столкновении с атомами остаточного газа утрачивают, а затем вновь приобретают свой электрический заряд. В 1918 году он опубликовал еще одну статью по этим лучам, связанную с измерением постепенного уменьшения силы их свечения после того, как они покидают катод. Из этих экспериментов Вин вывел то, что классическая физика именует затуханием световых колебаний в атомах, а квантовая физика — ограниченной продолжительностью существования возбужденных состояний атомов.

В этом, да и в других отношениях Вин внес свой вклад в переход от классической физики Ньютона к физике квантовой. Как писал о нем Макс фон Лауэ, его «бессмертная слава» состоит в том, что «он подвел нас к самым вратам квантовой физики».

Вин был членом Академий наук Берлина, Геттингена, Вены, Стокгольма, Христиании и Вашингтона, а также почетным членом Физического общества города Франкфурт-на-Майне.

В 1898 году он женился на Луизе Мелер из Экс-ла-Шапель (Ахен). У них было четверо детей. Он умер в Мюнхене 30 августа 1928 года.

[1]По-видимому, Вин в своих измерениях повторил ошибочный результат Шустера (см. лекцию Ленарда, стр. 101). Объяснение физических причин этого отклонения можно найти в лекции Томсона, см. стр. 131. — *Прим. ред.*

Нильс Густав Дален

«за изобретение автоматических регуляторов с газовыми аккумуляторами для источников света на маяках и бакенах»

Нильс Густав Дален лекции не читал.

Биография

Нильс Густав Дален родился 30 ноября 1869 года в Стенсторпе, в Скараборге (Швеция). Он был сыном фермера. Получив начальное образование, мальчик поступил в сельскохозяйственную школу, чтобы изучать молочное сельское хозяйство, но Густав де Лаваль, заметив в нем талант к механике, посоветовал ему получить техническое образование. Он самостоятельно подготовился к поступлению в Институт Чалмерса в Гетеборге, куда и был принят в 1892 году. В 1896 году он закончил институт, получив профессию инженера, и провел год в Швейцарии, занимаясь под руководством профессора Стодолы в Федеральный Технологический институт.

По возвращению в Швецию Дален занимался исследованиями в Гетеборге и начал работать инженером-консультантом. В 1901 году он стал техническим директором Шведской карбидно-ацетиленовой компании, а впоследствии начал работать в Шведской компании газовых аккумуляторов, где в 1906 году стал главным инженером. В 1909 году эта компания была реорганизована и превратилась в Шведскую компанию газовых аккумуляторов (Svenska Aktiebolaget Gasaccumulator (AGA)), где Дален стал финансовым директором.

Впервые изобретательность Далена проявилась, еще когда он был ребенком и жил на ферме отца. Он соорудил молотилку, которую приводило в движение старое прядильное колесо. Он изобрел прибор, который

показывал содержание в молоке молочного жира, в результате чего познакомился с де Лавалем. Получив высшее образование, Дален работал над созданием паровой турбины и связанными с ней воздушными компрессорами и насосами. Он также изобрел аппарат для пастеризации и доильный аппарат.

В 1901 году компания Далена приобрела патентное право на французское изобретение растворенного ацетилена, и Дален начал работать над автоматическими регуляторами для маяков. Его последующее изобретение солнечного клапана, благодаря которому маяк при наступлении сумерек автоматически зажигается, а при наступлении рассвета — гаснет, обеспечило идеальное функционирование маяков и позволило посещать их для проверки зачастую не более одного раза в год. Изобретение Даленом цилиндра, наполненного пористым асбестом и инфузорной землей, для хранения ацетилена значительно снизило риск при работе с этим материалом, и его использование в сварочных работах стало безопасным. Дален изобрел смеситель, который обеспечивает постоянное и правильное соотношение газа и воздуха и используется в раскаленной сетке газового фонаря, а также прибор для устранения сломанных сеток и их замены новыми.

В 1912 году при проверке предохранителей на цилиндрах, содержащих ацетилен, несмотря на принятые меры предосторожности, произошел внезапный взрыв, в результате которого Дален получил серьезные травмы и потерял зрение. От всех травм, кроме последней, он оправился и, несмотря на свое серьезнейшее увечье, продолжил свои исследования. Он получил контракт на освещение Панамского канала и впоследствии обратился к области тепловой техники, где он изобрел плиту, на этот раз для общего пользования, которая обеспечивает тепло для приготовления пищи в течение двадцати четырех часов, сжигая при этом всего восемь фунтов угля.

Дален писал мало, но он оставил свои практические работы, обеспечив свет, а значит безопасность, для блага людей, путешествующих по земле, воде или воздуху.

Среди многих знаков отличия, которыми был награжден Дален, — членство в Шведской королевской академии наук (1913 г.) и в Академии науки и техники (1919 г.). В 1918 году его назначили почетным доктором Лундского университета и наградили медалью Морхеда Международной ацетиленовой ассоциации. Он принимал участие в прениях в Национальном экономическом обществе и служил в муниципальном совете города Лидингё в течение почти двадцати лет.

В 1901 году Дален женился на Эмме Перссон. У них было два сына и две дочери. Их старший сын, Гуннар, стал инженером и вслед за отцом — директором AGA; младший сын, Андерс, стал доктором медицинских наук; брат Густава, Албин, знаменитый офтальмолог, был профессором в Каролинском институте.

Дален умер 9 декабря 1937 года на своей вилле в Лидингё.

Хейке Камерлинг-Оннес

«за исследование свойств вещества при низких температурах, которые привели к получению жидкого гелия»

Хейке Камерлинг-Оннес

Исследования свойств веществ при низких температурах, которые, помимо всего прочего, привели к получению жидкого гелия

Нобелевская лекция, 11 декабря 1913 г.

Поскольку вы оказали мне честь тем, что позволили описать вам мои исследования свойств веществ при низких температурах, которые привели меня, помимо всего прочего, к получения жидкого гелия, я, прежде всего, должен выразить свою глубочайшую благодарность вашей древней и знаменитой Академии за то, что она отметила меня таким образом. Это произошло именно тогда, когда продолжение моей работы будет многого от меня требовать. Но ничто, кроме вашей доброй воли, не может дать мне больше сил взглянуть в лицо новым проблемам с той же смелостью, с какой 30 лет назад я встречал трудности, которых теперь уже не существует.

С той поры основная цель исследований свойств веществ при низкой температуре весьма изменилась. Когда я впервые обратился к исследованиям в этой области, основной целью все еще было статическое

сжижение газов, которое до того момента не было освоено, а также разливка в открытые контейнеры газов, наиболее тяжело поддающихся сжижению.

Лейденская работа с самого начала приобрела свой особый характер благодаря тому, что я подчинился зову теорий Ван дер Ваальса, особенно его только что выведенного закона соответственных состояний.

Этот закон имел для меня особую притягательность, потому что я надеялся найти для него основу в стационарном механическом подобии веществ, а с этой точки зрения казалось особенно важным изучение отклонений в веществах простой химической структуры с низкими критическими температурами.

Мне очень хотелось выполнить необходимые прецизионные измерения при низких температурах. Для этого нужно было поддерживать при постоянной температуре множество измерительных инструментов, а кроме того, сконструировать подходящие температурные ванны (которые также были бы полезны и для других исследований), чтобы охватить весь диапазон низких температур.

Пока я размышлял над тем, как все это можно сделать, вышла в свет основная классическая работа Врублевского и Ольшевского по статическому сжижению кислорода. В связи с этим приобрело большое значение определение изотерм водорода в ванне, наполненной жидким кислородом, особенно если принять во внимание проблему сжижения водорода. Это определение удалось провести только во второе десятилетие существования криогенного института, а его результаты не могли быть опубликованы через несколько лет после того, как Дьюар уже получил жидкий водород. Первый большой успех развитии криогенной лаборатории, сделавший возможными измерения в ванне, наполненной жидким кислородом, также был достигнут лишь во второе десятилетие существования института. Ольшевский и Дьюар к тому времени уже решили проблему разлива жидкого кислорода в открытые контейнеры.

Лейденский процесс отличался от всех остальных в следующем: чтобы получить постоянную ванну, испаренный кислород вновь сжижался и проводился через замкнутую циркуляционную систему. В дальнейшем, совершенствуя технику Лейденской лаборатории, мы рассматривали создание подобных циркуляционных систем, несмотря на то, что выполняемые исследования направлялись в область еще более низких температур. Опыт, полученный на ранних стадиях работы, можно было использовать для решения возникавших впоследствии проблем, что и сыграло решающую роль в сжижении гелия. Таким образом, во всей

криогенной лаборатории по-прежнему присутствуют следы, оставленные более ранними проблемами.

Доступный нам сейчас диапазон низких температур намного превышает тот, о котором я мечтал, начиная свои исследования, так как гелий был открыт много позже, а он позволяет подойти к абсолютному нулю температур в пять или десять раз ближе, нежели водород.

В то же время цели криогенной лаборатории, которые первоначально были весьма ограниченными, стали гораздо более обширными.

Все это произошло десять лет назад в то время, когда я в своем ректорском обращении рассказывал о программе работы лаборатории. Тогда лаборатория решала не только вопросы термодинамики, но и некоторые вопросы из других областей.

В то время проблемы термодинамики стояли на переднем плане для криогенного отделения лаборатории, потому что, главным образом, там проводилась работа по уравнению состояния при низких температурах. Однако и другие вопросы, которые требовали проведения исследований при низких температурах, стали столь многочисленными и важными, что я почувствовал необходимость привлечь к работе при низких температурах все остальные группы, чтобы Лейденский институт занимался исключительно изучением общего характера влияния низких температур.

Именно благодаря подобной специализации мне удалось установить сотрудничество с несколькими учеными, которые откликнулись на гостеприимство нашей лаборатории. Решение начать взаимодействие Лейденского института, который занимался исключительно сложной работой в области низких температур, с более крупными заведениями подобного рода оказалось очень полезной научной основой для такого сотрудничества.

В ходе специализации Лейденского института, которая сейчас завершилась, я, конечно же, был убежден в том, что исследования при низких температурах объяснили бы многие свойства веществ. Однако реальность превзошла все мои ожидания. Дело даже не в том, что было весьма и весьма желательно посредством значительного подавления теплового движения максимально упростить условия, при которых происходят все явления (причем произошло это в гораздо большей степени, чем это можно было предвидеть). Нам удалось показать, что с помощью жидкого гелия можно сделать неожиданно большой шаг в этом направлении, так как для некоторых явлений он позволяет достигать температур, равных почти абсолютному нулю. Дальнейшие открытия в другой области неожиданно потребовали проведения исследований свойств мно-

гих веществ при температурах, близких к абсолютному нулю. Тепловая теорема Нернста и особенно теория квантов и теория энергии нулевых колебаний Планка сделали измерения при нулевых температурах жизненно важными для физиков.

Правда, вопрос Фарадея относительно того, все ли газы могут быть сжижены, мало-помалу был разрешен в смысле высказывания Ван дер Ваальса, что «материя всегда будет проявлять притяжение», и таким образом одна фундаментальная проблема была устранена. Однако в то же время вопрос, заданный Планком, поставил другую, не менее фундаментальную, проблему, в решение которой свой вклад могут внести исследования свойств различных веществ при низких температурах.

А теперь я попрошу вас пройти вместе со мной в Лейденскую лабораторию.

Как я уже коротко объяснил, измерения проводят в ваннах, содержащих сжиженные газы, которые находятся в криостатах (оборудование для поддержания постоянных низких температур) так долго, как это необходимо, а испаренный газ циркулирует по системе: он всасывается и вновь сжижается.

Циклы для различных газов, как и в знаменитом эксперименте Пикте, объединяются в каскады, так что холодная ванна, температуру которой может поддерживать предыдущий цикл, также служит для сжижения при более низкой температуре газа, который циркулирует в следующем цикле. На рис. 1 приведена диаграмма различных циклов, за исключением цикла гелия. Эти циклы показаны разными линиями.

Первый цикл содержит метилхлорид. Жидкий метилхлорид находится в охлаждаемом водой конденсаторе. Из конденсатора он попадает в холодильник, где испаряется под давлением, соответствующим температуре, необходимой для сжижения этилена. Пар всасывается большим вакуумным насосом через восстановитель (в котором согласно противоточному принципу он проходит мимо охлаждаемого этилена), а сопряженный компрессор возвращает его в конденсатор, где он сжижается.

Второй цикл содержит этилен. Циркуляция происходит точно также, как и в первом цикле.

В третьем цикле таким же образом циркулирует кислород. Сжиженный кислород также может служить для получения жидкого воздуха в кислородном холодильнике.

Криостат с ванной жидкого кислорода, о котором я говорил раньше, был смонтирован без использования вакуумных стеклянных сосудов. Он подсоединен к сжижающему аппарату, поэтому измерения можно про-

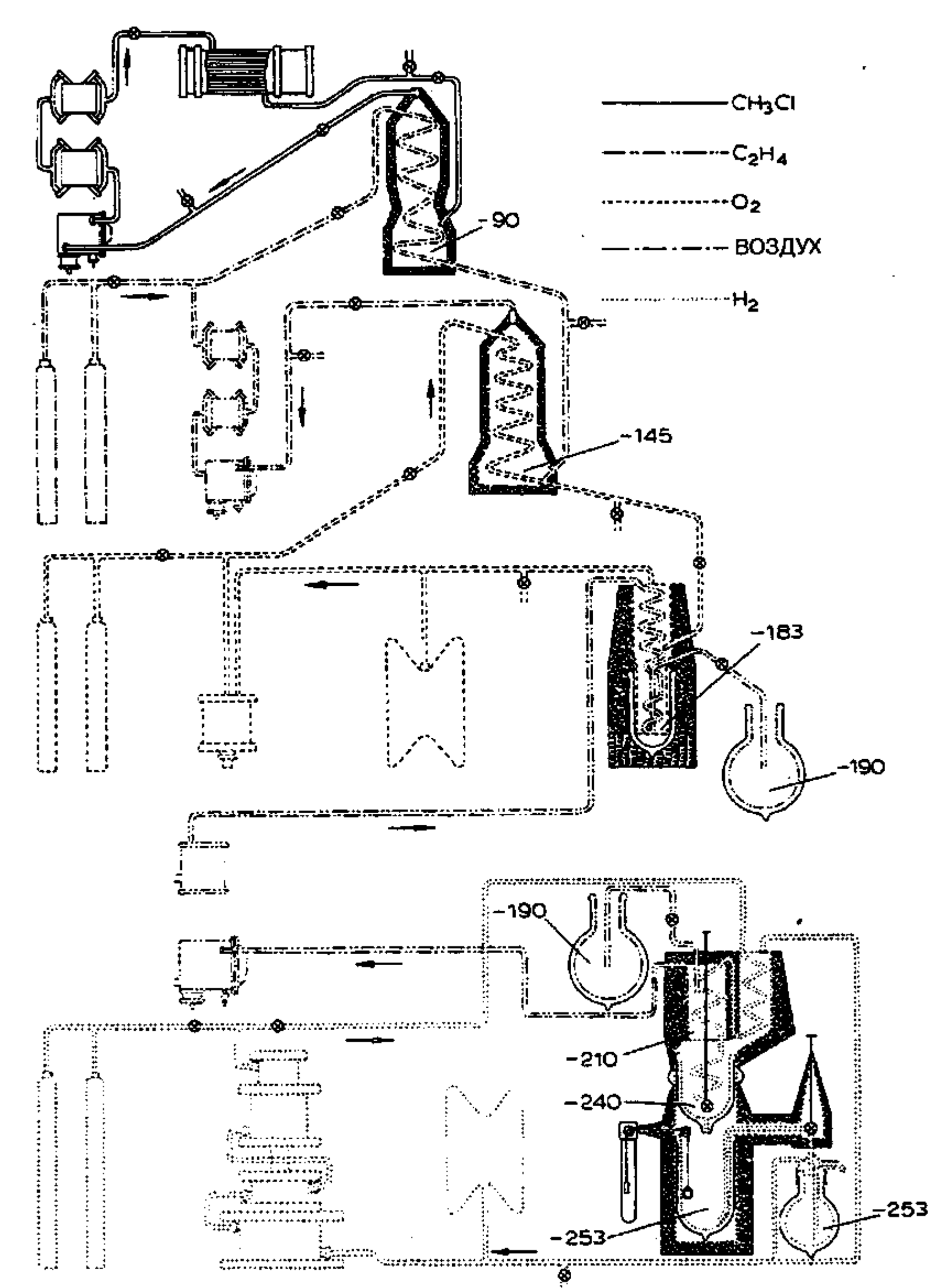


Рис. 1

водить только в непосредственной близости от этого аппарата. Дьюар произвел коренной переворот в работе с низкими температурами, введя посеребренные вакуумные стеклянные сосуды. В этих сосудах можно было хранить жидкий кислород и транспортировать его из сжижающего аппарата к месту его использования. При экспериментах с этими циклами и в моей последующей работе мне не раз помогала оригинальная идея Дьюара.

Жидкий воздух получается в четвертом цикле. Остальные циклы являются замкнутыми, но этот можно разорвать. Воздух всасывается из комнаты, а запас жидкого воздуха можно хранить в открытых вакуумных стеклянных сосудах.

Вскоре после того как нам удалось получить постоянную ванну жидкого кислорода, великий мастер техники охлаждения, Линде, открыл процесс, с помощью которого он создал промышленную установку для получения жидкого воздуха. Это оригинальное открытие позволяет воздуху, имеющему нормальную температуру, сжижаться без промежуточных этапов. Вы увидите, что получение жидкого водорода и жидкого гелия в следующих циклах, которые каждый раз требуют одинаково большого падения температуры без промежуточной стадии, основано на принципах процесса Линде. Однако жидкий воздух мы по-прежнему получаем с помощью объединенных в каскад циклов, как было описано выше. При рассмотрении такой установки, которая также является очень экономичной и поставляет около 14 литров воздуха в час, не надо забывать о том, что все важные циклы должны быть готовы к непрерывной работе, так что во время опытов в лаборатории нам всегда доступен весь температурный диапазон вплоть до −217°C.

На рис. 2 изображены четыре первых цикла лейденского каскада. На нем ясно видны сопрягаемые сосуды для систем, в которых циркулируют метилхлорид и этилен, а также компрессор Брозерхуда для цикла кислорода. (Кроме того, на рисунке видны многие части оборудования, которые используются для измерений, но не видно ни воздушного компрессора Брозерхуда, ни вакуумных насосов, которые так важны для работы установки и которые делают возможным испарение при очень низком давлении. Эти составляющие особенно важны для измерений, потому что именно с их помощью, используя один и тот же газ, можно охватить широкий диапазон температур.)

Обратимся теперь к циклу водорода. Когда я начал думать о сжижении водорода, я исходил из принципа механического подобия, о котором уже упоминал. Следуя этому принципу, а также критическим параметрам, которые так искусно удалось определить Ольшевскому, можно за-

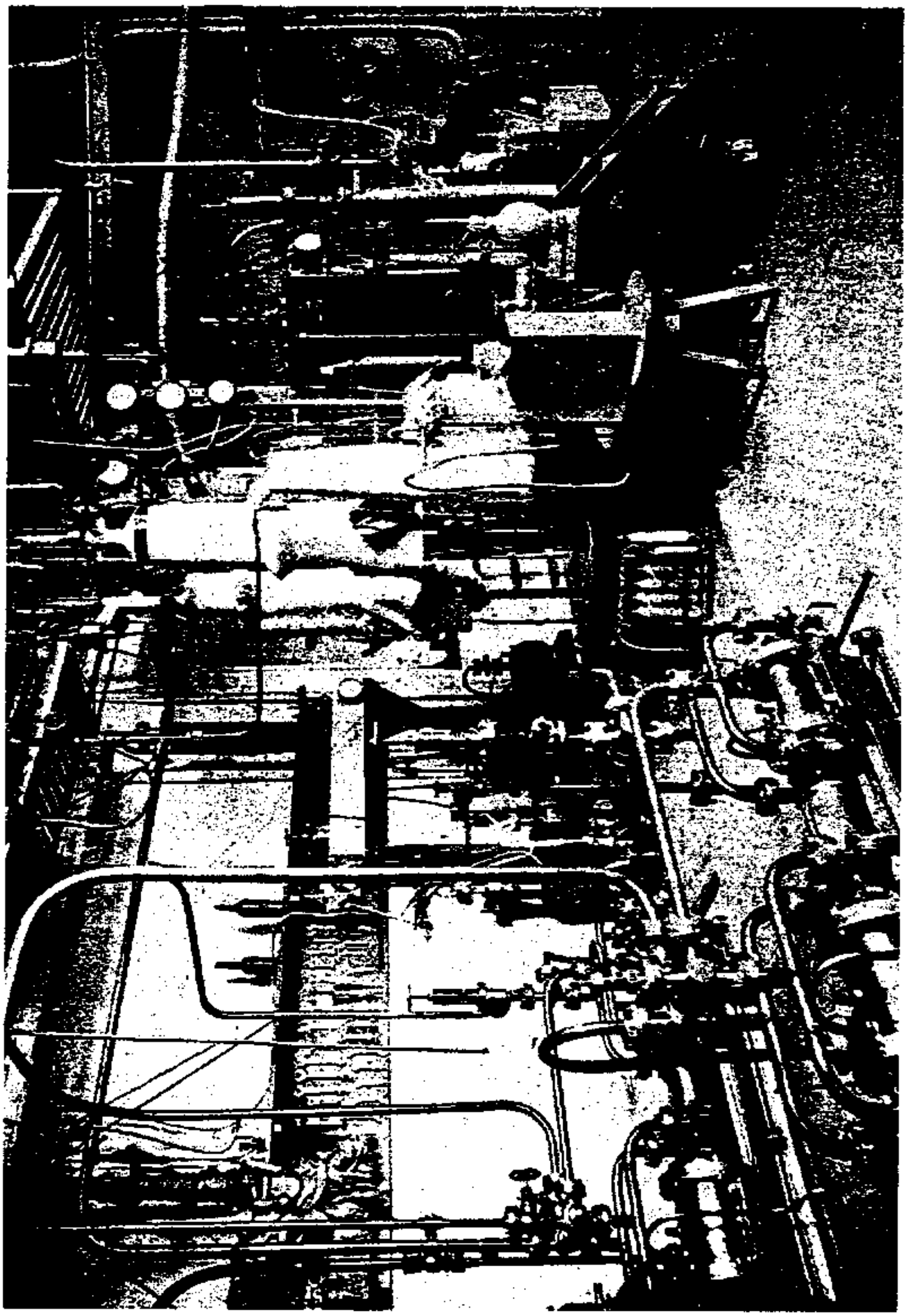


Рис. 2

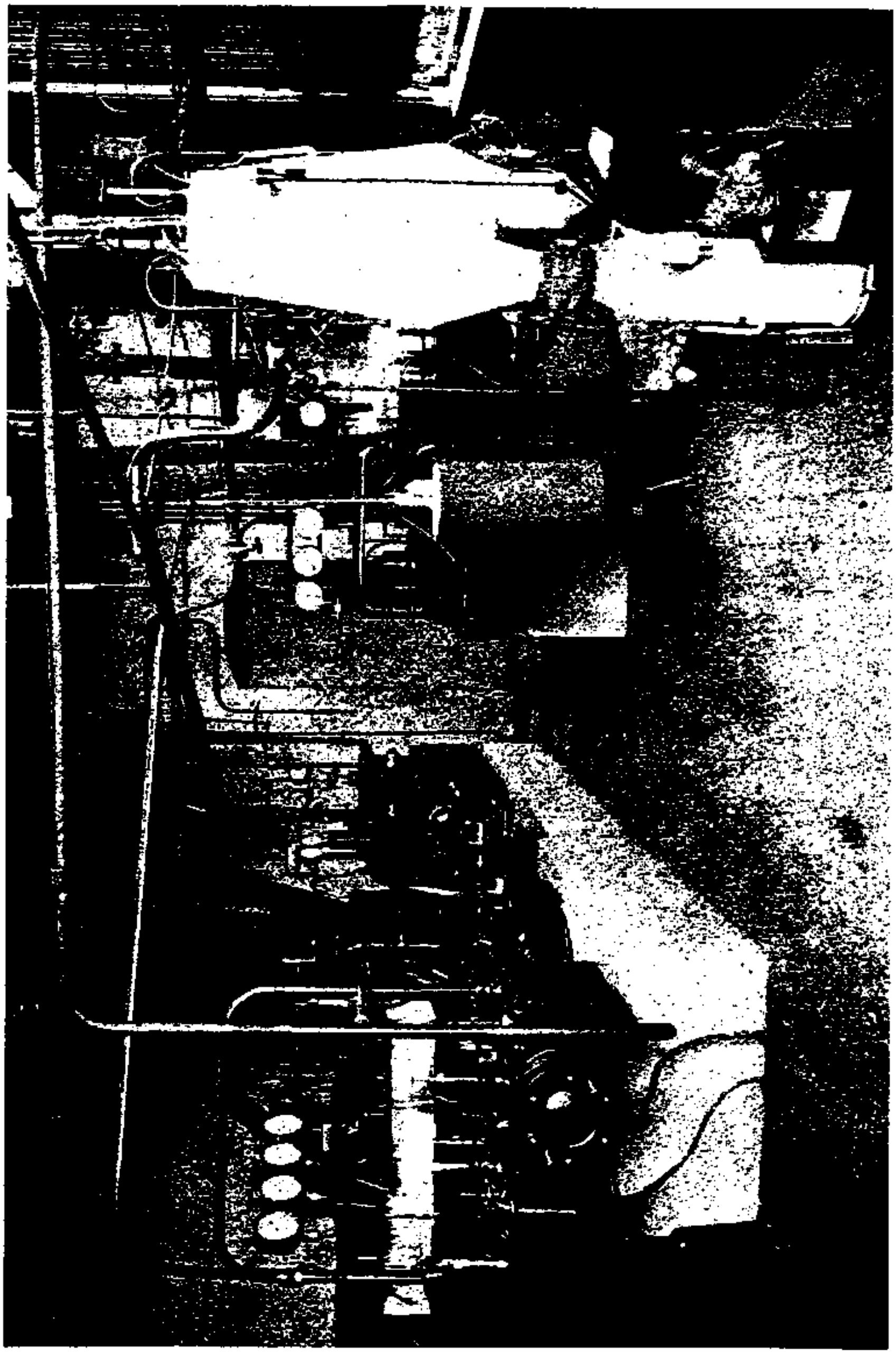


Рис. 3

ключить, что если бы нам удалось построить аппарат, который подошел бы в качестве модели, сжижающей *кислород*, начиная с *нормальной* температуры, то с помощью аппарата, основанного на этой модели, мы смогли бы добиться сжижения *водорода*, начиная с температуры *жидкого кислорода*. Задолго до того как у меня появилась возможность использовать этот принцип, Дьюар уже получил жидкий водород. В своем ректорском обращении, на которое я ссылался, я уже рассказывал об огромной важности блестящего достижения Дьюара для физических измерений. В виде жидкого водорода в нашем распоряжении имеется морозильный агент, который подводит нас к абсолютному нулю в пять раз ближе, нежели жидкий воздух. В Лейдене это должно было использоваться в непрерывно работающем цикле. (Из-за серьезных требований, предъявляемых точными измерениями, возможность которых предполагали при температурах жидкого водорода, все это удалось осуществить только через много лет.) Циркуляционная система схематично изображена на рис. 1.

Сжатый водород выходит из холодильника, в котором воздух откачивается в воздушный насос, в спираль восстановителя с дроссельным клапаном, который, по примеру Дьюара, помещен в посеребренный вакуумный сосуд. Сама спираль создана по образцу чрезвычайно практичного аппарата Хэмпсона для сжижения воздуха.

Жидкий водород собирается в сосуде Дьюара и (как показывает поплавок) с помощью сифона откачивается в передвижные металлизированные вакуумные сосуды, которые соединяются с контейнером для чистого водорода. Жидкий водород откачивается через сифон из вакуумных стеклянных сосудов в криостаты. Совершенно ясно, что для непрерывной циркуляции сорока кубических метров в час необходимо использовать очень чистый водород, абсолютно замкнутый цикл и специальные насосы, поскольку совсем небольшая примесь воздуха способна заблокировать тонкие трубки и клапаны, через которые должен течь водород.

Цикл циркуляции показан на рис. 3. Ясно видны компрессоры, сжижающий аппарат и вакуумный насос для испарения жидкого воздуха в холодильнике. Еще несколько аппаратов нужны, чтобы обеспечить регулярную подачу десяти литров жидкого водорода в час, которые мы теперь получаем, и обеспечить бо́льшие запасы, которые необходимы при работе с жидким гелием.

Трубопровод для высасывания газа из криостатов связывает описанные циклы со всеми рабочими комнатами. Таким образом, с помощью сжиженных газов, которые испаряют при соответствующем давлении и которые, так сказать, имеются в жидком состоянии, можно поддержи-

вать постоянные температуры вплоть до точки замерзания водорода во всех отделах лаборатории.

Обратимся к экспериментам, которые выполнялись с помощью этого метода.

Вообще говоря, первая задача состояла в том, чтобы приспособить измерительные приборы к выбранному методу работы. Их нужно было закрыть в герметической камере, что не всегда легко сделать. Однако зачастую именно это играет решающую роль, поскольку однажды сконструированный подходящий для экспериментов криостат такого типа имел преимущество, состоящее в том, что его можно было последовательно заливать различными газами и, таким образом, проходить весь диапазон низких температур без каких бы то ни было изменений измерительной аппаратуры.

Я не могу тратить слишком много времени на рассказ об этом оборудовании (как не могу я останавливаться и на работе с ваннами, хотя зачастую они играли решающую роль в успехе сложных измерений, поскольку позволяли наблюдателю сосредоточить все свое внимание на измерениях). Я бы предпочел рассказать о том, что исследования, в которых это оборудование использовалось, привели к получению температурной зависимости свойств самого разного типа. Упоминая о некоторых из них, я ограничусь лишь исследованиями, в которых достигалась точка замерзания водорода. Но сначала мне хотелось бы рассказать о нескольких ученых, с которыми я работал.

Мистер Ж. Беккерель прибыл, чтобы исследовать влияние магнитного поля на спектры поглощения редкоземельных элементов (явление Зеемана); господа Беккерель, отец и сын, приехали, чтобы изучать фосфоресценцию сложных уран-содержащих соединений; мистер Ленард и мистер Паули — чтобы изучить продолжительную фосфоресценцию сульфидов щелочноземельных металлов; мадам Кюри — чтобы исследовать проникающее излучение радия; мистер Вебер — чтобы найти вязкость газообразного водорода и гелия. Мне особенно приятно сообщить, что достойный шведский исследователь мистер Бенгт Бекман вместе с женой приезжали в Лейден, чтобы поработать над несколькими проблемами, связанными, главным образом, с экспериментами, которые он проводил в Упсале и из которых я могу назвать эффект Холла в сплавах и увеличение сопротивления свинца под давлением. Мне бы хотелось показать (на рис. 4) диаграмму, взятую из работы доктора Бекмана, в которой использовались ванны с этиленом, кислородом и водородом. Она показывает, до каких вы-

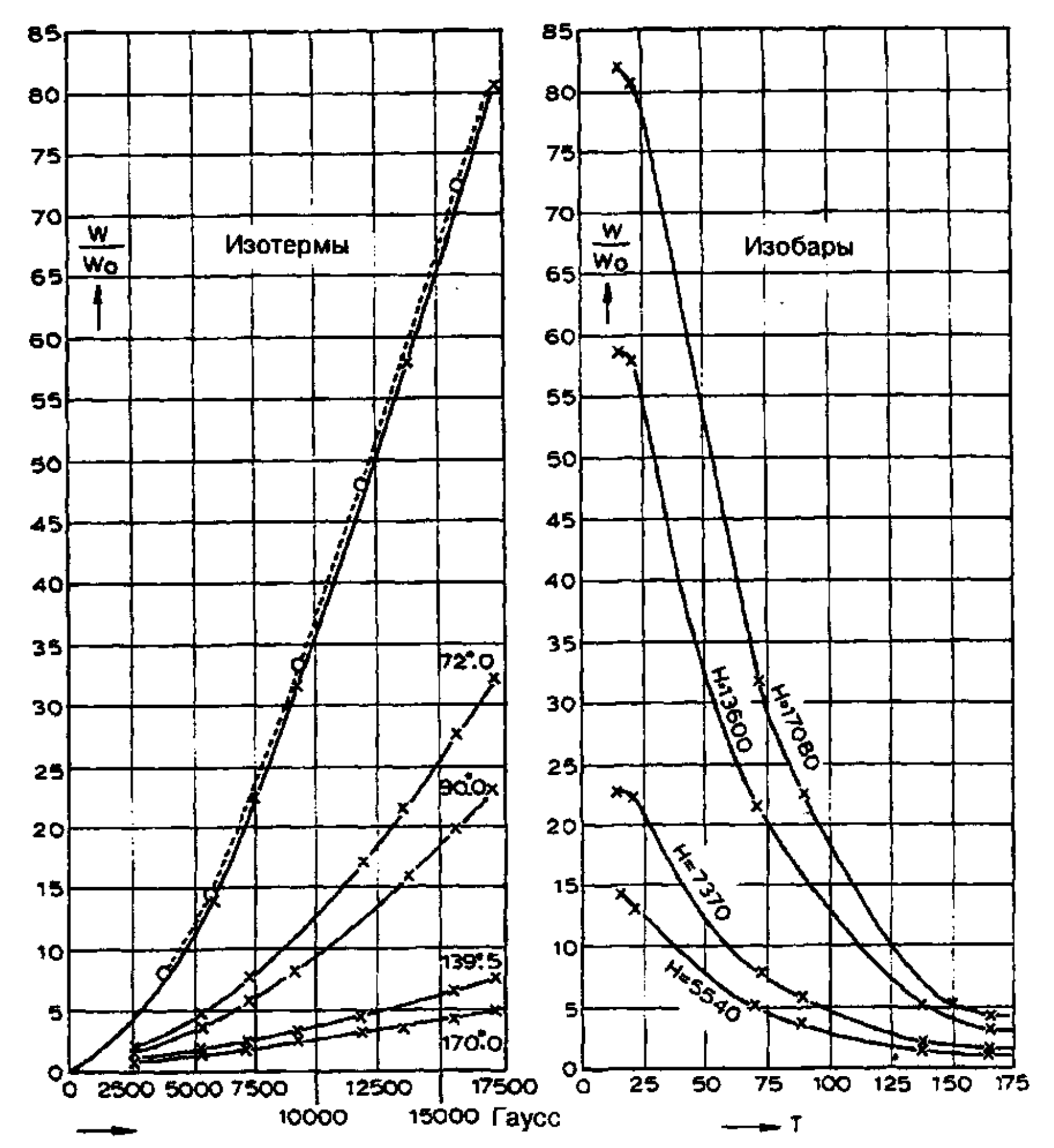


Рис. 4

соких значений при температурах водорода возрастает сопротивление висмута.

С только что упомянутыми экспериментами тесно связана группа опытов, касающихся магнетизма.

Мистер Вейсс приехал, чтобы определить магнитный момент молекул ферромагнитных материалов с помощью измерений насыщения

в точке плавления водорода. Позднее, когда Вейсс открыл магнетон, полученные результаты помогли определить его величину, которая, вероятно, является фундаментальной для магнитных моментов всех атомов. Эксперимент, который мы провели вместе с мистером Перье над жидким и твердым кислородом, выявил отклонения от закона Кюри, который мы впоследствии тоже нашли в экспериментах с парамагнитными солями. Во время работы с мистером Остерюи мы нашли, что один класс этих отклонений можно объяснить, принимая отрицательный знак для молекулярного поля Вейсса, которое тогда — согласно нашим с мистером Перье исследованиям восприимчивости жидких смесей кислорода и азота и следуя теории Вейсса — можно понимать как функцию расстояния между молекулами.

Продолжение, по мере их подготовки, измерений парамагнетизма при гелиевых температурах также важно в связи с теорией энергии нулевых колебаний. Дело в том, что было немало попыток объяснить отклонения от закона Кюри без введения отрицательного поля. Так делал и Остерюи, вводя в теорию вращательной энергии Ланжевена, которую Ланжевен считает пропорциональной температуре, выражение Эйнштейна и Штерна, содержащее энергию нулевых колебаний. Если верна неизмененная теория Ланжевена, это можно было бы особенно ясно показать при гелиевых температурах. Также при гелиевых температурах стало бы очевидным влияние достижимых полей на восприимчивость, которая согласно теории Ланжевена обратно пропорциональна температуре, тогда как при температурах водорода этого нельзя ожидать, пока не будут достигнуты поля в десять раз бо́льшие и вследствие этого намного превышающие то, что можно ожидать. (См. Приложение 1.)

Изучение уравнения состояния, связанного с монументальными теориями Ван дер Ваальса, всегда было главным предметом исследований в Лейденской лаборатории. В частности, точное изучение уравнения состояния простых газов принадлежит к области низких температур. Сюда же относится и определение абсолютной шкалы температур ниже точки замерзания воды. Мне хотелось бы поблагодарить своих талантливых сотрудников за помощь с исчерпывающими прецизионными измерениями, с которыми здесь приходится иметь дело. В последнее время меня особенно поддерживали господа Браак, Клей, Кроммелин, Дорсман, мистер и миссис Гааз-Лоренц, а также господа Хольст и Кеезом, а мистеру Кроммелину я обязан еще и техническим состоянием лаборатории.

Я очень многим обязан выдающимся теоретическим знаниям мистера Кеезома, а также исчерпывающему и оригинальному способу его работы над теоретическими проблемами, связанными с уравнением со-

стояния, изучение которого также выпало, главным образом, на его долю.

Что касается экспериментальной работы, для ее проведения нужно было соблюсти различные условия, каждое из которых должно выполняться с огромной точностью. (Закон соответственных состояний справедлив приблизительно, вследствие чего реальную ценность имеют лишь те наблюдения, точность которых дает возможность определения отклонений от этого закона.) Давление, при котором сжимается газ, объем, который он занимает, и температура, при которой происходит эксперимент, должны быть известны с необходимой точностью. Объем, занимаемый измерительными приборами, требовал, чтобы ванны в криостатах даже при работе с жидким водородом иногда имели емкость вплоть до полутора литров. Кроме того, в таких случаях нужно было поддерживать одинаковую и постоянную температуру вплоть до 1/100 градуса.

(На рис. 5 схематично изображен пьезометр высоких давлений. Большой резервуар, наполненный исследуемым газом, погружается в блок Кайете и через стальную капиллярную трубку соединяется с маленьким резервуаром. Последний находится в криостате, в котором один из циклов поддерживает нужную температуру в ванне. Газ в пьезометре под давлением ртути переходит в малый резервуар. Количество перемещенного газа измеряется высотой градуированного столбика ртути.)

Чтобы гарантировать необходимую точность измерений, давление с помощью сжатого газа передавалось от первого манометра ко второму и так далее в целом ряду дифференциальных ртутных манометров, как это показано на рис. 6, так что в рабочем пространстве можно было получить высоту ртутного столба, равную 45 метрам, а давления до 60 атмосфер измерялись с точностью до миллиметра. (Впоследствии диапазон действия этого аппарата расширили до 90 атмосфер.)

Что касается измерения температур, я должен ограничиться лишь упоминанием о том, что эталоном такого измерения является водородный термометр, к которому гораздо позднее был добавлен еще и гелиевый термометр. Если судить по одновременному изучению всех типов дополнительных термометров вплоть до точки плавления водорода, похоже, что при абсолютном определении температур достигается точность, равная 1/50 градуса.

Прибор для измерения объема, который помимо всего прочего использовался при исследованиях прямолинейного диаметра, ради чего в Лейден приехал мистер Матиас, входит в аппарат, служащий для определения уравнения состояния. Я должен опустить все подробности, связанные с этим, да и другим вспомогательным оборудованием, несмотря

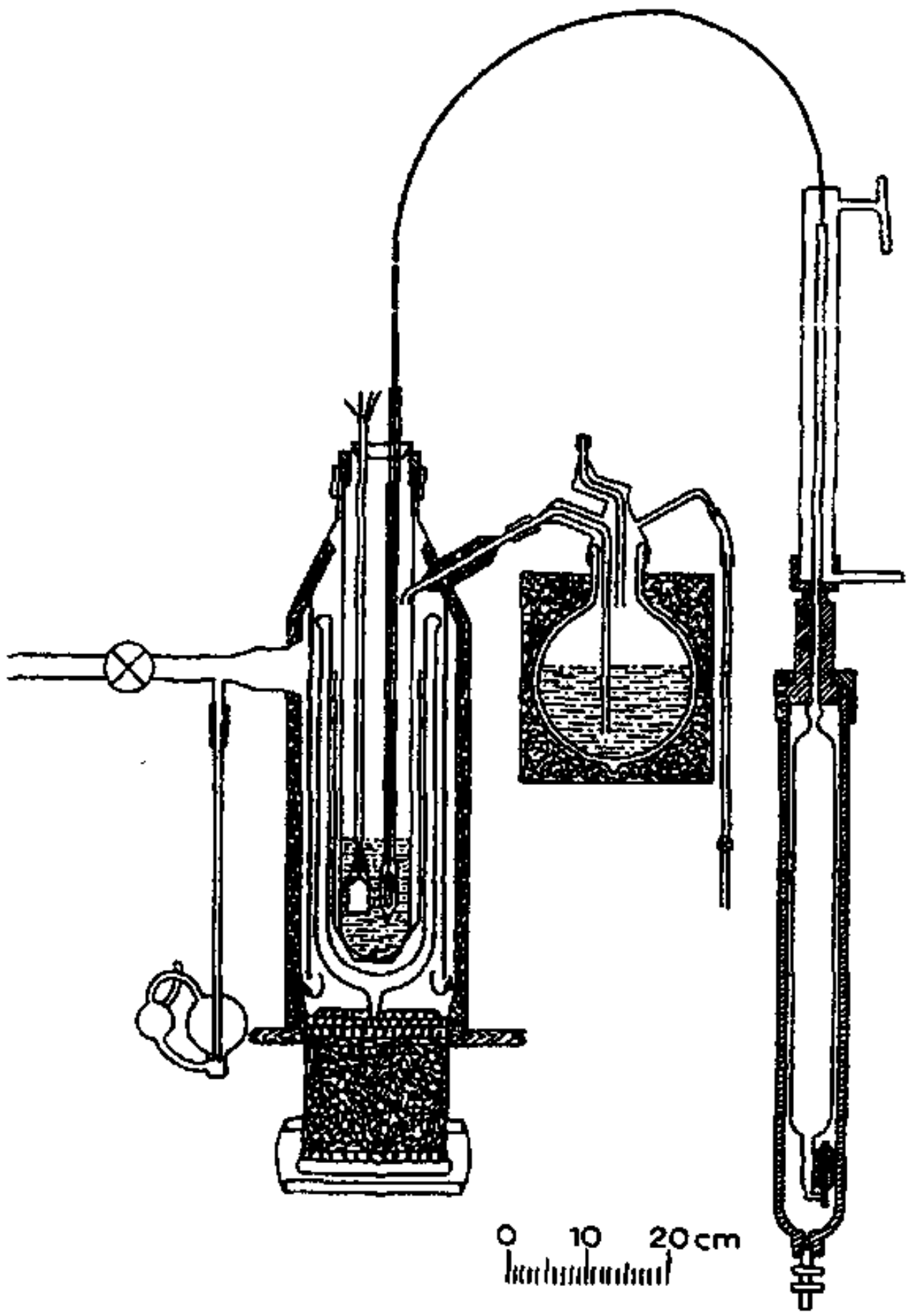


Рис. 5

на то, что мне было бы приятно представить более точную картину всей работы, которую пришлось проделать для нахождения уравнения состояния, нежели это возможно за столь короткое время. И еще меньшее время я имею право тратить на рассказ об оценке наблюдений. Но, тем не менее, мне хотелось бы отметить, что с помощью мистера Браака и мистера де Гааза я получил вириальные коэффициенты для водорода, а с помощью мистера Кроммелина — для аргона. Тогда, используя эти коэффициенты, мистер Кеезом проделал великолепную работу по проверке различных теоретических концепций и обнаружил, помимо всего прочего, что в том, что касается отклонений от закона Бойля при низких

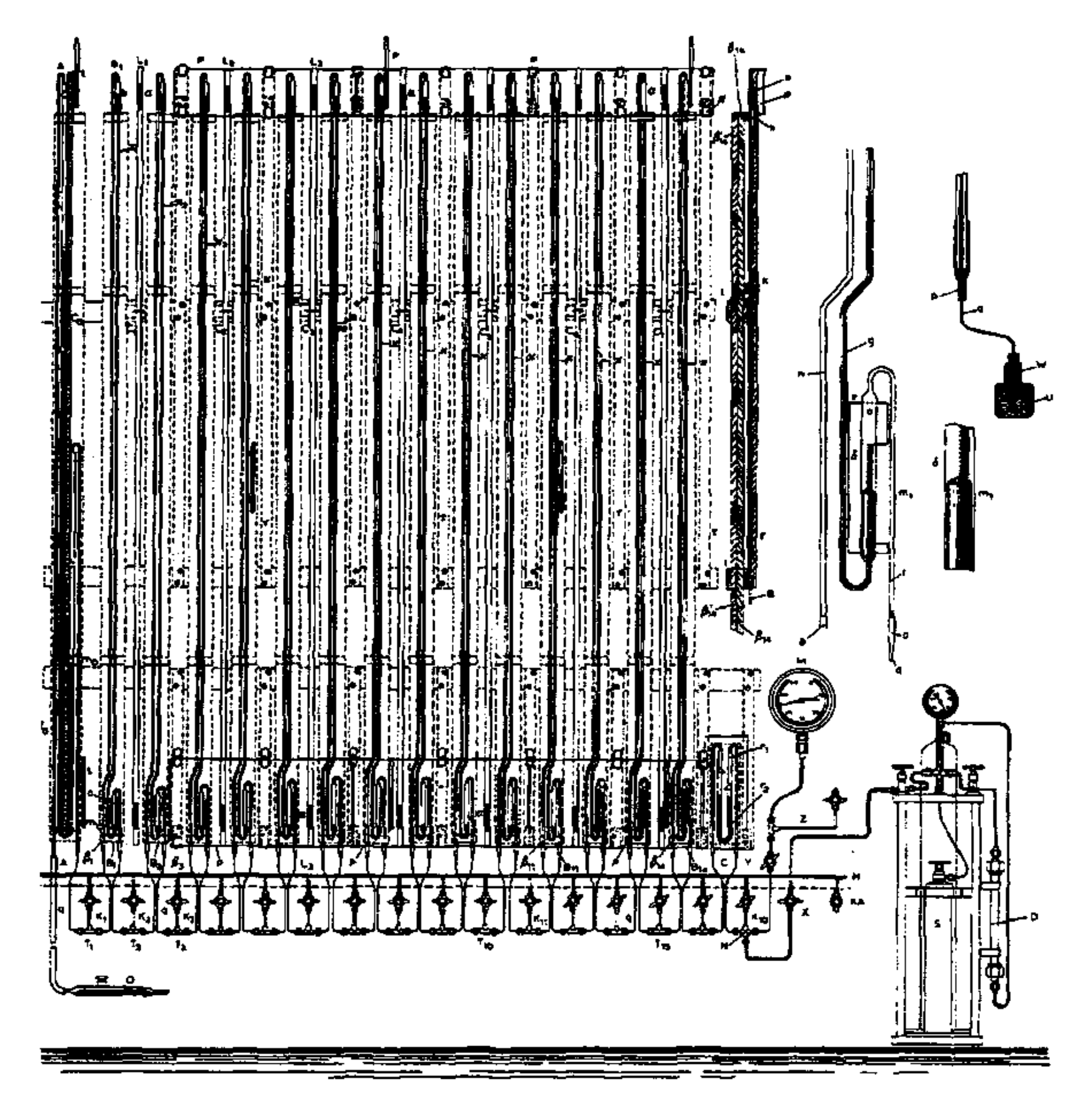


Рис. 6

давлениях, водород при этом ведет себя подобно одноатомному аргону, как это и обнаружил для удельной теплоемкости Эйкен.

Для сжижения гелия чрезвычайно важным было определение изотерм этого газа. Они могли обеспечить информацию относительно того, подчиняется ли гелий, подобно всем другим веществам, закону соответственных состояний, и если подчиняется, то каковы его критические параметры. Имея эту информацию, мы могли бы решить, можно ли по-

лучить этот газ в жидком состоянии с помощью процесса Линде, начиная с точки замерзания водорода — самой низкой температуры, до которой этот газ можно охладить. Если бы такая возможность существовала, то мы могли бы вновь применить принцип подобия к циклу гелия, точно также как по образцу модели Хэмпсона для сжижителя воздуха был создан сжижитель водорода. Все понимали, что нужно выяснить, лежит ли температура, при которой начальное сжатие гелия подчиняется закону Бойля — точка Бойля — выше точки плавления водорода. В этом случае можно надеяться на статическое сжижение, если создать и запустить в действие замкнутый цикл гелия в соответствии с моделью водородного цикла. Определение изотермы дало положительный ответ на стоявший вопрос. Более того, давление сжатия, время проведения эксперимента, охлаждение, которое должен был обеспечить цикл водорода, а также необходимое количество гелия, оценивались как вполне достижимые величины. Что касается гелия, то мой брат, мистер О. Камерлинг-Оннес, директор Департамента внешней торговли в Амстердаме, смог помочь мне получить необходимый монацит. Мне очень приятно, что сегодня я имею возможность поблагодарить и его.

Проведение эксперимента вышеописанным способом означало, что обычную промежуточную стадию при сжижении газа следовало обойти одним большим рывком, несмотря на то, что это граничило с невозможным. Однако это казалось единственным выходом, поскольку гелий, который тогда все еще оставался загадкой, уже столь сильно меня разочаровал.

На рис. 7 приведена диаграмма оборудования для эксперимента. Сжатый гелий после соответствующего предварительного охлаждения поступает в холодильник, где водород испаряется в воздушный насос, проходит через спираль восстановителя и расширяется в дроссельном клапане. Жидкость, образовавшаяся согласно процессу Линде, собирается в нижней части вакуумного стеклянного сосуда. Чтобы иметь возможность видеть жидкий гелий, эта часть делается прозрачной и помещается в наполненный жидким водородом вакуумный стеклянный сосуд, защищенный прозрачным вакуумным стеклянным сосудом, содержащим жидкий воздух, который, в свою очередь, помещен в сосуд, где циркулирует нагретый спирт.

Более подробно, но по-прежнему схематично цикл гелия показан на рис. 8. Здесь мы вновь видим аппарат для сжижения, компрессоры, колбы для хранения газа и плавающие в масле регулирующие колокола газгольдера. Сам сжижитель более подробно показан на рис. 9, где

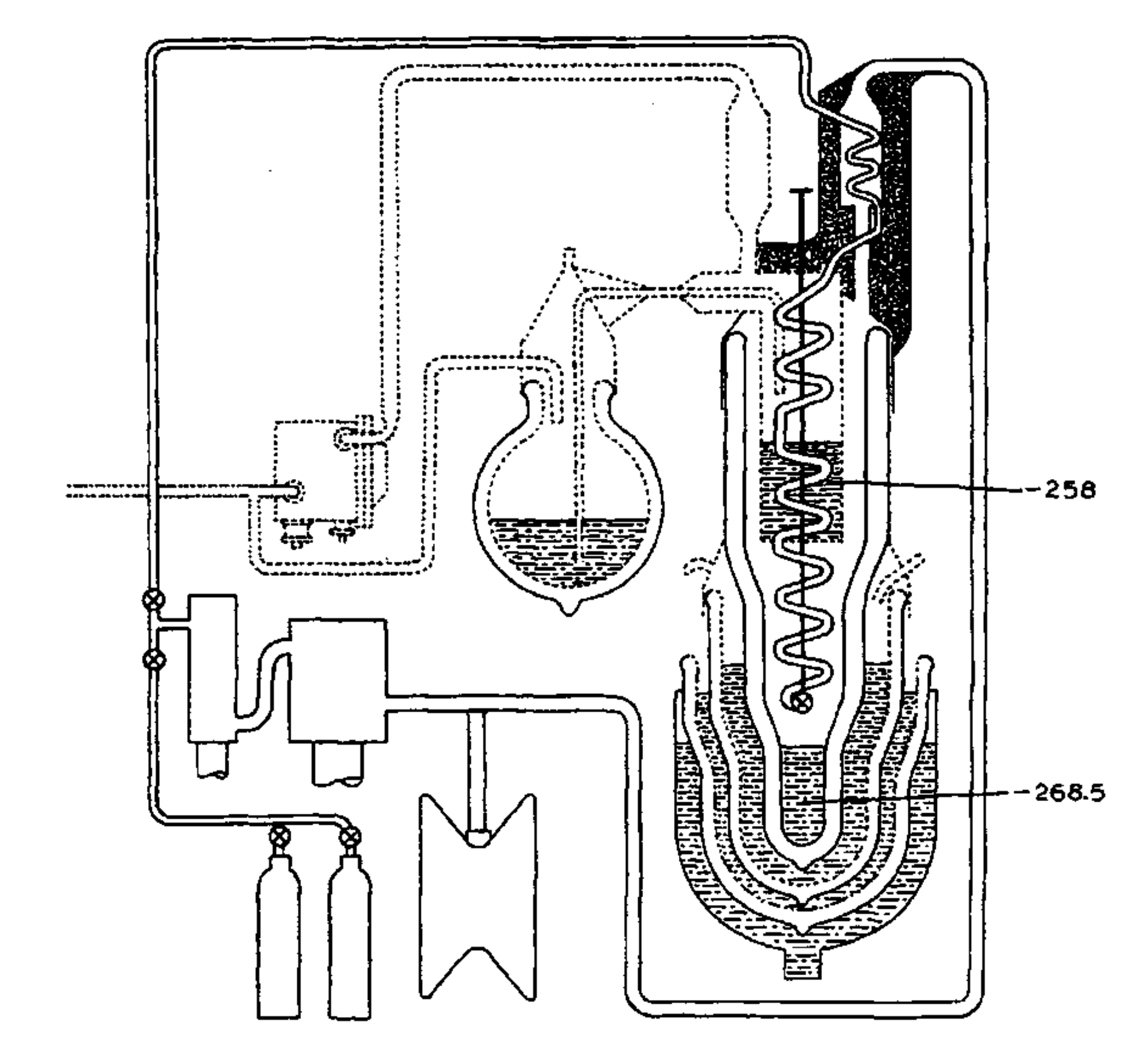


Рис. 7

опять ясно видна сжижающая спираль, построенная согласно модели Хэмпсона.

Жидкий водород поступает в холодильник из прозрачного промежуточного резервуара, куда он откачивается из сосудов, в которых хранится. Гелий до охлаждения в водородном холодильнике проходит через трубку, охлажденную в жидком воздухе и содержащую уголь, чтобы освободиться от остатков воздуха, которые могли загрязнить его в процессе циркуляции. Применением этого свойства угля мы обязаны Дьюару. Я уже говорил об огромной важности его работы, но здесь мне хотелось бы особенно подчеркнуть, что она очень помогла мне в сжижении гелия.

Температура гелия измеряется гелиевым газовым термометром, резервуар которого находится в камере сжижения и связан с частью манометра через стальную капиллярную трубку.

На рис. 10 показан весь аппарат. Ясно видна прозрачная камера сжижения с тройной защитой.

Как мы и предвидели при планировании экспериментов, их реализация граничила с невозможным. К тому времени, когда эксперимент, начавшийся в половине шестого утра, завершился в половине десятого вечера, а первый гелий мы увидели в половине седьмого, каждый сделал все, что от него можно было требовать. Особенно это касается моего верного сотрудника, механика Г. Дж. Флима, которому я также глубоко признателен за помощь в проведении других экспериментов и работе с другими аппаратам, о которых я уже упоминал.

Удивительное было зрелище, когда мы впервые увидели жидкость, которая всем казалась почти нереальной. Мы заметили ее, когда она начала втекать в сосуд. Но в ее присутствии невозможно было убедиться, пока она не наполнила весь сосуд. Ее поверхность резко очерчивалась на фоне сосуда, напоминая кромку ножа.

Как я был рад показать сконденсированный гелий своему выдающемуся другу Ван дер Ваальсу, чья теория привела меня к завершению моей работы по сжижению газов.

Мы нашли, что температура кипения гелия равна 4,25° К, а критическая температура — 5° К. Низкое критическое давление, к которому мы пришли и которое находилось между двумя и тремя атмосферами, было замечательно маленьким.

Теперь, когда мы получили такое объяснение свойств гелия, обозначилась следующая цель.

Используя свои знания, мы должны были провести некоторые измерения и на основе полученной информации выбрать какие-то устройства, которые облегчили бы получение жидкого гелия и возможность его использования в криостате. Это проблему я также решал поэтапно. Я обозначу эти этапы, рассказывая о некоторых исследованиях, которые уже были проведены с жидким гелием. В термодинамической части этих исследований мне помогал мистер Дорсман, а в их электрической части — мистер Хольст. Я в высшей степени им за это признателен.

Прежде всего, с довольно сложными условиями мы столкнулись в камере сжижения. В экспериментах, показанных на рис. 11, уже был достигнут ощутимый прогресс в различных направлениях.

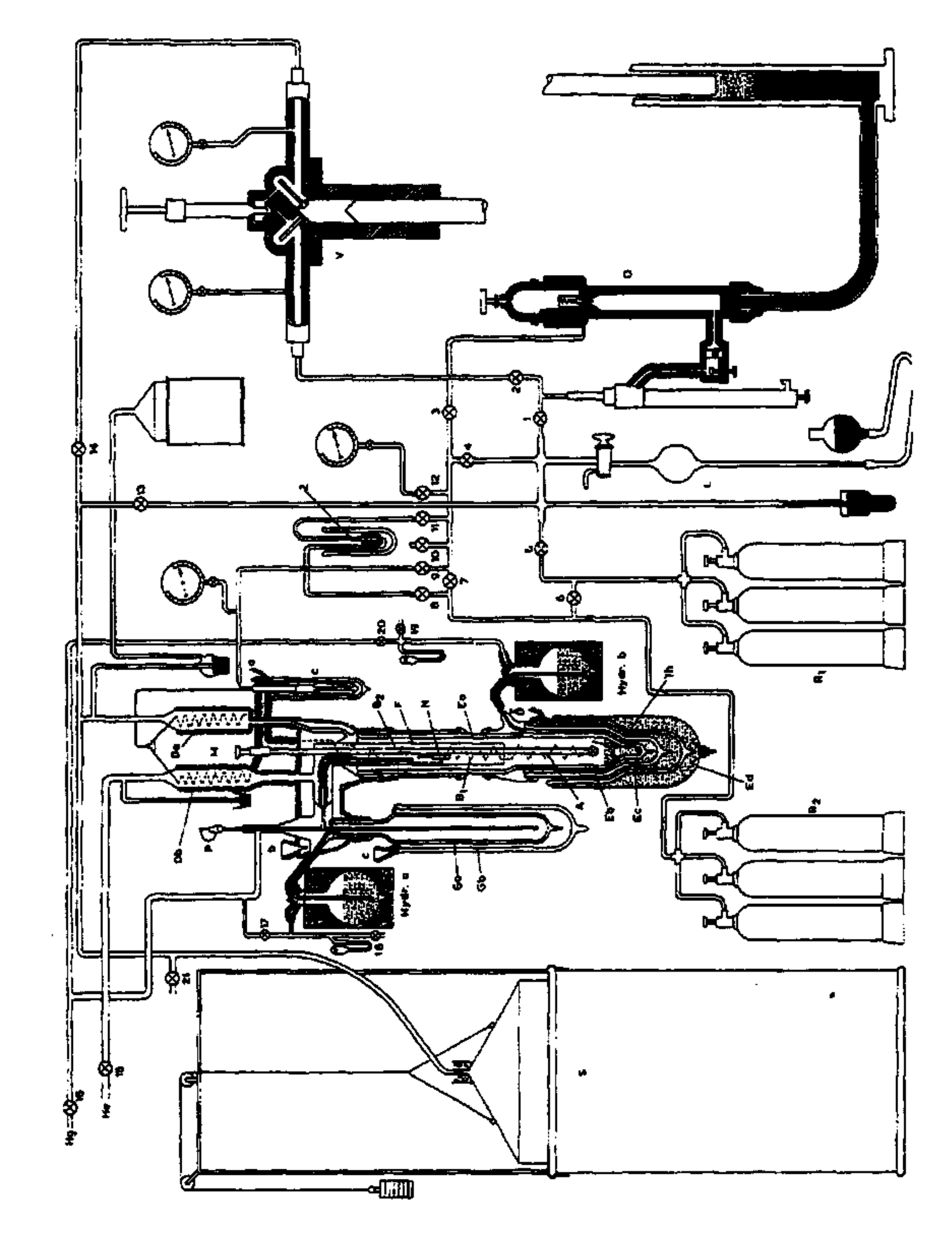


Рис. 8

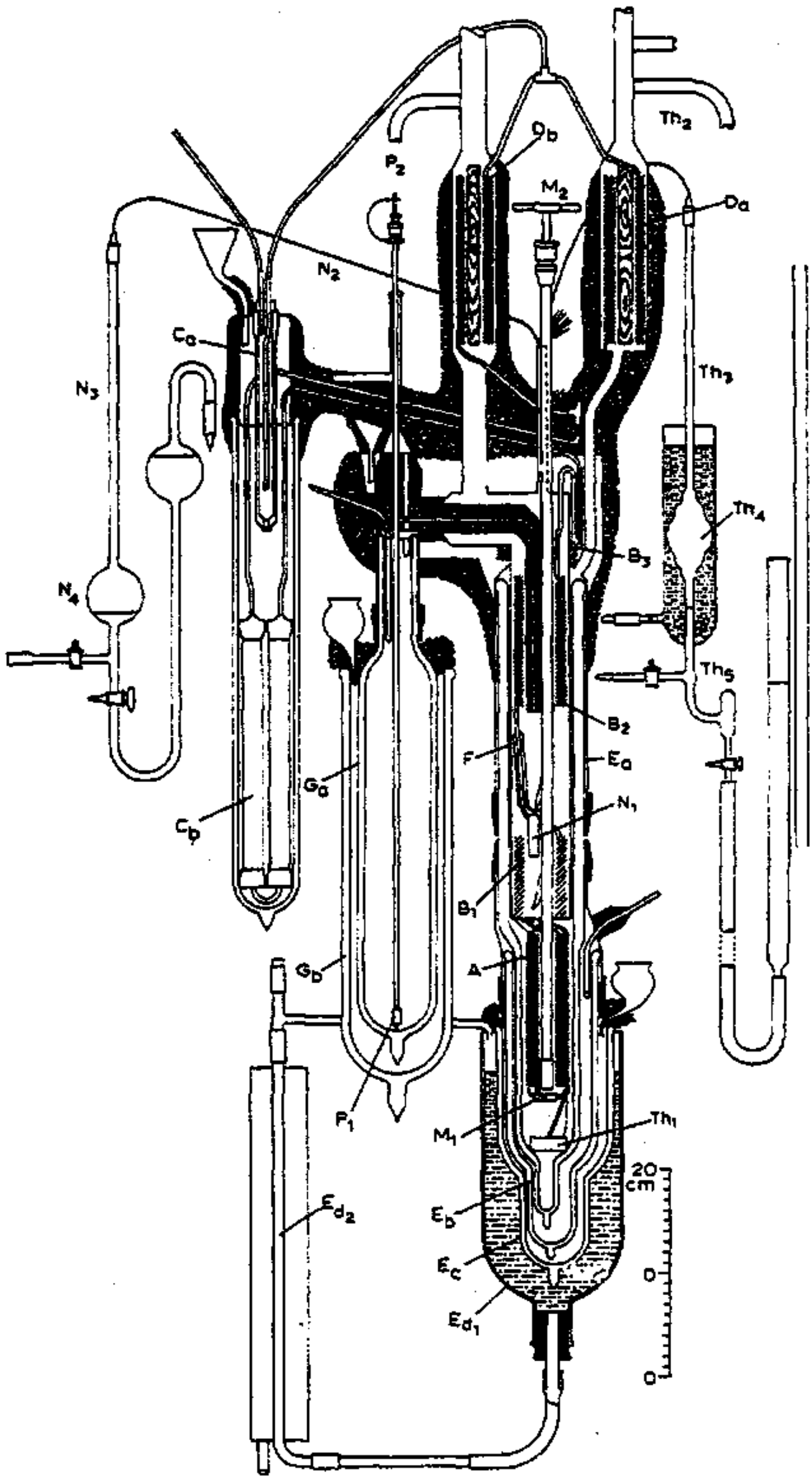

Th2
Db
P2
M2
Da
N2
Ca
N3
Th3
Th4
B3
N4
Th5
B2
F
Ea
Ga
N1
Cb
B1
Gb
A
P1
M1
Th1
20 cm
0
0
Ed2
Eb
Ec
Ed1

Рис. 9

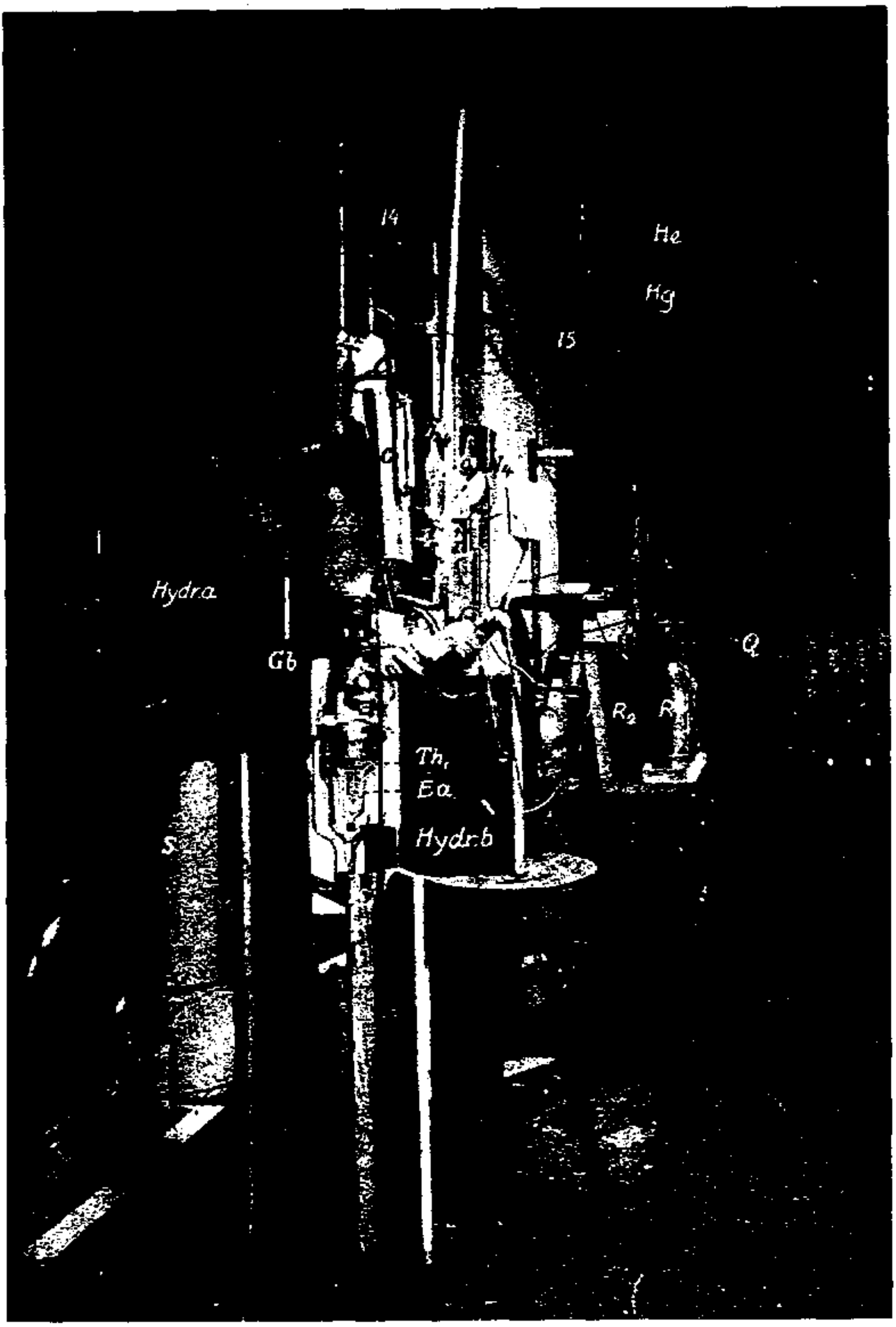


Рис. 10

Экспериментальная камера для этих опытов также блокируется сверху сжижающей спиралью, вследствие чего опыты усложняются (поскольку в экспериментальную камеру можно проникнуть только с помощью стальных капиллярных трубок или изолированных проволок, проведенных за сжижающей спиралью), но при этом в жидкий гелий уже помещается целый набор инструментов. Здесь мы можем увидеть гелиевый термометр, давление которого (при 0° С равное 145 мм) равно всего 3 мм в точке кипения гелия, так что с его помощью можно измерить температуры примерно до 1,5° К. В данном случае точность измерения соответствовала малости давления.

Параллельное измерение давления в камере, в которую испаряется жидкий гелий, помогло получить закон давления пара. Чтобы измерить изменение плотности жидкого гелия с температурой, в гелиевой ванне также присутствовал дифференциальный дилатометр (в который объемно измеренные количества гелия поступали через две одинаковые стальные капиллярные трубки).

Несложно заметить, что эксперименты указывают на то, что плотность гелия, которая сначала резко падает с температурой, примерно при 2,2° К достигает максимума, а при дальнейшем снижении температуры снова падает. Подобный экстремум может быть связан с теорией квантов. Как бы то ни было, более тщательное исследование уравнения состояния гелия и отклонений от закона соответственных состояний обещает дать весьма многое, так как критическая температура именно этого газа подходит к абсолютному нулю так близко.

Естественно возник вопрос, можно ли добиться получения твердого гелия. Эксперимент, направленный на достаточное снижение температуры гелия при испарении его без подачи тепла, потерпел неудачу и послужил исключительно для получения самых низких температур, которые были зафиксированы до того времени. Гелий (см. рис. 12), испаряющийся в вакуумный стеклянный сосуд, был защищен от поступления тепла, а сам сосуд был опущен в ванну с жидким гелием. Ванна получалась, как видно на рисунке, из жидкого гелия, вытекающего из сжижающего аппарата в криостат.

Испарение даже очень малого количества газа при малом давлении пара требует непрерывного отвода колоссальных объемов пара. С помощью вакуумных насосов очень большой емкости нам удалось понизить давление до 0,2 мм. При этом, согласно найденному закону давления пара, достигалась температура, равная 1,15° К. (Конечно же в данном случае мы можем говорить только об оценочных данных. Разработка термометрии для столь низких температур с помощью манометра Кнуд-

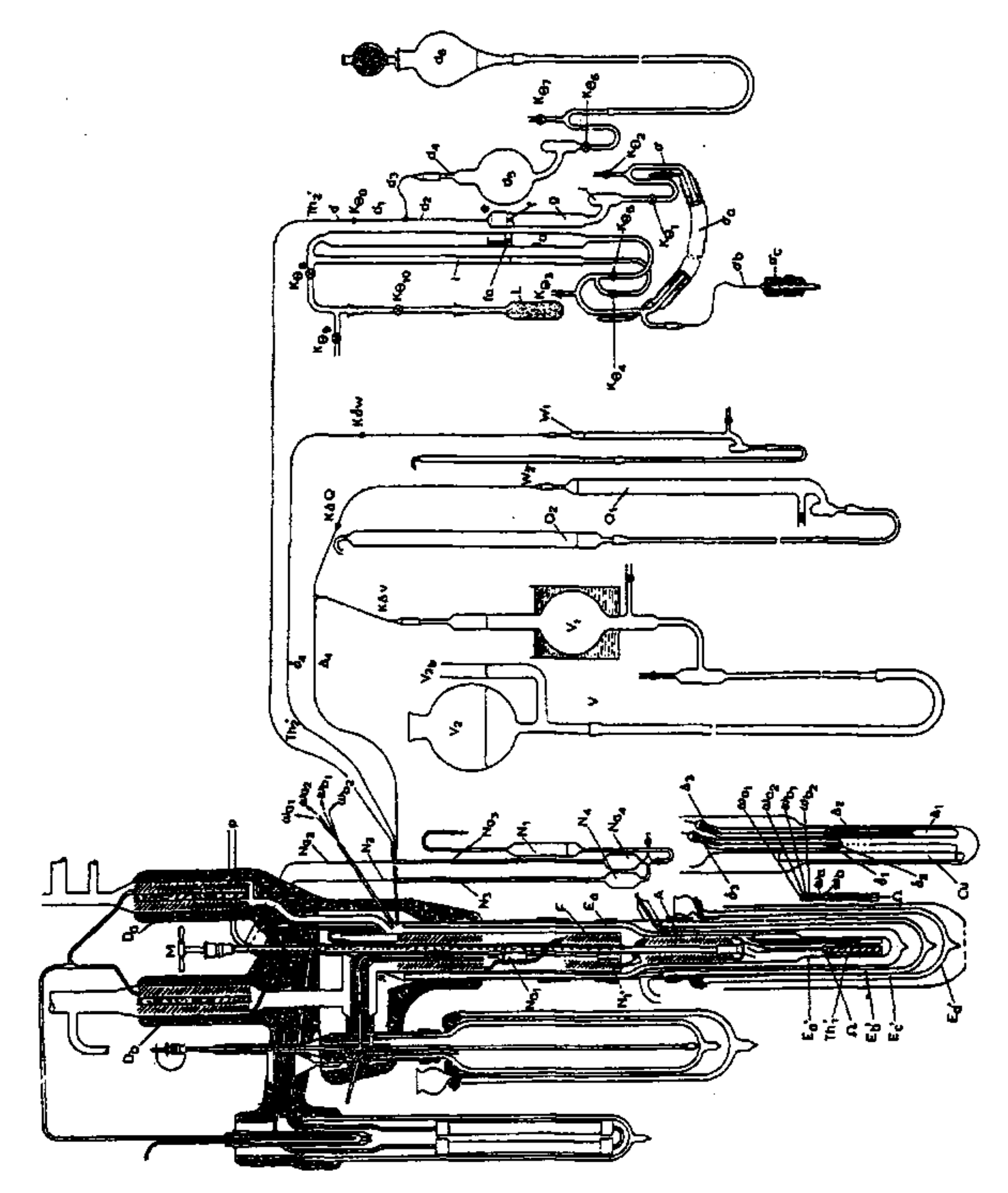


Рис. 11

сена, содержащего термоэлемент, по-прежнему находится на начальных стадиях.) Я отложил вопрос о том, можно ли заморозить гелий, так как,

чтобы на него ответить, потребовалось бы новое оборудование, и занялся другими, более неотложными задачами, которые можно было решить, используя доступное оборудование.

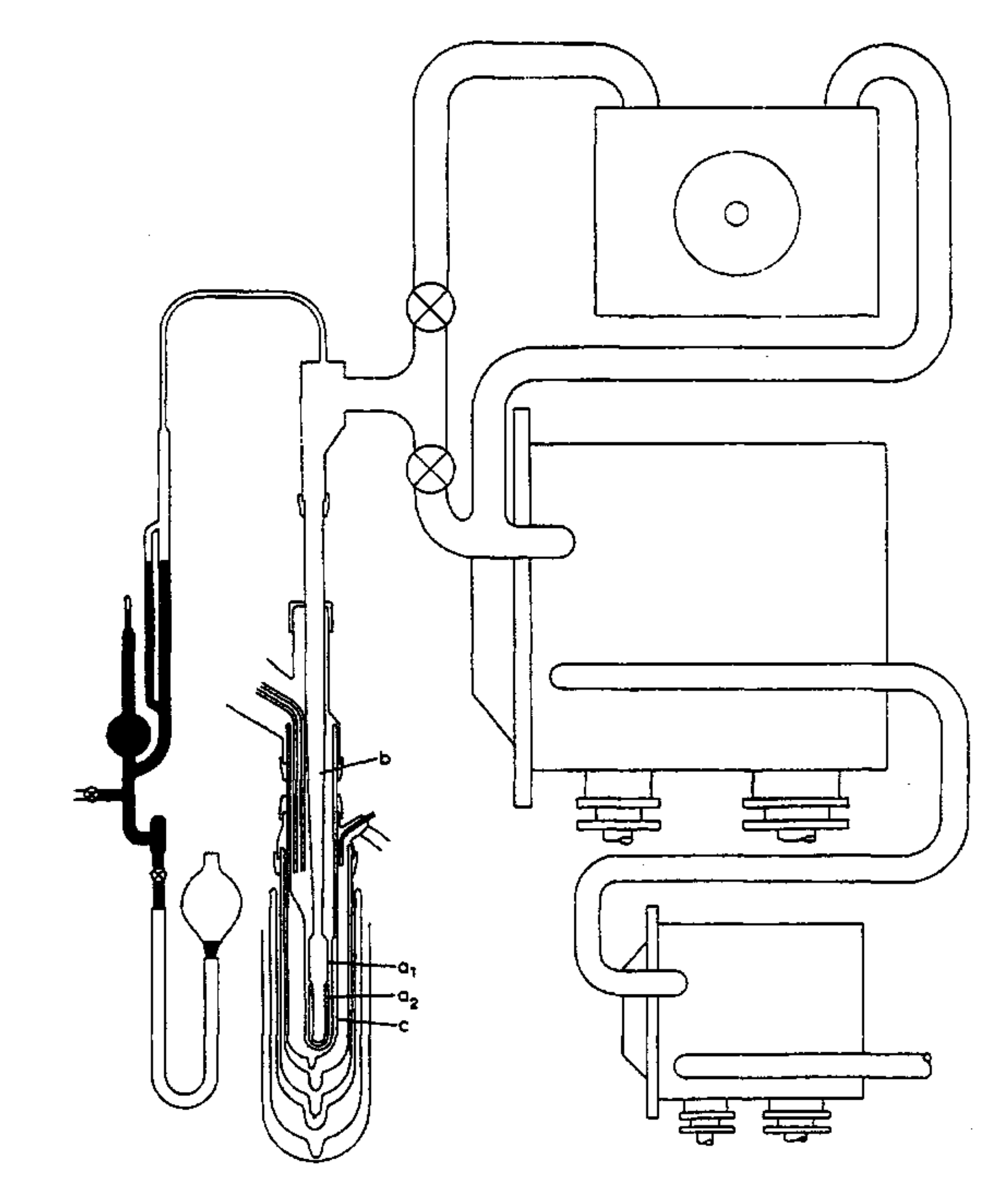


Рис. 12

Решение этих вопросов значительно упростилось, когда нам удалось добиться, чтобы заработал криостат, изображенный на рис. 13. Жидкий гелий перегоняется из сжижителя в сосуд криостата, который открыт сверху (через вакуумную трубку, охлаждаемую жидким воздухом). Сжижитель можно изолировать от криостата клапаном. Таким образом становится возможной непрерывная работа сжижителя. Содержимое ванны энергично размешивается насосом с электромагнитным приводом.

С помощью этого криостата можно проводить исследования чрезвычайно большой проводимости некоторых металлов при низких температурах, и именно об этом я хочу сейчас рассказать.

Даже самые первые эксперименты по сопротивлению металлов привели к очень удивительным результатам. При опытах с платиновой проволокой после достижения минимального сопротивления не происходило повторного его возрастания, которого следовало бы ожидать, если бы электроны, которые обеспечивают проводимость, накрепко примерзали к атомам при низких температурах; напротив, сопротивление переставало зависеть от температуры. Из результатов эксперимента, проведенного вместе с мистером Клеем, до точки замерзания водорода, мы заключили, что сопротивление абсолютно чистой платины полностью исчезает в точке кипения гелия. Следовательно, при самых низких температурах электроны проводимости не связаны, а факторы, которые препятствуют их движению, исчезают. Очевидно, что эти препятствующие движению электронов факторы следует искать в энергии осцилляторов Планка, так что в этом отношении теория сопротивления должным образом согласуется с теорией удельной теплоемкости.

То, что сопротивление стало постоянным и ненулевым, я объяснил присутствием мельчайших примесей, которые остаются даже в чистом золоте. Я мог только надеяться получить ртуть более чистую, чем золото, а только что сделанные наблюдения позволяют сделать вывод, что ее сопротивление в точке кипения гелия по-прежнему можно было бы наблюдать, но при самой низкой температуре, которой можно достичь, используя гелий, оно исчезает. Возможность подтверждения этого вывода привела меня к размышлениям о малом значении, которое имели все сложности, связанные с экспериментом. Нам удалось преодолеть все эти сложности, и, как видно из рис. 14, мы получили убедительные результаты. Сопротивление в долях сопротивления при нуле градусов по шкале Цельсия, отложено по оси ординат, а температура — по оси абсцисс. На рисунке, кроме результатов, полученных в гелии, которые отмечены *II*, также приведены результаты, отмеченные *I*, которые были получены в ходе исследований, проведенных мистером Клеем до точки плавле-

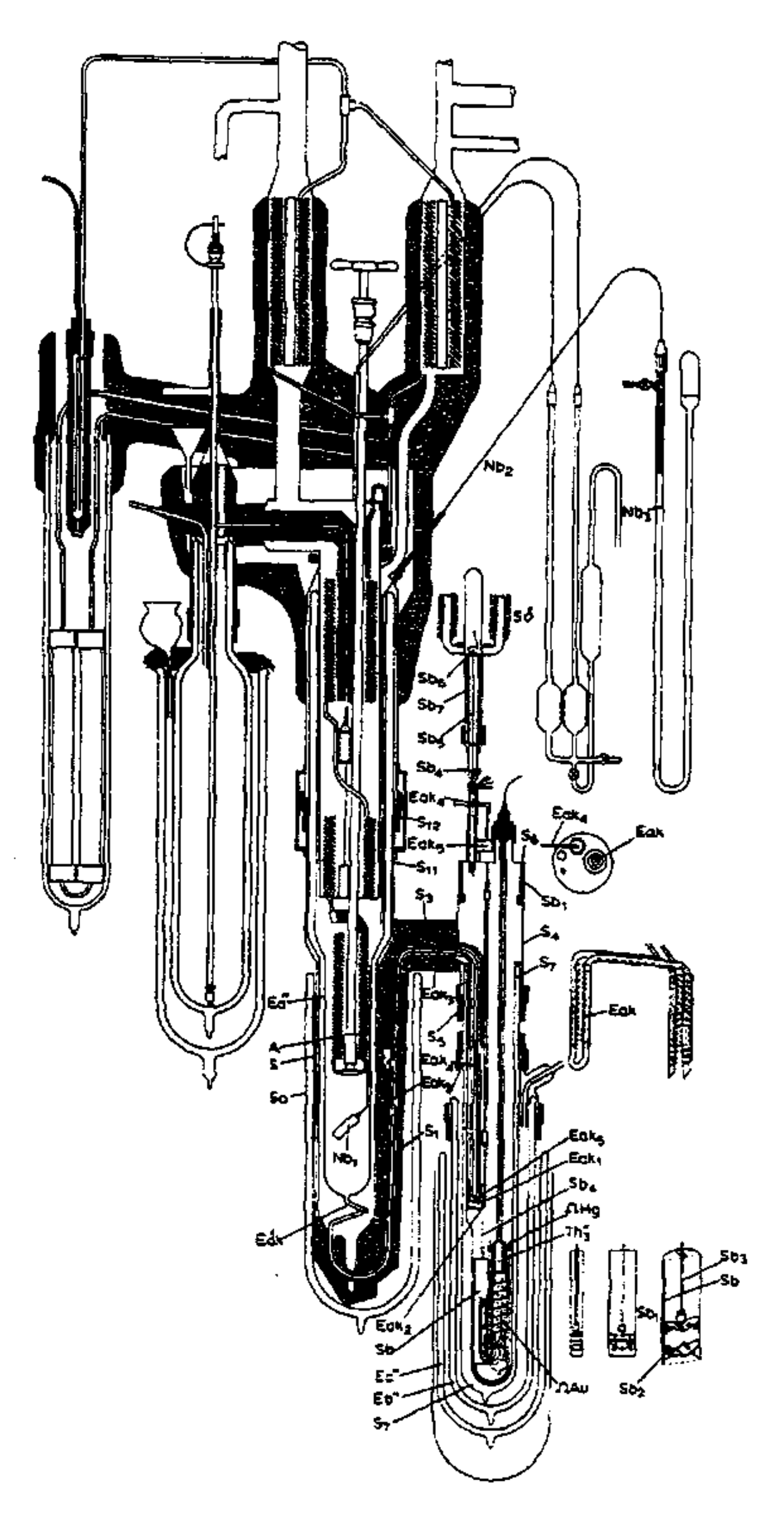

Nb2
Nb1
Sb
Sb6
Sb7
Sb5
Sb4
Eok4
S12
Eok5
S11
S9
Eok4
Eok
S8
Sb1
S4
S7
Eok
Eo''
A
S
So
Eok3
S5
Eok4
Eok7
S1
Nb1
Eok5
Eok1
Sb4
ΩHg
Th
Eok
Eok2
Sb
Eo''
Eb''
S7
ΩAu
Sb3
Sb
Sb1
Sb2

Рис. 13

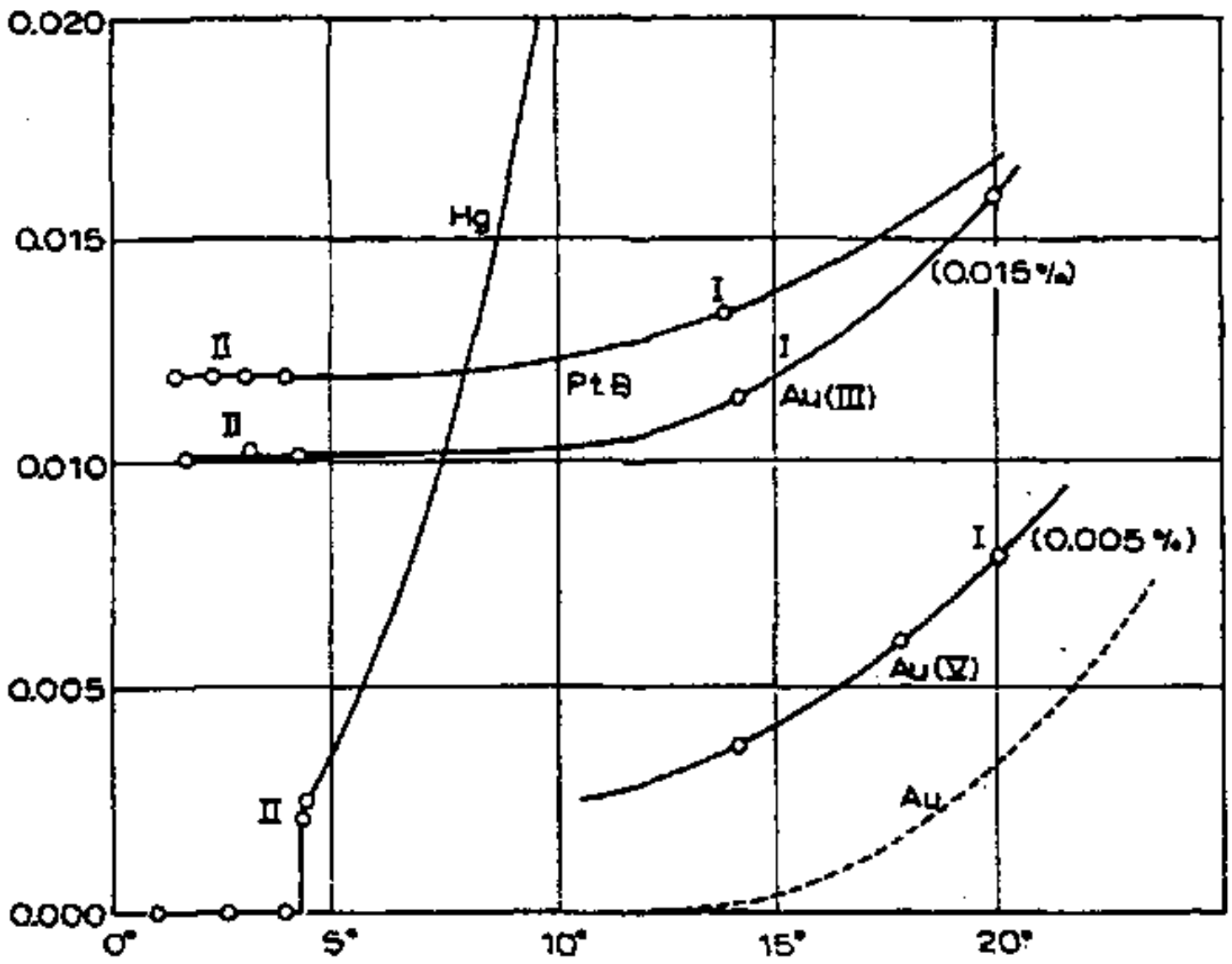


Рис. 14

ния водорода. Сопротивление ртути обозначено *Hg*. На рисунке также показаны результаты, полученные для платины и для золота, а также гипотетическая кривая для чистого золота (изображенная пунктирной линией).

Мне хотелось бы немного рассказать об оборудовании, которое использовалось в этом эксперименте.

На рис. 15 показана ртутная нить, сопротивление которой мы измеряли. Ртуть, для очищения которой были приложены всевозможные усилия, разливается в вакууме в несколько U-образных капиллярных трубок, имеющих диаметр около 1/20 мм, и во время эксперимента замораживается в них. На верхних концах U (рис. 16) находятся резервуары, которые помогают справиться с изменением объема ртути. Однако в процессе таяния или замерзания ртути сложно избежать взрыва трубок или разрыва нити. На концах сопротивлений имеются ртутные проволоки для проведения тока и измерения разности потенциалов. (Это самая простая теоретическая модель: система разветвленных проволок, сделанных из одного металла. В следующей модели, см. рис. 16, нижние части проволок напряжения заменены платиновыми проволоками.)

Как я уже сказал, эксперимент не оставлял сомнений, что сопро-

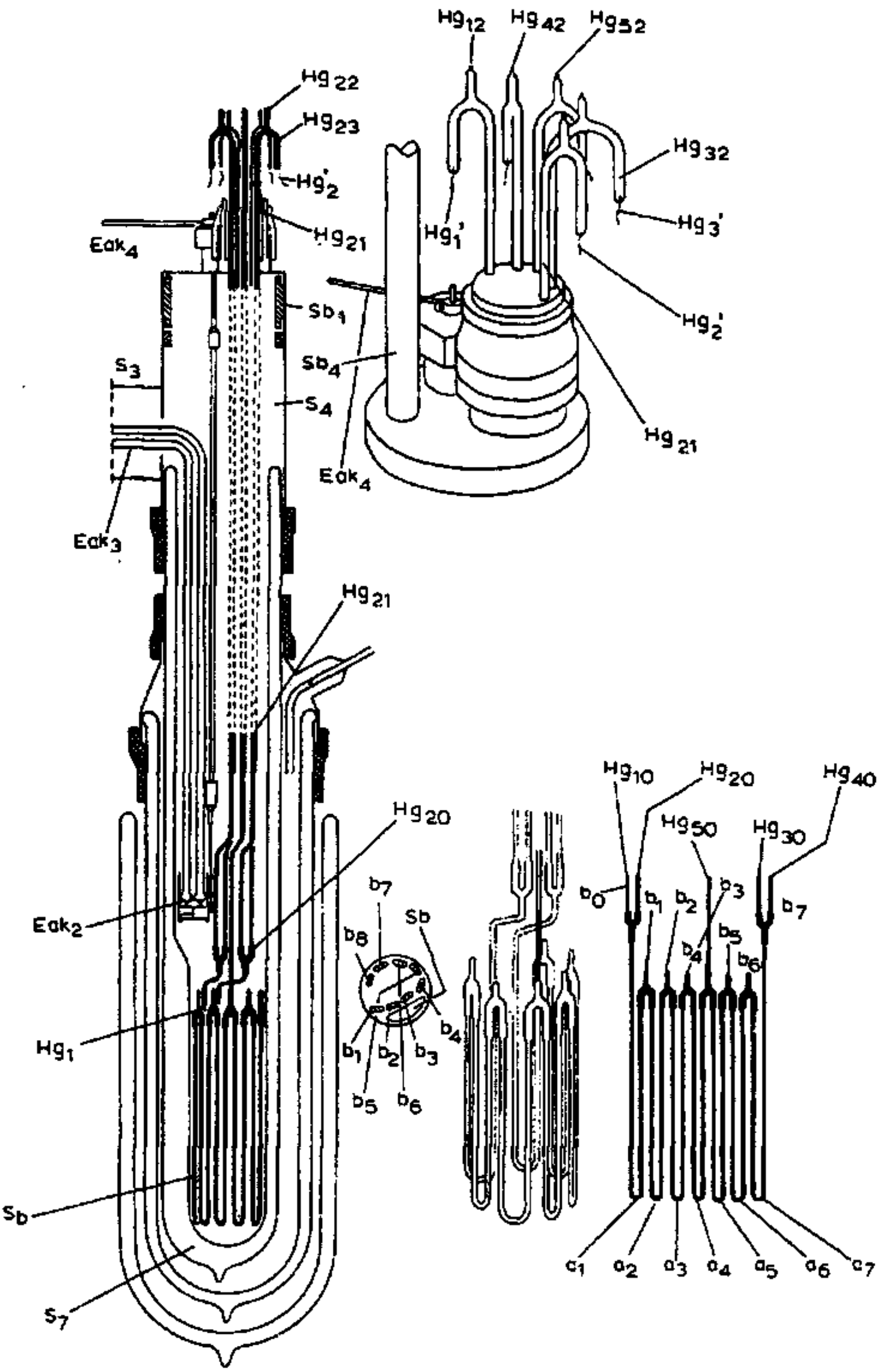

Hg12
Hg42
Hg52
Hg22
Hg23
Hg32
Hg'2
Hg21
Hg'1
Hg'3
Eak4
Sb1
Hg'2
S3
Sb4
S4
Hg21
Eak4
Eak3
Hg21
Hg10
Hg20
Hg40
Hg20
Hg50
Hg30
b7
b0
b1
b2
b3
b7
Eak2
Sb
b8
b5
b4
b6
Hg1
b4
b1
b2
b3
b5
b6
Sb
c1
a2
a3
a4
a5
a6
c7
S7

Рис. 15

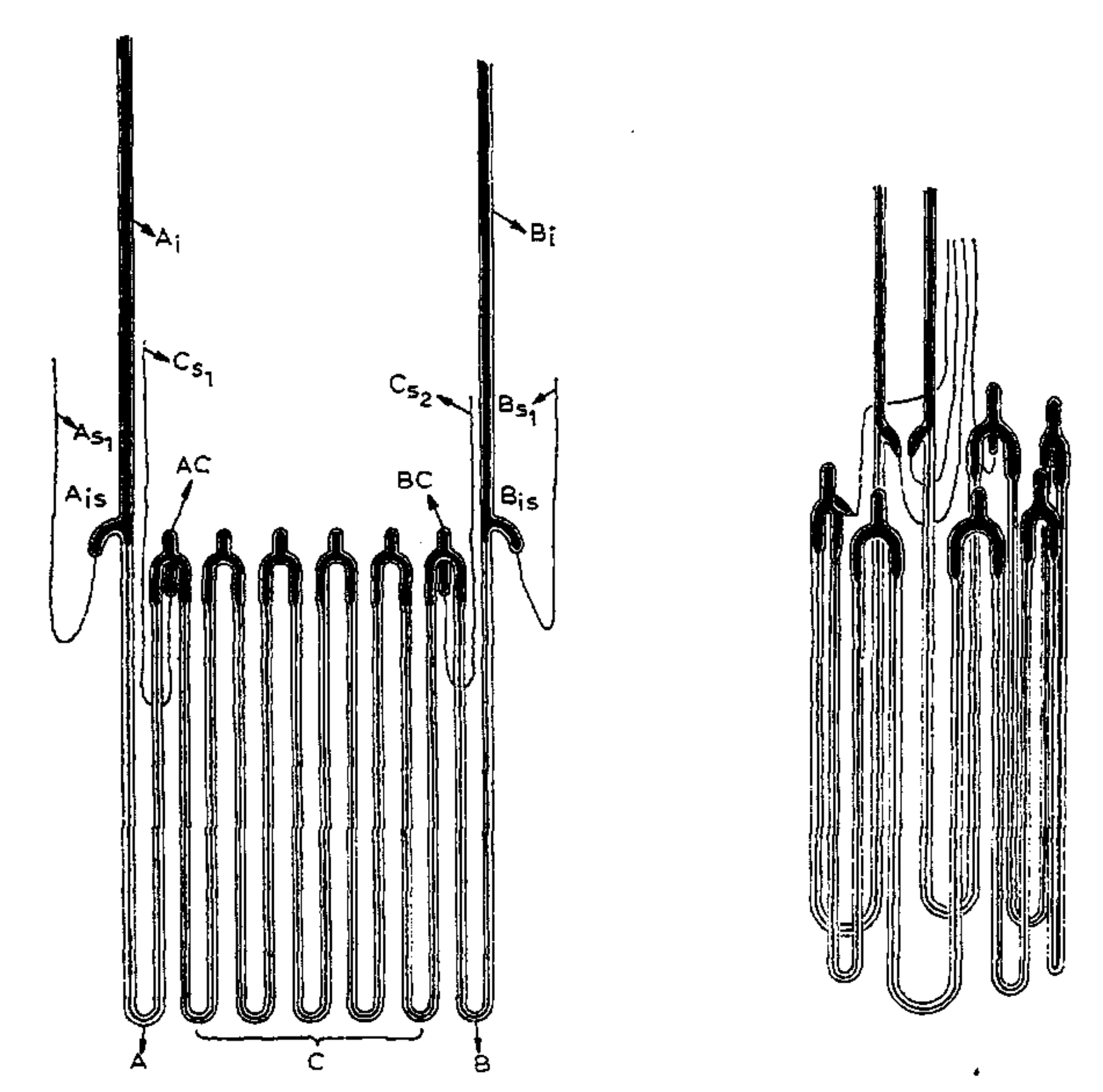


Рис. 16

тивление исчезает, по крайней мере настолько, насколько это могла показать точность эксперимента. Однако в то же время произошло нечто неожиданное. Исчезновение сопротивления происходило не постепенно, а *резко* (ср. рис. 17). От значения, равного 1/500, при температуре 4,2° К сопротивление падает до одной миллионной. Нам удалось установить, что при самой низкой температуре, равной 1,5° К, сопротивление стало менее одной тысячемиллионной доли сопротивления при нормальной температуре.

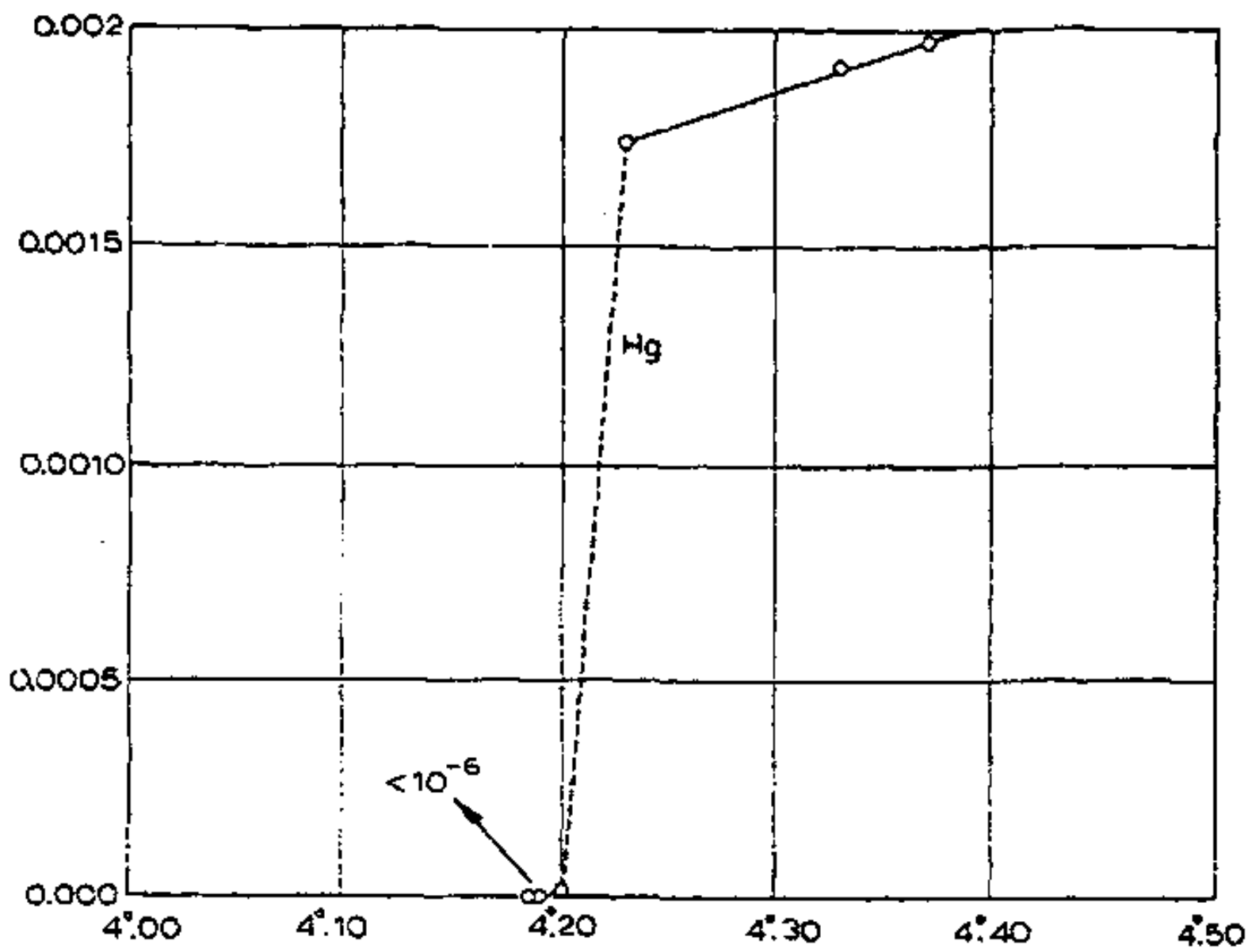


Рис. 17

Таким образом, ртуть при температуре в 4,2° К перешла в новое состояние, которое, благодаря его особым электрическим свойствам, можно назвать состоянием сверхпроводимости.

Для изучения свойств этого состояния очень важен тот факт, что олово и свинец тоже могут стать сверхпроводящими. Точкой перехода олова в состояние сверхпроводимости является температура 3,8° К, а свинца, вероятно, — 6° К. Теперь, когда мы можем использовать эти металлы, с которыми легко работать, мы можем проводить все виды электрических опытов с аппаратами, в которых отсутствует сопротивление. Рассмотрим один пример: замкнутое кольцо, охлажденное в магнитном поле, должно быть в состоянии в течение некоторого времени после выключения этого поля моделировать молекулярный ток Ампера. (См. Приложение 2.). Также существует вопрос о том, можно ли благодаря отсутствию джоулева тепла получить сильные магнитные поля, используя катушки, не содержащие железа[1], так как через очень тонкие, тесно

[1]Незадолго до этой лекции мне все еще казалось, что дальнейшие эксперименты привели бы к положительному ответу на этот вопрос. Так как если бы все было наоборот, то мы обнаружили бы новые явления. Мне кажется возможным, что потенциальные явления, которые будут обсуждаться далее, можно подавить, улучшая материал и конструкцию катушки. Тогда нужно было бы учитывать только то сопротивление, которое может

намотанные проволочные спирали можно пропускать ток очень большой плотности. Так, нам удалось провести ток силой в 0,8 А, т. е. 56 А на квадратный миллиметр, через катушку, которая состояла из тысячи витков сечением 1/70 квадратного миллиметра на квадратный сантиметр, под прямым углом к виткам.

Все, что я уже сказал о сверхпроводниках, применимо только к токам, меньшим некоторого порогового значения, лежащего тем выше, чем ниже температура. Вплоть до этого порогового значения силы тока на концах сопротивления (в пределах достигнутой на данный момент точности) разностей потенциалов обнаружено не было. Проволока имеет, как максимум, только остаточное сопротивление. Однако, как только превышается это пороговое значение, появляется необходимость в разности потенциалов для поддержания тока. Тогда необъяснимым пока образом в проволоке появляется нормальное сопротивление, и при большой скорости увеличения разности потенциалов на концах может возникнуть ощутимое повышение температуры. Так, погруженная в жидкий гелий очищенная свинцовая проволока, которая оставалась сверхпроводящей до плотности тока в 420 А на квадратный миллиметр, расплавилась при плотности тока, равной 940 А. В общем, создается ощущение, что при превышении порогового значения силы тока локальное нагревание проводника, по которому течет ток, происходит при температуре, превышающей температуру перехода, вследствие чего в этой точке возникает нормальное сопротивление. При увеличении интенсивности тока джоулево тепло, созданное в этой точке, переносит все сопротивление в область над точкой перехода.

появиться в идеальной проводящей проволоке благодаря характеристическому полю катушки. После выполнения описанного в тексте эксперимента с маленькой катушкой нам казалось, что и это сопротивление не появляется даже при создании сильных полей. Исходя из аналогии, следовало принять, что оно увеличивается равномерно с полем, и даже когда оно пропорционально квадрату поля, оно не имело бы очень большого значения в том числе и в полях с магнитной индукцией в 100 000 Гс, так как сопротивление, созданное в катушке ее собственным полем, все равно осталось бы незаметным. Однако точно определить это можно только с помощью экспериментов. Эксперименты, которые тогда были спланированы, мы провели уже после того, как я прочитал эту лекцию, и эти эксперименты показали удивительные результаты. В полях со значением магнитной индукции ниже порогового (для свинца в точке кипения гелия 600 Гс), которое не было достигнуто во время эксперимента с маленькой катушкой, упомянутого в тексте, магнитного сопротивления нет вообще. В полях с магнитной индукцией, превышающей это пороговое значение, сразу же возникает относительно большое сопротивление, причем оно заметно растет вместе с этим полем. Так, совершенно неожиданно мы столкнулись с трудностью создания сильных магнитных полей катушками, не содержащими железа. Однако открытие странного свойства, которое является причиной этого, окупило эти трудности.

Однако по-прежнему нет ответа на весьма серьезный вопрос: зарождается ли первый импульс в некачественных отрезках проволоки, или он также возникает в чистом, свободном от напряжения, металле с равномерной кристаллической структурой. Если потенциальные явления следует отнести к некачественным участкам проволоки, мы научимся исключать их, и тогда, вероятно, нам удастся поднять сверхпроводимость до величины, превышающей достигнутое в настоящее время значение, которое в тысячу миллионов раз больше проводимости при нормальной температуре. Однако потенциальные явления могут зависеть и от природы металла в том, что покоящиеся осцилляторы металла, который теперь является сверхпроводящим, не придут в движение, пока электронный ветер, который дует на них, не достигнет определенной силы. Такие явления не подчинялись бы закону Ома.

Но вместо того чтобы пускаться в возможное объяснение, основанное на теории квантов, мне бы хотелось рассмотреть один из экспериментальных вопросов, который возник в результате открытия сверхпроводников. Согласно обыкновенной электронной теории мы находим, что длины свободного пробега электронов, которые при нормальной температуре находятся в пределах размера молекул, в состоянии сверхпроводимости возрастают до метра. Так будут ли электрические лучи различных типов проходить через сверхпроводящую фольгу легче или с меньшим отклонением, чем через обычную проводящую фольгу? Это вопрос возник не только у меня, но и мистера Ленарда. Мы с мистером Беккером уже занимаемся соответствующими предварительными экспериментами.

Я уже сказал, что это лишь один из многих вопросов, которые поднимают сверхпроводники. На переднем плане постоянно возникает множество вопросов из различных областей физики, ответ на которые могут дать измерения при температурах жидкого гелия.

В будущем я вижу, как во всей Лейденской лаборатории измерения делаются в криостатах, в которые жидкий гелий транспортируется точно также, как это сейчас происходит с другими жидкими газами, и в которых этот газ будет таким же доступным, как вода.

А пока существует довольно большой объем работы, которую можно выполнить уже сейчас, хотя и не без сложностей (как это было, когда мы начали использовать жидкий кислород), в сжижающих аппаратах и которая может весьма способствовать поднятию занавеса, который тепловое движение при нормальной температуре простирает над внутренним миром атомов и электронов.

Добавлено для доказательства

1. В мае 1914 года для обоих случаев, упомянутых в тексте, справедливость закона Ланжевена в качественном отношении была установлена в сульфате гадолиния в ходе экспериментов при гелиевых температурах.

2. Во время экспериментов, проведенных в апреле-июне 1914 года с токами, сохраняющимися в сверхпроводниках в отсутствие электродвижущей силы, было достигнуто следующее. Ток, однажды созданный в сверхпроводящей катушке, оставался практически неизменным в течение нескольких часов. Нагревание катушки до температуры выше точки перехода немедленно разрушает электромагнитное поле контура. Эксперименты явно демонстрируют свободный от трения механизм, который предвидел Максвелл в эфире, окружающем контур, и поглощение его кинетической энергии сопротивлением, введенным в контур.

Биография

Хейке Камерлинг-Оннес родился 21 сентября 1853 года в Гронингене (Нидерланды). Его отец, Харм Камерлинг-Оннес, был владельцем кирпичного завода неподалеку от Гронингена. Его матерью была Анна Гердина Керс из Арнема, дочь архитектора.

Проведя должное время в «Hoogere Burgerschool» (средняя школа без преподавания классических языков) в своем родном городе, директором которой был будущий профессор химии Лейденского университета Ж. М. ван Беммелен, он получил дополнительное образование, изучив греческий и латинский языки. В 1870 году он поступил в Гронингенский университет, на следующий год получил степень «candidaats» (что приблизительно соответствует бакалавру естественных наук), а затем отправился в Гейдельберг, чтобы стать студентом Бунзена и Кирхгофа на период с октября 1871 по апрель 1873 г. Затем он вернулся в Гронинген, где в 1878 году сдал «doctoraal» экзамен (что приблизительно соответствует магистру естественных наук), а в 1879 году получил степень доктора, защитив замечательную диссертацию *Nieuwe bewijzen voor de aswenteling der aarde* (Новые доказательства вращения Земли).

Тем временем, в 1878 году он стал ассистентом в Делфтской Политехнической школе, работая под руководством Босхи, вместо которого он также читал лекции в 1881 и в 1882 году, когда его назначили профессором экспериментальной физики и метеорологии в Лейденском университете, вслед за П. Л. Рейке.

Талант Каммерлинга-Оннеса к решению научных задач проявился уже в 1871 году, когда в возрасте восемнадцати лет он получил золотую медаль на конкурсе, финансируемом факультетом естественных наук Утрехтского университета, а на следующий год — серебряную медаль на аналогичном конкурсе в Гронингенском университете. Работая с Кирхгофом, от также выиграл «Seminarpreis», что дало ему право занять одно из двух существующих мест ассистента Кирхгофа.

В своей докторской диссертации он привел как теоретическое, так и и экспериментальное доказательство того, что знаменитый эксперимент с маятником Фуко следует рассматривать как частный случай большой группы явлений, которые гораздо более простым способом можно использовать для доказательства вращения Земли. В 1881 году он опубликовал статью *Algemeene theorie der vloeistoffen* (Общая теория жидкостей), связанную с кинетической теорией жидкого состояния, где он подошел к закону соответственных состояний Ван дер Ваальса с механистической точки зрения. Эту работу можно считать началом исследования свойств материи при низких температурах, которым он занимался всю жизнь. В своем вступительном обращении *De beteekenis van het quantitatief onderzoek in de natuurkunde* (Важность количественного исследования в физике) он высказал свой знаменитый девиз «Door meten tot weten» (Знание через измерение), оценив тем самым важность измерений, которые занимали его на протяжении всей научной карьеры.

Получив назначение на кафедру физики в Лейден, Камерлинг-Оннес реорганизовал Физическую лабораторию (которая теперь носит его имя) так, чтобы она подошла к его собственной программе. Его исследования основывались, главным образом, на теориях двух его великих соотечественников, Й. Д. Ван дер Ваальса и Х. А. Лоренца. В частности, он задумал создать криогенную лабораторию, которая дала бы ему возможность проверить закон соответственных состояний Ван дер Ваальса в широком диапазоне температур. Его попытки создать чрезвычайно низкие температуры закончились сжижением гелия, которого он добился в 1908 году. Доведя температуру гелия до 0,9 К, он на тот момент максимально близко подошел к абсолютному нулю, тем самым подтверждая поговорку, что самое холодное место на Земле находится в Лейдене. Именно за это изучение низких температур Камерлинг-Оннес получил Нобелевскую премию. Впоследствии его ученики, В. Х. Кеезом и В. И. де Гааз (зять Лоренца), проводили в этой лаборатории эксперименты, благодаря которым они еще больше приблизились к абсолютному нулю.

Другие исследования в этой лаборатории, которая постепенно приобрела важность и международную славу, были связаны с термодинамикой, законом радиоактивности, наблюдениями оптических, магнитных и электрических явлений, например, изучением флуоресценции и фосфоресценции, магнитного вращения плоскости поляризации света, спектров поглощения кристаллов в магнитном поле, а также эффекта Холла, диэлектрических постоянных и, особенно, сопротивления металлов. Важным стало открытие (в 1911 г.) *сверхпроводимости* чистых металлов типа ртути, олова и свинца при очень низких температурах, за которым последовали наблюдения *незатухающих токов*.

Результаты исследований Камерлинга-Оннеса были опубликованы в *Proceedings of the Royal Academy of Sciences of Amsterdam* (Труды Королевской академии наук Амстердама), а также в *Communications from the Physical Laboratory at Leyden* (Сообщения из физической лаборатории Лейденского университета). Чтобы поработать в лаборатории Камерлинга-Оннеса, туда на короткие или длинные периоды времени приезжали многие иностранные ученые, причем не только те, кого он упомянул на стр. 265–267, но и некоторые другие.

Еще большую известность в мире лаборатория приобрела, когда в 1901 году Камерлинг-Оннес основал при ней школу прибористов и стеклодувов.

Уже в 30 лет Камерлинг-Оннес был избран членом Королевской академии наук Амстердама. Он был одним из основателей Международной ассоциации (теперь Института) холода (Association International du Froid). Он был Командором Ордена Нидерландского Льва, Нидерландского Ордена Оранж-Нассо, Норвежского Ордена св. Олафа и Ордена Полонии Воссоединенной Польши. Он был почетным доктором Берлинского университета. Его наградили медалью Маттеучи, медалью Румфорда и медалью Франклина. Ему также была присуждена премия Баумгартена. Камерлинг-Оннес был членом Московского Общества друзей науки, а также членом Академий наук Копенгагена, Упсалы, Турина, Вены, Геттингена и Галле; иностранным членом-корреспондентом Парижской академии наук, иностранным членом Римской Академии деи Линчеи и Лондонского королевского общества. Он был почетным членом Физического общества Стокгольма, Швейцарского Общества естественных наук, Лондонского королевского института, Испанского общества физики и химии в Мадриде и Института Франклина в Филадельфии.

Помимо научной работы Камерлинг-Оннес любил проводить время в семье, а также помогать тем, кто в этом нуждается. Несмотря на то, что работа была его любимым занятием, образ напыщенного учено-

го был для него далек. Человек, обладающий огромным личным обаянием, филантроп по натуре, во время и после Первой мировой войны он вел весьма активную деятельность по урегулированию политических разногласий между учеными и помогал голодающим детям в странах, страдавших от нехватки продуктов. В 1887 году он женился на Марии-Адриане-Вильгельмине-Элизабет Бийлевельд, которая очень помогала ему во всей этой работе и сумела создать дом, прославившийся своим гостеприимством. У них был один сын, Альберт, который стал высокопоставленным государственным служащим в Гааге.

Камерлинг-Оннес никогда не отличался особо крепким здоровьем, поэтому после недолгой болезни он умер 21 февраля 1926 года в Лейдене.

Макс фон Лауэ

«за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах»

Макс фон Лауэ

Об открытии интерференции рентгеновских лучей

Нобелевская лекция, 12 ноября 1915 г.

Так как все остальные лауреаты Нобелевской премии в этот момент выражают свою благодарность за оказанную им высокую честь тем, что подробно излагают историю своего открытия, они могут рассказать, как в самом начале они представляли великую, но, тем не менее, достижимую цель, и как они стремились достичь ее различными путями, многие из которых вначале оказались ложными, и как потом после долгих лет непрерывных попыток они, наконец, достигли своей цели. На мой взгляд, честь, которая им оказана, увеличивается прямо пропорционально величине трудностей, которые им, в конечном счете, удалось преодолеть. Но то, о чем могу рассказать здесь я, несколько отличается от приведенных мной примеров. Я, конечно, тоже знал о проблеме получения интерференции рентгеновских лучей задолго до того, как, в конце концов, мне удалось преодолеть все присущие ей сложности. Но я никогда не думал, что именно мне удастся сделать некоторый вклад в этот предмет, и именно поэтому я не слишком увлекался этой темой, пока совершенно неожиданно не придумал способ, который оказался

кратчайшим путем к успеху. Поэтому я не смогу рассказать очень подробно о своей личной подготовительной работе и ограничусь рассказом о сочетании научных и личных обстоятельств, породивших эту идею.

В случае с рентгеновским лучами сам Рентген уже пытался обнаружить явления их дифракции или интерференции, чтобы ответить на вопрос, представляют ли они собой волновое явление или являются испусканием каких-то маленьких частиц. Однако здесь его исследования, которые во всех остальных отношениях были столь успешны, потерпели неудачу. Тем не менее, с самого начала первое мнение имело своих сторонников, так как Стоксу и Вихерту удалось абсолютно точно показать, что согласно электродинамике Максвелла – Лоренца электромагнитные волны должны создаваться всякий раз, когда изменяется скорость носителей электричества. Кроме того, все знали, что катодные лучи, которые создаются рентгеновскими лучами при столкновении с препятствием, состоят из электронов. В. Вин попытался примирить это соображение с тем, что в то время было очень молодой теорией квантов, чтобы таким образом оценить соответствующие длины волн. Он получил значение, лежащее между 10^{-10} и 10^{-9} см, которое соответствовало тому, что если бы эти лучи состояли из волн, то длина их волны была бы короче длины волны видимого света. Дело в том, что в 1900 году все электромагнитные излучения бо́льших длин волн уже были известны, по крайней мере, настолько, что в них невозможно было усмотреть более поразительные характеристики рентгеновских лучей, такие, как, например, их сильная проникающая способность.

Если явления дифракции или интерференции все же следовало искать, то, согласно основным принципам волновой теории необходимо было выбрать экспериментальное устройство гораздо меньших размеров, нежели те, что использовались при соответствующих опытах с видимым светом. Так, Хага и Винд, а также Вальтер и Поль выбрали клиновидную заостренную щель, на остром конце которой они смогли продемонстрировать расширение прошедших пучков рентгеновских лучей, которое можно было объяснить дифракцией. Определяющее значение этих опытов нередко становилось предметом жарких споров; к примеру, существовала одна школа мыслителей, которая пыталась объяснить расширение как субъективную оптическую иллюзию. Однако фотометрические измерения, проведенные П. П. Кохом по лучшим фотограммам этого типа, а также предполагаемая длина волны, равная 4×10^{-9} см, которую Зоммерфельд связал с этими результатами, судя по всему, доказывали существование объективной основы для теории расширения.

Так что сейчас, когда подтвердились соответствующие длины волны, мы должны рассматривать это значение как представляющее очень хорошее определение для таких проверок.

Дальнейшее свидетельство в поддержку волновой теории рентгеновских лучей обеспечило открытие Барклой поляризации. Баркла направляет лучи, например, те, которые создаются на антикатоде рентгеновской трубки, на некоторое вещество, например, углерод, после чего переходит к работе со вторичными рентгеновскими лучами, которые возникают при рассеянии из рассматриваемого вещества перпендикулярно направлению первичного излучения. Если на такое вещество направить вторичное излучение, то в результате повторного рассеяния появится третичное рентгеновское излучение, максимум интенсивности которого будет расположен в одном направлении (в плоскости, перпендикулярной вторичному излучению), а перпендикулярно ему будет расположен минимум излучения, в котором оно может даже полностью исчезать. Это совершенно ясно указывает на то, что для вторичного излучения направление распространения не является осью симметрии и что, таким образом, излучение поляризовано. На основе корпускулярной теории этот факт можно объяснить только с большими сложностями — и нам это хорошо известно из истории оптики. Напротив, не составляет труда объяснить это явление с помощью волновой теории, основанной на том, что все электромагнитные волны совершают поперечные колебания, вследствие чего они являются, вообще говоря, поляризованными. Эта теория также легко объясняет тот факт, что направление уменьшения интенсивности параллельно направлению первичных лучей.

Несмотря на эти серьезные аргументы, волновая теория поначалу не была принята всеми. Дело в том, что некоторые специалисты, например, В. Г. Брэгг, до 1912 года придерживались корпускулярной теории, в поддержку которой они могли назвать ряд явлений, которые волновая теория, действительно, не могла объяснить. Если рентгеновские лучи падают на тело, они не только возбуждают вышеупомянутые вторичные рентгеновские лучи, но также высвобождают электроны. Скорости этих электронов уже не зависят от температуры и других характеристик рассматриваемого тела, следовательно, можно допустить, что они получают свою кинетическую энергию из падающих рентгеновских лучей. Именно здесь и возникала трудность, так как наблюдаемые скорости зависят не от интенсивности излучения, а от его жесткости, причем таким образом, что при увеличении жесткости скорости возрастают. Ослабление интенсивности излучения ведет к уменьшению количества высвобожденных электронов, но не оказывает никакого воздействия на их скорости.

Самая большая скорость, которая может быть, это всегда та скорость, которой обладало катодное излучение, возбудившее рентгеновские лучи; все происходит так, словно рентгеновское излучение сохраняет «память» о процессе своего создания и выражает этот факт, когда, в свою очередь, высвобождает электроны.

Это было бы несложно понять, если бы энергия рентгеновского излучения должна была аккумулироваться и оставаться в таком состоянии в определенных точках, как, например, это происходило бы в том случае, если бы двигались отдельные корпускулы. Но согласно волновой теории энергия распространяется постепенно по увеличивающимся областям. Это ставит перед нами совершенную загадку, которая становится только более сложной из-за дальнейшего наблюдения, согласно которому высвобожденные электроны, судя по всему, предпочитают двигаться в направлении падающих рентгеновских лучей. Нам станет немного лучше, если мы напомним себе, что при фотоэлектрическом эффекте то же самое происходит с видимыми лучами коротковолнового диапазона, а также с лучами ультрафиолетового света. В этом случае эти явления также непостижимы, несмотря на то, что здесь мы совершенно определенно имеем волновой процесс.

Единственное, на что мы способны, — это понять причины того, почему мы не можем это понять. Эйнштейн установил правило зависимости максимально возможной скорости электрона от частоты световых волн. В этом правиле решающую роль играет универсальная постоянная h, которую Планк, ее открывший, назвал элементарным квантом действия. Последние же измерения — в которых особой точности удалось достигнуть Эрнсту Вагнеру из Мюнхена, — показали, что в обратном процессе, а именно: возбуждении рентгеновских лучей катодными лучами, — появляется та же постоянная. Этот же закон Эйнштейна связывает и максимальную частоту рентгеновского спектра с кинетической энергией катодных лучей. Здесь мы сталкиваемся лишь с одним частным случаем великой квантовой загадки, разгадку которой можно справедливо назвать самой важной целью, которая в настоящее время стоит перед всей физикой. Однако вполне понятно, что до установления такого соотношения с теорией квантов исследователи основывали свои доводы против волновой теории на фактах эмиссии электронов.

Но давайте вновь вернемся к ситуации, которая сложилась перед 1912 годом, так как, насколько я могу вспомнить, учитывая свой интерес к физике, — а он возник еще в те дни, когда мне довелось получить первоклассное обучение в знаменитой старой Протестантской гимназии в Страсбурге (Эльзас) — мое внимание всегда особенно при-

влекала оптика и волновая теория света в ней. Лекции Фойгта, Планка, Люммера, которые я слушал в пору своего студенчества, на тот момент, особенно в вышеупомянутой области, дали мне подробные объяснения и теоретические знания. Так что поскольку мне удалось взрастить в себе то, что можно назвать почти особым ощущением или интуицией волновых процессов, моя первая независимая работа совершенно естественно оказалась связанной с распространением естественного излучения в диспергирующих средах и термодинамикой явлений интерференции. Оказалось, что мне очень повезло, что в свое время Зоммерфельд передал мне статью «Wellenoptik» (Волновая оптика), над которой мне нужно было поработать для «Энциклопедии математических наук» (Encyclopedia of Mathematical Sciences). Дело в том, что именно в ходе этого проекта я должен был искать математическое представление теории решеток, которую — хотя она и не была тем, что можно назвать новшеством, — можно было бы достаточно просто применить к решеточным структурам. Уже тогда я очень много времени посвящал размышлениям о дальнейшем переходе к пространственным решеткам; однако я не стал развивать этот вопрос дальше, так как эти решетки все-таки не играют существенной роли в области оптики.

По прибытии в Мюнхен в 1909 году я больше не отвлекался от проблемы реальной природы рентгеновских лучей, сначала под влиянием работы Рентгена, которой он занимался в этом университете, а затем из-за активного интереса Зоммерфельда к рентгеновскому излучению и гамма-лучам, который также выразился в нескольких работах. К этому добавилось еще одно важное обстоятельство. Со времен работы Гюи и Браве основной кристаллографический закон рациональных индексов минералоги объясняли просто и наглядно через пространственно-решеточную структуру атомов. Зонке, Федоров и Шенфлис довели математическую теорию возможных пространственных решеток до максимально возможной степени совершенства. Однако из этого направления размышлений больше не удалось сделать далеко идущих физических выводов, вследствие чего эта теория, в виде сомнительной гипотезы, оставалась для физиков до некоторой степени неизвестной. Однако в Мюнхене, где модели пространственных решеток Зонке можно было найти не в одном университете, в их защиту, устно и письменно, выступил П. Грот, от которого я многому научился. Мой интерес к излагаемым им теориям рос постепенно по мере того, как я уже тогда убеждался — в противовес сомнениям в реальности атомов, которые в то время разделяли лишь немногие ученые — в отсутствии неопровержимых эпистемологических аргументов, которые могли бы противоречить этому факту, тогда как

практический опыт постоянно преподносил свежие доказательства в его пользу.

Таким было состояние дел, когда, однажды вечером, в феврале 1912 года, ко мне в гости зашел П. Эвальд. По настоянию Зоммерфельда он работал над математическим исследованием поведения длинных электромагнитных волн в пространственной решетке, а впоследствии опубликовал диссертацию по теории оптики кристаллов, основанную именно на этой работе. Однако в то время он столкнулся с определенными сложностями, а потому пришел ко мне за советом. Тогда я не смог ему помочь. Но во время нашей беседы я был внезапно поражен очевидным вопросом о поведении волн, которые являются короткими по сравнению с постоянными пространственной решетки. И именно тогда моя интуиция в оптике внезапно подсказала мне ответ: должны получаться решеточные спектры. Тот факт, что постоянная решетки в кристаллах имеет порядок 10^{-8} см, был достаточно хорошо известен из аналогии с другими межатомными расстояниями в твердых и жидких веществах, и, кроме того, это было несложно доказать из плотности, молекулярной массы и массы атома водорода, которые именно тогда были найдены особенно точно. Порядок длин волн рентгеновских лучей Вин и Зоммерфельд оценили как 10^{-9} см. Таким образом отношение длин волн и постоянных решетки было бы чрезвычайно благоприятным при пропускании рентгеновских лучей сквозь кристалл. Я тут же сказал Эвальду, что предвижу явления интерференции рентгеновских лучей.

Вскоре об этом узнал В. Фридрих. Он немедленно выразил желание провести соответствующий опыт, тогда как признанные мэтры нашей науки, которым я имел возможность его предложить, высказывали определенные сомнения насчет этой точки зрения. Понадобилось приложить некоторые дипломатические усилия, прежде чем Фридриху и Книппингу, наконец, позволили проводить эксперимент по моему плану, используя сначала очень простое оборудование. В качестве кристалла был взят сульфат меди, поскольку можно было получить большие куски этого вещества правильной формы. Направление облучения было оставлено на волю случая. Непосредственно с самого начала фотопластинка, расположенная за кристаллом, показала присутствие значительного количества отклоненных лучей, а также след первичного луча, исходящего непосредственно от антикатода. Это были те самые решеточные спектры, которые я предвидел (рис. 1).

В продолжении работы Фридрих и Книппинг с помощью значительного количества оборудования, которое они тогда получили в свое распоряжение от Института теоретической физики Мюнхенского универси-

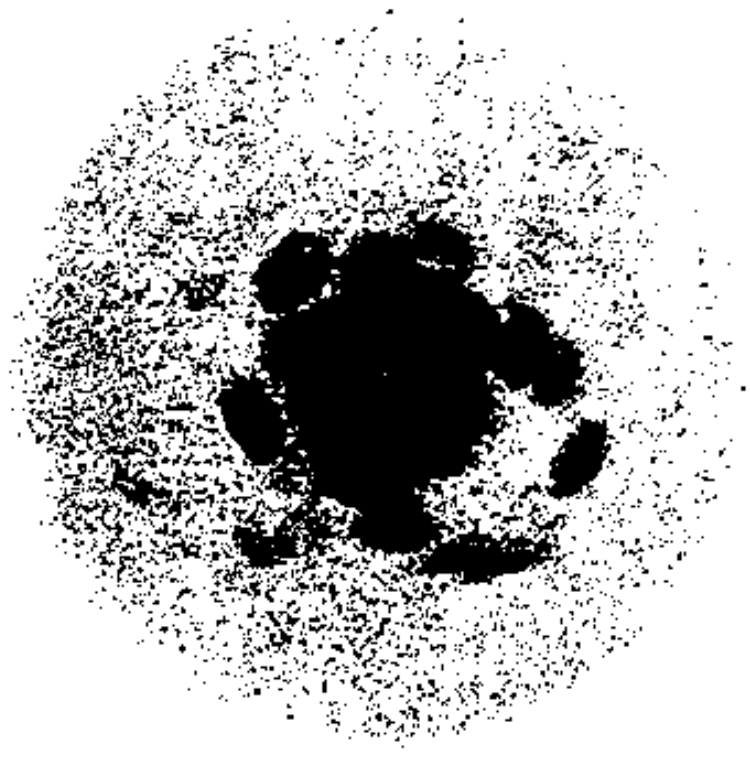


Рис. 1

тета, заменили случайное облучение триклинного сульфата меди облучением в направлениях кристаллографических осей кристаллов с максимально возможной симметрией, т. е. монокристаллов. В принципе, теория уже была завершена переходом от обычной и решеточной структур, и 8 июня 1912 года Зоммерфельд смог представить в Мюнхенскую академию наук совместную работу, написанную Фридрихом, Книппингом и мной по интерференции рентгеновских лучей, которая, помимо самой теории, также содержала ряд весьма характерных демонстраций (рис. 2 и 3). Через четыре недели эту теорию впервые применили для интерпретации интерференционных максимумов, созданных монокристаллом при облучении вдоль оси четвертого порядка (рис. 2). Каждому интерференционному максимуму соответствуют три целых числа, происходящих от трех пространственных периодов решетки, отношения которых определяют его положение. Во второй публикации я приписал эти числа интерференционным максимумам, которая появилась одновременно с первой. Они, или их отношения, подтвердили свою абсолютную надежность даже при их повторной проверке, которую осуществили Брэгги и другие исследователи. Таким образом, первая проверка правильности теории интерференции оказалась благоприятной для этого нового явления. Это оказалось полезным не только для понимания рентгеновских лучей как волнового явления, но и для решеточной теории кристаллов.

Из трех установленных чисел также можно определить длину волны, а потому последняя публикация содержит и связанную с этим информацию. Тем не менее я не делал секрета из того, что не могу говорить о столь же высокой степени надежности этих значений, какую

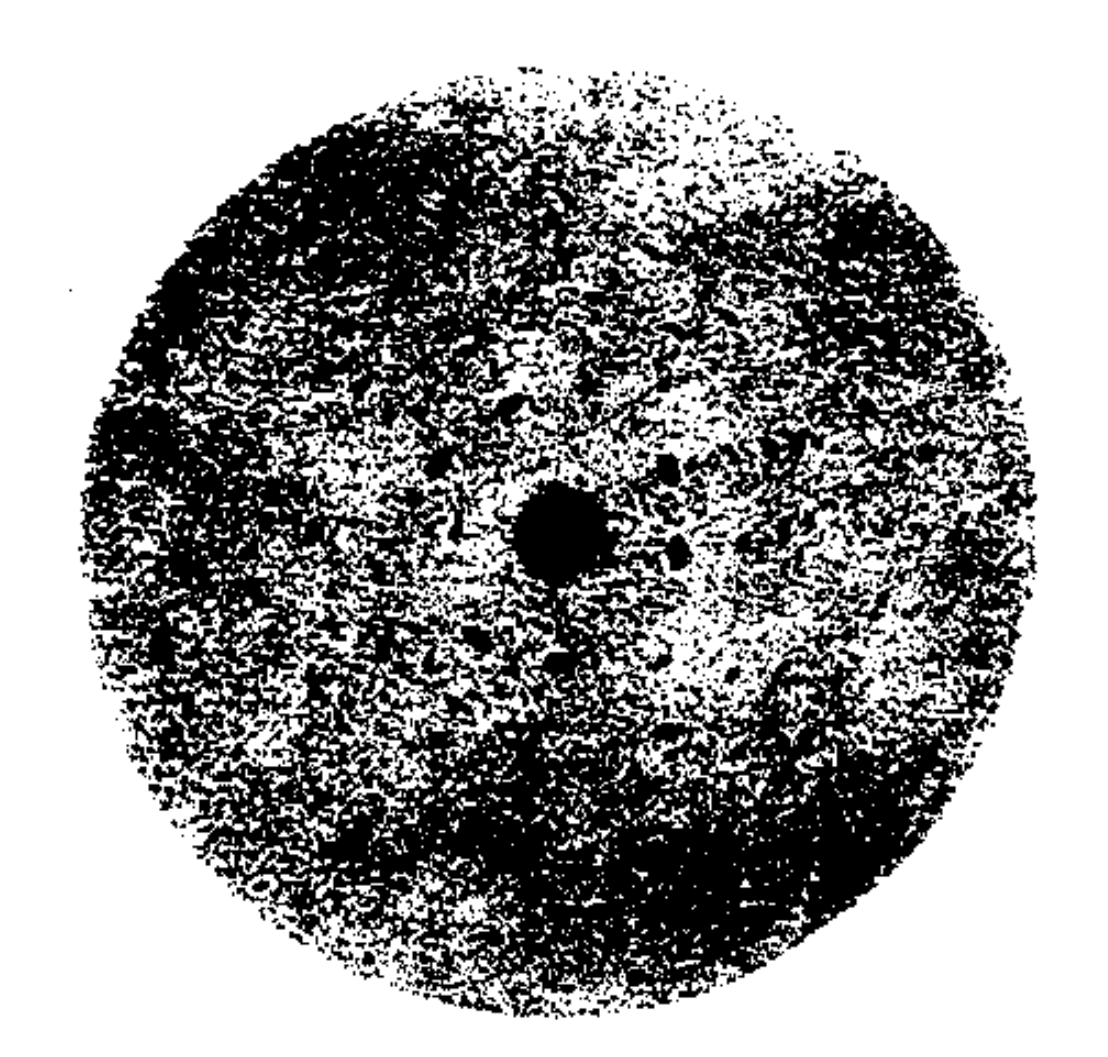


Рис. 2

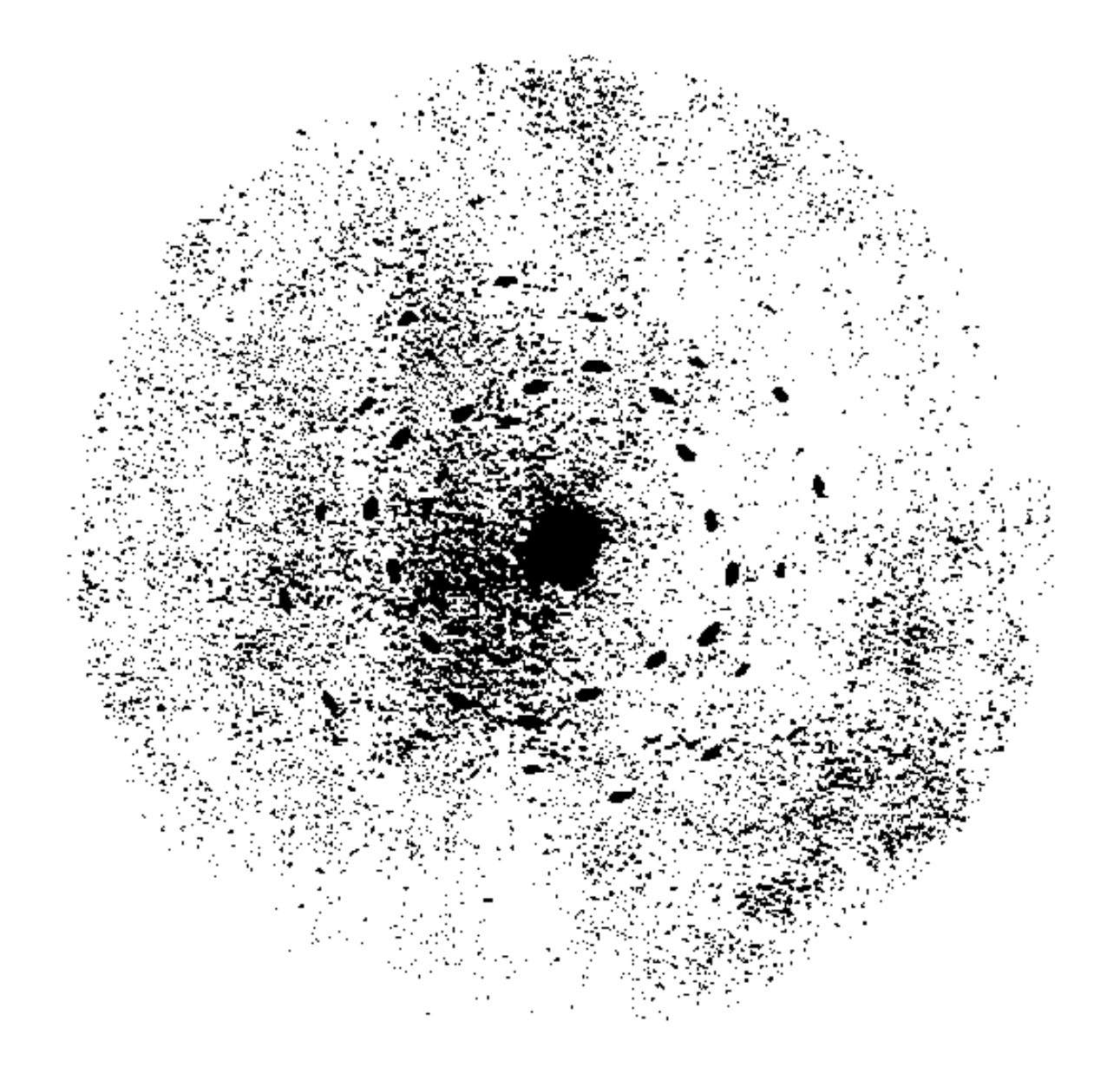


Рис. 3

имеют отношения чисел. На это у меня были две причины. С одной стороны, в каждом интерференционном максимуме — и это известно из оптики — помимо основной длины волны дополнительно может иметь

место ее половина, треть и т. д. Дело в том, что пока нет другой точки отсчета, кроме положения максимума, длина волны остается неопределенной на целый множитель. Тогда длины волн измерялись размерами кристаллической решетки. Как уже было сказано, эти размеры можно было оценить порядком их величины; но, чтобы вычислить их с некоторой степенью точности, нужно было знать молекулярную структуру кристаллов до мельчайших подробностей. А вместо этого, исключительно из исследований математиков, все знали, что помимо простых пространственных решеток возможны многие другие типы решеток, например, гранецентрированные и объемноцентрированные решетки. Тот тип структуры, который присутствует в некоторых кристаллах, впервые определили Брэгги, после того как отважились предложить гипотезу о структуре хлорида натрия. Именно так им удалось провести окончательные измерения длин волн.

Однако способ обобщения математической теории для таких более сложных типов структуры я выдвинул почти год спустя, когда возникла настоятельная необходимость такого шага. Изменения оказались минимальными. Положение интерференционных максимумов остается таким же, как в случае простой решетки с ее одинаковыми постоянными. Новый множитель, который теперь обозначается как структурный фактор, появляется только в выражении для их интенсивности. Однако иногда этот множитель обращается в нуль, и тогда соответствующий ему максимум полностью уничтожается. Именно из-за этого множителя пластинка, подвергаемая излучению, демонстрирует более слабо выраженную симметрию реального кристалла вместо полной симметрии простой пространственной решетки.

Значительный интерес, который вызвали первые исследования, вскоре выразился в большом количестве последовавших работ. Сначала в них выражались некоторые сомнения относительно того, действительно ли в данном случае происходит явление интерференции. Но вскоре этим сомнениям был положен конец. На мой взгляд, наиболее мощный отпор обеспечило доказательство Вагнером и Глокером, того, что рентгеновское излучение в интерференционных максимумах имеет только одну длину волны, даже если в исходном луче присутствует несколько длин волн. Экспериментальные исследования распределились на два основных направления. Кристаллы либо исследовали с помощью интерференции, которая помогала выявить их пространственные решетки, либо подвергали спектроскопии в диапазоне рентгеновских лучей. Начиная с 1912 года в обеих областях было сделано очень много, и первый важный шаг за пределы исследований, проведенных в Мюнхене, в обеих областях

сделали У. Л. Брэгг и У. Г. Брэгг. Если бы я сейчас начал составлять достаточно полный список всех исследователей, отличившихся в этой работе, это отняло бы довольно много времени. Я же могу упомянуть лишь об изменении процесса, которое оказалось очень важным для дальнейших экспериментов и в ходе которого Дебай превратил исследование прекрасных правильных фрагментов кристаллов, — которые иногда бывает очень сложно получить, — в исследование мельчайшего кристаллического порошка. Мне также следует упомянуть о чрезвычайно сложном и точном определении характеристических спектров различных химических элементов, которое начал Мозли, а продолжили (главным образом, здесь, в Швеции) Манне Сигбан и Стенстрем. Это исследование, как известно, получило фундаментальное значение для дальнейшего знания о структуре атома. Я не имею права не упомянуть также о том, что теорию удалось расширить. Важный вопрос относительно того, почему тепловое движение атомов не приводит к серьезному нарушению явлений интерференции, был решен Дебаем, а Х. А. Лоренц показал, как интерференционные максимумы, возникающие из непрерывного спектра, получают интенсивность из энергии множества соседних волн. По обеим причинам (из-за теплового движения и совместного влияния волн разных длин) появляются множители, которые, подобно структурному множителю, некоторым образом влияют на яркость интерференционных максимумов, но не на их положение.

Наконец, мне хотелось бы рассмотреть вопрос, который все еще остается нерешенным и ответ на который, на мой взгляд, очень скоро дадут рентгеновские лучи. Существует два противоречивых мнения в отношении смешанных кристаллов. Эти мнения сходятся в том, что атомы образуют пространственные решетки, как это происходит в случае химически однородных кристаллов. Согласие существует и относительно того, что в смешанном кристалле, например, хлорида калия и хлорида рубидия, атомы хлора расположены по отношению друг другу точно так же, как в чистом хлориде калия или чистом хлориде рубидия. (Из работы, проведенной Брэггами, нам уже известно, что две эти соли имеют идентичную пространственную решетку.) Но каким образом атомы калия и рубидия распределяются по положениям, отведенным для атомов металла? Согласно одной точке зрения, которую, вероятно, выдвинул Вант-Гофф, это происходит совершенно случайно. Другая же точка зрения утверждает регулярность этого процесса, тем самым составляя пространственные решетки из равных параллелепипедов молекулярных размеров, идентичных во всех отношениях, включая места нахождения атомов. По чисто теоретическим причинам первое мнение представляет-

ся мне более вероятным. Если, как в приведенном примере, возможно любое отношение концентраций составляющих, в различных случаях действительно сложно понять принцип распределения атомов, подчиняющихся кристаллографической симметрии и, кроме того, имеющих достаточно малые размеры для точно определенных элементарных параллелепипедов. Эксперименты по облучению вышеописанных смешанных кристаллов, проведенные Вегардом и Скьелдрупом, судя по всему, завершились появлением еще большего противоречия со вторым мнением, чем ожидали сами исследователи. Тем не менее, за последние несколько лет Тамман провел химические опыты со смешанными кристаллами различных металлов, например, меди и золота, которые, на первый взгляд, доказывают второе мнение. Видимо, это создаст область нового применения интерференции рентгеновских лучей.

Биография

Макс Теодор Феликс фон Лауэ родился 9 октября 1879 года в Пфаффендорфе, неподалеку от Кобленца. Он был сыном Джулиуса фон Лауэ, служащего военной администрации Германии, которому в 1913 году присудили наследственное дворянство и которого часто отправляли в разные города, вследствие чего Макс фон Лауэ провел детство и юность в Бранденбурге, Позене, Берлине и Страсбурге, а в трех последних городах он ходил в школу. В Страсбургской протестантской школе он попал под влияние профессора Геринга, который познакомил его с точными науками.

В 1898 году Макс закончил школу и в течение года служил в армии. Затем он поступил в Страсбургский университет, где изучал математику, физику и химию. Однако вскоре он перебрался в Геттингенский университет, где работал под руководством профессоров В. Фойгта и В. Абрагама, которые оказали на него очень сильное влияние. Проведя семестр в Мюнхенском университете, в 1902 году он уехал в Берлинский университете, чтобы работать под руководством профессора Макса Планка. Там он также посещал лекции О. Люммера по интерференционной спектроскопии и тепловому излучению, влияние которых проявилось в диссертации фон Лауэ по явлениям интерференции в плоскопараллельных пластинах.

Получив степень доктора в 1903 году в Берлине, фон Лауэ на два года уехал в Геттингенский университет. В 1905 году ему предложили должность ассистента Макса Планка в Институте теоретической фи-

зики в Берлине. Там он работал над применением энтропии к полям излучения и над термодинамическим значением когерентности световых волн.

В 1909 году он стал приват-доцентом в Мюнхенском университете, где читал лекции по оптике, термодинамике и теории относительности, а в 1912 году стал профессором физики в Цюрихском университете. В 1914 году он перебрался во Франкфурт-на-Майне, заняв пост профессора физики, а с 1916 года в Вюрцбургском университете занимался военными разработками, связанными с трубками с глубоким вакуумом, используемыми в телефонии и беспроволочной связи. В 1919 году его назначили профессором физики в Берлинском университете, где он оставался до 1943 года. С 1934 года он также был консультантом в Физико-техническом институте в Берлине-Шарлоттенбурге.

В 1917 году, когда в Берлине-Далеме был основан Физический институт, директором которого назначили Эйнштейна, фон Лауэ, став заместителем директора, занимался большей частью административной работы этого института, который был тесно связан с научными исследованиями Германии. В этот период времени, а также позднее фон Лауэ оказывал значительное влияние на развитие научных исследований в Германии. Когда Берлин начали бомбить, институт переехал в Гехинген, в Вюртемберге, и фон Лауэ последовал туда же. С 1944 по 1945 г. он оставался в Гехингене, где, чтобы отвлечься от войны, он писал «Историю физики», которая выдержала четыре издания и была переведена на семь других языков. Именно в этом городе он встретил французские войска, и вместе с девятью другими немецкими учеными был перевезен англо-американской миссией в Англию, где оставался до 1946 года. Во время своего пребывания в Англии он написал статью по малому поглощению рентгеновских лучей при дифракции, которую в 1948 году передал в Международный союз кристаллографов в Гарвардском университете. В 1946 году он уехал в Геттинген, став действующим директором института им. Макса Планка и титулярным профессором Геттингенского университета.

В 1951 году его избрали директором института физической химии им. Фрица Габера в Берлине-Далеме, где он вместе с Борманом и другими занимался исследованиями по рентгеновской оптике.

В 1958 году он вышел на пенсию, а в 1959 году отметил свой восьмидесятый день рождения в Берлине-Далеме. Он прожил, по-прежнему активно работая, еще шесть месяцев.

Кроме уже упомянутой ранней работы, научная деятельность фон Лауэ охватывала широчайший диапазон. В самом начале научной карье-

ры его привела в восторг теория относительности Эйнштейна, и в период между 1907 и 1911 гг. он опубликовал восемь статей по приложениям этой теории. В 1911 году он опубликовал книгу по специальной теории относительности, а в 1912 году — еще одну книгу по общей теории относительности, причем обе книги выдержали несколько изданий.

Однако самой известной его работой, за которую в 1914 году он получил Нобелевскую премию по физике, стало открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. Это открытие зародилось, как он сказал в Нобелевской лекции, во время обсуждения проблем, связанных с прохождением световых волн через периодическое кристаллическое расположение частиц. Именно тогда он подумал, что гораздо более короткие электромагнитные лучи, которыми считались рентгеновские лучи, вызвали бы в такой среде явления дифракции или интерференции и что именно такой средой является кристалл. Несмотря на то, что его коллеги, А. Зоммерфельд, В. Вин и другие, с которыми он обсуждал эту идею во время лыжного похода, возражали ему, В. Фридрих, один из ассистентов Зоммерфельда, и П. Книппинг осуществили экспериментальную проверку, причем после нескольких неудачных попыток им удалось продемонстрировать правильность этой идеи. Фон Лауэ разработал ее математическую формулировку и в 1912 году опубликовал свое открытие, которое устанавливало электромагнитную природу рентгеновских лучей и открывало путь для дальнейшей работы сэра Уильяма и сэра Лоренса Брэггов. Впоследствии фон Лауэ продолжал развивать этот предмет.

Не менее выдающимся в работе фон Лауэ был вклад, который он, будучи профессором физики в Берлинском университете, сделал в проблемы сверхпроводимости. В то время в Берлинском физико-техническом институте Вальтер Мейсснер изучал замечательное исчезновение омического сопротивления, которое происходит во многих металлах при температурах порядка температуры жидкого гелия. Особенно ценным вкладом, который тогда сделал фон Лауэ, было данное им в 1932 году объяснение того, что пороговое значение приложенного магнитного поля, которое разрушает сверхпроводимость, изменяется вместе с формой тела, потому что, когда магнитное поле устанавливается после возникновения состояния сверхпроводимости, это поле деформируется сверхтоками, индуцированными на поверхности используемого металла. Это объяснение подтвердилось и открыло путь последующему открытию Мейсснером того, что сверхпроводник полностью уничтожает магнитное поле внутри себя, тем самым став основной идеей теории сверхпроводимости Ф. и Г. Лондонов. Фон Лауэ опубликовал одну статью вместе

с Ф. и Г. Лондонами, а в период с 1937 по 1947 г. он опубликовал по этому предмету двенадцать статей и книгу.

Среди множества наград и знаков отличия, которые были присуждены фон Лауэ: медаль Ладенбурга, медаль Макса Планка, а также золотая медаль Бимала-Черн-Ло Индийской ассоциации в Калькутте. Фон Лауэ был почетным доктором Боннского, Штутгартского, Мюнхенского, Берлинского, Манчестерского и Чикагского университетов; он был членом Российской академии наук, а также Академии наук Берлина, Германского физического и математического общества, общества им. Канта, Академии наук Вены, Американского физического общества, Французского физического общества, а также Французского общества минералогии и кристаллографии. Кроме того, фон Лауэ был почетным сенатором Общества им. Макса Планка и почетным членом Германского общества им. Рентгена, членом-корреспондентом Академий наук Геттингена, Мюнхена, Турина, Стокгольма, Рима (Папская академия), Мадрида, Римской Академии деи Линчеи и Лондонского Королевского общества. В 1948 году он стал почетным президентом Международного союза кристаллографов, а в 1952 году его сделали рыцарем Ордена Pour le Mérite (За заслуги). В 1953 году фон Лауэ был награжден Большим Крестом со звездой за заслуги перед правительством, а в 1957 году он стал офицером Французского Почетного легиона.

Современники очень ценили фон Лауэ за его характер и здравое суждение, поэтому с ним нередко советовались, и за время своей жизни он оказал огромное влияние на направление и развитие научной деятельности в Германии. Его характеризовали глубокая любовь к Пруссии и восхищение ею, а также обостренное чувство справедливости и честность во всем. Когда к власти пришла Национал-социалистическая партия, возглавляемая Гитлером, фон Лауэ, рискуя получить взыскание или пострадать лично, защищал научные взгляды, например, теорию относительности, которые не одобряла Партия или столь ярые ее приверженцы, каким был физик Ленард. Когда Эйнштейн подал в отставку из Берлинской академии наук и ее вице-президент заявил, что не велика потеря, из всех членов академии возразил один фон Лауэ.

Фон Лауэ любил парусный спорт, катание на лыжах, увлекался альпинизмом и автомобильным спортом. Он не был скалолазом, но ему нравилось путешествовать по Альпийским ледникам со своими друзьями-учеными. Как автомобилист он был известен в Берлине, причем сначала его узнали как мотоциклиста, на огромной скорости мчащегося на лекции, а уж потом как водителя автомобиля. Он обожал большие скорости,

но никогда не попадал в аварии, до того рокового столкновения, которое оборвало его жизнь.

В последние годы жизни он страдал от приступов депрессии и ощущения гонений учеными и военными властями, которые были ему очень неприятны. Однако обычно ему удавалось успешно преодолевать эти приступы и возвращать свойственное ему чувство юмора и жизнерадостность. Он не занимался искусством, но интересовался многими его направлениями, особенно, классической музыкой; он много читал по истории и философии науки. Фон Лауэ с благоговением и смирением размышлял о звездах, о горных вершинах и о достижениях человечества, в душе будучи глубоко религиозным человеком. Он попросил, чтобы на его надгробной плите было начертано, что он умер, твердо веря в Божье прощение.

В 1910 году он женился на Магдалене Деген.

Восьмого апреля 1960 года, когда фон Лауэ ехал в свою лабораторию, в его машину врезался мотоциклист, который получил водительские права двумя днями раньше. Мотоциклист умер сразу, а автомобиль фон Лауэ перевернулся на Берлинском скоростном шоссе и упал под откос, откуда его доставала пожарная бригада. Несмотря на то, что на первых порах казалось, что фон Лауэ начинает оправляться от полученных увечий, 24 апреля, в возрасте 80 лет, он все же от них скончался.

Уильям Генри Брэгг
Уильям Лоуренс Брэгг

«за важный вклад в изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей»

У. Г. Брэгг лекции не читал.

Биография

Уильям Генри Брэгг родился 2 июля 1862 года в Вестворде, Камберленд. Он учился в средней школе Маркит Харбороу, а затем в колледже Кинг-Уильям (о-в Мэн). Будучи избранным в 1881 году младшим студентом в Тринити-колледж (Кембридж), он изучал математику у знаменитого преподавателя доктора Э. Дж. Рауса. В июне 1884 году он занял третье место на экзамене по математике (семестр 1) и в следующем январе был переведен в первый класс второго семестра. Он изучал физику в Кавендишской лаборатории во время семестра 1885 года, в конце которого его выбрали профессором математики и физики в Аделаидский университет (Южная Австралия). Впоследствии он последовательно становился Кавендишским профессором физики в Лидском университете (1909–1915), Квейнским профессором физики в Лондонском Юниверсити-колледже (1915–1925) и Фуллеровским профессором химии в Королевском институте.

Его исследовательские интересы охватывали огромное множество тем, причем ему удавалось, едва взявшись за какой-то предмет, тут же, почти случайно, сделать в него значительный вклад, а потом оставить его. Однако работа Брэгга и его сына Лоуренса в 1913–1914 гг. породила

новую область науки, имеющую огромное значение и важность: исследование структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей. Если фундаментальным открытием волновой природы рентгеновских лучей, о которой свидетельствует их дифракция на кристаллах, мы обязаны фон Лауэ и его сотрудникам, то использованием рентгеновских лучей в качестве инструмента для систематического анализа строения кристалла мы в равной степени обязаны Брэггам. Признанием этого факта стало вручение в 1915 году отцу и сыну Нобелевской премии по физике.

Во время Первой мировой войны Брэгг отвечал за исследования по обнаружению и измерению подводных звуков в связи с определением местонахождения подводных лодок. Поэтому, вероятно, в связи с признанием как его работы, так и его таланта к науке, в 1917 году Брэгга сделали кавалером «Ордена Британской Империи» 2-й степени, а в 1920 году — посвятили в рыцари. В 1931 году Брэгг получил орден «За заслуги». С 1907 года Брэгг являлся членом Королевского общества, а в 1935 году его избрали президентом этого общества.

Брэгг был почетным доктором шестнадцати университетов и членом ведущих иностранных обществ. Он также получил много медалей и наград, среди которых стóит назвать медаль Румфорда, которую он получил в 1916 году, и медаль Копли (он стал первым награжденным этой медалью), присужденную ему в 1930 году.

Он был автором многих книг, среди которых «Изучение радиоактивности» (*Studies in Radioactivity*), «Рентгеновские лучи и структура кристаллов» (*X-Rays and Crystal Structure*), «Мир звука» (*The World of Sound*), «О природе вещей» (*Concerning the Nature of Things*), «Старые занятия и новое знание» (*Old Trades and New Knowledge*), «Введение в исследование кристаллов» (*An Introduction to Crystal Analysis*) и «Вселенная света» (*The Universe of Light*). Его любимым времяпрепровождением был гольф.

В 1889 году Брэгг женился на Гвендолине Тодд, дочери сэра Чарльза Тодда, члена королевского общества, министра почт и правительственного астронома Южной Австралии. Их сын Уильям Лоренс Брэгг вместе с отцом получил Нобелевскую премию по физике.

Прожив удивительно плодотворную жизнь, сэр Уильям Брэгг скончался 10 марта 1942 года.

Уильям Лоуренс Брэгг

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах

Нобелевская лекция, 6 сентября 1922 г.

С огромнейшим удовольствием я использую эту возможность выразить вам свою благодарность за великую честь, которую вы мне оказали, наградив моего отца и меня Нобелевской премией по физике в 1915 году. В другие годы ученые, получившие этот великий знак отличия за блестящую работу, посвященную исследованиям, приезжали сюда, чтобы выразить вам свою благодарность. Но то, что вы отвели мне, в самом начале моей научной карьеры, пусть даже самое скромное место среди этих великих людей, — награда, которой я не могу не гордиться.

Вы пригласили меня сюда два года назад, после окончания войны, но некоторые неприятные обстоятельства моей жизни, следовавшие одно за другим, лишили меня возможности принять ваше приглашение. Я всегда глубоко сожалел об этом и поэтому с огромным удовольствием принял приглашение, сделанное несколько месяцев назад профессором Аррениусом, и подготовился к этому визиту. Наконец-то я могу выразить вам свою глубокую благодарность и лично сказать «спасибо».

Вы уже наградили Нобелевской премией профессора фон Лауэ, которому мы обязаны великим открытием, сделавшим возможным весь последующий прогресс в новой области науки, — изучении структуры

[1]Двенадцатого ноября 1915 года Шведская Королевская академия наук наградила профессора У. Л. Брэгга Нобелевской премией по физике. Шестого сентября 1922 года он произнес следующую речь в зале Стокгольмского технического университета.

материи с помощью дифракции рентгеновских лучей. В своей Нобелевской лекции профессор фон Лауэ описал, как он пришел к своему эпохальному открытию. Пытаясь найти способ получения дифракции рентгеновских лучей и ответить на вопрос об их истинной природе, он понял, что природа в виде кристалла уже создала дифракционную решетку, которая идеально подходит для этой цели. Уже тогда предполагалось, что если бы рентгеновские лучи действительно были электромагнитными волнами, то они имели бы очень короткую длину волны, порядка 10^{-9} см. Работа Зонке, Федорова и других по геометрии кристаллической структуры показала, что атомы или молекулы кристалла должны располагаться абсолютно правильно. Кроме того, удалось вычислить, что период структуры должен иметь порядок 10^{-8} см. Отношение этого периода и предполагаемой длины волны рентгеновских лучей было точно таким, какое нужно для создания эффектов дифракции. Фон Лауэ вместе с Фридрихом и Книппингом провел эксперимент, во время которого узкий пучок рентгеновских лучей проходил через кристалл. Им сразу же удалось получить несомненное доказательство дифракции. Это открытие дало начало столь многим и столь плодотворным направлениям исследований, что профессор фон Лауэ в своем обращении к вам смог рассказать о них лишь вкратце. Учитывая те успехи в нашем познании структуры материи, которых удалось достичь с помощью эффекта фон Лауэ, мы должны рассматривать это открытие как занимающее уникальное место в истории науки.

Рассказывая о работе, за которую нам присудили Нобелевскую премию, я чувствую, что не могу говорить только от своего имени, а потому говорю и от имени своего отца. Свой собственный вклад мне удалось сделать исключительно благодаря вдохновению, которое он в меня вселял, а также его руководству, поэтому одним из самых величайших событий в моей жизни стало то мгновение, когда я услышал, что вы связали мое имя с его именем и присудили нам совместную премию по физике.

Профессор фон Лауэ проводил некоторые из своих ранних экспериментов с кристаллом сульфида цинка и получил результаты, доказавшие, что дифрагированные пучки лучей демонстрируют симметрию, лежащую в основе кристаллической структуры, которая в данном случае является кубической. Он разработал математическую теорию дифракции на пространственной решетке и доказал, что эти дифрагированные пучки расходятся в направлениях, соответствующих системе дифракционных точек, образующих пространственную кубическую решетку. Продолжая это исследование, он попытался объяснить, что, несмотря на наличие

большого числа направлений, в которых можно ожидать появление дифрагированного пучка, на фотопластинке, используемой для фиксирования данного эффекта, появляется лишь некоторое их количество. Он предположил, что это можно объяснить существованием в пучке рентгеновских лучей волн только определенных длин, вследствие чего дифрагированный пучок появляется только тогда, когда условия дифракции подходят для волн именно таких длин. Изучая его работу, я подумал, что, может быть, происхождение такого отбора определенных направлений дифракции следует искать в особенностях кристаллической структуры, а не в составе пучка рентгеновских лучей, которые могут иметь природу белого света и образовывать непрерывный спектр длин волн. Я попытался подойти к этой проблеме с несколько другой точки зрения и посмотреть, что произойдет, если серия нерегулярных импульсов попадет на точки дифракции, расположенные на правильной пространственной решетке. Это естественно привело к рассмотрению эффектов дифракции как отражения импульсов плоскостями структуры кристалла. Точки пространственной решетки можно расположить на следующих друг за другом параллельных равноудаленных плоскостях. По мере прохождения импульса через каждую точку дифракции он рассеивает волну, а если на плоскости находится несколько таких точек, то дифрагированные волны малой амплитуды объединятся, образуя согласно хорошо известному построению Гюйгенса фронт отраженной волны.

Импульсы, отраженные последовательными плоскостями, образуют цуг волн, анализ которого показывает, что он состоит из длин волн, определяемых формулой

$$n\lambda = 2d\sin\vartheta.$$

В этом выражении n — целое число, λ — длина волны рентгеновских лучей, d — расстояние между плоскостями, а ϑ — угол скольжения, под которым отражаются рентгеновские лучи.

Рассмотрение дифракции как отражения рентгеновских лучей не содержало никакого нового принципа, которого не было бы в математическом решении фон Лауэ. Оно по-прежнему не давало ответа на вопрос, почему некоторые плоскости структуры цинковой обманки отражают сильно, а другие, казавшиеся не менее подходящими для этого, не представлены дифрагированными пучками. Однако при анализе результата, полученного фон Лауэ, я обнаружил, что отбор действующих плоскостей можно объяснить, допуская, что центры дифракции располагаются не в простой кубической решетке, а в гранецентрированной. Структурной единицей гранецентрированной кубической решетки является куб,

в каждом углу и центре каждой грани которого расположена точка. В наиболее плотноупакованных и, следовательно, наиболее эффективно отражающих плоскостях такой решетки порядок расположения атомов достаточно сильно отличается от случая простой кубической решетки. Таким образом, мне казалось, что, приписывая цинковой обманке гранецентрированную кубическую структуру, можно удовлетворительным образом объяснить фотографию фон Лауэ как созданную дифракцией лучей белого света с максимальной интенсивностью в определенной части спектра. Затем я провел опыт с двумя простыми кубическими кристаллами: хлоридом натрия и хлоридом калия. Фотографии фон Лауэ, сделанные при использовании хлорида натрия, указывали на его гранецентрированную решетку, а фотографии, полученные для хлорида калия, говорили о его более простой природе и были такими, которые можно было ожидать при расположении точек в углах кубов. Поскольку мне казалось вероятным, что эти два кристалла имеют подобную структуру, я пришел к гипотезе, что атомы в них расположены, как показано на рис. 1, где каждая вершина куба заполнена атомом, причем атомы одного вида образуют гранецентрированную решетку. В хлориде калия атомы настолько близки по своему весу, что ведут себя как эквивалентные центры дифракции, поэтому его структуру можно считать простой кубической.

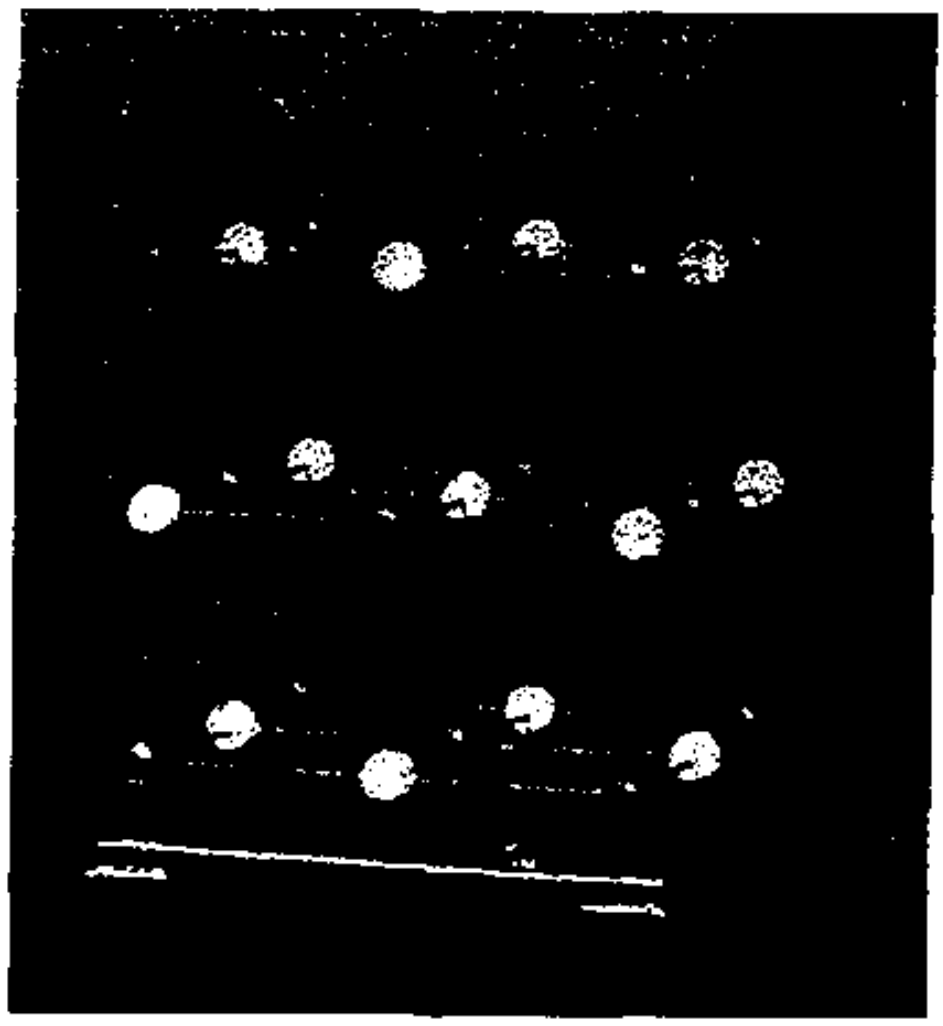


Рис. 1. *Каменная соль* (NaCl, KCl, LiF и т. д.). *Белые шарики* представляют натрий (или хлор); *черные шарики* — хлор (или натрий).

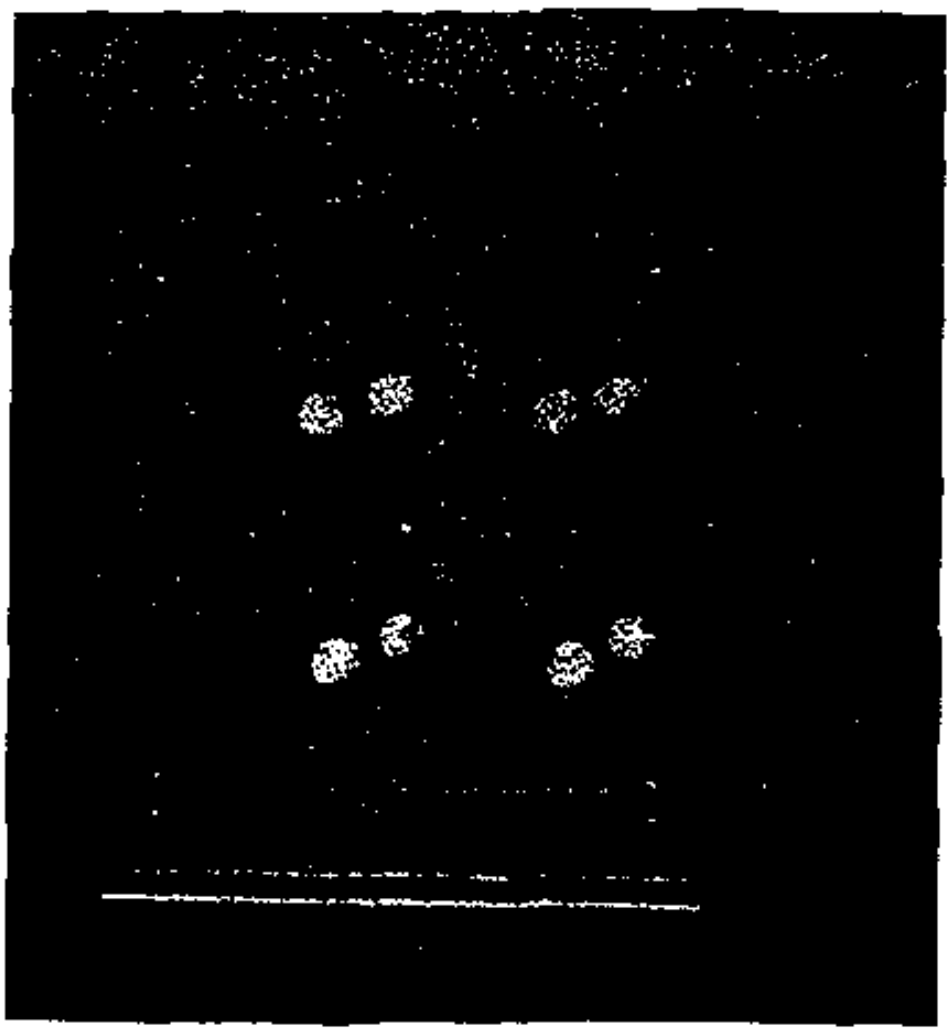


Рис. 2. *Флуорит* (CaF_2). *Черные шарики* представляют кальций; *белые шарики* — фтор.

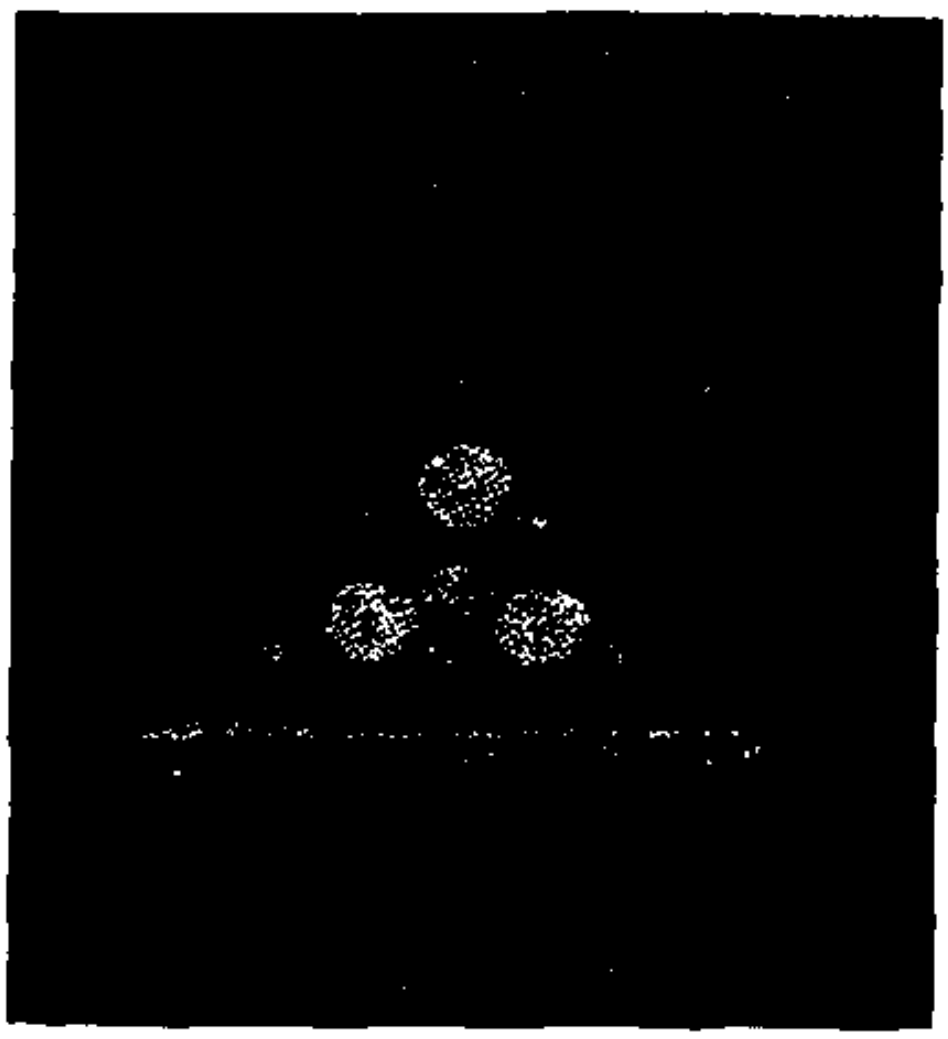


Рис. 3. *Алмаз*. И *черные*, и *белые* шарики представляют атомы углерода. Каждый шарик является центром притяжения четырех других.

Несмотря на то, что казалось определенным, что эффект фон Лауэ вызван дифракцией очень коротких волн, оставалась возможность то-

го, что рентгеновских лучей там нет. Чтобы это проверить, мой отец исследовал, ионизируется ли газ лучом, отраженным кристаллом; он обнаружил, что это действительно происходит. Он исследовал степень отражения на разные углы, а на основе прибора, который сначала использовался для этой цели, впоследствии был создан рентгеновский спектрометр, с помощью которого мы проделали бóльшую часть работы. В этом приборе рентгеновские лучи, выходящие из трубки, с помощью щелей формируются в узкий пучок, который падает на кристалл в центре стола спектрометра. Это кристалл отражает пучок, который затем принимается и измеряется в ионизационной камере.

Исследуя влияние изменения угла падения, мой отец обнаружил, что очень сильное отражение появлялось, когда данная грань кристалла располагалась под некоторыми определенными углами. Поскольку между углом скольжения и длиной волны должно сохраняться вышеупомянутое отношение, это стало первым свидетельством существования характеристических «линий» в излучении, испущенном антикатодом. Эти же линии можно было увидеть в отражениях от других граней, а измерение углов, при которых они появлялись, показало себя наиболее эффективным методом определения расположения атомов в кристалле. Структуры хлорида натрия и хлорида калия, о которых говорили фотографии фон Лауэ, были точно определены с помощью спектрометра; кроме того, были исследованы более сложные структуры, например, кальцит, цинковая обманка, флюорит и железные колчеданы. С другой стороны, поскольку расположение атомов в этих кристаллах было известно, можно было вычислить расстояния между отражающими плоскостями и таким образом приписать определенную длину волны характеристическим линиям спектра. При использовании трубок с антикатодами из платины, осмия, вольфрама, никеля и других металлов стало ясно, что каждый из них испускает излучение, содержащее характеристические линии, свойства которых соответствовали свойствам K- или L-излучений, впервые открытых Барклой. Затем Виддингтон измерил энергию катодных лучей, которые необходимы, чтобы возбудить K- и L-излучения Барклы. Результаты, полученные с помощью спектрометра, показали частоту этих излучений, и моему отцу удалось продемонстрировать, что произведение частоты и постоянной Планка h равно энергии катодного луча, необходимой для создания этих лучей. Это было первым доказательством квантового правила в применении к рентгеновским лучам.

Изучение рентгеновских спектров и структуры кристаллов представляют собой два крупных направления исследований, к которым привело открытие фон Лауэ. Первым рентгеновские спектры исследовал

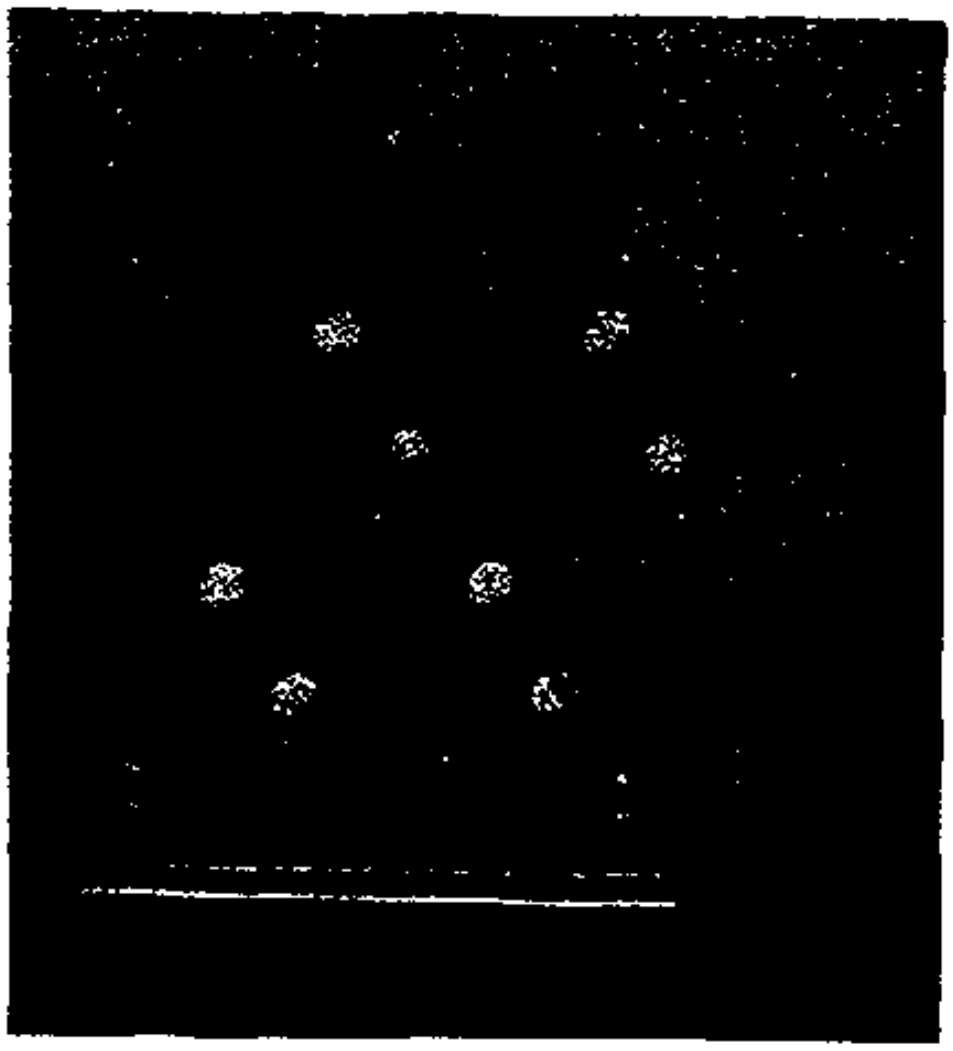


Рис. 4. *Железные колчеданы* (FeS_2). Расположение атомов можно рассматривать как модификацию CaF_2. *Черные шарики* — это атомы железа. Каждый *белый шарик*, теперь представляющий атом серы, смещен из центра куба, как и в случае CaF_2, по диагонали, выбранной особенным образом, который проще всего понять из модели. Тригональная ось проходит через два белых шарика, которые расположены рядом друг с другом и вблизи центра всей фигуры.

Мозли. В ходе своей знаменитой работы он установил закон, которому подчиняется порядковый номер элементов. Он обнаружил, что при переходе от одного элемента периодической таблицы к другому, происходит регулярное увеличение частоты K- и L-излучений, испускаемых элементами, и что эта регулярность настолько велика, что каждому элементу можно абсолютно точно отвести соответствующее место в списке и определить интервалы таблицы, в которых элемент не известен. Смерть Мозли во время войны прервала его блестящую карьеру, так и не дав ей начаться. С тех пор технология рентгеновской спектроскопии получила значительное развитие. Но никто не добился в этом направлении большего, чем профессор Сигбан из вашего Лундского университета, который достиг такой изумительной точности и чувствительности при измерениях рентгеновских спектров. Установление происхождения K-, L- и M-излучений, впервые обозначенное соотношениями Косселя, и исследование границ поглощения, на которых поглощающая способность элемента для различных длин волн проходит через критическое значе-

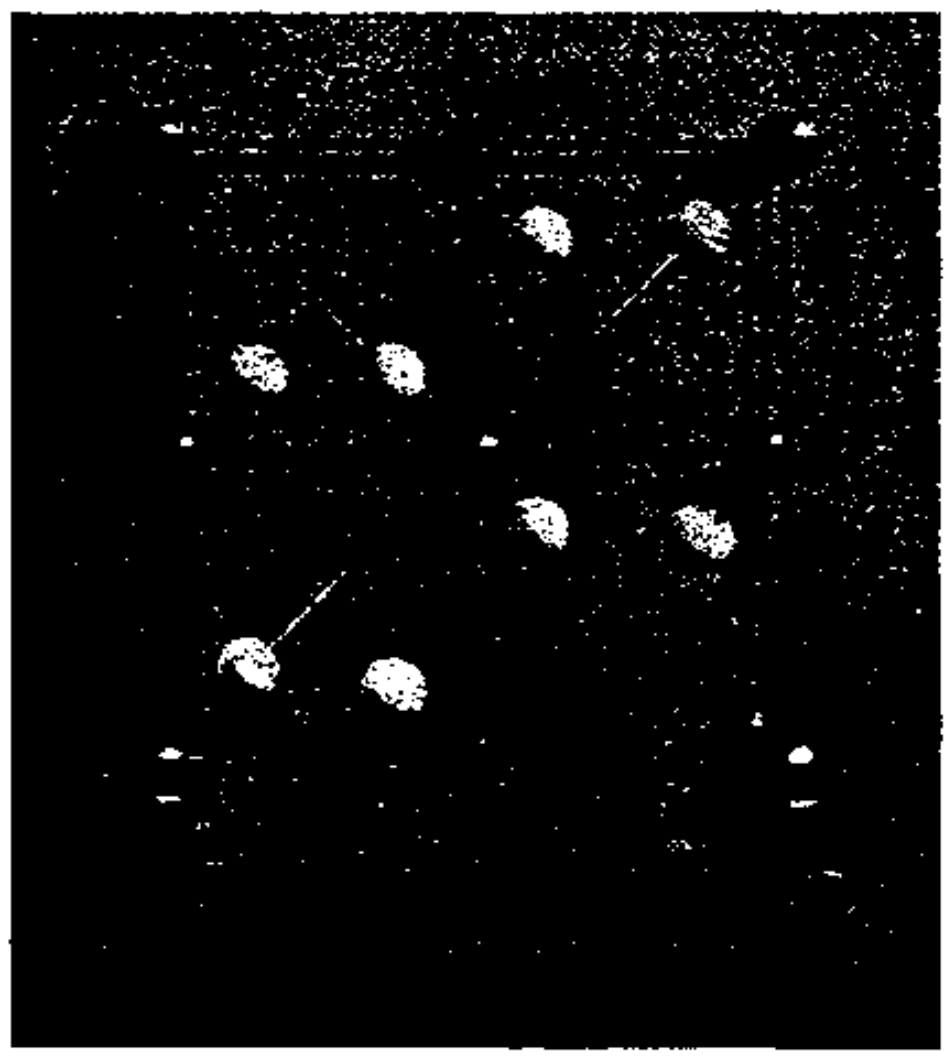


Рис. 5. *Железные колчеданы.* При рассмотрении под другим углом можно увидеть расположение атомов серы на горизонтальных линиях. Они параллельны хорошо известным отметкам на кристалле FeS_2. При изменении угла зрения, например, при повороте модели на прямой угол вокруг вертикальной оси или оси, лежащей в плоскости бумаги, расположение атомов меди становится вертикальным вместо горизонтального: то же самое происходит с отметкой.

ние, стали жизненно важными моментами в изучении атомной структуры, поскольку они предоставляют прямое свидетельство величины изменения энергии, когда электрон внутри атома переходит из одного стационарного состояния в другое. Точность, до которой сейчас можно довести измерение длины волны, даже дала нам возможность обнаружить, что в расположении этих границ поглощения существуют небольшие отличия, когда, как это показал доктор Линд, в качестве абсорбентов используются разные химические вещества, в которые входит этот элемент, и это наводит на мысль о новом и наиболее эффективном методе исследования химического состава веществ и потенциальной энергии валентных связей.

Исследование структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей впервые помогло нам узнать реальное расположение атомов в твердых телах. Изучение структуры с помощью микроскопа ограничено «крупнозернистостью» света, освещающего объект, так что мы не можем надеяться разглядеть детали, меньшие длины волны света. При

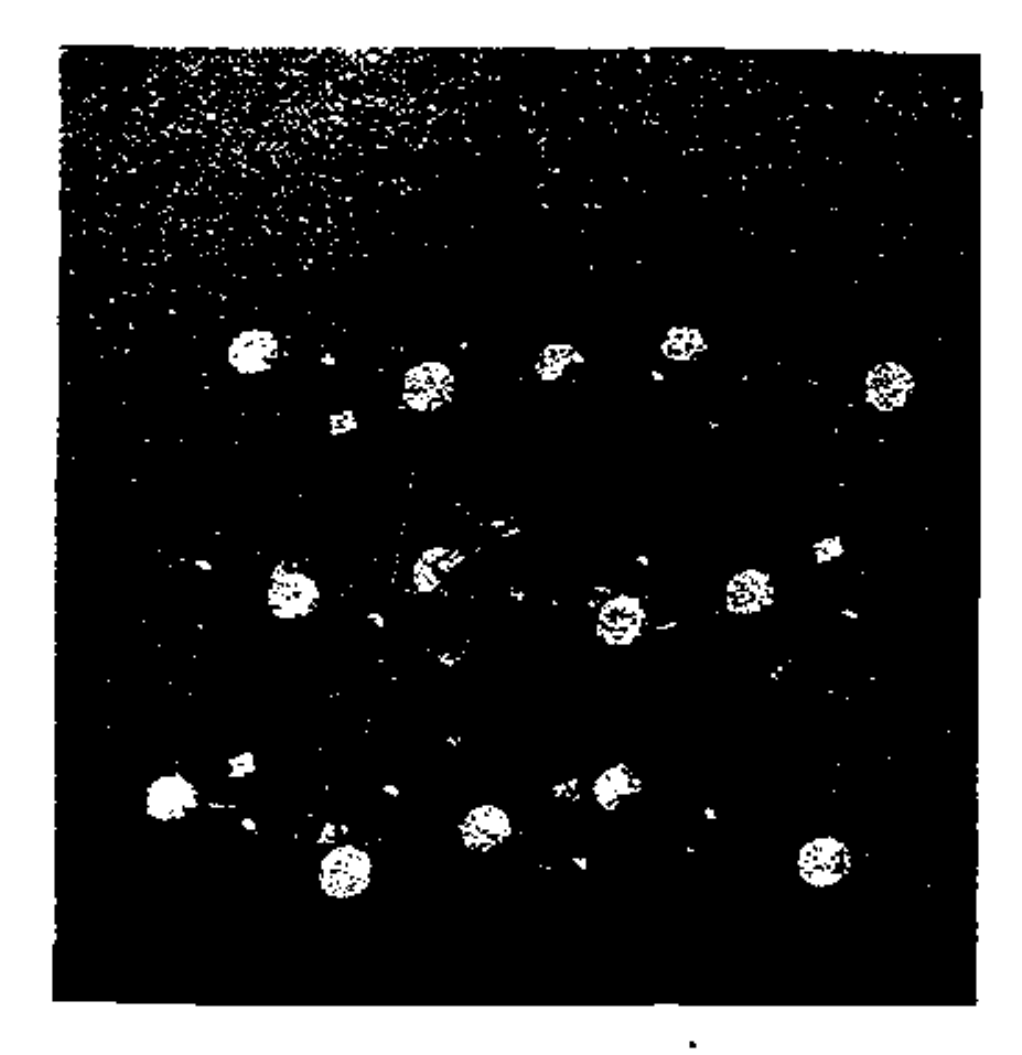


Рис. 6. *Кальцит* ($CaCO_3$). *Белые шарики* представляют кальций; *черные шарики* — углерод, а *кубики* — кислород.

использовании рентгеновских лучей с их очень короткой длиной волны этот предел малости уменьшился сразу в десять тысяч раз, так как длина волны рентгеновских лучей имеет меньший порядок, нежели размеры атомной структуры. С помощью этой «мелкозернистой» формы света мы, фактически, заглядываем внутрь молекулы и атома.

Границы рентгенограммы кристалла расположены на пространственной решетке. Каждая граница повторяется идентичным образом много раз на протяжении всей структуры, через регулярные промежутки во всех направлениях. При исследовании структуры кристалла с помощью рентгеновских лучей, прежде всего необходимо определить размеры элементарной ячейки этой пространственной решетки, стороной которой является примитивная трансляция, после которой рассматриваемая структура совмещается сама с собой. Достичь этого просто. Мы находим угол, под которым монохроматический пучок рентгеновских лучей известной длины волны отражается различными гранями кристалла. Отражение происходит, только когда удовлетворяется отношение

$$n\lambda = 2d\sin\vartheta.$$

Таким образом, расстояние d между плоскостями, параллельными любой исследуемой грани, можно найти, измеряя угол ϑ. Размеры единичной ячейки можно найти, измеряя d для нескольких граней. Определив

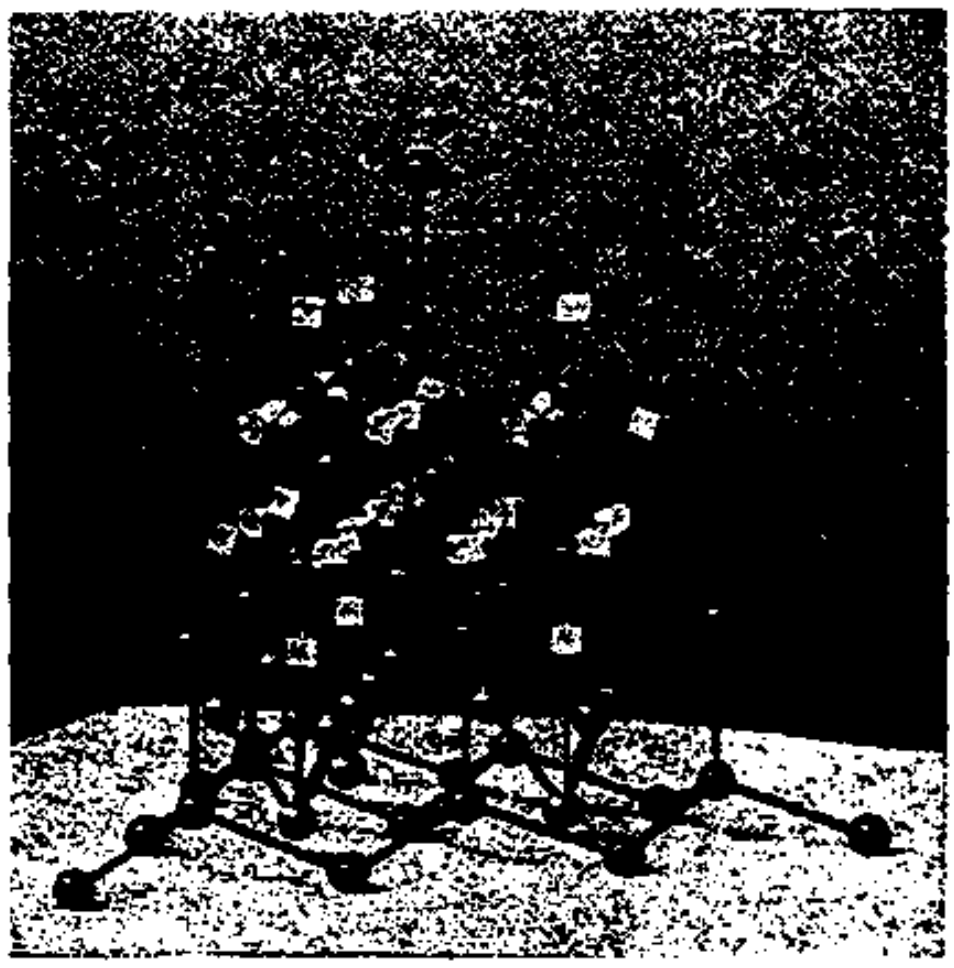


Рис. 7. *Структура шпинели* ($MgAl_2O_4$ *со структурой шпинели; магнитный железняк* $FeFe_2O_4$; *ганит* $ZnAl_2O_4$ *и т. д.)*. Двухвалентные атомы (Mg, Fe, Zn и т. д.) располагаются по отношению друг к другу точно так же, как атомы углерода в алмазе, и представлены *черными шариками*. *Серые шарики* представляют трехвалентные атомы (Al, Fe и т. д.). Серый шарик расположен в центре каждого шестиугольного (бензольного) кольца черных шариков. *Светлые кубики* — это атомы кислорода. Каждый двухвалентный атом касается только четырех атомов кислорода. Каждый трехвалентный атом касается шести кислородных атомов и ничего более. Каждый атом кислорода касается одного двухвалентного и трех трехвалентных атомов. Расстояние между центрами двух соседних двухвалентных атомов в магнитном железняке равно 3,60 ангстрема.

размеры единичной ячейки, мы можем вычислить, сколько атомов или молекул в ней содержится, используя в качестве данных плотность кристалла и массу каждой молекулы.

Второй этап исследования состоит в определении способа, которым атомы группируются вместе, образуя каждую единицу структуры. Именно здесь и возникает принципиальная сложность. Способ проведения исследования можно проиллюстрировать аналогией со спектрами, получаемыми с помощью дифракционной решетки. Хорошо известно, что форма линий, нанесенных на решетку, влияет на относительную интенсивность спектров, которые получаются с помощью этой решетки. Интенсивность одних спектров может увеличиваться или, наоборот, уменьшаться по сравнению с другими. Действительно, решетки иногда линуют так, что-

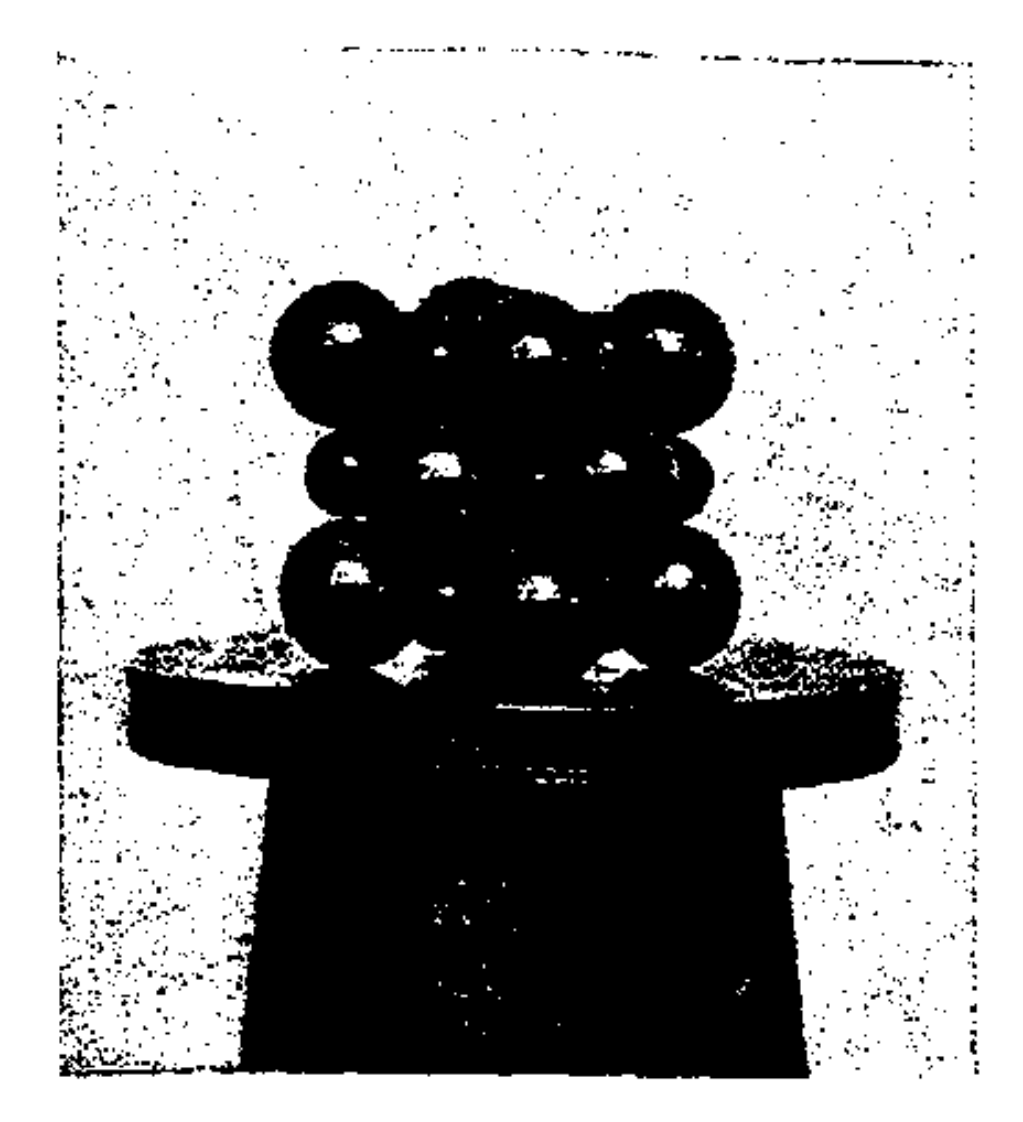


Рис. 8. *Каменная соль* (см. также рис. 1).

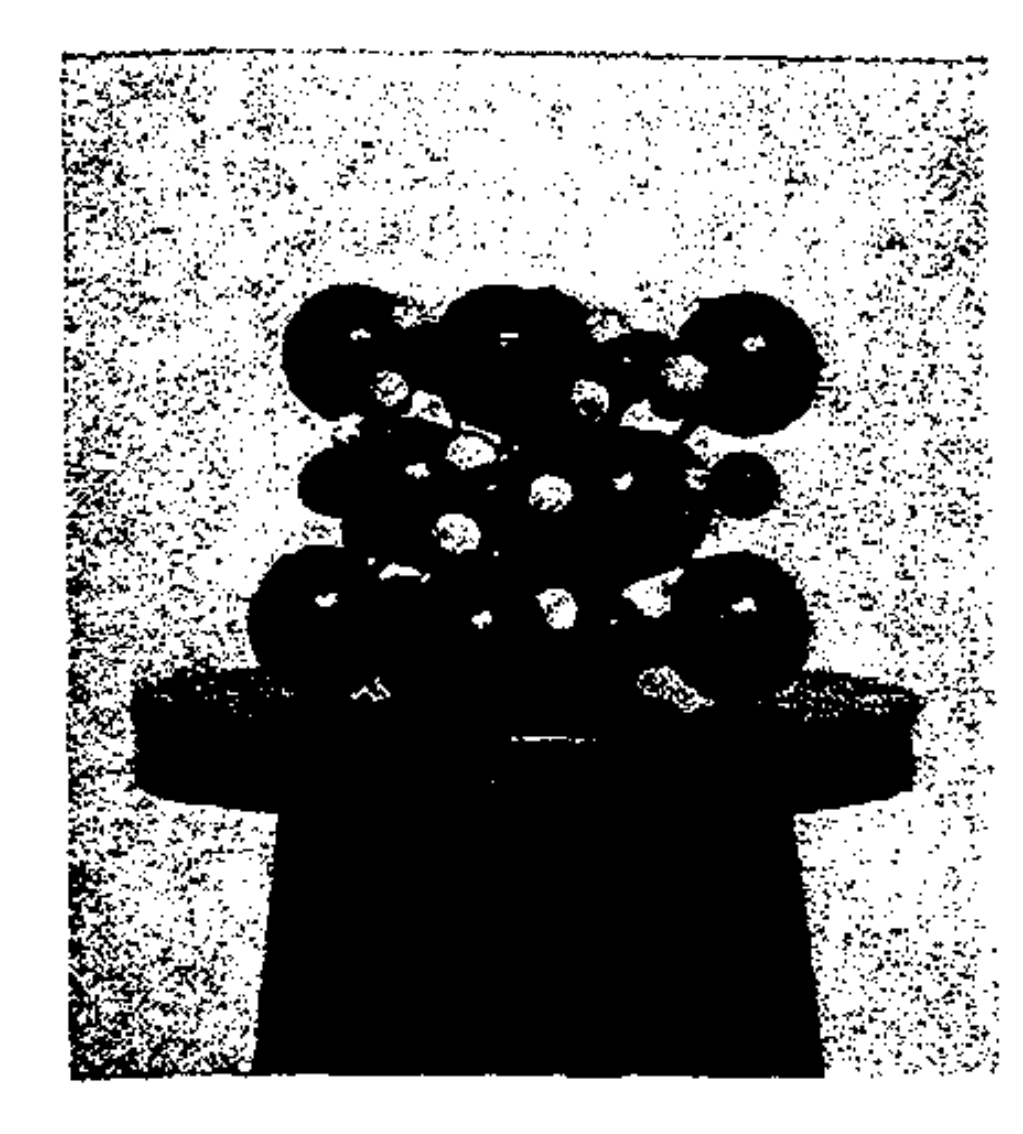


Рис. 9. *Кальцит. Большой темный шарик* — это атом кальция; *маленький темный шарик* — углерод; *белый шарик* — кислород.

бы большая часть энергии уходила в спектры, наиболее значимые для исследования. Форма линий решетки не влияет на положения спектров,

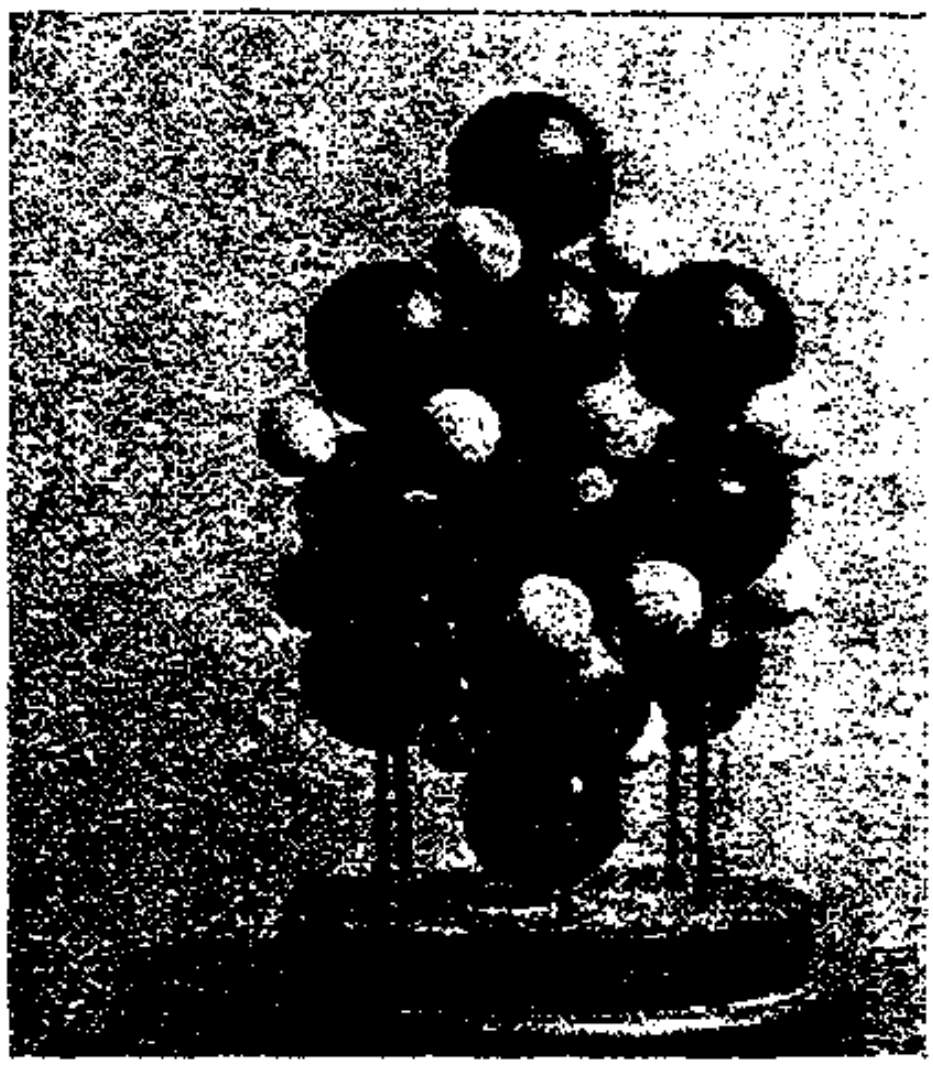


Рис. 10. *Корунд* (Al_2O_3). Тип симметрии аналогичен симметрии в кальците. Ось вертикальна. *Темные шарики* представляют алюминий, *белые шарики* — кислород.

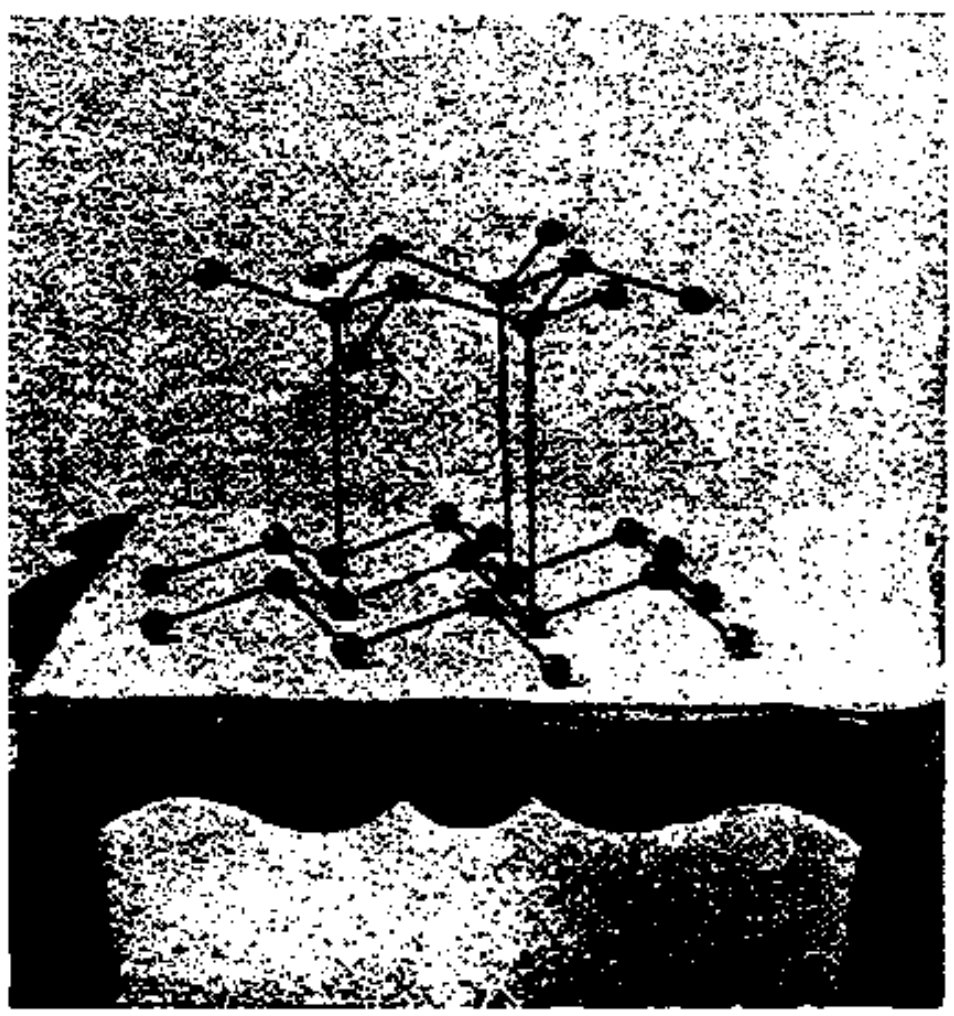


Рис. 11. *Графит.*

которые зависят только от их количества на каждом сантиметре решетки, но при этом отдельные линии рассеивают больше света в одних

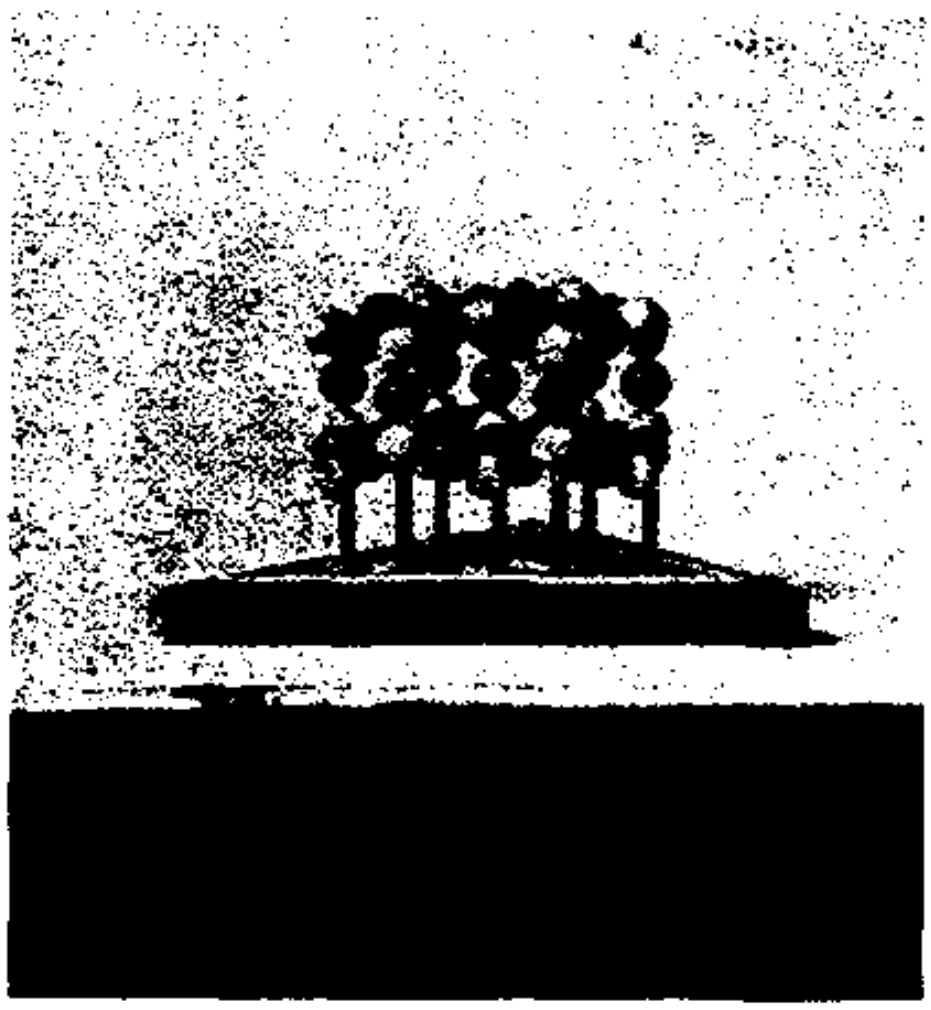


Рис. 12. *Лед* (H_2O). *Белые шарики* представляют атомы кислорода, *черные шарики* — атомы водорода. Атомы кислорода расположены так же, как атомы углерода в алмазе. Каждый атом водорода расположен посредине между двумя атомами кислорода.

направлениях, чем в других, что усиливает спектры, лежащие в этих направлениях.

Структура группы атомов, которая составляет единицу кристаллической решетки, точно так же влияет на силу различных отражений. Лучи преломляются электронами, сгруппированными вокруг центра каждого атома. В некоторых направлениях атомы дают сильно рассеянный пучок лучей, а в других их эффекты почти уничтожают друг друга в процессе интерференции. Точное расположение атомов следует выводить из сравнения силы отражений от различных граней и в разном порядке.

В своей ранней работе мы сделали некоторые допущения, чтобы распутать сложный клубок, созданный отражениями от некоторых кристаллов. Мы предположили, что дифракция происходит в центре каждого атома, как если бы все влияние было сосредоточено именно там. Затем мы предположили, что влияние атома пропорционально его атомному весу. Как показало более глубокое исследование, все эти допущения справедливы лишь очень приблизительно. Однако теория показывает, что при малейшем изменении относительного положения атомов сила рассеянных пучков изменяется настолько, что эти допущения могут служить для точного определения этих положений. Мы проанализиро-

вали таким образом несколько простых кристаллов, примеры которых представлены на фотопластинках, прилагаемых к данной лекции.

В рентгеновском спектрометре используется монокристалл. Во время первых экспериментов мы исследовали большие кристаллы, отражающие от естественных или искусственно подготовленных граней. Однако это не обязательно, так как ионизационная камера является настолько чувствительным детектором рентгеновского излучения, что можно исследовать даже очень маленькие кристаллы шириной один-два миллиметра. В этом случае лучи отражаются всем объемом кристалла, который не достаточно велик, чтобы сильно их поглотить. Маленький кристалл можно поместить в центре прибора, расположив его так, чтобы зона была параллельна оси, а затем поворачивать, чтобы поочередно наблюдать отражение от различных граней. Таким образом, рентгеновский спектрометр можно использовать способом, весьма напоминающим тот, который использует кристаллограф, чтобы измерить кристалл гониометром. Однако наш метод является более исследовательским. Гониометр может измерить только углы между гранями, выросшими на кристалле, тогда как рентгеновский спектрометр измеряет углы между плоскостями структуры кристалла и расстояния между плоскостями, хотя кристалл при этом может и не иметь правильной внешней формы.

Во многих случаях невозможно получить даже маленькие идеальные кристаллы. Прекрасный метод исследования, который предложили Дебай и Шеррер в Германии и Халл в Америке, устранил эту сложность. В их методе монохроматический пучок рентгеновских лучей падает на массу кристаллического порошка. Некоторые крошечные кристаллы будут расположены так, чтобы отразить лучи для каждой грани и порядка и тем самым создать серию дифракционных гало, которые фиксируются на фотопластинке. С помощью этого метода Халл исследовал структуру очень большого количества элементов, включая большинство металлов. Этот метод замечательно подходит для изучения сложных веществ, которые не образуют больших кристаллов, но имеют очень простую структуру. Сам по себе он не слишком хорошо подходит для анализа сложных кристаллов, так как в нем нет ничего, что указало бы на то, какие плоскости создали наблюдаемые на пластинке дифрагированные лучи. Однако очень часто ключ к объяснению запутанных данных можно получить при исследовании отражения от установленной плоскости маленького монокристалла; это дает нам возможность сопоставить линии на фотографии Дебая с правильными плоскостями кристалла.

Метод исследования кристаллов Дебая таит в себе такие возможности развития, которые еще почти не были затронуты. С помощью

этого метода можно исследовать сложную смесь различных кристаллов, поскольку каждое вещество дает свою характерную серию гало. Это совершенно новый подход к таким проблемам, как структура сплавов или минералов, поскольку он показывает нам не только их составляющие, но и то, как они объединяются в твердые тела, то есть как их кристаллическую структуру, так и химическую.

Дальнейшее развитие порошкового метода, который показал себя очень интересным, состоит в изучении коллоидных частиц. Шеррер показал, что частицы металлов в коллоидном состоянии образованы крошечными кристаллами; ему даже удалось оценить размер частиц, наблюдая уширение гало, вызванное утратой разрешающей способности из-за малого количества отражающих плоскостей в любой отдельно взятой частице.

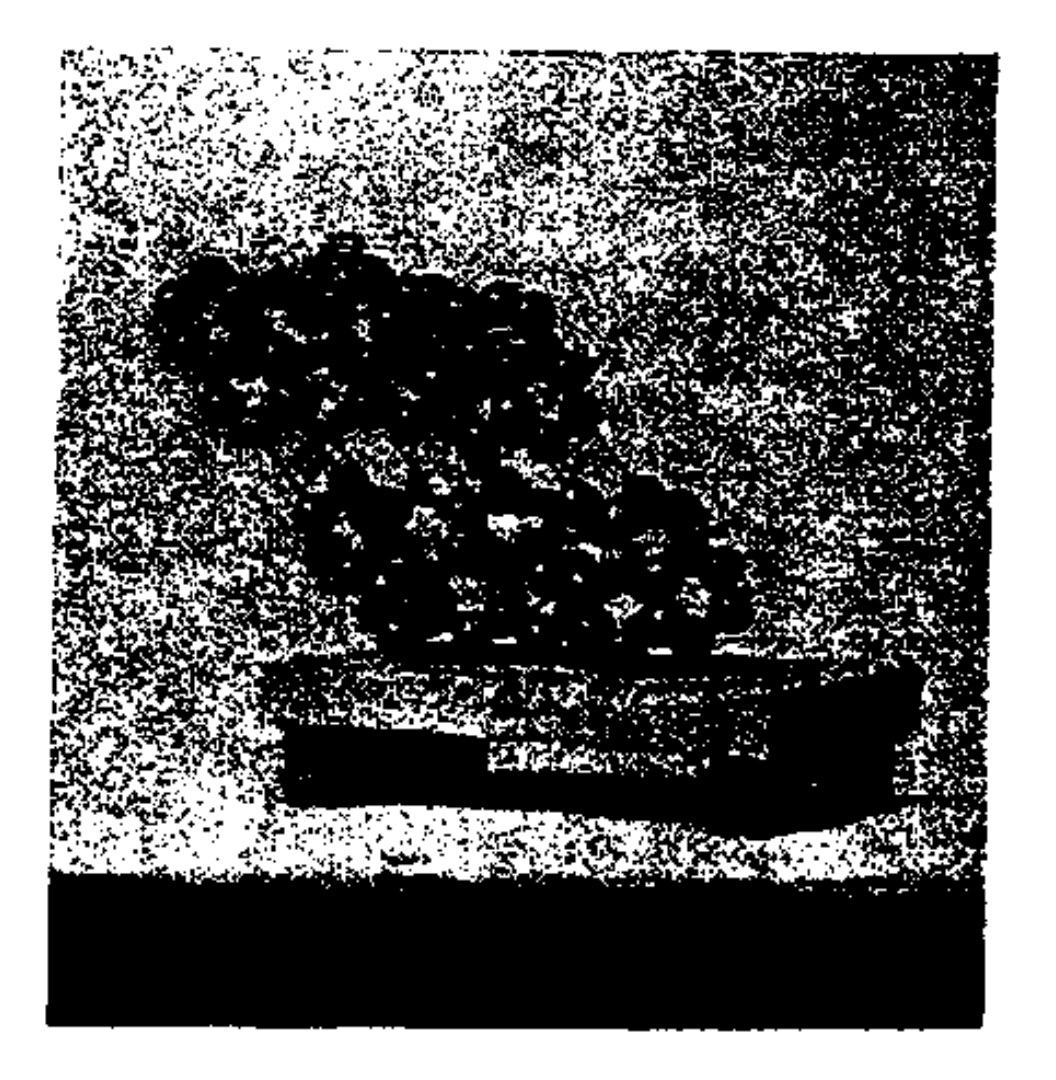


Рис. 13. *Нафталин* ($C_{10}H_8$). Двойные кольца из *серых шаров* представляют двойные бензольные кольца атомов углерода. Положения атомов водорода обозначены *черными* и *белыми шарами*.

Судя по всему, вряд ли есть хоть один тип материи в истинно твердом состоянии, который мы не могли бы попытаться исследовать с помощью рентгеновских лучей. Впервые стало известно расположение атомов в твердых телах; впервые мы можем наблюдать, на каком расстоянии друг от друга находятся атомы и как они группируются. Важность этого состоит в том, что данный метод проливает свет на химический

состав веществ. С помощью рентгеновских лучей пока что были исследованы очень немногие кристаллы, и те, которые были исследованы, имеют очень простой состав, но по мере увеличения знаний о кристаллической структуре мы должны получить гораздо более глубокое понимание природы сил, связывающих атомы воедино. Один тип химической связи уже нашел свое подтверждение. В структуре, подобной структуре хлорида натрия (рис. 1), атомы натрия и хлора не соединяются в химические молекулы, но располагаются, чередуясь, на равном расстоянии от нескольких соседей. Это можно объяснить, предполагая, что эти атомы ионизуются в кристаллической структуре и вся структура удерживается вместе благодаря притяжению противоположно заряженных ионов. Это согласуется с теориями Косселя о составе сложных веществ, а работа Борна и Ланде показала, что мы можем проводить количественные сравнения электрической потенциальной энергии такого ансамбля ионов и теплоты образования твердого тела из его составляющих. Это один из первых шагов к объяснению химического сродства через знакомые физические силы.

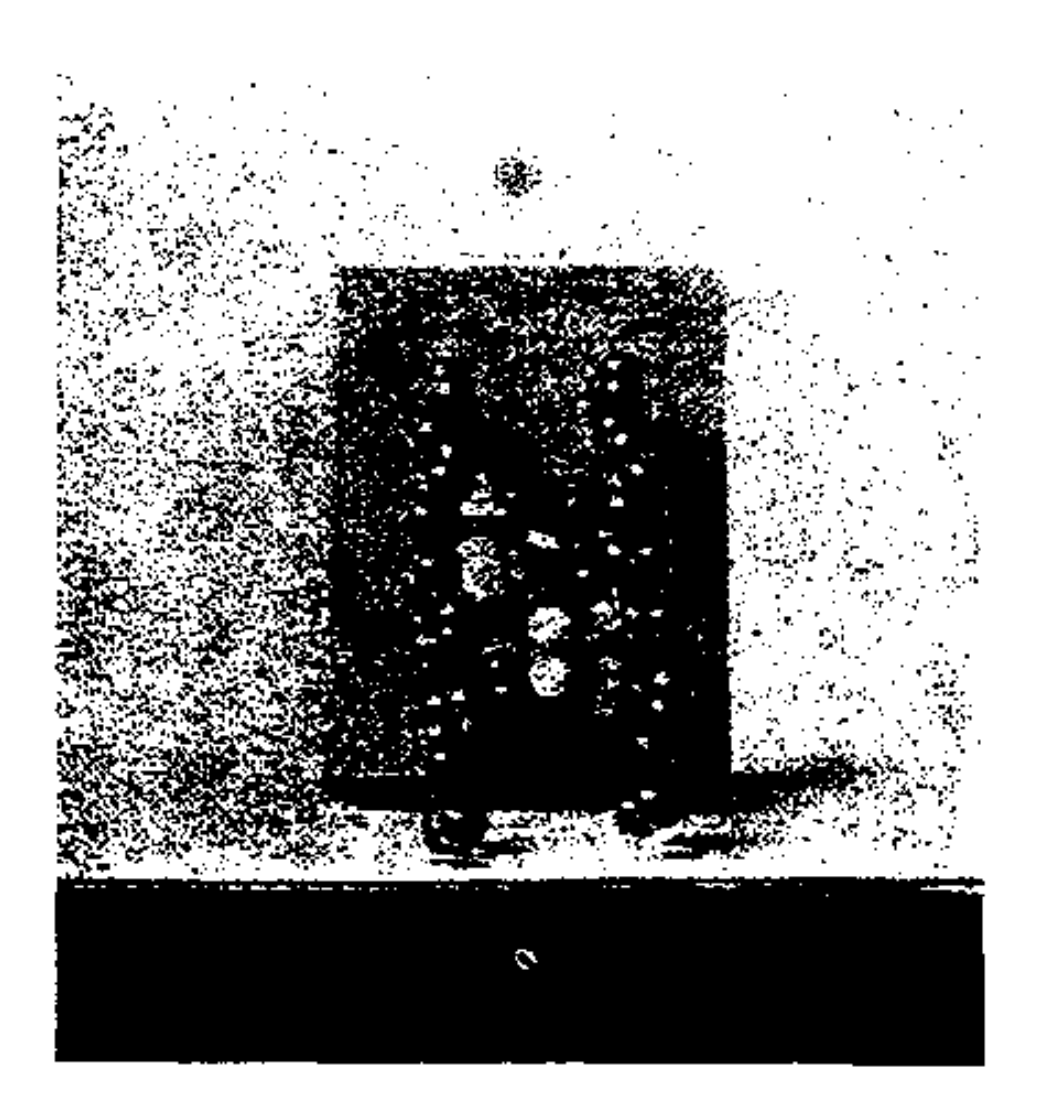


Рис. 14. *Нафталин* ($C_{10}H_8$). Та же модель, что и на рис. 13, но рассматриваемая перпендикулярно оси С.

С другой стороны, химический состав сложного вещества помогает определить его кристаллическую структуру. В более сложных кристаллах может быть так много разных группировок атомов, что можно

растеряться, не зная, с чего начать определение различных положений атомов, чтобы объяснить эффекты рентгеновской дифракции. Знание наиболее вероятной конфигурации атомов и расстояний между ними, каким бы приблизительным оно ни было, очень и очень помогает нам. Вероятно, это можно проиллюстрировать на примере структур ароматических органических сложных веществ, некоторые из которых недавно удалось исследовать моему отцу. Симметрия кристаллов таких веществ, как нафталин, антрацен и их производных, очень низка, а их молекулы состоят из очень большого количества атомов, поэтому исследовать их структуры было бы очень сложно. Однако предполагалось, что размер бензольных колец в этих кристаллах примерно равен размеру соответствующих колец в алмазе и графите. При таком допущении данные по размерам элементарной ячейки для всех этих сложных веществ связаны друг с другом некоторыми соотношениями. Бензольное кольцо можно рассматривать как отдельную единицу, и в структуре кристалла нужно найти пространство, чтобы в каждую единичную клетку можно было вставить как минимум одно такое кольцо. Возможно, следуя подобным линиям рассуждения, нам удастся найти решения для многих других сложных кристаллов, которые в настоящее время кажутся безнадежными.

Наконец, исследование с помощью рентгеновских лучей можно применить и к еще более глубоким областям — структуре самого атома. Поскольку длина волны рентгеновских лучей не превышает «диаметр атома», определенный несколько приблизительно, и поскольку эти лучи предположительно преломляются электронами, находящимися в атоме, мы должны суметь получить некоторое представление о распределении этих электронов точно так же, как мы делаем выводы относительно группирования атомов. Между волнами, рассеянными электронами, должна произойти интерференция. Для изучения этого вопроса нужно более тщательно исследовать механизм отражения рентгеновских лучей. Эту проблему пытались решить многие ученые, в том числе, Дарвин в Англии, Дебай в Германии, Комптон в Америке. Мы стремились получить точные количественные определения силы отражения рентгеновских лучей, причем нашей целью было измерить количество излучения, рассеянного атомом во всех направлениях при прохождении через него рентгеновского луча. Эта задача изобилует сложностями, а допущения, на которых основана теория отражения, еще не доказаны полностью. С другой стороны, судя по всему, существует перспектива того, что данный метод обеспечит эффективный способ проверки различных моделей, предложенных для атома, поскольку можно вычислить характер

дифракции рентгеновских лучей этими моделями и сравнить с реальными наблюдениями.

В этой лекции я дал лишь очень краткое описание многих направлений исследования, которые возникли из открытия фон Лауэ. Мне бы, конечно, хотелось сделать для этого предмета, который я вам описал, еще больше, чтобы оправдать наивысшую любезность, которую вы оказали мне, присудив эту премию, но война прервала работу на много лет, и с тех пор вся университетская деятельность в Англии много раз реорганизовывалась, поэтому заниматься исследованиями было очень сложно. Но мне хотелось бы завершить свое обращение, выразив вам свою благодарность за предоставленную мне возможность обратиться к вам, а также за все то, чем я вам обязан.

Биография

Уильям Лоуренс Брэгг, сын Уильяма Генри Брэгга, родился 31 марта 1890 года в Аделаиде (Южная Австралия). Среднее образование он получил в колледже св. Петра в родном городе, а затем поступил в Аделидский университет, где в 1908 году получил степень по математике с отличием. В 1909 году он вместе с отцом приехал в Англию и поступил в Тринити-колледж (Кембридж) как студент Аллена, и в 1912 году с отличием сдал «Треножник по естественным наукам». Осенью того же года он начал исследовать явление фон Лауэ и в ноябре опубликовал свою первую работу по этому предмету в *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* (Труды Кембриджского философского общества).

В 1914 году его назначили членом совета и лектором по естественным наукам в Тринити-колледже, и в том же году он был награжден медалью Барнарда. С 1912 по 1914 г. Лоуренс работал вместе со своим отцом, а результаты их работы в сжатом виде были опубликованы в труде «Рентгеновские лучи и структура кристалла» (*X-rays and Crystal Structure*, 1915). Именно эта работа принесла им совместную Нобелевскую премию по физике в 1915 году, и, начиная с этого года по 1919 г. У. Л. Брэгг работал техническим консультантом по акустическому измерению расстояний в отделе картографии в ставке главного командования Франции, получив в 1918 г. Орден Британской империи и став членом конгресса. В 1919 году его назначили Лангуортским профессором физики в Манчестерском университете, где он работал до 1937 года.

Уильям Лоуренс Брэгг, которого в 1921 году избрали членом Королевского общества, в 1937–1938 гг. был директором Национальной

физической лаборатории, а с 1938 по 1953 г. — Кавендишским профессором экспериментальной физики в Кембридже. С 1958 по 1960 г. он был председателем Консультативного комитета по частотам.

Посвященный в 1941 г. в рыцари, сэр Лоуренс имеет степень магистра гуманитарных наук (Кембридж), является почетным доктором (Дублин, Лидс, Манчестер, Лиссабон, Париж, Брюссель, Льеж и Дарем), почетным доктором философии (Кельн) и почетным доктором права (колледж св. Эндрюса). Он является почетным членом многих научных обществ и почетным или иностранным членом Американской, Французской, Шведской, Китайской, Нидерландской и Бельгийской академий наук, а кроме этого, он еще и почетный член Французского общества минералогии и кристаллографии.

В 1931 году сэр Лоренс был награжден медалью Хьюза Королевского общества; в 1946 году Королевской медалью того же общества, а в 1948 году — медалью Реблинга Американского минералогического общества.

Вместе со своим отцом, после первой совместной публикации 1915 года, он опубликовал различные научные работы по структуре кристаллов: «Кристаллическое состояние» (*The Crystalline State*, 1934), «Электричество» (*Electricity*, 1936) и «Атомная структура минералов» (*Atomic Structure of Minerals*, (1937)).

В настоящее время[1] сэр Лоуренс занимается, главным образом, применением рентгеновского анализа к структуре белковых молекул, которые исследуются в Лаборатории Дэви и Фарадея в Королевском институте, продолжая работу, которую он начал еще в Кавендишской лаборатории в Кембридже. В результате этой совместной работы впервые удалось определить структуру очень сложных молекул живой материи.

Получив Нобелевскую премию в очень молодом возрасте (тогда ему было всего 25 лет), Уильям Лоуренс Брэгг так и остался самым молодым ее лауреатом. Очень редкой возможности отпраздновать золотой юбилей получения Нобелевской премии было уделено особое внимание во время декабрьской церемонии вручения премии 1965 года, когда сэр Лоуренс, по приглашению Нобелевского фонда, прочитал лекцию — первую Нобелевскую лекцию гостя — о развитии интересующей его области за последние пятьдесят лет.

В 1921 году он женился на Элис-Грейс-Дженни (урожденной Хопкинсон) из Кембриджа. У них родились два сына (старший из которых стал главным консультантом Роллс-Ройса, а младший работает в Кем-

[1]Сэр Уильям Лоуренс Брэгг умер 1 июля 1971 г., а данная биография была написана еще при его жизни. — *Прим. пер.*

бриджской приборостроительной фирме) и две дочери (старшая из которых вышла замуж за служащего Министерства иностранных дел, а младшая — за сына главы Кристи-колледжа в Кембридже).

В 1916 году премия не присуждалась.

Чарлз Гловер Баркла

«за открытие характеристического рентгеновского излучения элементов»

Чарлз Гловер Баркла

Характеристическое рентгеновское излучение

Нобелевская лекция, 3 июня 1920 г.

Мне было несколько сложно решить, о чем я должен сегодня рассказывать. Большая часть моей работы по характеристическому излучению в настоящий момент является сравнительно старой и может быть знакома многим из вас, поскольку о ней было рассказано в таких работах, как *Ежегодник радиоактивности и электроники* и *Атомная динамика* профессора Штарка. Вследствие этого я остановлюсь лишь на двух моментах, которые в последнее время представляют значительный интерес, — во-первых, на результатах своих собственных экспериментов, связанных с квантовой теорией излучения, а во вторых, на обнаружении еще одной серии характеристического излучения — J-серии[1].

Квантовая теория излучения

Явления рассеяния. Результаты экспериментов по рассеянию рентгеновских лучей, связь которых с квантовой теорией излучения несомненна, можно кратко описать следующим образом.

[1]Ссылки на оригинальные работы автора можно найти в Бакерианской лекции 1916 г., опубликованной в *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Философские труды Королевского общества), 1917 г.

Когда рентгеновские лучи проходят сквозь материю любого рода, эта материя становится источником излучения, которая по своим свойствам напоминает падающее на нее первичное излучение. Изменение интенсивности этого рассеянного излучения вокруг первичного луча в зависимости от направления говорит о небольшой поляризации первичного излучения, исходящего непосредственно из рентгеновской трубки.

Рассеянное излучение, движущееся в направлении, перпендикулярном направлению распространения первичного излучения, сильно поляризовано, подобно свету, рассеянному небом.

Изменение интенсивности рассеянного излучения в направлении оси первичного излучения в некоторых пределах очень точно согласуется с теоретическим распределением, заданным уравнением

$$I_0 = I_{\pi/2}(1 + \cos^2\theta),$$

которое непосредственно выводится из общепринятой теории электромагнитных волн. Эти экспериментальные результаты рассматриваются как с необходимостью следующие из такой теории.

Как бы ни было сложно объяснить два первых результата на основе теории квантов или что-нибудь другого, т. е. на основе любой теории, принимающей, что само излучение существует в виде определенных неделимых порций или квантов, быть может, самым сильным свидетельством против этого является экспериментальная проверка (в определенных пределах) вышеприведенного уравнения. Вывод этого уравнения существенно предполагает зависимость от направления не числа неделимых объектов, а плотности энергии вокруг отдельного излучающего заряда, которым в данном случае является электрон.

Измерение энергии рассеянного излучения является одной из наиболее тщательных и критических проверок, которую можно применить к любой теории. Ранее автор заключил, что излучение рассеивают не атомы, не молекулы и не ионы газа, а составляющие материю электроны, и что, в общем случае, для легких атомов количество электронов на атом пропорционально атомному весу[1]. Часть пучка лучей, теряющаяся при рассеянии в кубическом сантиметре вещества, через которое прошел луч, Дж. Дж. Томсон определил как

$$f = \frac{8\pi}{3} N \frac{e^4}{m^2} \mu^2,$$

[1]За исключением водорода.

где N — это количество частиц, имеющих заряд e и массу m, в одном кубическом сантиметре. При первом применении этого выражения к экспериментальным данным показалось, будто количество электронов в атоме в несколько раз превышает атомный вес. Однако после более точного определения значений N, e/m и e вычисленное значение количества электронов в атоме уменьшилось, пока при использовании самых последних значений этих величин обозначенное число не стало равно одному электрону в атоме водорода, шести — в атоме углерода, семи — в атоме азота, восьми — в атоме кислорода, пятнадцати или шестнадцати — в атоме серы и т. д.

Поскольку все эти выводы относительно числа электронов (внешних электронов) в атоме подтвердились исследованиями Резерфорда, Бора и Мозли, совершенно логично использовать это соответствие как свидетельствующее в поддержку теории излучения, на которой оно было основано. Вероятность случайного достижения подобного соответствия является почти бесконечно малой, ибо, в отличие от классической теории электромагнитного излучения, интенсивность рассеянного излучения могла бы составить что-то между — скажем — одной тысячной долей того, что наблюдалось в ходе эксперимента, и величиной, в тысячу раз превышающей наблюдаемую. Тем не менее, величина, экспериментально определенная в 1904 году, согласуется с вычисленной величиной настолько точно, насколько точно можно оценить давление воздуха, при котором проводились эксперименты!

Это подтверждение является совершенно замечательным. Оно основано на теории распространения волн, которая допускает, что рассеянное излучение — это излучение, происходящее вследствие возмущения электронов, вызванного влиянием электростатического поля первичного излучения.

Данная теория предполагает, что электроны могут испускать излучение в любых количествах и что оно не ограничивается какими-то порциями или квантами, а также, что это излучение является непрерывным процессом и не зависит от какого-либо ограничивающего или критического условия.

Кроме того, я обнаружил, что интенсивность излучения, рассеянного легкими элементами, в заметных пределах плавно меняется с длиной волны первичного излучения. Это полностью согласуется с теорией, основанной на допущении независимого действия электронов. Дальнейшие эксперименты показали, что интенсивность излучения, рассеянного тяжелыми атомами, в которых составляющие электроны расположены более тесно, быстро и, по-видимому, непрерывно растет вместе с длиной

волны излучения, если только она не является достаточно малой. Кроме того, в общем случае скорость роста интенсивности с длиной волны тем больше, чем тяжелее рассеивающий атом. Таких результатов опять-таки следовало ожидать, исходя из волновой теории, когда длина волны становится сравнимой с размером атома, так как фазы излучений, испущенных соседними электронами, очень близки друг к другу. В конечном счете, не отдельный электрон, а целая группа электронов движется как единое целое и становится единицей рассеяния. (Когда эта группа включает в себя все электроны, имеющиеся в атоме, рассеяние в атоме согласно этой теории становится пропорциональным квадрату атомного номера, а не самому атомному номеру, как это бывает при независимом рассеянии света электронами.)

Таким образом, в явлении рассеяния нет ни намека на квант, или нечто подобное, ни указания на какую-либо прерывность процесса излучения, но есть некоторая доля сильного положительного свидетельства против любой подобной теории. Эти результаты кажутся убедительными, так как мы проводили очень тщательные проверки, используя весьма чувствительные инструменты. Наблюдаемые явления становятся бессмысленными, если их рассматривать с точки зрения теории квантов или какого-либо объекта. Этот вывод также касается поглощения, так как при распространении рентгеновских лучей, особенно с короткой длиной волны, сквозь материю, состоящую исключительно из легких элементов, практически вся поглощенная энергия вновь испускается в виде рассеянного излучения. Количества излучения, испущенные каждым электроном, почти равны поглощенным. Следовательно, *этот* процесс поглощения также является процессом, который происходит в любом количестве и не ограничен никакими критическими условиями.

Характеристическое излучение. Каждый элемент при прохождении через него рентгеновских лучей испускает характерное только для него рентгеновское излучение; каждое характеристическое излучение не зависит от изменений физических условий или состояния химической комбинации излучающего элемента, а его качество не зависит от качества возбуждающего первичного излучения. Но возбудить характеристическое излучение способно только более коротковолновое первичное излучение — это обобщение закона Стокса о флуоресценции.

Все доселе наблюдаемые излучения распадались на три серии: K-, L-, и M-серии (M-серию открыли Сигбан и его сотрудники). Кроме того, существует весьма веское свидетельство наличия серии с более высокой частотой — J-серии. О ней мы поговорим позднее. Метод поглощения,

использованный для анализа излучения, показал, что излучение К-серии от конкретного элемента является настолько однородным, что его стали рассматривать как дающее спектральную линию — К-линию; но очевидная разнородность L-излучения навела на мысль о возможности существования L-излучения, состоящего из более чем одной линии.

Однако эксперименты по интерференции, проведенные Брэггом, Мозли и другими, показали, что и К-, и L-излучения дают спектры, состоящие из нескольких расположенных рядом линий.

Однородность распределения характеристического излучения вокруг излучающего вещества, существующая даже при поляризации первичного пучка лучей, показывает, что, в отличие от процесса эмиссии рассеянного излучения, эмиссия характеристического излучения абсолютно не зависит от первичного излучения, которое ее возбуждает. Явление эмиссии — это не прямое, а косвенное следствие прохождения первичного луча, и сам процесс зависит от некоторого критического условия, как свидетельствует закон Стокса. Здесь появляется возможность применения своего рода разновидности теории квантов. Самое серьезное свидетельство о происхождении характеристического излучения дает изучение сопутствующих явлений: поглощения возбуждающего первичного излучения и эмиссии электронов из излучающего вещества в виде корпускулярного излучения. Я показал, что полное поглощение первичного излучения в веществе, через которое оно проходит, можно разложить на предположительно независимые поглощения, каждое из которых — за исключением вызванного процессом рассеяния — определенным образом связано с эмиссией характеристического рентгеновского излучения. Таким образом, можно говорить о J-, K-, L-, M-поглощениях. Аналогично, корпускулярное излучение можно разложить на корпускулярные J-, K-, L-, M-излучения, каждое из которых связано[1] с эмиссией соответствующего характеристического рентгеновского излучения.

Результаты, полученные при изучении энергии поглощенного первичного пучка и энергии испущенных характеристического и корпускулярного излучений имеют огромную важность. В некоторых веществах — в броме и, вероятно, веществах с большим атомным весом — почти вся энергия первичного пучка, поглощенная в связи с эмиссией характеристического К-излучения, вновь испускается частично в виде характеристического рентгеновского излучения К-серии и частично в виде корпускулярного излучения К-серии. Но дело не только в этом, так как существует еще и определенное соотношение между интенсивностью К-

[1]Вероятно, в случае Т-излучения.

излучения и количеством электронов, испущенных в связанном с ним корпускулярном излучении. Судя по всему, для различных длин волн первичного излучения отношение количества квантов флуоресцентного K-излучения к количеству испущенных K-электронов примерно равно 1. Фактически, на практике получались такие значения: 1,09, 0,95, 0,85, 0,81, 0,90. Максимальное отклонение от единицы, равное 19 процентам, чрезвычайно мало, если учитывать количество и характер экспериментальных определений. Если не принимать во внимание теорию квантов, диапазон возможных значений так велик по сравнению с наблюдаемыми вариациями, что эмиссию одного кванта характеристического рентгеновского излучения на каждый электрон в сопутствующем корпускулярном излучении следует рассматривать как экспериментально установленный факт. Если бы оба вторичных K-излучения, корпускулярное и характеристическое рентгеновское, отвечали за всю поглощенную K-энергию, то вся она (K-поглощение) должна была бы делиться на долю $n/(n + n_k)$, вновь испускаемую в виде корпускулярного K-излучения, и долю $n_k/(n + n_k)$ вновь испускаемого флуоресцентного рентгеновского K-излучения, где n и n_k — это частоты первичного и характеристического излучения соответственно. В действительности, когда n немного больше, чем n_k, два вторичных излучения отвечают примерно за 88 % первичного излучения. По мере увеличения n энергии флуоресцентного и корпускулярного излучений остаются практически взаимодополняющими, так что энергия первого излучения уменьшается при увеличении энергии второго. Между наблюдаемыми долями энергии и долями, вычисленными с помощью вышеприведенных выражений, действительно существует очень близкое соответствие. Однако может быть так, что, кроме одного кванта L-излучения, для каждого вырванного K-электрона испускается еще один квант L-излучения. Если основываться на таком предположении, то наблюдаемое и вычисленное значения согласуются даже в большей степени. Каким бы ни был процесс излучения, вряд ли можно сомневаться в том, что характеристическое излучение испускается в виде квантов теми атомами, из которых был вырван электрон.

Однако те же самые отношения энергий показывают, что поглощение происходит *не* квантами первичного излучения. Каждый поглощающий атом, то есть каждый атом, который, в конечном итоге, испускает электрон, поглощает энергию одного кванта первичного излучения плюс энергию одного кванта характеристического излучения, что равно $(1 + n_k/n)$ кванта первичного излучения. Это может составлять от одного до двух квантов. Все свидетельствует о том, что характеристическое излучение испускается сразу после высвобождения электрона из атома.

Подводя итог, можно сказать, что все имеющиеся в нашем распоряжении свидетельства говорят о том, что рентгеновское излучение может испускаться и испускается электронами, в некоторых случаях, возможно, группами электронов, или даже атомами, причем происходит это в виде непрерывного процесса и в любом количестве. Это излучение часто испускается в количествах, почти бесконечно малых по сравнению с квантом. Однако оно испускается в виде квантов из атомов, когда достигаются некоторые критические условия, приводящие к высвобождению некоторых электронов; тогда процесс излучения происходит совершенно определенным образом, включая излучение определенного количества энергии, пропорционального частоте колебания (закон Планка: $E = hn$).

Поглощение обычно также происходит в очень крошечных количествах, которые невероятно малы по сравнению с квантом. Но при некоторых процессах, которые обычно отвечают почти за все поглощение, излучение поглощается количествами, превышающими размер кванта первичного излучения, причем эти количества в зависимости от условий варьируются от одного до примерно двух квантов. Свидетельств поглощения рентгеновского излучения целыми квантами нет, хотя условия нередко бывают такими, что это происходит приближенно.

Создается впечатление, что все эти факты указывают на то, что кванта излучения в том смысле, в каком он часто использовался (т. е. как неделимая порция энергии излучения), не существует. Процесс излучения может быть, и является, непрерывным, по крайней мере, в пределах, простирающихся в область гораздо меньших величин, нежели квант. Квант является единицей атомной энергии, которая должна быть поглощена, чтобы изменить конфигурацию атома, и испускается, когда конфигурация возвращается в первоначальное состояние. Таким образом, он непременно появляется в некоторых процессах поглощения и излучения.

Вероятные J-серии излучения

Недавние исследования привели меня к выводу о том, что характеристическое излучение более высокой частоты, чем K-излучение (образующее в различных элементах J-серию), вероятно, испускают все легкие элементы. Дело в том, что различные эксперименты: 1) по поглощению рентгеновских лучей, 2) ионизации газов рентгеновскими лучами и 3) по интенсивности корпускулярного (электронного) излучения из фото-

пластинок, подвергнутых действию рентгеновских лучей, — показывают, что уменьшение длины волны первичного рентгеновского излучения сопровождается внезапным увеличением измеряемого эффекта. Это увеличение неизменно обнаруживалось в сопровождении характеристического рентгеновского излучения и оно до сих пор не наблюдалось, кроме как вместе с этим излучением.

Кроме того, величины критических длин волн, определенные с помощью этих трех методов, близко согласуются друг с другом.

Как и в случаях с явлениями, сопутствующими характеристическому K-, L- или M-излучению, увеличение атомного веса элемента сопровождается уменьшением критической длины волны этого элемента.

Однако получить прямое свидетельство эмиссии характеристических J-излучений оказалось не так просто, как это могло показаться из предварительных экспериментов. Казалось, что некоторые экспериментальные результаты указывают на то, что, хотя J-излучения неотделимы от самого рассеянного излучения, их существование несложно продемонстрировать. Однако они оказались более неуловимыми, чем мы думали после проведения первых экспериментов. Эксперименты, проводимые в настоящее время, постепенно совершенствуются, и мы надеемся, что нам удастся обеспечить прямое доказательство, которое мы ищем. Однако следует заметить, что свидетельство, полученное из экспериментов с характеристическим K-излучением позволяет ожидать лишь очень слабого характеристического излучения из этих легких элементов, так как из энергии первичного пучка, поглощенной в связи с эмиссией флуоресцентного характеристического K-излучения — т. е. K-поглощения, — доля, преобразованная в это характеристическое рентгеновское излучение, быстро уменьшается с ростом атомного веса элемента, так что из этих легких элементов даже из «K-поглощения» лишь очень маленькая доля появляется в виде характеристического K-излучения. Таким образом, максимальное значение отношения K-излучение (энергии)/K-поглощение (энергии) равно около 40 процентов в меди, 30 процентов — в железе, 20 процентов — в хроме. При этом множество признаков указывает на то, что в самых легких элементах оно становится действительно очень маленьким. Кроме того, «J-поглощение» в этих легких элементах является лишь очень малой долей поглощения при рассеянии, скажем, порядка 15 процентов. Следовательно, разумно было бы ожидать, что энергия флуоресцентного излучения из алюминия, кислорода, азота и углерода будет гораздо меньше, чем 3–15 процентов от 20 процентов рассеянного излучения; насколько меньше — предсказать невозможно, но, вероятно, менее одного процента. Однако мы рассуждаем,

исходя из опыта, который мы получили с «К-излучениями»; это можно было бы счесть ненадежной основой, если бы мы не нашли подтверждения в экспериментальных результатах, полученных при исследовании J-излучений.

Дуэну и другим не удалось обнаружить характеристического J-излучения, возбужденного в алюминии при его бомбардировке катодными лучами. Это может означать, что характеристическое J-излучение очень слабо по сравнению с немонохроматическим рентгеновским излучением, создаваемом в алюминии, — так как нельзя забывать, что, подобно другим характеристическим излучениям, J-излучение создается только вместе с эмиссией J-электронов, а их может быть очень мало или они могут с трудом поддаваться смещению, — или это может указывать на то, что J-излучение можно возбудить ударом катодных частиц только в очень исключительных случаях или вообще невозможно. Нельзя исключать и то, что J-электроны тесно связаны с другими электронами, положительными и отрицательными, как это может быть в ядре. Тогда катодная частица может попасть под влияние всей этой крошечной системы и отклониться, так и не вступив в достаточно тесный контакт ни с одним составляющим электроном, чтобы нарушить его устойчивость. Таким образом, несложно понять, что рентгеновское излучение влияет на отрицательные и положительные составляющие такой системы по отдельности, что равновесие нарушается и J-электроны вырываются, за чем следует эмиссия характеристического рентгеновского J-излучения, тогда как электрон корпускулярного излучения не способен создать необходимое смещение J-электрона. Этот вопрос могут решить только дальнейшие эксперименты.

Одна важная деталь открытия J-серии характеристических рентгеновских излучений заключается в том, что для нее нет места в теории излучения Бора, которая применяется к K- и L-излучениям. Однако может быть и так, что J-излучение испускается электронами в системе другого рода, например, в самом ядре, а не вне него. Но близость с другими явлениями — близость, подобная той, что наблюдается в случае с K- и L-излучениями, —- говорит о близком сходстве всего процесса. В настоящее время по данному предмету ведутся эксперименты.

Биография

Чарлз Гловер Баркла родился 7 июня 1877 года в Уиднесе (графство Ланкашир, Англия), где его отец Дж. М. Баркла был руководителем хи-

мической компании. Он учился в Ливерпульском институте, после чего в 1894 году поступил в Юниверсити-колледж в Ливерпуле, чтобы изучать математику и физику. Физику Чарлз изучал у Оливера Лоджа. В 1898 году он закончил университет с отличием по физике, а на следующий год получил степень магистра. В 1899 году он был также награжден исследовательской стипендией Королевского комитета за выставку 1851 года и поехал в Тринити-колледж (Кембридж), чтобы вместе с Дж. Дж. Томсоном работать в Кавендишской лаборатории. В 1900 году он перебрался в Кингс-колледж, а в 1902 году вернулся в Ливерпуль как стипендиат Оливера Лоджа. С 1905 по 1909 год он был сначала лаборантом, потом лектором-совместителем по физике, а потом специальным лектором по углубленному курсу электричества в университете. В 1909 году Баркла стал преемником Х. А. Вильсона на посту Уитстоновского профессора физики в Лондонском университете. В 1913 году Баркла принял кафедру натурфилософии в Эдинбургском университете, где и работал до самой смерти.

Первые исследования Барклы были связаны со скоростью распространения электрических волн вдоль проволок, но в 1902 году он начал заниматься рентгеновским излучением, которому суждено было стать основным делом его жизни. Открытие им монохроматическое характеристическое излучение элементов показало, что эти элементы имеют в рентгеновском луче свои характеристические линейчатые спектры. Он первым показал, что вторичное излучение бывает двух видов: одно состоит из рентгеновских лучей, которые рассеиваются, не изменяясь, а другое представляет собой флуоресцентное излучение, характерное именно для этого вещества. Баркла открыл поляризацию рентгеновских лучей — экспериментальный результат огромной важности, который означал, что рентгеновское излучение можно рассматривать как подобное обычному свету. Баркла сделал ценный вклад в современное знание о поглощении и фотографическом действии рентгеновских лучей, а его последующая работа продемонстрировала связь между характеристическим рентгеновским излучением и сопутствующим ему корпускулярным излучением. Он также показал применимость и ограниченность теории квантов в отношении рентгеновского излучения. Результаты его исследований зафиксированы во множестве работ, которые публиковались, главным образом, в *Transactions* и *Proceedings of the Royal Society*. У Барклы была репутация хорошего экзаменатора по физике.

Баркла, член Королевского общества, был почетным доктором нескольких университетов. В 1916 году он был назначен Бакерианским

лектором (Королевского общества), а на будущий год награжден медалью Хьюза.

В 1907 году Чарлз Гловер Баркла женился на Мэри Эстер, старшей дочери Джона Коуэлла из Дугласа, главного инкассатора доходов о-ва Мэн. У них было два сына и дочь. Их младший сын, лейтенант авиации Майкл Баркла, блестящий ученый, погиб в бою в 1943 году. Чарлз Баркла очень любил петь: у него был мощный баритон, и в 1901–1902 гг. он был членом певческой капеллы Королевского колледжа. Впоследствии он также увлекся гольфом.

Баркла умер у себя дома, в Бредвуде (Эдинбург) 23 октября 1944 года.

Макс Планк

«в знак признания заслуг в деле развития физики благодаря открытию кванта энергии»

Макс Планк

Возникновение и современное состояние теории квантов

Нобелевская лекция, 2 июля 1920 г.

Если я правильно понимаю смысл принятого мною на сегодня обязательства прочесть публичный доклад относительно моих работ, то, думаю, ничто не может лучше соответствовать выполнению этой задачи, важность которой подчеркивается для меня чувством благодарности к великодушному основателю этого учреждения, как попытка набросать в общих чертах историю возникновения теории квантов и дать вам приблизительную картину развития этой теории до настоящего времени и ее современное значение для физики.

Когда я оглядываюсь на времена 20-летней давности, — времена, когда впервые из ряда опытных фактов начали вырисовываться понятия и величина физического кванта действия, и на долгий извилистый путь, приведший в конце концов к ее открытию, то все это кажется мне теперь новой иллюстрацией к давно сказанным словам Гёте, что человек заблуждается, покуда у него есть стремления. И вся напряженная работа духа могла бы показаться прилежному исследователю тщетной

и безнадежной, если бы иногда поразительные факты не давали ему в руки неопровержимого доказательства того, что он в конце своего тернистого и извилистого пути по крайней мере хоть на шаг приблизится к истине. Преследование определенной цели, далекий свет которой не меркнет от первых неудач, является необходимой предпосылкой, хотя далеко не гарантией успеха.

Для меня такой целью уже давно было решение вопроса о распределении энергии в нормальном спектре лучистой теплоты. С тех пор как Густав Кирхгоф показал, что свойства теплового излучения, которое образуется в пустом пространстве, ограниченном любыми равномерно нагретыми поглощающими и излучающими телами, вполне независимы от природы этих тел, было доказано существование некоторой универсальной функции, зависящей только от температуры и длины волны, но никоим образом не от особенных свойств какого-либо вещества; и отыскание этой замечательной функции сулило более глубокое проникновение в сущность связи между энергией и температурой, связи, которая является главной проблемой термодинамики, а следовательно, и всей молекулярной физики. Для решения этой задачи не оставалось иного пути, как выбрать из всех различных, встречающихся в природе тел какое-нибудь одно с определенной испускательной и поглощательной способностью и вычислить свойства теплового излучения, находящегося с ним в состоянии стационарного обмена энергией. Тогда, по теореме Кирхгофа, это излучение не должно зависеть от свойств тела.

Телом, особенно пригодным для этой цели, показался мне линейный осциллятор Генриха Герца, законы излучения которого при данном числе колебаний незадолго до этого были Герцем вполне установлены. Если в пустом пространстве, окруженном зеркальными стенками, находится некоторое число таких осцилляторов, то они, так же как и акустические резонаторы и камертоны, будут, поглощая и испуская электромагнитные волны, обмениваться друг с другом энергией, и в конце концов в этом пустом пространстве установится стационарное, так называемое черное излучение, соответствующее закону Кирхгофа. Тогда я предавался надеждам, кажущимся теперь, конечно, немного наивными, что законов классической электродинамики, взятых в общем виде и освобожденных от специальных гипотез, достаточно, чтобы понять важнейшее в рассматриваемом процессе и достичь, таким образом, желанной цели. Поэтому я сначала вывел законы излучения и поглощения линейного резонатора из возможно более общих основных положений; при этом я фактически действовал обходным путем, которого мог бы вполне избежать, применяя электронную теорию Г. А. Лоренца, в то время в сущ-

ности уже законченную. Но так как я не вполне доверял электронной гипотезе, то предпочел рассматривать энергию, входящую и выходящую из шаровой поверхности, описанной определенным радиусом около резонатора. При этом рассматриваются только процессы в пустоте, знания которых достаточно, чтобы вывести необходимые заключения об изменении энергии резонатора.

Плодом этого ряда исследований — причем некоторые из них могли быть проверены сравнением с опытными данными, именно с измерениями затухания, произведенными Бьеркнесом, и при этом подтвердились — было установление общей зависимости между энергией резонатора с определенным собственным периодом и энергией излучения соответствующей спектральной области в окружающем поле при стационарном обмене энергии. При этом получился замечательный результат, что это отношение совершенно не зависит от природы резонатора, даже от его постоянной затухания — обстоятельство, особенно благоприятное и радостное для меня, так как благодаря ему всю проблему можно было упростить, заменяя энергию излучения энергией резонатора, отчего запутанная система со многими степенями свободы заменялась простой системой с одной-единственной степенью свободы.

Конечно, этот результат обозначал не более как подготовительный шаг к преодолению самой проблемы, которая теперь казалась еще неприступнее в своей страшной высоте. Первая попытка завоевать ее не удалась, так как моя первоначальная робкая надежда на то, что испускаемое резонатором излучение будет каким-нибудь характерным образом отличаться от поглощаемого, благодаря чему явилась бы возможность вывода дифференциального уравнения, интегрированием которого можно было бы получить особенные условия для свойств стационарного излучения, оказалась обманчивой. Резонатор реагировал только на те лучи, которые он сам испускал, и оказывался совершенно нечувствительным к соседним областям спектра.

К тому же мое утверждение, что резонатор может производить одностороннее, следовательно, необратимое действие на энергию окружающего поля излучения, вызвало энергичные возражения со стороны Людвига Больцмана, доказывавшего со всей своей зрелой опытностью в таких вопросах, что по законам классической динамики каждый из рассмотренных мною процессов может идти также и в совершенно противоположном направлении таким образом, что излученная резонатором шаровая волна, перемещаясь обратно, снаружи внутрь в виде непрерывно уменьшающихся шаровых поверхностей, сгустится на резонаторе и будет опять поглощена им, благодаря чему энергия, ранее им поглощен-

ная, будет снова испускаться в пространство по тому же направлению, по которому она пришла; и если даже я могу исключить подобные отдельные явления, как направленная внутрь шаровая волна, введением ограничительного предположения, а именно гипотезы естественного излучения, то все-таки из этого анализа выясняется все отчетливее, что для полного понимания сущности всего вопроса недостает еще важного связующего звена.

Тогда мне не осталось ничего другого, как попытаться одолеть эту задачу с противоположной стороны — термодинамической, где я с самого начала чувствовал себя более твердо. Здесь мне помогли мои более ранние работы по второму началу термодинамики, а именно тем, что я сразу установил отношение между энергией резонатора и его энтропией и даже не самой энтропией, но ее второй производной по энергии, ибо эта производная обладает прямым физическим значением для необратимости обмена энергией между резонатором и излучением. Так как я в то время был настроен еще слишком феноменологически, чтобы задаться вопросом о связи между энтропией и вероятностью, то я обратил прежде всего внимание на непосредственные результаты опыта. В 1899 г. наиболее интересным представлялся только что выведенный Вином закон распределения энергии, экспериментальной поверкой которого были заняты Пашен в Высшей школе в Ганновере и Луммер и Прингсхеймв Государственном физическом институте в Шарлоттенбурге. Этот закон представляет зависимость интенсивности излучения от температуры при помощи показательной функции. Вычисляя обусловленную им связь между энтропией и энергией резонатора, получаем замечательный результат, что обратная величина упомянутой выше производной, которую я обозначу здесь через R, пропорциональна энергии. Это весьма простое отношение может считаться вполне адекватным выражением закона распределения энергии Вина, потому что при помощи общеизвестного закона смещения Вина оно вместе с зависимостью от энергии дает непосредственно и зависимость от длины волны.

Поскольку при решении всей этой задачи речь шла об универсальном законе природы и так как я тогда, как и теперь, держался мнения, что закон природы выражается тем проще, чем более общим он является, причем, конечно, вопрос, какую формулировку считать более простой, не всегда может быть решен бесспорно и окончательно, то я полагал одно время, что в положении о пропорциональности величины R и энергии нужно видеть основу всего закона распределения энергии. Но такое предположение вскоре оказалось несостоятельным перед результатами новых измерений. Именно тогда как для небольших значений энергии

и для коротких волн закон Вина вполне подтвердился и в дальнейшем, для более длинных волн Луммер и Прингсхейм установили заметные отклонения, а затем измерения, произведенные Рубенсом и Курльбаумом с инфракрасными остаточными лучами плавикового шпата и каменной соли, обнаружили отношения совершенно другого рода, но также чрезвычайно простые, которые характеризуются тем, что величина R пропорциональна не энергии, а квадрату энергии, притом тем точнее, чем к большим энергиям и длинам волн мы переходим.

Таким образом, прямым опытом для функции R были определены две границы: для малых энергий — пропорциональность энергии, для больших энергий — пропорциональность квадрату энергии. Ничего не было проще, как приравнять для общего случая величину R к сумме двух членов: одного, содержащего энергию в первой степени, другого — во второй, таким образом, чтобы для малых энергий имел перевес первый член, для больших — второй, и таким образом была найдена новая формула излучения, которая вполне удовлетворительно выдерживала до сих пор экспериментальную проверку. Конечно, и сейчас нельзя говорить об окончательном подтверждении ее опытом, и весьма желательна новая проверка.

Но даже если бы эта формула излучения оказалась абсолютно точной, то она имела бы очень ограниченное значение — только как счастливо отгаданная интерполяционная формула. Поэтому я со дня ее нахождения был занят задачей установления ее истинного физического смысла, и этот вопрос привел меня к рассмотрению связи между энтропией и вероятностью, т. е. к больцмановскому образу мыслей. После нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота рассеялась и наметились новые, неподозреваемые раньше дали.

Разрешу себе здесь небольшое отступление. По Больцману, энтропия является мерой для физической вероятности, и сущность второго начала термодинамики состоит в том, что в природе какое-либо состояние встречается тем чаще, чем оно вероятнее. Но в природе измеряется всегда не самая энтропия, а только разность энтропий, поэтому без известного произвола нельзя говорить об энтропии какого-нибудь состояния. Однако все-таки рекомендуется вводить определенную абсолютную величину энтропии, исходя из того соображения, что посредством нее можно известные общие теоремы формулировать особенно просто. Здесь дело обстоит, насколько я могу судить, так же, как и с энергией, где мы обычно измеряем только ее разности. Поэтому раньше вводили в вычисления не энергию, а работу, и еще Эрнст Мах, который много занимался законом сохранения энергии, но избегал принципиально всех рассужде-

ний, выходящих из области непосредственного наблюдения, всегда старался не говорить о самой энергии. В термохимии также придерживались вначале теплового эффекта, т. е. разности энергий, пока Вильгельм Оствальд не подчеркнул, что многие сложные рассуждения могут быть значительно сокращены, если вычислять не с калориметрическими цифрами, а с самими энергиями. Добавочная постоянная, остававшаяся еще неопределенной в выражении энергии, была окончательно определена теоремой теории относительности о пропорциональности между энергией и инерцией[1].

Так же, как для энергии, можно теперь определить абсолютное значение и для энтропии, и, следовательно, для физической вероятности, определяя добавочную постоянную из условия, что энтропия исчезает вместе с энергией. На основании подобных рассуждений для вычисления физической вероятности определенного распределения энергии в системе резонаторов получается относительно простой прием комбинаторики, который прямо приводит к выражению энтропии, обусловленному законом излучения, и после многих испытанных разочарований мне доставило особенное удовлетворение, что Людвиг Больцман выразил свой интерес и принципиальное согласие с выбранным мной ходом мыслей в письме, которым он ответил на присылку моей работы.

Чтобы провести количественно упомянутое вычисление вероятности, необходимо знание двух универсальных постоянных, каждая из которых имеет самостоятельный физический смысл. Поэтому их определение из закона излучения делает возможным и решение вопроса, представляет ли весь этот способ только искусственный вычислительный прием или он имеет определенный физический смысл. Первая постоянная — более формального характера, она связана с определением температуры. Определяя температуру как среднюю кинетическую энергию одной молекулы идеального газа, т. е. ничтожно малую величину, мы получаем для этой постоянной значение $^2/_3$. В общепринятых же единицах температуры эта константа, напротив, принимает чрезвычайно малое значение, которое, естественно, стоит в тесной связи с энергией одной молекулы и точное значение которой приводит поэтому к вычислению массы одной молекулы и связанных с ней величин. Эта постоянная часто обозначается как больцмановская постоянная, хотя сам Больцман никогда не вводил ее, насколько я знаю; это странное обстоятельство объясняется тем, что Больцман, как это, по-видимому, следует из его случайных высказываний, совершенно не думал о возможности точно-

[1] Абсолютная величина энергии равна произведению массы на квадрат скорости света.

го измерения этой постоянной. Ничто не может лучше иллюстрировать успехи, достигнутые в последние 20 лет искусством экспериментирования, чем факт, что теперь открыт не один, а множество методов измерения массы одной молекулы почти с такой же точностью, как и массы планеты.

В то время когда я произвел соответствующее вычисление, исходя из формулы закона излучения, точная проверка полученного числа была вообще невозможна, и не оставалось ничего другого, как определить допустимый порядок его величины. Однако вскоре Резерфорду и Гейгеру удалось определить путем непосредственного счета α-частиц значение элементарного электрического заряда в $4{,}65 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц, согласие которого с вычисленным мной числом $4{,}69 \cdot 10^{-10}$ может рассматриваться как решающее подтверждение правильности моей теории. Впоследствии методы, разработанные Регенером, Милликеном и другими, привели к небольшому повышению этого значения.

Гораздо труднее было истолковать значение второй универсальной постоянной закона излучения, которую я назвал элементарным квантом действия, так как она представляет произведение энергии и времени, равное по первому вычислению $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ эргам в секунду. Она была совершенно необходима для получения правильного выражения энтропии, так как только при ее помощи можно было установить величину «элементарных областей» вероятности; однако она упорно не поддавалась никаким попыткам уместить ее в каком-нибудь подобающем виде в рамки классической теории. При больших энергиях или больших периодах времени, пока их можно было рассматривать как бесконечно малые, все было в полном порядке, но в общем случае в каком-нибудь месте вдруг обнаруживался разрыв, который становился все шире при переходе к более слабым и быстрым колебаниям. Крушение всех попыток перебросить мост через возникшую пропасть вскоре уничтожило все сомнения: или квант действия был фиктивной величиной — тогда весь вывод закона излучения был принципиально иллюзорным представлял просто лишенную содержания игру в формулы, или при выводе этого закона в основу была положена правильная физическая мысль — тогда квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль, тогда появление его возвещало нечто совершенно новое, дотоле неслыханное, что, казалось, требовало преобразования самых основ нашего физического мышления, покоившегося, со времен обоснования анализа бесконечно малых Ньютоном и Лейбницем, на предположении о непрерывности всех причинных связей.

Опыт решил в пользу второй альтернативы. Но тем, что это произошло так скоро и решительно, наука обязана не подтверждению закона распределения энергии теплового излучения, тем более не данному мною специальному способу вывода этого закона; она обязана этим работам тех неустанно стремившихся вперед ученых, которые пользовались в своих исследованиях понятием кванта действия. Первый шаг в этой области был сделан А. Эйнштейном, который, с одной стороны, указал на то, что для ряда замечательных наблюдений над действиями света, такими, как явление Стокса, испускание электронов, ионизация газов, по-видимому, можно получить простое объяснение, если ввести обусловливаемые квантом действия кванты энергии. С другой стороны, отождествляя выражение энергии системы резонаторов с энергией твердого тела, он получил формулу для теплоемкости твердого тела, дающую в общем правильное представление об изменениях теплоемкости, особенно об ее уменьшении при падении температуры. При этом поднято было немало различных вопросов, всесторонняя точная разработка которых с течением времени вызвала к жизни обширный ценный материал. Даже приблизительно полный обзор множества выполненных здесь работ не может входить в мою задачу; речь может идти лишь о том, чтобы отметить важнейшие характерные этапы на пути развивающейся науки.

Сначала — о термических и химических явлениях. Что касается теплоемкости твердого тела, то вывод Эйнштейна, основанный на предположении одного-единственного собственного колебания атома, был распространен Борном и Карманом на случай собственных колебаний различного рода, ближе соответствующий действительности, а П. Дебай получил при помощи смелого упрощения предложений о характере собственных колебаний относительно простую формулу для теплоемкости твердого тела, которая, особенно для низких температур, не только давала совершенно те же значения, как и измеренные Нернстом и его учениками, но и хорошо согласовалась с упругими и оптическими свойствами тела. Также выяснилось и значение кванта действия для теплоемкости газов. Еще раньше Нернст указал на то, что кванту энергии колебания должен соответствовать квант энергии вращения, и поэтому можно было ожидать, что и вращательная энергия молекулы газа исчезает при низких температурах. Измерения теплоемкости водорода Эйкеном подтвердили это заключение, и если вычисления Эйнштейна, Штерна, Эренфеста и других до сих пор не дали удовлетворительного согласия, то причиною этого, понятно, является наше еще далеко не полное знание модели молекулы водорода. После работ Н. Бьерума, Е. Бар,

Г. Рубенса и Г. Геттнера и других о полосах поглощения инфракрасной части спектра нельзя больше сомневаться в том, что в природе действительно существуют системы, подчиняющиеся квантовым условиям вращения газовых молекул, хотя до сих пор еще нельзя было дать всесторонне исчерпывающего объяснения этих замечательных ротационных спектров.

Поскольку в конце концов все свойства химического сродства какого-либо вещества обусловлены его энтропией, то квантово-теоретическое вычисление энтропии дает возможность подхода ко всем проблемам учения о химическом сродстве. Абсолютное значение энтропии газа характеризуется химической константой Нернста, которую Сакур вычислил прямо, при помощи приема комбинаторики, подобного примененному к осцилляторам, а Г. Тетроде определил посредством рассмотрения процесса испарения разность энтропий в газообразном и твердом состоянии в приложении к данным, полученным им из измерений.

Если в рассмотренных до сих пор случаях дело шло всегда о состояниях термодинамического равновесия, для которых измерения могут дать лишь статистические средние значения, относящиеся к большим периодам времени и многим частицам, то наблюдение столкновений электронов вводит нас в детали динамики исследуемых процессов, и поэтому произведенное Дж. Франком и Г. Герцем определение так называемого резонансного потенциала или той критической скорости, которой по меньшей мере должен обладать электрон, чтобы при столкновении с нейтральным атомом побудить его к испусканию одного светового кванта, дает метод измерения кванта действия, прямее которого невозможно и желать. Точно так же и для рентгеновского спектра можно, по исследованиям Вебстера, Вагнера и других, найти соответствующие методы, которые приводят к вполне согласным результатам.

Испускание светового кванта при столкновениях электронов представляет собой процесс, обратный испусканию электронов при облучении световыми, рентгеновскими и γ-лучами, и здесь кванты энергии, выражающиеся через квант действия и частоту колебания, играют характерную роль, как это уже раньше можно было понять из поразительного факта, что скорость испускаемых электронов зависит не от интенсивности освещения, но только от цвета падающего света.

Вышеупомянутое эйнштейновское отношение к световым квантам подтвердилось и количественно, как это было установлено Милликеном посредством измерения скорости, с которой вылетает испускаемый электрон, в то время как Варбург нашел значение светового кванта для начального периода фотохимических реакций.

Если приведенные мной до сих пор взятые из различнейших областей физики опытные факты представляют подавляющий материал в пользу существования кванта действия, то с обоснованием и развитием теории атома Нильсом Бором гипотеза квантов получила еще более прочную основу. В кванте действия этой теории суждено было найти долго искавшийся ключ к воротам в чудесную страну спектроскопии, которые со времени открытия спектрального анализа упорно не поддавались всем попыткам отворить их. Как только путь освободился, полился целый поток новообретенных познаний обо всей этой области, равно как и о соседних областях физики и химии. Первым блестящим достижением было получение формулы серии Бальмера для водорода и гелия, включительно до выражения универсальных постоянных Ридберга через хорошо известные величины, причем, даже небольшая разница этих постоянных для водорода и гелия оказалась необходимо обусловленной слабым движением тяжелого атомного ядра. Это закончилось открытием других серий в оптическом и рентгеновском спектрах при помощи всегда плодотворного комбинационного принципа Ритца, только теперь понятого во всем своем значении.

После того как Зоммерфельд показал, что при надлежащем распространении закона распределения квант на систему со многими степенями свободы, при условии учета изменяемости массы, требуемой теорией относительности, получается волшебная формула, по которой спектры водорода и гелия должны были открыть загадку своей тонкой структуры, насколько она вообще могла быть определена измерениями Пашена, тончайшими из всех ныне возможных (достижение, вполне равноценное знаменитому открытию планеты Нептуна, существование и элементы орбиты которой были вычислены Леверье раньше, чем ее видел человеческий глаз), — после всего этого даже те, кто, видя количественные совпадения, которые при чрезвычайной точности спектроскопических измерений должны быть особенно убедительны, все еще склонялись считать все это игрой случая, в конце концов принуждены были оставить последние сомнения. Идя дальше по этому пути, Эпштейн добился полного объяснения эффекта Штарка — расщепления спектральных линий в электрическом поле. Дебай раскрыл простое значение исследованной Манне Сигбаном K-серии рентгеновского спектра; за этим следует ряд исследований, более или менее успешно раскрывающих тайны строения атома.

После всех этих результатов, для полного изложения которых нужно было бы привлечь еще много громких имен, судье, не желающему пренебрегать фактами, не остается ничего другого, как дать кван-

ту действия (который среди пестрого множества различных процессов в каждом отдельном случае всегда появлялся как одна и та же величина, именно $6{,}54 \cdot 10^{-27}$ эргов в секунду) полные права гражданства в системе универсальных физических постоянных. Должно показаться странным совпадением, что в то время, когда мысль об общей относительности проложила себе свободную дорогу и достигла неслыханных успехов, природа открыла как раз там, где этого менее всего можно было ожидать, нечто абсолютное, некую действительно неизменную единицу измерения, посредством которой можно величину действия, содержащуюся в пространственно-временном элементе, выразить совершенно определенным, свободным от произвола числом, отчего она лишится своего относительного характера.

Конечно, введение кванта действия еще не создает никакой истинной теории квант. Может быть, путь, который еще остался для исследования, не менее далек, чем путь от открытия скорости света Олафом Рёмером до обоснования теории света Максвеллом. Выше я уже касался трудностей, возникших с самого начала при введении кванта действия в установленную классическую теорию. С течением времени они скорее увеличились, чем уменьшились, и если за этот промежуток бурно несущееся вперед исследование на время перешло от них к текущим вопросам, то добросовестного систематика эти зияющие пустоты удручают еще мучительнее. То, что является в теории Бора основным предположением при установлении законов действия, слагается из известных гипотез, которые, без сомнения, каждым физиком прошлого поколения были бы совершенно отвергнуты. Можно еще считать приемлемым то, что известные, отмеченные совершенно определенными квантовыми условиями пути играют особенную роль; менее легко принять, что электроны, двигающиеся по этим путям с ускорением, не излучают совершенно никакой энергии. Но теоретику, воспитаннику классической школы, должно показаться чудовищным и неприемлемым требование, что четко определенная частота испускаемого светового кванта должна быть иной, чем частота излучающего электрона.

Но дело решают цифры, и вследствие этого теперь роли постепенно изменились по сравнению с прошлым. Вначале речь шла о том, каким образом с большими или меньшими усилиями втиснуть новый чуждый элемент в рамки общепринятых теорий; теперь, завоевав надежное место, он, со своей стороны, перешел в нападение, и сейчас уже ясно, что эти старые рамки каким-нибудь образом будут им сломаны. Неясно еще только, где и в какой степени ему удастся сделать это. Если позволительно уже сейчас высказать мнение об ожидаемом исходе этой горячей

битвы, то, кажется, все говорит за то, что из классических теорий великие принципы термодинамики и в теории квант не только сохранят в неприкосновенности свое центральное положение, но даже соответствующим образом расширят свои владения. То значение, которое принадлежало при обосновании классической термодинамики умственному эксперименту, теперь, в теории квант, принадлежит адиабатной гипотезе П. Эренфеста, и, подобно тому как Р. Клаузиусом за исходный пункт при измерении энтропии была введена теорема о возможности при подходящем подборе обратимого процесса перевести друг в друга два любых состояния материальной системы, новые идеи Бора открывают нам вполне соответствующий путь в глубь открытой им страны чудес.

Есть в особенности один вопрос, от исчерпывающего ответа на который мы должны, по моему мнению, ожидать значительных результатов. Что будет с энергией одного светового кванта после совершившегося полного испускания? Будет ли она, по волновой теории Гюйгенса, расширяться при дальнейшем распространении по всем направлениям, занимая все большее пространство и бесконечно утончаясь? Или, по ньютоновской теории истечения, она полетит, как брошенный снаряд, в одном направлении? В первом случае квант не был бы более в состоянии сконцентрировать свою энергию в одном месте пространства настолько, чтобы он смог освободить электрон, связанный с атомом, но во втором пришлось бы пожертвовать главнейшим триумфом теории Максвелла — непрерывностью между статистическим и динамическим полем, а вместе с этим и вполне разработан- ной до тончайших подробностей теорией интерференционных явлений. И то и другое следствие одинаково печально для теперешних теоретиков.

Но и здесь будет, как всегда: ни в каком случае не может быть сомнения, что наука преодолеет *также и эту тяжелую дилемму*; и то, что сегодня кажется нам непонятным, когда-нибудь будет казаться, с более высокой точки зрения, особенно простым и гармоничным. Но прежде чем эта цель будет достигнута, проблема кванта действия не перестанет побуждать и оплодотворять мысль исследователей, и чем большие трудности представятся в ее решении, тем важнее она окажется для расширения и углубления всего нашего физического знания.

Биография

Макс Карл Эрнест Людвиг Планк родился 23 апреля 1858 года в Киле (Германия). Он был сыном Иоганна Юлиуса Вильгельма фон Планка

и Эммы Планк (урожденной Патциг). Его отец был профессором права сначала Кильского, а затем Геттингенского университета.

Планк учился в Мюнхенском и Берлинском университетах у Кирхгофа и Гельмгольца. Степень доктора философии он получил в Мюнхене в 1879 году. С 1880 по 1885 гг. он был приват-доцентом в Мюнхенском университете, а затем адъюнкт-профессором теоретической физики в Кильском университете до 1889 года, когда стал преемником Кирхгофа на должности профессора Берлинского университета, где работал до ухода на пенсию в 1926 году. Затем он стал президентом Общества продвижения науки кайзера Вильгельма, где оставался до 1937 года. Прусская академия наук приняла его в свои члены в 1894 году, а в 1912 году сделала своим постоянным секретарем.

Ранняя работа Планка была связана с термодинамикой, интерес к которой зародился во время учебы у Кирхгофа, которым он восхищался, а также во время чтения работ Р. Клаузиуса. Он опубликовал несколько статей по энтропии, термоэлектричеству и теории разбавленных растворов.

В то же время внимание Планка занимали и проблемы процессов излучения, и он показал, что эти процессы также следует рассматривать как имеющие электромагнитную природу. Эти исследования привели его к проблеме распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Экспериментальные наблюдения распределения энергии, испущенной черным телом, по длине волны как функции температуры отличались от предсказаний классической физики. Планку удалось вывести соотношение между энергией и частотой излучения. В статье, опубликованной в 1900 году, он объявил о выводе этого соотношения, которое было основано на революционной идее о том, что энергия, испущенная резонатором, может принимать исключительно дискретные значения, или кванты. Энергия резонатора частоты ν равна $h\nu$, где h — универсальная постоянная, которая теперь называется постоянной Планка.

Это стало не только самой важной работой Планка, но и поворотной точкой в истории физики. Важность открытия, которое оказало столь далеко идущее влияние на классическую физику, сначала не оценили. Однако свидетельств его состоятельности мало-помалу становилось все больше, так как применение этой гипотезы объясняло многие расхождения наблюдаемых явлений с классической теорией. Среди этих применений и разработок можно упомянуть объяснение фотоэлектрического эффекта Эйнштейном.

Работа Планка по теории квантов (именно под этим названием она стала известна) была опубликована в *Annalen der Physik*. По этой рабо-

те были написаны две книги: *Thermodynamik* (Термодинамика, 1897 г.) и *Theorie der Wärmerstrahlung* (Теория теплового излучения, 1906 г.).

В 1926 году Планк был избран иностранным членом Лондонского королевского общества, а в 1928 году — награжден медалью Копли этого общества.

В период нацистской власти в Германии Планк пережил беспокойный и трагический период своей жизни. Он чувствовал свой долг оставаться на родине, но открыто противостоял некоторым аспектам политики своего правительства, в частности, в том, что касалось преследования евреев. В последние недели войны его невзгоды обострились еще сильнее, так как его дом был разрушен попавшей в него бомбой.

Коллеги Планка уважали его не только из-за важности сделанных им открытий, но и за его личные качества. Он был одаренным пианистом и, судя по некоторым рассказам, когда-то даже собирался сделать карьеру музыканта.

Планк был женат дважды. Когда в 1885 году его назначили адъюнкт-профессором в родном городе Киле, он женился на подруге детства, Марии Мерк, которая умерла в 1909 году. Он вновь женился на ее двоюродной сестре Марге фон Хесслин. Трое его детей умерли в младенческом возрасте, и у него осталось два сына.

Он пережил личную трагедию, когда один из них был казнен за участие в неудавшемся покушении на Гитлера в 1944 году.

Макс Планк умер в Геттингене 3 октября 1947 года.

Йоханнес Штарк

«за открытие эффекта Допплера на каналовых лучах и расщепления спектральных линий в электрическом поле»

Йоханнес Штарк

Структурные и спектральные изменения химических атомов

Нобелевская лекция, 3 июня 1920 г.

Вопрос о составе реальных объектов занимал умы еще древних греков. Они сформировали философскую концепцию неделимой частицы — атома — как мельчайшей составляющей реальных объектов. Однако на этой стадии гипотезы они остановились; они не провели экспериментальное исследование, а потому им не удалось получить окончательный результат.

Умы германских народов устроены иначе. В качестве отправной точки они использовали опыт химической работы с материей, установили существование некоторого количества основных веществ, или химических элементов, которые невозможно разделить далее, и выдвинули гипотезу о том, что химический элемент состоит из однородных составляющих, или атомов, которые отвечают за конкретные свойства данного элемента и которые с помощью химических методов нельзя ни разложить далее, ни отличить один от другого.

Ближе к концу прошлого века эта концепция химического атома несколько закостенела. Подтверждение, которое она получила в процессе тысяч химических опытов, привело к убеждению, что химический атом не только невозможно разложить на более мелкие части с помощью известных химических методов, но он, в принципе, целиком и полностью неделим. Более того, изобилие химических сложных веществ и их важность в повседневной жизни мешала химику исследовать вопрос о том, в чем же все-таки состоит индивидуальность атомов различных элементов. За три последних десятилетия концепция химического атома освободилась от этого оцепенения благодаря нашим физическим опытам. Открытие различных явлений привело к признанию того, что химический атом обладает индивидуальностью и состоит из нескольких единиц, объединенных в единое целое.

Во главе этих новых открытий и обретенного понимания стоит установление того, что электричество состоит из дискретных частиц равного размера, или квантов, а свет является электромагнитным волновым движением. Из этого с необходимостью следовало, что в составе химического атома должны присутствовать отдельные кванты электричества, так как при определенных условиях химические атомы испускают световые волны характерной длины или частоты колебаний, — знакомые характеристические спектры, — а они могут исходить в виде электромагнитных волн исключительно из ускоренных квантов электричества.

Более того, фундаментальную важность имело открытие того, что отрицательный электрон является составляющим химического атома. В катодных лучах физик узнал способные к независимому движению свободные отрицательные электрические кванты, масса которых оказалась меньше тысячной доли массы атома водорода. В процессе ионизации физик наблюдал высвобождение таких отрицательных квантов, или электронов, из химических атомов. Подвергнув влиянию магнитного поля спектральные линии химических элементов, Зееман и Лоренц сумели обнаружить отрицательный электрон даже внутри атома, составляющим которого он является.

В эти три последних десятилетия великих физических открытий, как никогда ранее в истории, природа подняла занавес, скрывавший от глаз физика третью тайну, раскрыть которую он даже не мечтал. Открытие и исследование радиоактивности доказало даже самым отъявленными скептикам способность атома не только разделяться на части, но также его химическую и физическую индивидуальность, — особенно исходного атома, но, в равной степени, и тех атомов, которые возникают в результате его распада.

Признав, что химический атом состоит из отдельных электрических квантов, которые можно отделить друг от друга, человечество сделало огромный шаг вперед в исследовании мира природы. Однако это достижение поставило перед нами новую, даже более серьезную проблему, — проблему структуры атома. Сколько электрических квантов присутствует в атоме химического элемента? Каковы их силовые поля? На каких расстояниях друг от друга они расположены? Как они движутся? Какие силы начнут в них действовать, если внешнее вмешательство выведет их из состояния равновесия?

В течение полутора десятков лет перед нами стоят эти вопросы. Маловероятно, что в ходе размышлений мы получим ответ на все эти вопросы одним махом, внезапно представив всю картину. Скорее всего, пройдет более века, прежде чем мы познаем структуру атомов так же основательно, как мы знаем нашу Солнечную систему. Путь к этой цели, как это было и ранее, будет проходить через сложности и сюрпризы экспериментальных исследований. Многим ученым придется сделать свой вклад в решение этой великой проблемы; им придется следить за всеми явлениями, в которых явно выражается структура атома, и проводить соответствующие измерения.

Помня об этом, лет двадцать назад я поставил перед собой конкретную задачу — экспериментально исследовать связь, существующую между изменением в структуре и изменением в спектре химических атомов. Прежде всего, здесь можно задаться двумя вопросами.

Первый вопрос связан с явлением изменения в структуре поверхности атома. Для того чтобы ясно представить себе все возможности, которые могут существовать в этом отношении, мы начнем с одного атома, все части которого находятся во взаимном равновесии. Из опыта нам известно, что, когда электрический луч сталкивается с поверхностью атома, от него может отделиться электрон, а при некоторых обстоятельствах — второй и даже третий. Тогда вместо нейтрального атома мы получаем одно-, двух- или трехвалентный ион соответствующего атома. Мы спрашиваем себя: каковы те два спектра, которые принадлежат двум структурам атома — нейтральным атомам и положительным ионам атома? Этот вопрос может быть также дополнен еще одним: испускается ли характерный спектр, если положительный ион атома меняется на нейтральный атом?

На эти вопросы я дал совершенно определенные ответы, сначала после предварительного исследования известных мне всех предыдущих исследований в форме рабочих гипотез, чтобы получить возможность придумать специальный ряд опытов для их проверки.

Ответ на первый вопрос был таким: спектральные серии химических элементов принадлежат исключительно положительным ионам и наблюдаются, главным образом, в дугах и искрах, а их линии, как это лучше всего показал Ридберг, можно объединить в группы, причем линии, составляющие каждую группу, являются функциями целых чисел.

Вторая гипотеза была такова: в процессе захвата отрицательных электронов положительными ионами атомов химических элементов излучаются их тонкоструктурные полосатые спектры в виде потенциальной энергии связи множества различных орбит, испускаемой порциями, кратными квантовой постоянной Планка.

Двум этим рабочим гипотезам были уготованы совершенно разные судьбы. Вскоре после того как я постулировал вторую гипотезу, я понял, что она ошибочна, и не стал проверять ее на опыте. Однако в теоретическом плане оказалось чрезвычайно плодотворным ядро этой гипотезы, т. е. допущение о том, что энергия испускается согласно квантовому закону Планка благодаря изменению электроном своих орбит относительно положительного заряда. Это допущение образует отправную точку теории Бора излучения серий линий. Несмотря на то, что я сам стоял на пороге этой теории и несмотря на то, что окончательные формулы дают ряд соотношений для частот спектральных серий, которые полностью согласуются с наблюдаемыми фактами, я все же не могу в нее поверить, потому что в своих предсказаниях она выдвигает некоторые гипотезы, противоречащие не только теории Максвелла, но и самому духу физики. Эта критика относится не ко кванту действия Планка, а к связанным с ним гипотезам Бора.

Но вернемся к гипотезе о том, что положительные ионы отвечают за спектральные серии. Вскоре после формулировки этой гипотезы мне удалось получить от нее экспериментальные плоды благодаря следующему умозаключению.

Пропуская положительные ионы через электрическое поле и сообщая тем самым им некоторую скорость, их можно отделить от нейтральных неподвижных атомов. Если из испускаемых ими спектральных линий можно вывести их скорость, то этот вывод требует приписать смещенные спектральные линии движущимся ионам как их источникам. Движение источников спектральных линий можно вывести на основе принципа Допплера.

Во-первых, мы можем поместить пучок лучей движущихся положительных ионов в плоскость, перпендикулярную оси, в направлении которой мы наблюдаем испущенные ими спектральные линии. Тогда они появляются только в тех местах спектра, где обычно находятся, когда

их источники неподвижны. Во-вторых, мы можем сделать так, чтобы пучок положительных ионов приближался к нам вдоль оси наблюдения, тогда их спектральные линии будут казаться нам смещенными из своего нормального положения в спектре в сторону более коротких волн на величину, пропорциональную скорости движения испускающей их системы. И, в-третьих, если мы заставим ионы удаляться от нас вдоль оси наблюдения, то их спектральные линии будут казаться нам смещенными из своего нормального положения в противоположную сторону.

В 1905 году я попытался экспериментально доказать только что описанное явление. Состояние исследования на тот момент означало, что в качестве положительных ионов следует взять каналовые лучи, которые приближаются к катоду тлеющего разряда и появляются на другой его стороне через отверстия в нем. Я направил ось коллиматора своего спектрографа сначала перпендикулярно оси пучка каналовых лучей водорода, а во второй раз — параллельно этой оси. При сравнении двух спектрограмм, полученных таким образом, в линиях водородной серии появился предвиденный эффект Допплера, а впоследствии тот же результат был получен в линиях серий многих других химических элементов.

Таким образом, в начале 1906 года казалось установленным фактом то, что источниками спектральных серий химических элементов являются их положительные ионы. Такая интерпретация моего наблюдения вскоре действительно подверглась сомнению. Дело в том, что, как показали, в частности, В. Вин и Дж. Дж. Томсон, каналовые лучи помимо лучей положительных ионов обычно содержат также нейтральные лучи, так что совершенно невозможно точно определить, первым или вторым лучам следует приписать эффект Допплера в спектральных линиях. Однако позднее были выявлены случаи, когда каналовые лучи, состоящие исключительно из положительных ионов, проявляли эффект Допплера в испущенных ими спектральных линиях. Несмотря на то, что даже сегодня я по-прежнему считаю положительные ионы химического элемента источниками его спектральных серий, я уже не думаю, что эта концепция так ограничена, как я полагал ранее, когда рассматривал только свободные положительные ионы, которые благодаря своему положительному заряду ускоряются электрическим полем. Сейчас я, скорее, думаю, что серии линий серии также могут испускаться из положительного иона, который не является свободным и к которому уже начал присоединяться отрицательный электрон; только электрон, должно быть, еще не успел приблизиться к иону настолько, что эмиссия из последне-

го уже стала бы чувствительной к электрическому полю этого электрона и была бы разрушена его действием.

В этой связи можно упомянуть ультрафиолетовый непрерывный спектр водорода. Я ожидал, что непрерывный спектр будет испускаться, когда в ходе присоединения отрицательного электрона к положительному иону водорода его вторжение зайдет так далеко, что эмиссия линий серии заметно нарушится. Именно поэтому я искал — и нашел — непрерывный спектр в каналовых лучах водорода.

Со времени открытия эффекта Допплера на каналовых лучах с этим явлением было проделано множество экспериментов. Из них можно вывести следующие основные результаты.

Источниками спектральных серий, без исключений, являются отдельные атомы, а не соединения атомов. Спектры ионов более высокой валентности отличаются от спектров ионов этого же элемента, но более низкой валентности.

Полосатые спектры — например, спектры водорода и азота, — как правило, не проявляют эффект Допплера на каналовых лучах. Поскольку я, с одной стороны, ожидал, что их источниками являются положительные молекулярные ионы, состоящие из более чем одного атома, и поскольку, с другой стороны, положительные молекулярные ионы также являются каналовыми лучами при низком давлении, я объяснил отсутствие эффекта Допплера в полосатых спектрах тем, что, когда при столкновении происходит возбуждение, вследствие которого испускается свет, молекулярные ионы, состоящие из более чем одного атома, после короткого периода существования диссоциируют. Эта идея также говорит о том, что в полосатых спектрах эффект Допплера на каналовых лучах возможен при маленьких скоростях и низком давлении. И, действительно, недавно мистеру Рау из Вюрцбургского физического института удалось доказать это для полос отрицательного азота. Более того, все его наблюдения привели к выводу о том, что источниками этих полос являются положительные двухатомные ионы молекулы азота.

Объявление об этом новом шаге вперед обязывает нас признать, что исследовательская работа по эффекту Допплера на каналовых лучах еще ни в коем случае не завершена, и вопрос о том, что является источником спектров химических элементов, еще не получил окончательного ответа.

Если физик-экспериментатор уже проделал в этой области огромную работу, то физик-теоретик еще едва только начал оценивать экспериментальный материал, который может привести его к каким-то выводам относительно структуры атома. Однако мы уже установили, что превращение структуры нейтрального атома в структуру иона включает

фундаментальные изменения колебаний электрических квантов, остающихся в этой структуре. Но вопрос о том, какие из этого можно сделать выводы относительно структуры нейтрального атома и иона, остается без ответа.

Удаление электрона с поверхности атома, — то есть ионизация атома, — является фундаментальным структурным изменением его поверхностного слоя. С самого начала следовало ожидать, что это будет сопровождаться не менее фундаментальным изменением в спектре поверхностного слоя. Однако в случае структурного изменения второго рода, которое я сделал предметом своего экспериментального исследования, дела обстоят иначе.

Мы всегда должны твердо помнить, что химический атом является индивидуальной, замкнутой структурой, состоящей из положительных и отрицательных электрических квантов. Внешнее электрическое поле, в которое попадают и через которое проходят кванты, влияет как на положительные, так и на отрицательные кванты атома, направляя их в противоположные стороны. Это смещение скоро прекращается под действием противоположно направленных сил, которые оно создает в квантах, смещенных друг относительно друга, оно все же происходит и вызывает деформацию — изменение структуры атома по сравнению с его состоянием в отсутствии внешнего электрического поля. Соответственно, возникает вопрос: проявляется ли это изменение структуры атома, эта деформация электрическим полем, в изменении спектра атома. Другими словами, встает вопрос влияния электрического поля на спектральные линии.

В то время, когда я заинтересовался этим вопросом, Фойгт уже создал теорию электрического аналога эффекта Зеемана и разработал ее математическую формулировку. Результат этой теории был обескураживающим, так как он предполагал, что изменение частоты колебания, или длины волны, спектральных линий под действием электрического поля настолько мало, что измерить его будет невозможно. Судя по всему, этот вывод подтверждался абсолютной безрезультатностью многолетних исследований, связанных с попытками обнаружить этот эффект.

Однако я не видел возможности согласиться с предпосылкой данной теории, а именно: допущением того, что эмиссия спектральной линии со стороны атома является делом лишь одного электрона, независимо движущегося в атоме. На мой взгляд, структура всего атома является целостной, а все его части связаны между собой, так что эмиссия спектральной линии представлялась мне результатом связи и взаимодействия нескольких электрических квантов. Соответственно, я ожи-

дал, что вследствие изменения структуры атома под влиянием внешнего электрического поля в спектре этой структуры также появится какое-то изменение. Тогда я попытался решить эту проблему, создав в светящемся газе сильное электрическое поле. Я достиг этого, пропуская каналовые лучи через отверстия в катоде, за которым они попадали в сильное электрическое поле, существующее между катодом и вторым дополнительным электродом, расположенным напротив него.

Моя самая первая спектрограмма каналовых лучей в водороде и гелии выявила влияние электрического поля на некоторые спектральные линии и подсказала, что во вновь открытой области существует множество неизвестных явлений. Более того, это открытие еще раз показало, насколько более богаты и оригинальны творения природы в сравнении с идеями человека. Для случая, когда ось наблюдения излучения перпендикулярна направлению электрического поля, теория постулировала, что под влиянием этого поля каждая отдельная спектральная линия будет расщепляться на две компоненты, каждая из которых будет казаться смещенной от положения нормальной линии в сторону более длинных волн, причем одна из этих компонент будет совершать колебания параллельно электрическому полю, а другая — перпендикулярно. Насколько же иной оказалась реальность! Например, красная линия водорода расщепляется симметрично нормальной линии на девять компонент, электрические колебания шести из которых параллельны, а трех других — перпендикулярны внешнему полю.

Со времени открытия влияния электрического поля на спектральные линии, которое произошло в 1913 году, по этому эффекту было проделано множество экспериментов. Наиболее распространенный и наиболее важный результат этих экспериментов заключается в том, что природа и сила влияния поля на соответствующие серии различных элементов главным образом выражают особенность их атомной структуры или, по крайней мере, структуры их поверхности. Таким образом, влияние поля на серию водорода, на серию одно- и двухвалентных положительных ионов атомов гелия, на серию лития, ртути и алюминия характерным образом отличается друг от друга.

Следующие результаты могут быть интересны во всех подробностях.

Вдоль серии линий, идущих от более длинных волн к более коротким, влияние электрического поля возрастает по мере увеличения номера серии, то есть по мере уменьшения длины волны.

Доля интенсивности различных серий, входящих в одну систему, в случае нескольких элементов зависит от силы деформирующего электрического поля. Так, под его влиянием могут стать видимыми новые

серии, которые без электрического поля обладают столь малой интенсивностью, что наблюдать их невозможно.

Уширение и смещение спектральных линий, сопровождающие увеличение давления газа или плотности ионов, берет начало во влиянии электрического поля отдельных атомов на соседние, испускающие свет атомы. Именно с этим связана многообещающая идея Габера о возможности выяснить происхождение гетерогенного катализа на твердых поверхностях, начиная с деформации молекулярной структуры под воздействием молекулярного электрического поля. Возможно, такие электрические поля удастся точно исследовать с помощью спектрального анализа.

Но оставим эти подробности и вернемся к проблеме структуры атома. Мы должны спросить себя, можно ли из влияния электрического поля на линии серий элементов сделать вывод о структуре атома или, по крайней мере, о процессе эмиссии этих линий. Бор и Эпштейн разработали теорию рассматриваемого эффекта, которая предсказывает количество компонент и промежутки между ними в электрических полях, причем эти данные удивительно точно соответствуют наблюдениям, по крайней мере, в случае серии одновалентного иона атома водорода и двухвалентного иона атома гелия — или, даже скорее, в случае присоединения к этим ионам электрона. Это соответствие является веским аргументом в пользу теории Бора об эмиссии спектральных линий, а также в пользу его предположения, впервые высказанного Резерфордом, о структуре атомов водорода и гелия.

Несмотря на то, что я высоко ценю это теоретическое достижение, я все же не могу принять его как окончательное. Дело даже не в том, что я не могу поверить в некоторые его предпосылки, просто оно не вполне соответствует нашему опыту. Оно не способно объяснить следующее наблюдение, которое мне представляется очень важным для исследования структуры атома.

Пучок светящихся водородных каналовых лучей из-за своей скорости имеет то же направление, что и электрическое поле, в котором его можно заставить двигаться. Если ось пучка расположить перпендикулярно оси поля, то интенсивности компонент каждой отдельной линии, которая расщепляется, симметричны относительно нормальной линии, как и промежутки, на которых они располагаются относительно нее, смещаясь в правую и левую сторону. С другой стороны, если направление лучей совпадает с направлением поля, то интенсивность тех компонент, которые находятся ближе к длинным волнам, возрастает.

Если же каналовые лучи движутся в направлении, противополож-

ном направлению поля, то все происходит наоборот: компоненты, которые оказываются ближе к коротким волнам, обладают бо́льшей интенсивностью. Вследствие этого может показаться, будто атом водорода, или его ион, в электрическом поле обладает полярностью вдоль оси этого поля, т. е. в этой оси можно выделить две стороны. Это явление настолько же замечательно, насколько оно важно. Мы вполне обоснованно можем ожидать, что, исходя из его теоретических следствий, нам удастся сделать вывод о структуре атома водорода. Этот вывод имеет все шансы на успех, если мы будем учитывать не только влияние на отдельный электрон на поверхности атома, как это было прежде, а примем в качестве отправной точки своих выводов, сделанных на основе наблюдений, связь между частями атома, которые составляют индивидуальную структуру.

Это замечание возвращает нас к проблеме структуры атома. Лишь оглянувшись на то, что мы уже сделали, мы тут же поймем необъятность этой проблемы. Исследования изменений спектра химических атомов в результате изменений их структуры раскрыли целый ряд новых явлений. Удаление электрона из поверхности атома — или его повторное присоединение — приводит к фундаментальным изменениям в спектре составляющих атома, способных совершать колебания; и деформация атомной структуры электрическим полем тоже выражается различными видами воздействия на колебание этих составляющих атома. Но даже несмотря на то, что эти новые явления уже принесли столь богатые экспериментальные плоды, даже несмотря на то, что теории, которые начинают возводиться на их основе, выглядят столь многообещающими, они все же почти не начали прояснять огромную проблему, разве что пролили свет на небольшую часть экспериментальной работы, тогда как для теории они не сделали даже этого. Исследование этих явлений может сделать лишь небольшой вклад в решение грандиозной проблемы структуры атома. Чтобы получить это решение, потребуется работа многих поколений. Наш переход от умозрительной гипотезы атома, сформированной греками, к открытию электрической природы его структуры через германские исследования, проведенные в последнее столетие, должен стать вдохновением и уроком для будущего века.

Биография

Йоханнес Штарк родился 15 апреля 1874 года в Шиккенхофе (Бавария) в семье землевладельца. Образование мальчик получил в Байрейт-

ской гимназии (средняя школа), а затем в Регенсбурге, после чего в 1894 году поступил в Мюнхенский университет, чтобы заниматься физикой, математикой, химией и кристаллографией. В 1897 году Штарк закончил университет, защитив докторскую диссертацию по электрохроническим кольцам Ньютона в мутной среде определенного типа. С 1897 по 1900 год он работал ассистентом фон Ломмеля в Физическом институте Мюнхенского университета, а затем стал бесплатно читать лекции по физике в Геттингенском университете. В 1906 году его назначили внештатным профессором в Высшей технической школе в Ганновере, а в 1909 он согласился стать профессором в Высшей технической школе в Аахене. В 1917 году Штарка пригласили на подобную должность в университет Грейфсвальда. Три года спустя он перешел в Физический институт Вюрцбургского университета, где оставался до 1922 года.

Научная деятельность Штарка охватывает три крупные области: электрические токи в газах, спектроскопический анализ и химическая валентность. Его работа по спектроскопии заключалась в исследовании связи между изменением структуры и спектра химических атомов. В 1919 году Штарк получил Нобелевскую премию по физике «за открытие эффекта Допплера на каналовых лучах и эффекта расщепления спектральных линий в электрическом поле». Эта премия дала ему возможность создать свою собственную частную лабораторию.

В 1933 году Штарка избрали президентом Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Физико-технический институт); на этой должности он сменил фон Пашена и оставался до ухода на пенсию в 1937 году. В то же время он занимал пост президента Deutsche Forschungsgemeinschaft (Германская ассоциация исследователей).

Штарк был плодовитым писателем и опубликовал более трехсот научных работ. В 1902 году была издана его книга *Die Elektrizität in Gasen* (Электричество в газах). За этой книгой последовали работы по элементарному излучению и электрическому спектроскопическому анализу химических атомов. В связи со своей работой по химической валентности он написал книгу *Die Elektrizität im chemischen Atom* (Электричество в химическом атоме). Штарк основал *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* (Ежегодник радиоактивности и электроники) и с 1904 по 1913 г. был его редактором.

Йоханнес Штарк был членом-корреспондентом академий наук Геттингена, Рима, Лейдена, Вены и Калькутты; в 1910 году ему присудили премию Баумгартнера Венской академии наук, а в 1914 году — премию Вальбруха Геттингенской академии наук. Он также был награжден медалью Маттеучи Римской академии наук.

В последние годы жизни Штарк исследовал эффект отклонения света в неоднородном электрическом поле. Эти исследования он проводил в частной лаборатории у себя в поместье Эппенштатт, недалеко от Траунштейна в Верхней Баварии.

Штарк был женат на Луизе Юплер. У них было пятеро детей. Ему нравилось заниматься лесоводством и выращивать плодовые деревья.

Штарк умер 21 июня 1957 года.

Шарль Эдуард Гильом

«в знак признания его заслуг перед точными физическими измерениями — открытия аномалий железо-никелевых сталей»

Шарль Эдуард Гильом

Инвар и элинвар

Нобелевская лекция, 11 декабря 1920 г.

Аномалия никелевых сталей

Открытие аномалии. В 1889 в Севре — резиденции Международного бюро весов и мер — состоялась Генеральная конференция весов и мер. Тогда это бюро совершило первое великое деяние, продиктованное девизом, начертанным на фронтоне величественного здания, которое представляет собой метрическая система: *«A tous les temps, a tous les peuples»* (На все времена, всем людям); и это деяние заключалось в утверждении и распределении между правительствами государств, поддерживавших Метрическую конвенцию, образцов эталонов доселе неизвестной точности с намерением распространить метрическую единицу по всему миру.

Эти образцы были поистине достойны внимания. Они были сделаны из платино-иридиевого сплава, созданного Анри Сен-Клер Девилем

и объединяющего в себе все качества твердости, неизменности и сопротивления действию химических агентов, которые делали его пригодным для изготовления эталонов, должных служить веками. Но высокая стоимость таких эталонов исключала их из поля деятельности обычной науки; в то время один метр стоил 7000 крон — а сколько он стоит сегодня?

Нужно было искать менее дорогое решение, так как между этими драгоценными образцами и эталонами, дающими весьма неопределенные гарантии точности, существовала огромная брешь, которую нечем было заполнить.

Впервые я занялся этой проблемой в 1891 году и очень скоро обнаружил действительно превосходные свойства чистого никеля, который по сей день используется для изготовления неокисляемого эталона, неподвластного времени, жесткого и имеющего средний коэффициент линейного расширения. Однако была одна сложность, которая помешала мне ввести его в общее употребление. Нужно было соблюсти геодезическую норму: брусок должен был иметь длину четыре метра, а ни один завод, производивший никель, не мог поставить абсолютно качественный брусок такой длины, в котором не было бы трещин.

Следующие исследования получили свое направление благодаря удаче. В 1895 году, по просьбе Парижского технического артиллерийского отдела (Section technique de l'artillerie), Ж. Р. Бенуа занялся изучением эталона, сделанного из сплава железа, содержащего 22% никеля и 3% хрома, и обнаружил, что коэффициент его расширения близок к коэффициенту расширения латуни. Это был немагнитный сплав, а потому он был аномален вдвойне.

Уже несколько лет назад Джон Хопкинсон открыл очень любопытные явления, а именно: после ковки некоторые сплавы железа с никелем, содержащие порядка 25% последнего, являются немагнитными и не очень твердыми; однако сразу после их охлаждения, например, в твердой двуокиси углерода, они становятся твердыми и проявляют сильные магнитные свойства; более того, в процессе этого превращения их объем увеличивается примерно на 2%.

Было совершенно ясно, что явления, открытые Хопкинсоном и Бенуа, связаны между собой. Но как бы интересны они ни были для физико-химика, для метролога на них было наложено строгое табу. Сплав, который способен изменяться, и сплав, который обладает высоким коэффициентом линейного расширения, не подходят для создания эталонов длины.

Дело приняло совершенно другой оборот, когда в 1896 году я заметил новый и довольно неожиданный факт, тесно связанный с теми, о которых я только что рассказал. В Международное бюро доставили стальной брусок, содержащий 30% никеля, и я обнаружил, что он расширяется на одну треть меньше платины. Продолжение исследования этого факта обещало хорошие результаты, поэтому я стал упорно этим заниматься.

Для метрологии проблема линейного расширения является фундаментально важной; действительно, ошибка измерения температуры влечет за собой пропорциональную расширяемости эталона ошибку измерения длины, так что постоянные попытки метрологов защитить свои измерительные инструменты от вредного влияния температуры говорят о необыкновенной важности, которую они придают ошибкам, вызванным расширением.

К примеру, всем известно, что эффективные измерения можно проводить только в здании, комнаты которого надежно защищены от внешних колебаний температуры, даже само присутствие наблюдателя является помехой, против которой нередко приходится принимать строгие меры предосторожности.

До открытия аномалии, о которой я только что рассказал, любой физик мог бы поклясться, что нет никакой надежды как-то изменить существующую ситуацию с помощью металлов или сплавов, коэффициент линейного расширения которых гораздо ниже известных величин, так как все полагали, что на практике соблюдается правило смесей.

Сначала я позаботился о том, чтобы проверить направление расширения как функцию состава сплавов. Это не было излишней предосторожностью, поскольку между немагнитным сплавом, содержавшим 22% никеля, и магнитным сплавом с 30-ю % никеля мог существовать некоторый разрыв. Об экспериментах, проведенных с двумя этими сплавами, мне сообщили из Société de Commentry-Fourchambault & Decazeville; эти эксперименты установили непрерывность[1].

Классификация по магнитным свойствам. Точное измерение расширений требует времени и усилий. Поскольку ни у кого не было сомнений в том, что обнаруженная аномалия влияет на все свойства новых сплавов, нужно было использовать новые и легко применимые методы. Было совершенно очевидно, что следует изучать магнитную восприим-

[1]Вдохновленные своим финансовым директором, Анри Файолем, работники этой фирмы не пожелали останавливаться на достигнутом. Предоставив мне свои аналитические отчеты, фирма включила в них более шестисот сплавов. Именно благодаря такому широкому сотрудничеству мои исследования продолжались почти четверть века.

чивость, так как если бы дело касалось лишь выяснения присутствия или отсутствия ферромагнетизма, то это можно было сделать с помощью элементарных опытов.

Самые ранние этапы исследования показали наличие двух отдельных превращений. Одно из них, открытое Хопкинсоном, необратимо; другое — обратимо и было обнаружено впервые. Несколько наблюдателей, особенно, Осмонд, Луи Дюма, Пьер Вейсс и его ученики, Нагаока и Хонда, установили особенности этого явления.

Очень простая диаграмма с первого взгляда показывает полную картину превращений ферро-никелевых сплавов, касающихся их магнитных свойств.

Начиная с железа, эти превращения разделяются на две группы, AB и AC, которые постепенно расходятся (рис. 1a). Когда мы, двигаясь вниз, пересекаем нижнюю кривую, появляется магнетизм, который затем увеличивается до некоторого предельного значения. При повторном нагревании сплава магнетизм уменьшается, начиная с данной температуры и полностью исчезает после пересечения верхней кривой. С другой стороны, поведение отдельной кривой в сплавах с более высоким содержанием никеля указывает на появление ферромагнитных свойств при охлаждении и на их исчезновение при повторном нагревании.

Пересечение кривых двух разных категорий имеет точный смысл: добавление углерода, хрома и марганца значительно понижает температуру необратимых превращений, но гораздо меньше действует на обратимые. Таким образом, можно распространить обратимое превращение в область обычно необратимых сплавов.

Более того, справа от точки пересечения умеренное охлаждение оставляет магнетизм полностью обратимым; более интенсивное охлаждение дает начало превращению и делает его необратимым.

Теперь возьмем третью ось, расположенную перпендикулярно двум первым. Вдоль этой оси мы отложим восприимчивость и на полученной таким образом трехмерной диаграмме сделаем два ортогональных сечения, ab и cd. В необратимой области ранее охлажденный сплав сохраняет вдоль ABC (рис. 1b) приобретенную им восприимчивость, которая вдоль CD обращается в нуль. При охлаждении она останется нулевой, пока не будет достигнута точка F, по достижении которой она снова начнет подниматься вдоль линии FB.

Охлаждение можно прервать в любое время, тогда при повторном нагревании сплав сохранит постоянные магнитные свойства, показанные линией $B'C'$.

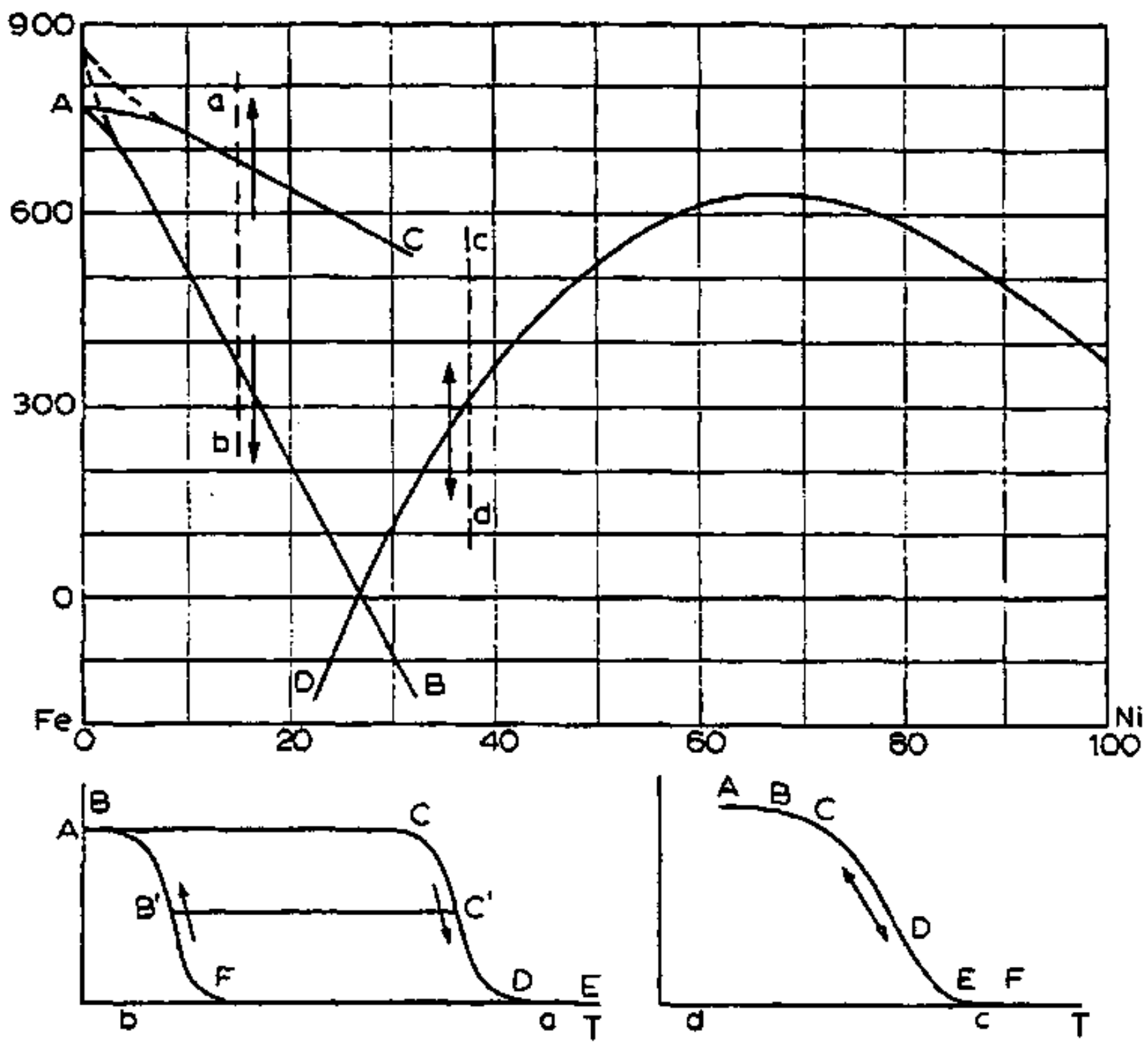


Рис. 1. a. Температура магнитного превращения никелевых сталей как функция их состава. Ветви AB и AC относятся к необратимым сплавам, а ветвь DE — к обратимым. b, c. Изменения магнитной восприимчивости никелевых сталей как функция температуры в обратимых и необратимых областях сплава (температура отложена по оси абсцисс, а значения восприимчивости по оси ординат).

В обратимой области восприимчивость представлена кривой $ABCDEF$ (рис. 1c).

Все интересующие нас свойства сплавов связаны с этими превращениями, а их особенности, с которыми мы только что познакомились, также обнаружатся и в кривых, представляющих изменения объема или модуля упругости.

Определив таким образом ориентир, я посвятил все свои силы изучению изменений объема, которые составляют главный метрологический фактор, связанный с существованием этих сплавов.

Изменения объема

Методы. Способность твердых материалов к расширению была четко продемонстрирована в восемнадцатом веке. Знаменитый французский физик и геодезист Бугер однажды захотел продемонстрировать эти эффекты большому количеству людей и с этой целью подвесил под сводом Hôtel des Invalides (Дом инвалидов) металлическую проволоку, на которой висела оптическая труба, уравновешенная в двух точках. Эта труба была направлена на нивелирующий стержень и, когда в течение дня температура поднималась, а потом падала, изменения длины проволоки были видны по наблюдаемому в оптическую трубу движению точки стержня.

Однако этот случай представлял собой только доказательство данного факта, но никак не измерение. В девятнадцатом веке использовались различные методы определения расширения; я же почти исключительно пользовался методом сравнения, который барон Вреде рекомендовал Международному бюро в том виде, в каком он его использовал сам, и который, впоследствии усовершенствованный Ж. Р. Бенуа, привел к методам, распространенным в наши дни.

Два измерительных микроскопа, прикрепленные вертикально к каменным опорам, направлены на метки на погруженном в воду стержне и измеряют изменения его длины при последовательности различных температур. Однако в силу того, что расстояние между микроскопами не зафиксировано, процедура состоит в поочередном измерении исследуемого стержня и эталона, который находится при практически постоянной температуре во втором лотке. Этот метод называется *абсолютным.* Для повседневной работы он заменяется *относительным* методом, в котором контрольный эталон помещается в ту же ванну, что и исследуемый стержень. Расширение последнего представляет собой алгебраическую сумму относительного расширения, определенного в ходе эксперимента, и расширения эталонного стержня, определенного ранее с помощью абсолютного метода. Я воспользовался методом сравнения в относительном виде, взяв в качестве контрольного эталона иридиево-платиновый стержень.

Однако методом сравнения можно пользоваться лишь в ограниченном диапазоне температур, границами которого в моем эксперименте были 0° С и 38° С. Чтобы достичь температур выше 200° С и тем самым лучше охарактеризовать превращения, я прикрепил исследуемый образец к латунному стержню так, что на одном конце они оказались связанными, а на оставшейся части длины могли свободно расширяться.

Относительные расширения измерялись на свободном конце с помощью микроскопа.

Позднее П. Шевенар изобрел дилатометр, посредством которого можно очень точно измерить относительные расширения маленького образца исследуемого металла (от 25 до 50 мм) и эталона, сделанного из должным образом выбранного сплава. Его дилатометр, оснащенный фотографической записью, позволял охватить весь диапазон температур от температуры жидкого воздуха до 1000° С. В общих частях полученные нами диаграммы совпадают, но диаграмма Шевенара уходит дальше.

Необратимые изменения. Знание необратимых изменений объема сплавов было совершенно необходимо, особенно для того, чтобы установить их предел. Я изучал различные свойства двойных и тройных ферро-никелевых сплавов с хромом, медью и т. д. Я смог проследить только нижнюю часть цикла. Полные циклы гораздо позднее установил П. Шевенар.

Когда пруток из необратимого сплава, имеющий низкую температуру, нагревают, он расширяется в соответствии с почти прямолинейной кривой ABC (рис. 2b), потом, при определенной температуре, скорость расширения падает, затем начинается постепенное сжатие, которое продолжается ровно до завершения превращения, после чего расширение возвращается к своему обычному курсу DE.

Если пруток охладить, то окажется, что он сжимается вдоль EDF, причем в последней точке начинается расширение, которое прекращается в B, уступая место сжатию вдоль BA.

Если приостановить охлаждение в точке B' и вновь нагревать пруток, движение будет происходить вдоль линии $B'C'$ и продолжится вдоль кривой $C'DE$, как и в предыдущем случае. Наклон прямой линии AC находится между 10 и 11×10^{-6}, а наклон EF составляет около 18×10^{-6}.

Первая линия показывает расширение обыкновенных чугунов или сталей, вторая — расширение вышеупомянутого немагнитного сплава железа, никеля и хрома. Между этими двумя линиями можно получить все промежуточные расширения, останавливая превращение в любой точке на одной из кривых CD или FB.

Вдоль кривой ABC железо находится в состоянии, которое мы назовем «устойчивым холодным»; вдоль кривой EDF оно находится в «устойчивом горячем» немагнитном состоянии.

Сопоставляя расширения необратимых сплавов, мы обнаруживаем, что они расположены между отрезками прямых линий AB и CB на

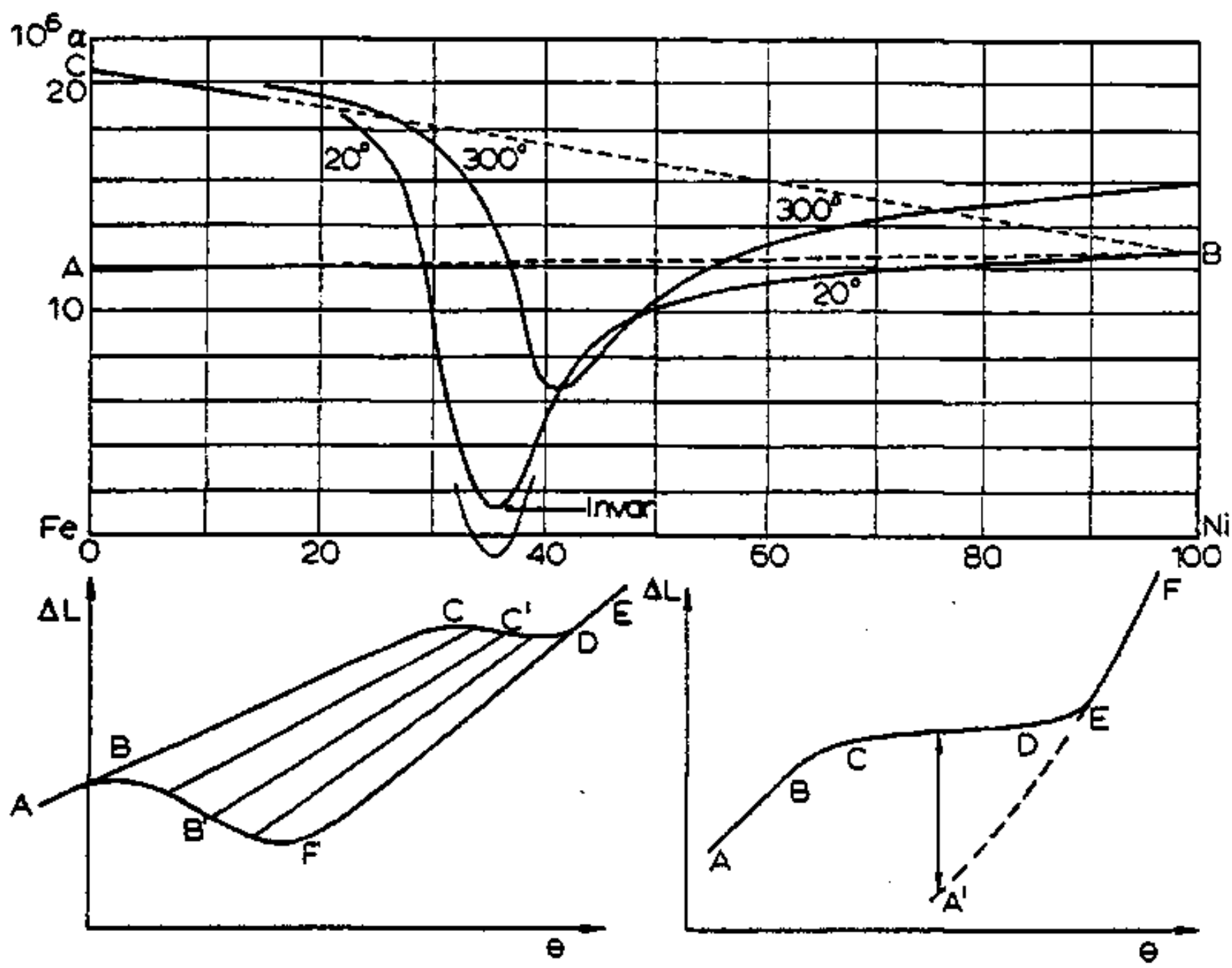


Рис. 2. a. Диаграмма, показывающая способность никелевых сталей к расширению как функцию их состава. Две прямые линии, берущие начало в A и C, ограничивают область необратимых сплавов; кривые представляют реальную способность обратимых сплавов к расширению при 20° C и при 300° C ($\alpha_{20}, \alpha_{300}$). b, c. Диаграммы для обратимого и необратимого сплава.

рис. 2a, относящимися к их конкретной зоне. Вопреки очевидному правило смесей соблюдается, но его следует применять к соединению никеля с той разновидностью железа, которая присутствует в сплаве в пределах охваченной зоны, или же к соединению никеля с долей каждого из двух состояний железа, которая зависит от достигнутой степени превращения.

Зона, которую могут занять более высокие расширения, постепенно увеличивается до обыкновенных температур при добавлении марганца, хрома или углерода, как это упоминалось при обсуждении магнетизма.

Обратимые изменения. Эксперименты с обратимыми сплавами были гораздо более исчерпывающими.

Первое исследование состояло в определении аномальной кривой

как функции содержания никеля, без учета добавок марганца, углерода и кремния, которые присутствуют в сплавах в различных количествах и из-за которых кривая становится немного неопределенной. Затем я изучил ряд сплавов, содержащих максимально возможные количества марганца и углерода. Определив таким образом коэффициенты, относящиеся к этим добавкам для всех значений содержания никеля, я смог представить результаты в виде, приведенном к сплавам с постоянным соотношением добавок (0,1% Mn, 0,4% C), которые я назвал *стандартными*. Более того, после горячей прокатки и охлаждения на воздухе об этих сплавах будут говорить, что они находятся *в естественном состоянии*.

Поскольку расширение материала задается уравнением

$$l_0 = l_o(1 + \alpha\theta + 2\beta\theta^2),$$

то выражение

$$\alpha_0 = \alpha + 2\beta\theta$$

называется *действительным* коэффициентом при θ, который, в то же время, является средним коэффициентом расширения между 0° C и 2θ; β — *квадратичный коэффициент*.

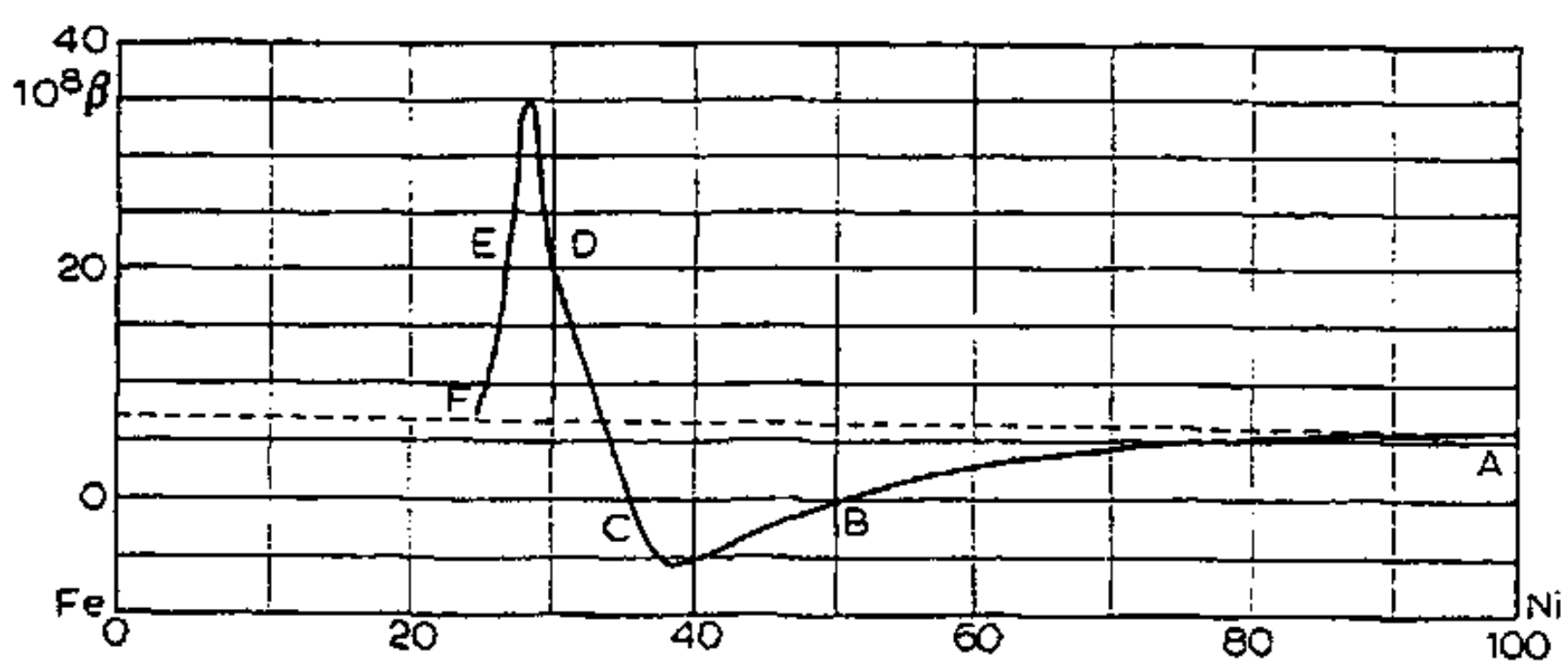


Рис. 3. Значения коэффициента β в обратимых сплавах. Буквы, отмеченные на кривой соответствуют буквам рис. 1c и 2c.

Способность большинства металлов к расширению в широком диапазоне температур хорошо описывается уравнением вышеприведенного вида; для рассматриваемых сплавов это правило можно адекватным образом применить к более узкому диапазону температур, в котором

я пользовался методом сравнения. Однако при увеличении температурного диапазона скоро становится ясно, что для представления данного явления уравнения второй степени уже не достаточно. Тем не менее, нам удобно пользоваться именно такой формой уравнения, приписывая β зависящее от температуры значение, которое обозначает полукривизну кривой расширения в каждой точке.

Для нормальных, обратимых никелевых сталей значения α_{20} и β_{20} представлены кривыми, изображенными на рис. 2а и 3. Линия AB соединяет значения одних и тех же коэффициентов для никеля и стали в холодном устойчивом состоянии и, таким образом, демонстрирует величину аномалии в коэффициенте расширения. Для β эта аномалия несомненно сначала положительна, а затем отрицательна. Судя по всему, то же самое справедливо и для α, но линия CB, которая начинается со значения коэффициента в гамма-железе и ограничивает зону больших значений коэффициента расширения необратимых сплавов, показывает аномалию как совершенно отрицательную. И, фактически, ее следует относить к этому представлению.

Аномалия огромна, поскольку коэффициент расширения сплавов изменяется в отношении примерно 1 к 15 и достигает величины, составляющей лишь одну четверть от самого низкого значения, обнаруженного в чистом металле. Более того, мы увидим, что, с практической точки зрения, низкие значения коэффициентов расширения в данном случае достигаются с помощью недорогих металлов и составляют абсолютно непрерывный спектр в отличие от разрывной и дорогой последовательности менее расширяющихся металлов: иридия, тантала, вольфрама.

Сплав, коэффициент линейного расширения которого немного отличается от минимального, получил родовое название *инвар*: сокращенное от неизменный[1]. Координаты минимума для стандартных сплавов в естественном состоянии: Ni=35,6 %; $\alpha = 1,2 \times 10^{-6}$.

Точное значение некоторых координат не особенно важно. В действительности, они относятся к сплаву, в котором добавки были зафиксированы произвольно в размере средних количеств, содержащихся в промышленных сплавах, и очень скоро мы увидим, что эти добавки оказывают ощутимое влияние на положение минимума. Более того, любая термическая или механическая обработка изменяет способность сплава к расширению, увеличивая ее в случае отжига с медленным охлаждением, уменьшая при быстром охлаждении и почти не изменяя при закалке. Проводя одну за другой обработки, снижающие коэффи-

[1]Invar (инвар) образовано от английского invariable — неизменный. — *Прим. пер.*

циент расширения сплава, можно тем самым довести его коэффициент расширения до значения, на $1,5 \times 10^{-6}$ ниже соответствующего естественному состоянию, и сделать это значение отрицательным. Затем, после того как это достигнуто, нагревание в течение нескольких часов, например, при температуре 100° С вновь повысит значение коэффициента расширения и может довести его почти до нуля. Таким образом, был разработан метод изготовления из инвара нескольких километров проволоки, коэффициент расширения которой можно было установить исключительно с помощью очень точных измерений. Этот результат имеет огромное практическое значение, и очень скоро мы это увидим.

Широкий диапазон изменений коэффициента β достаточен, чтобы предположить, что общая кривая, представляющая действительное расширение сплавов как функцию их состава, будет очень быстро деформироваться при изменении температуры, которой она соответствует. Более того, сравнение кривых на рис. 1а и 3 показывает, что максимальное значение β для частного случая обыкновенных температур соответствует, главным образом, той области, где появляется или исчезает магнетизм. В 1896 году мне удалось продемонстрировать, что это совпадение универсально вплоть до предела температур, которых я смог достичь, так что я сразу же заключил, что полная кривая характерных для данного сплава изменений длины переносится на соседние сплавы простым сдвигом по температурной шкале. Из этого я вывел правило соответственных состояний, которое несомненно является лишь грубым приближением к реальности, но, тем не менее, позволяет сделать обобщение, а следовательно, и предсказание.

Это правило можно сформулировать так: при определенной температуре данный сплав находится в том же состоянии, что и другой сплав при температуре, отличающейся от той, при которой впервые появляется магнетизм, на ту же величину, что и в первом сплаве.

Чтобы применить это правило, сопутствующие значения α и β для ряда сплавов, рассматриваемых при одинаковой температуре, будут сравниваться как принадлежащие одному и тому же сплаву при нескольких температурах. Таким образом, можно *a priori* проследить кривую расширения данного сплава, общий вид которой показан на рис. 2с. По существу, на этой кривой можно выделить пять интервалов, два крайних участка, AB и EF, где β является слабо положительной, давая результат, полученный из правила железо-никелевых смесей в холодном и горячем устойчивых состояниях, и три промежуточные области, BC и DE со слабо отрицательными или сильно положительными β и, нако-

нец, CD, которая представляет собой область перегиба, где β изменяет свое значение с отрицательного на положительное и где, в результате этого, коэффициент расширения достигает своего минимума.

Между 150° и 200° С коэффициент расширения инвара начинает расти, а между 250° и 300° С он становится нормальным.

Поскольку при увеличении содержания никеля вся кривая сдвигается в сторону высоких температур, сплав будет подбираться в соответствии с температурным диапазоном, характерным для предполагаемой области его применения. Однако следует помнить, что кривая деформируется медленно и что при высоких температурах не существует сплавов с очень низким коэффициентом расширения.

Верхняя кривая на рис. 2a, в качестве примера, представляет значения коэффициента расширения никелевых сталей при 300° С, которые были найдены в ходе экспериментов Шевенара. Аномалия по-прежнему является ярко выраженной, но минимум значительно сдвинулся к более высокому содержанию никеля, как это предсказывала тенденция значений β.

Расстояние между кривой FEA' и кривой $EDCBA$ (рис. 2c) является амплитудой аномалии при любой температуре.

Упругие свойства

Модуль упругости. Необратимость и обратимость, обнаруженные в ходе изучения магнитных свойств сплавов или изменений их объема связаны, как и следовало ожидать, с их упругими свойствами. Здесь превращения, влияние которых мы уже установили, опять вносят перемены, которые являются функцией доминирующей температуры или даже зависят от температурных воздействий, которым эти сплавы ранее подвергались.

В общем случае, любое расширение материалов снижает модуль упругости, сокращая интенсивность межмолекулярных сил. Необратимые изменения объема имеют тот же результат, и вследствие превращения, которому подверглись необратимые никелевые стали при низких температурах, их модуль упругости уменьшается примерно на одну десятую первоначального значения, причем это уменьшение происходит вдоль кривой FB (рис. 4b). Наконец, мне хотелось бы добавить, что система, частью которой является эта кривая, представляет все изменения модуля в этом классе сплавов, а ее аналогия с изменениями объема, проиллюстрированными на рис. 2b, совершенно очевидна.

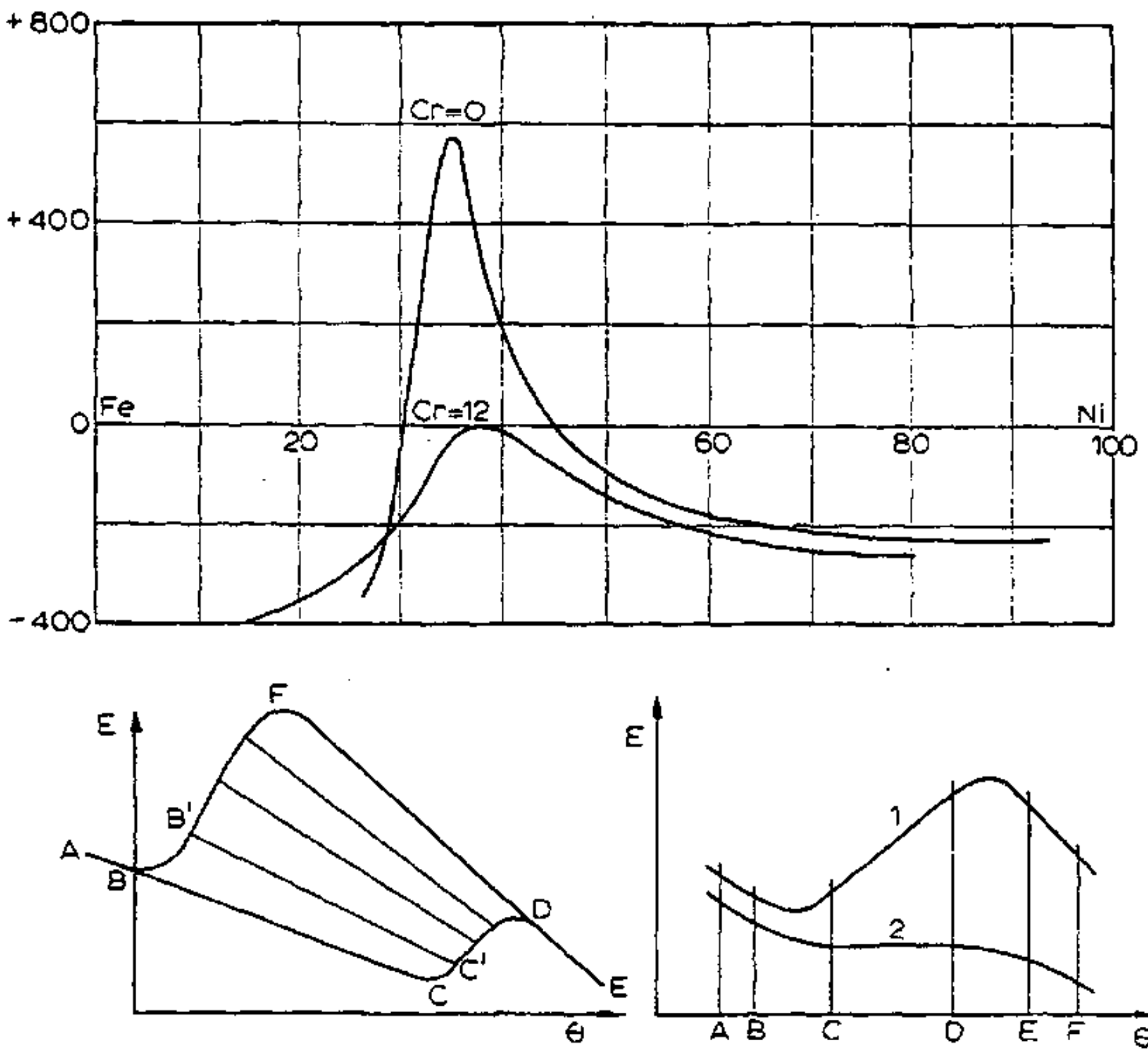


Рис. 4. a. Термоупругие коэффициенты стандартных железо-никелевых сплавов и сплавов с 12-и процентным добавлением хрома. b, c. Изменения модуля упругости необратимого и обратимого сплавов. Буквы на этой диаграмме совпадают с буквенными обозначениями на диаграммах 1, 2 и 3.

По сравнению со значениями, характерными для железа и никеля, кривая модулей как функции содержания расположена ниже, причем максимально низкое значение приходится на область инвара, где оно достигает примерно одной четверти величины, которую показало бы правило смесей. Таким образом, минимальный модуль упругости при обычной температуре близок к $1,4 \times 10^{12}$ единиц СГС.

Изменения модуля упругости с температурой. — Интерес представляет, главным образом, изучение изменения модуля упругости с температурой, независимо от того имеет место изгиб или кручение.

В последнем случае я провел короткое исследование, которое показало, как в случае кручения можно вывести эти термические коэффициенты из коэффициентов, определяющих изгиб. Этот вопрос очень подробно исследовал П. Шевенар. Во всех случаях использовался метод крутильного маятника.

В качестве инструмента изучения термоупругих коэффициентов изгиба был выбран хронометр, который является легко доступным, очень маленьким и легко дает результат, который можно использовать на практике. Его недостаток заключается в том, что успешное изготовление и настройка балансирной пружины (волоска) требуют умений специалиста. В этом исследовании очень большую помощь я получил от талантливого настройщика Поля Перре, который сам предложил мне свои услуги вскоре после того, как я опубликовал свои первые труды по инвару; впоследствии эксперименты проводились под моим руководством в технических лабораториях Société des Fabriques de Spiraux Réunies.

Из исследуемого сплава была сделана балансирная пружина, установленная на маятнике из известного металла; вся эта конструкция представляет собой регулятор хронометра.

Температурные изменения периода колебаний маятника, приводимого в движение балансирной пружиной, обусловлены одновременно расширением и изменением модуля изгиба.

Вопреки очень распространенному мнению, одно только расширение балансирной пружины снизит период колебаний, т. е. при повышенных температурах хронометр будет идти быстрее, так как при определении упругого момента изменение поперечного размера происходит четыре раза, а изменение длины — только один раз. В свою очередь, согласно общепринятому представлению, расширение маятника замедляет ход хронометра при высоких температурах. В случае стальной балансирной пружины и латунного маятника эффекты расширения почти полностью уничтожают друг друга. Но оснащенный таким образом хронометр отстает на 11 секунд в день при повышении температуры на каждый градус; это отставание почти полностью обусловлено температурным изменением модуля упругости, коэффициент которого отрицателен.

Для обратимых сплавов значения термоупругого коэффициента, $dE/d\theta$, проявляют не менее странную аномалию, чем значения коэффициента расширения. Тенденция показана верхней кривой (Cr=0) на рис. 4а. Начиная с отрицательного, т. е. нормального, значения, термоупругий коэффициент с увеличением содержания никеля очень круто поднимается вверх, пересекает нулевую ось, продолжает расти, переходит через выраженный максимум в области инвара, затем начинает

снижаться и более плавно движется к значению, соответствующему никелю. Таким образом, для всего класса сплавов термоупругий коэффициент положителен; будучи изогнутыми при обычной температуре, эти сплавы при нагревании стремятся выпрямиться.

Если бы на графике вместо модуля Юнга был *отложен коэффициент* деформируемости сплавов как функция температуры, то знак поменялся бы на противоположный, а кривая, начинаясь с положительных значений, имела бы минимум. Ее форма в этом случае не особенно отличалась бы от формы кривой коэффициента расширения, а общее происхождение обеих аномалий стало бы очевидным.

Вследствие низкого предела упругости металлов при высоких температурах изучение их изгибных деформаций в этом случае далеко не просто. Тем не менее, применение правила соответственных состояний позволяет предположить типичное поведение модуля Юнга. Его общая тенденция показана кривой I, рис. 4с, где минимум и максимум относятся к двум точкам, в которых вся кривая пересекает нулевую ось; области *AB* и т. д.. . . , которые уже появлялись при изучении магнитных свойств и коэффициента расширения, присутствуют и на этой кривой.

Трехкомпонентные сплавы

Сплавы, свойства которых только что были описаны, не являются простыми смесями железа и никеля без каких-либо других добавок. На самом деле, они представляют целые комплексы, в которых превалируют, главным образом, их главные компоненты, поскольку они составляют более 99 % всей массы сплава. Количество добавок близко к необходимому минимуму, хотя его можно увеличить до второго предела и тем самым получить трех- или четырехкомпонентные сплавы, свойства которых интересно знать.

Не говоря уже о важности данного исследования с физико-химической точки зрения, эти сплавы могут обладать свойствами, которые делают их особенно подходящими для практических целей. Так, достаточное добавление марганца делает сплав пригодным для литья, тогда как добавление хрома или углерода, или обоих вместе, повышает предел упругости сплава, из которого после этого можно изготавливать пружины.

Мои исследования в большей степени касались сплавов железа, никеля и марганца, причем они оказали достаточно всесторонними, чтобы по принципу трехмерных диаграмм Гатри построить семейство кривых, изображенное на рис. 5.

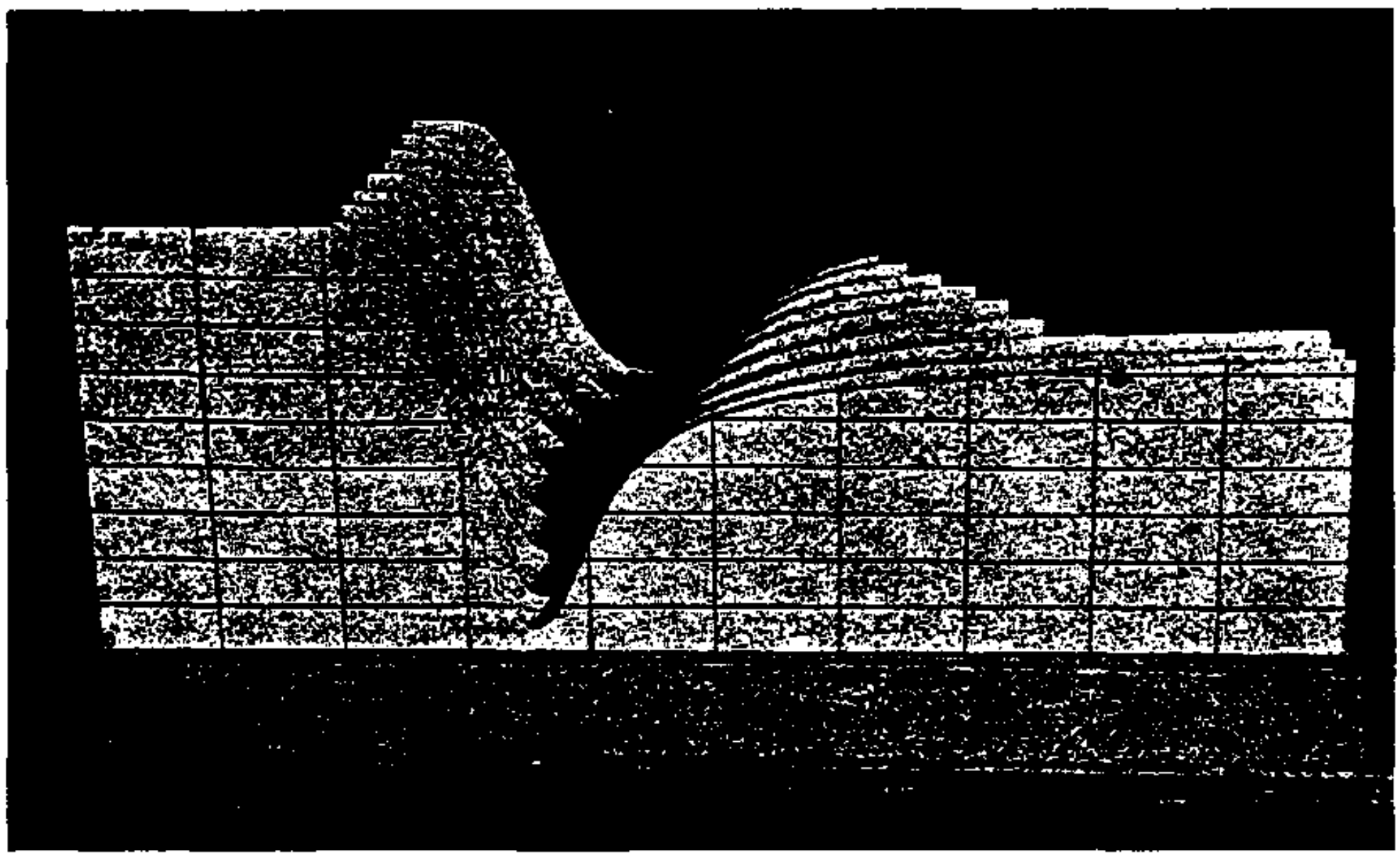


Рис. 5. Трехмерная диаграмма для сплавов железа, никеля и марганца.

Первая кривая относится к стандартным сплавам, содержащим 0,4% марганца, другие относятся к сплавам, содержащим целое количество процентов от 1 до 8. Эта трехмерная диаграмма показывает, что минимум быстро повышается, в то же время сдвигаясь к более высоким значениям содержания никеля.

Изучение действия хрома, меди и углерода, хотя и в менее широких пределах, обеспечило получение точных графиков, показывающих тенденцию изменения величины и положения минимума. Эта тенденция выражена двумя диаграммами, изображенными на рис. 6a и 6b. Небольшая экстраполяция к более высокому содержанию марганца показывает, что когда этот металл присутствует в количестве 10% в сплаве с минимальной расширяемостью, он сокращает аномалию примерно вполовину.

Кривые на рис. 7 представляют истинный коэффициент расширения при 20° С для предельных содержаний добавочного компонента. Изучение его действия имело очень важное значение в связи с практической проблемой, решения которой я искал. В сущности, проблема состояла в улучшении условий, при которых можно получить сплав с равным нулю термоупругим коэффициентом, — сплав с неизменным модулем

упругости, который я заранее назвал *элинваром*, чтобы определить программу его получения.

Бинарные сплавы обеспечивают двойное решение проблемы. Но, с одной стороны, кривая термоупругого коэффициента пересекает нулевую ось под очень крутым углом, так что малейшие ошибки в составе и даже простые дефекты однородности сплава приводят к получению свойства, отличающегося от искомого; с другой же стороны, нулевое значение — это не что иное, как минимум или максимум кривой вариаций, и это значение на практике существует лишь в небольшом диапазоне температур.

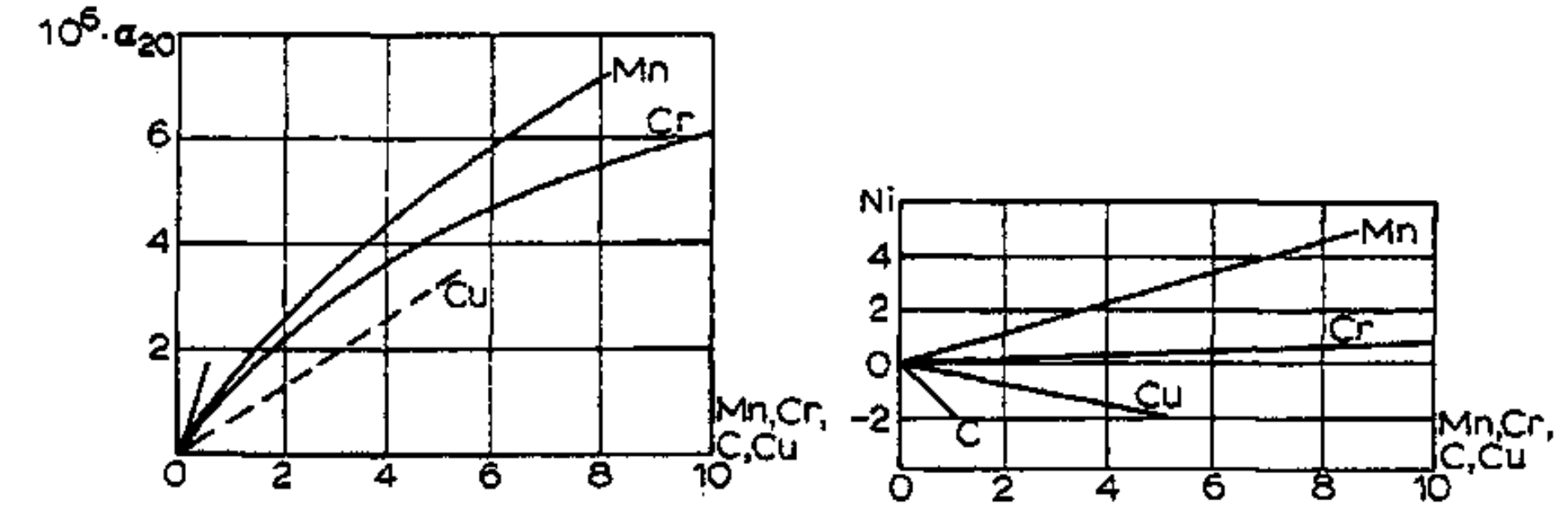


Рис. 6. a, b. Тенденция поведения минимума никелевых сталей, содержащих изменяющиеся добавки марганца, хрома, меди и углерода.

Если же мы рассмотрим увеличение минимума расширяемости в тройных сплавах и аналогию, существующую между аномалиями коэффициентов упругости и расширения, мы заранее можем быть уверены, что при соответствующих добавках кривая термоупругого коэффициента будет касательной к нулевой оси, вследствие чего приведет к легкому получению элинвара. Более того, правило соответственных состояний показывает, что все эти модули для одного и того же сплава будут демонстрировать не максимум или минимум, а плоский участок, вероятно, очень широкий и почти горизонтальный.

Оба этих условия обозначены на нижней кривой (Cr=12) на рис. 4a и на кривой 2 на рис. 4c (область *CD*); они характеризуют элинвар.

Прямые опыты установили величину добавок, необходимых для получения элинвара. Требования к пределу упругости направили исследования, главным образом, к отверждающим добавкам: хрому, вольфраму и углероду. Число решений бесконечно, поскольку для сокращения ано-

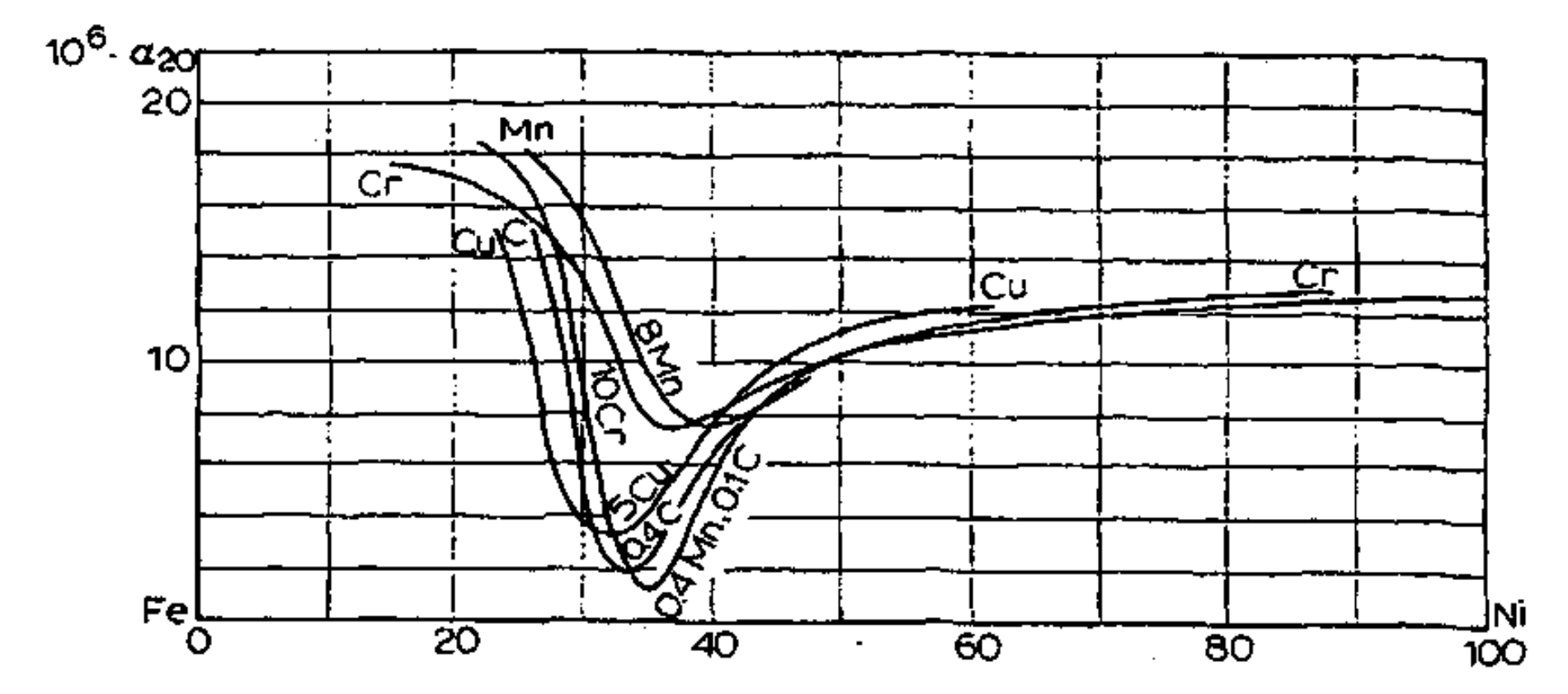


Рис. 7. Истинная расширяемость при 20 °С никелевых сталей с добавками марганца, хрома, меди и углерода до пределов, достигнутых на опыте.

малии добавки можно непрерывным образом заменять друг на друга. Во время опытов по кручению Шевенар нашел истинный элинвар с 12-ю процентной добавкой хрома, причем остальные добавки оставались близкими к необходимому минимуму.

Плавные или быстрые изменения

Достаточно замечательные свойства никелевых сталей являются весьма многообещающими для метрологии. Однако надежды, которые основывались на возможности их использования, долгое время ограничивались их реальным недостатком, а именно: небольшой нестабильностью, выявленной в ходе точных измерений длины контрольных образцов, которые проводились через годы или после разнообразных видов термообработки.

Характер этих изменений варьируется от сплава к сплаву, поэтому чтобы дать их эффективное описание, нужно обратиться к конкретному сплаву.

Например, пруток из инвара, охлажденный в воздухе от температуры ковки и содержащийся при температуре окружающего воздуха, расширяется с течением времени сначала достаточно быстро, затем заметно медленнее, так что через двадцать лет очень точные измерения могут выявить только то изменение, которое происходит в течение первого года.

Если бы охлаждение было прервано на некоторое время при температуре 100° С, то пруток расширился бы несравнимо быстрее, нежели при обычных температурах, и, примерно через сто часов, движение почти невозможно было бы ощутить. Вообще говоря, быстрая начальная скорость является экспоненциальной функцией от температуры, такой, что каждый раз, когда температура увеличивается на 20° С, скорость возрастает примерно в семь раз. Таким образом, это движение подчиняется законам, ранее установленным Аррениусом.

Из почти полного отсутствия при температуре 100° С движение возобновляется, когда пруток доводят до обычной температуры, но является гораздо меньшим, чем в отсутствии промежуточной стадии. Если по истечении нескольких месяцев или лет пруток вновь нагреть до 100° С, то можно увидеть, как он быстро сожмется и вернется к своей длине после первого нагревания.

Таким образом, при любой температуре длина прутка стремится к предельному значению; между 0° С и 100° С эти значения практически лежат на кривой, ординаты (отрицательные) которой, начиная с общего нуля, пропорциональны квадрату температуры. Это правило продолжает действовать и по достижении 100° С, затем скорость изменения падает, и, когда сплав переходит в немагнитное состояние, он испытывает лишь очень малые изменения.

Для стандартного инвара разность между конечными длинами прутков при 0° и 100° С имеет порядок одной тридцатимиллионной. Первое расширение, при 100° С, после температуры ковки, имеет примерно такое же значение. Однако величина этих изменений является крутой функцией содержания никеля. Таким образом, когда оно увеличивается от содержания, соответствующего инвару, величина изменений быстро уменьшается, а когда содержание никеля достигает 42 %, изменений не происходит вообще. Затем это изменение принимает обратное направление, проходит через отрицательный минимум, затем продолжает увеличиваться до тех пор, когда содержание никеля не достигнет 70 %.

Из моего изучения тройных сплавов в области нестабильности недавно появилось несколько очень важных результатов.

Я обнаружил, что присутствие марганца и хрома снижает нестабильность, тогда как присутствие углерода усиливает ее. С помощью экспериментов в ходе которых, благодаря службам Aciéries d'Imphy, в сплав удалось ввести предельно точные добавки углерода, я обнаружил, что нестабильность пропорциональна содержанию углерода и что, вследствие этого, сплавы, не содержащие углерода, были бы идеально стабильными.

Однако сплавы, содержащие железо, невозможно освободить от углерода полностью, так что можно было подумать, что инвар всегда будет немного нестабильным.

Мне показалось, что причина этой нестабильности может состоять в превращениях цементита (Fe_3C) — соединения, которое образуется почти всегда, когда железо и углерод встречаются вместе и которое опять-таки испытывает превращения, сопровождаемые изменением объема.

Таким образом, ответ на проблемы нестабильности будет заключаться в удалении цементита. Метод его удаления прост, он состоит во введении в сплав компонента, обладающего сильным сродством к углероду, например: хрома, вольфрама или ванадия.

Снижение содержания углерода до минимального понижает расширяемость, а дополнительный компонент повышает ее совсем чуть-чуть. Это новый метод, поэтому наилучшие условия еще не были ни определены, ни, тем более, достигнуты. Но уже сейчас нам удалось получить отливки из сплава, расширяемость которого оставалась равной расширяемости высококачественного инвара, а нестабильность сокращалась до одной десятой нестабильности стандартного инвара.

Медленные изменения упругих свойств сплавов, связанные с изменением их размеров, не получили систематического изучения. Однако можно сказать почти наверняка, что они подчиняются аналогичным законам в том смысле, что любое увеличение объема влечет за собой уменьшение модуля. Отношение относительных изменений двух этих свойств, будь то превращения необратимых сплавов или вообще расширение нормальных металлов и сплавов, имеет величину порядка $20 \div 30$, т. е. увеличение длины сопровождается двадцати- или тридцатикратным относительным уменьшением модуля.

В отсутствие прямого исследования с определенной степенью вероятности можно предполагать вид законов, управляющих плавными или быстрыми изменениями упругих свойств, и даже порядок величины их параметров.

Области применения

Необычные свойства никелевых сталей обеспечивают с помощью совершенно новых методов подход к, в общем-то, простому решению технических и научных проблем, которые доселе рассматривались как трудные или сложные.

Аномалии упругости или расширения и даже магнитные превращения этих сплавов привели к определенным их применениям, одного только перечисления которых будет достаточно, чтобы это сразу стало очевидным.

Присутствие в магнитном контуре элемента, сделанного из сплава, примерно такого состава, при котором магнетизм быстро исчезает, изменяет свойства этого контура как функцию температуры. Если, скажем, эта деталь является якорем магнита, взаимное притяжение будет уменьшаться с ростом температуры, пока не исчезнет вовсе. Таким образом, этот контур можно применить как автоматический ограничитель температуры; для этого якорь достаточно нагрузить подходящим механическим устройством. С помощью куска сплава также можно шунтировать магнитное поле, величина которого так уменьшается с ростом температуры, что поле будет стремиться усиливать само себя. Начав с этой идеи, Э. Мейлан оснастил измерительные приборы температурной компенсацией вариаций магнитного поля.

Более того, если двигаться по кривой расширяемости, на ней есть область с содержанием никеля, близким к 45 %, в которой последовательные сплавы имеют расширяемость всех известных типов стекла. Эти сплавы можно использовать для создания оптических оправ с постоянным захватом, а также электрических выводов для ламп накаливания. В последнем случае проволока, из которой при длительном нагревании в вакууме сначала было удалено большое количество окклюдированного газа, легко сплавляется со стеклом. Получившийся таким образом *платинит* почти вытеснил используемую в этих целях платину, обеспечив возможность использования последней в других областях. Экономия, которая была достигнута в результате этого, составляет порядка ста миллионов крон.

Элинвар, в свою очередь, подходит для изготовления монофилярных подвесов или, при небольшом изменении его состава, для изготовления камертонов, период колебаний которых не зависит от температуры. Эта информация, которую я опубликовал в 1898 году, подтвердилась в 1912 году Феликсом Робином, который много работал над изучением термоупругости никелевых сталей.

Этот беглый обзор ясно демонстрирует разнообразие проблем, которые можно решить, используя никелевые стали.

Сейчас мы подробно рассмотрим очень тонкие области применения этих сталей, методика или научная важность которых требует более детального исследования.

Измерение длины

Общее понятие. Для определения пределов, в которых могут использоваться никелевые стали при изготовлении приборов для измерения длины, необходимо знать те их свойства, которые существенны в каждом конкретном случае.

Эти сплавы замечательно полируются; при условии, что содержание марганца или углерода не слишком близко к минимальному, они, в общем случае, устойчивы к образованию каверн. На них можно наносить идеально чистые риски. Они слабо окисляются и способны выдержать погружение в холодную воду на несколько часов. Через несколько лет, проведенных во влажной атмосфере, полированные поверхности остаются неиспорченными или даже покрываются очень тонкой пленкой, которую можно удалить, просто осторожно потерев их мягкой кожей; с другой стороны, пары кислот достаточно быстро воздействуют на никелевые стали, и их действия следует избегать всеми возможными способами.

Однако я должен упомянуть, что инварные сплавы, подходящие для любого измерения длины, не являются в точности одинаковыми. Длины измеряются с помощью линеек, размеченные поверхности которых наблюдаются в микроскоп, или, как мы вскоре увидим, даже с помощью свободно подвешенных проволок. Устойчивость к образований каверн является необходимым качеством металлов, используемых для размеченных эталонов; для проволок же требуется высокий предел упругости. В первом случае будет увеличено содержание марганца, во втором — в сплав будет введено небольшое количество хрома. Углерод был бы полезен в обоих случаях, но мы уже видели, что он вызывает неустойчивость, а следовательно, должен быть использован в минимальных количествах.

Хотя, с одной стороны, совершенно верно то, что обработанная проволока должна иметь высокий предел упругости, с другой стороны, ее изготовление требует высокой степени ковкости. Эти свойства кажутся, в некоторой степени, противоречивыми. Тем не менее, сплавы типа инвара, обладают ими в том смысле, что в отожженном состоянии они имеют большую растяжимость, но при механической деформации быстро затвердевают, так что если начальная длина отожженной проволоки при волочении удвоилась, то она способна к достаточно большим упругим деформациям.

нестабильность никелевых сталей, как уже было сказано, налагает предел на области, в которых мы изначально могли поддаться искушению их применить. Однако при условии, что измерительный эталон,

сделанный, допустим, из инвара, время от времени будет проверяться с помощью абсолютно устойчивого эталона, то его почти с полной надежностью можно использовать в качестве инструмента для интерполяции; во всех случаях, когда его температуру сложно или невозможно определить точно, его важность становится первостепенной.

В прошлом подробное изучение законов, управляющих изменениями в инваре и близких к нему сплавов, дало возможность получить результаты, свободные от большинства воздействий этих изменений. А в будущем перспектива создания идеально устойчивого инвара устранит большую часть возражений, которые могут быть выдвинуты против использования сталей с низким коэффициентом расширения при высокоточных измерениях.

Геодезические базисы. Любая геодезическая (триангуляционная) сетка опирается на одну или более базисных линий, каждая из которых содержит длину, отмеченную на земле между фиксированными точками, причем расстояние между ними является настолько большим, насколько это позволяют обстоятельства, т. е. обычно имеет порядок около десяти километров и измеряется с максимальной точностью.

Определение этого расстояния на открытом воздухе и, зачастую в плохо определенных температурных условиях, требует особых мер предосторожности, которые геодезисты упорно стремились усовершенствовать в течение всего последнего столетия. В течение трех первых четвертей века они пытались, главным образом, повысить точность, как правило, не заботясь о стоимости этих действий. Затем наступила реакция; было осознано, что можно выиграть гораздо больше, если разделить работу между измерением углов и измерением длин, увеличивая количество базисных линий или удлиняя их за счет небольшой потери точности измерения.

Э. Йедерин, который собрал и систематизировал разрозненные методы, изобрел новые процессы и разработал методику, был главным сторонником этой реакции, породившей новый принцип построения триангуляционных сеток.

В традиционной геодезии измерительным инструментом был жесткий стержень (обычно длиной четыре метра), объединенный с микроскопами, нацеленными на конечные отметки, чтобы зафиксировать расстояние между ними по земле. Затем после того как стержень передвигался на расстояние, равное своей длине, положение третьего микроскопа фиксировалось по отношению ко второму и т. д. Этот метод был точным, но дорогим. Во избежание влияния излучения инструменты и наблюдатели

располагались в переносных шалашах. Сами инструменты были тяжелыми, и, прежде чем их удавалось разместить на земле, нужно было провести некоторые подготовительные операции. Полная команда, необходимая для проведения таких измерений, состояла человек из шестидесяти, и, в те дни, когда все шло гладко, удавалось измерить одну сотню длин, т. е. 400 метров.

Измерительным инструментом, который предложил Йедерин, является растянутая проволока с постоянной нагрузкой. Она используется для определения относительных расстояний в последовательности легких вешек, которые можно без труда перевозить с места на место и устанавливать в нужное положение.

Нормальная длина проволоки Йедерина равна 24 метрам, что в шесть раз сокращает количество промежутков. Землю уже не нужно специально готовить; с помощью более длинных проволок можно пересекать овраги или реки, если это потребуется (самая длинная проволока, использованная до настоящего момента, равнялась 168 метрам), и все это при участии 12–15 человек. Короче говоря, этот метод гораздо экономичнее, а скорость измерений весьма отличается от той, которой можно достичь, используя линейку и микроскопы.

Конечно, весьма сложным моментом оставалась температура.

Йедерин правильно понимал, что наилучшим методом было применить принцип, принятый Бордой и Лавуазье, а именно: измерить по очереди все промежутки с помощью стальной и латунной проволоки, а разность между полученными величинами определит общую температуру в каждый момент времени. Однако метод, разработанный до открытия инвара, был гораздо менее точным, чем метод с использованием линейки и микроскопов, поскольку температура оставалась недостоверной; но, в целом, метод был более рациональной формой гораздо лучшего баланса между количеством базисных линий и количеством треугольников.

Как только Йедерин, занимавшийся подготовкой к измерению базисных линий для Шведско-русской экспедиции на Шпицбергене[1], узнал о существовании инвара, он попросил у меня необходимую проволоку. Я уже уделил данному вопросу достаточно серьезное внимание и проследил, чтобы Aciéries d'Imphy изготовили пригодные для измерения базисных линий проволоки, которые уже использовались во многих предварительных экспериментах. Влияние волочения на расширяемость уже было частично известно, так что нам удалось снабдить экспедицию проволоками, которые практически не обладали способностью к расширению.

[1] Архипелаг в Северном Ледовитом океане. — *Прим. пер.*

Успех измерений, сделанных на Шпицбергене в 1899 году, был поразителен. Письмо, присланное мне Йедерином из Тройренберг-Бей и датированное 13 сентября 1899 года, сообщает:

«Я очень рад уведомить Вас, что проведенные нами этим летом измерения базисных линий были абсолютно успешными. В прямом и обратном направлении мы измерили базис длиной в 10 024 метра. Пока мы выполнили лишь один условный расчет, который показал несовпадение всего в 19 мм. Мы не делали никаких скидок на расширение проволоки».

Письмо заканчивалось такими словами, в которых сквозь бесконечную грусть, на мой взгляд, просвечивает потрясающее меня мужество:

«Последний из наших кораблей завтра уходит в Стокгольм, и до июня 1900 года мы будем полностью отрезаны от мира. К нам лишь раз приходила почта, причем, судя по всему, часть ее потерялась».

Это послание, пришедшее из необитаемого мира, было для меня самым мощным и самым ценным поощрением. Мы с Бенуа провели свои эксперименты с еще большим нетерпением, и, когда, год спустя, в Париже состоялось заседание Геодезической ассоциации, во время которого результаты, представленные Шведско-Российской экспедицией, вызвали грандиозную сенсацию, мы смогли утверждать, что при дальнейшем усовершенствовании данного метода, которому мы были готовы посвятить все свои усилия, можно достичь еще более высокой точности. Ассоциация вынесла свою резолюцию по поводу данного эффекта, а комитет наделил постоянной властью Международное бюро, которое, наконец, вошло в этот проект по ее программе.

Настенный базис, построенный сразу же, использовался с 1901 года для исследований, которые с тех пор проводятся непрерывно.

Наблюдения, которые мы сделали на данный момент почти за двадцать лет, сейчас насчитывают несколько сотен тысяч. Однако за свои труды мы получили щедрую награду, поскольку нам удалось определить условия, при которых проволоки из инвара, сначала обработанные особым образом, затем проверенные в бюро или любой метрологической лаборатории, можно транспортировать в виде пружины к области нахождения базиса, затем разматывать и использовать без какого-либо изменения их характеристик.

Благодаря исключению ошибок измерений, вызванных влиянием температуры, использование проволоки из инвара значительно повысило точность данного метода. Чтобы извлечь выгоду из потенциальных возможностей данного метода, мы с Бенуа пришли к созданию частично нового оборудования, которое теперь гарантирует, что при измерении каждого промежутка — обыкновенно равного 24 метрам — никогда не

будет сделана ошибка порядка одной сто тысячной измеренной длины. Согласно принципу сложения ошибок на длине в 100 таких промежутков ошибки, которые могут произойти в результате наблюдений, не превысят одной миллионной.

В последние годы было проведено множество измерений базисных линий с использованием проволоки из инвара. Проверки, проведенные либо путем измерений в прямом и обратном направлениях, либо последовательными измерениями с использованием различных проволок, показали, что точность в одну миллионную является обычной. Поскольку установка оснащения не вызывает проблем, в настоящее время можно использовать такие места, которые были совершенно непригодны для старых инструментов: жестких линеек и микроскопов. Более того, в виду быстрой установки и больших промежутков, а также малого веса и легкой транспортировки оснащения, количество работающего персонала удалось сократить до одной пятой, а скорость измерений увеличить в десять раз: хорошо обученная команда способна измерить до пяти километров в день. Таким образом общая экономия на измерении базисов составляет около 98%.

Увеличение количества базисных линий и их длины ощутимо снижает влияние ошибок при измерении углов, так что можно сделать менее суровыми требования, которые традиционная геодезия была вынуждена на них накладывать, в результате чего опять-таки получается экономия.

Нерастяжимые трансмиссии. С точки зрения принципа, я почти полностью ограничусь лишь вопросом, который только что обсуждался, упомянув передачу на фиксированное расстояние с помощью проволоки из инвара.

Специальных применений проволоки из инвара немало. Например, на железных дорогах существует множество трансмиссий между некоторым действием в сигнальной будке и движением, которое происходит на рельсах при получении сигнала. Расширение проволоки цепи управления нарушает передачу: в случае достаточно резкого падения температуры оно может привести к преждевременному поступлению сигнала, а если температура быстро повысится, то расширение вообще способно нейтрализовать выполненное действие. Проволока из инвара стала средством устранения этих недостатков и оградила нас от опасностей, которые могут в результате возникнуть; однако она еще не используется повсеместно, поскольку, за исключением особых случаев, стоимость сплава считают непомерно высокой.

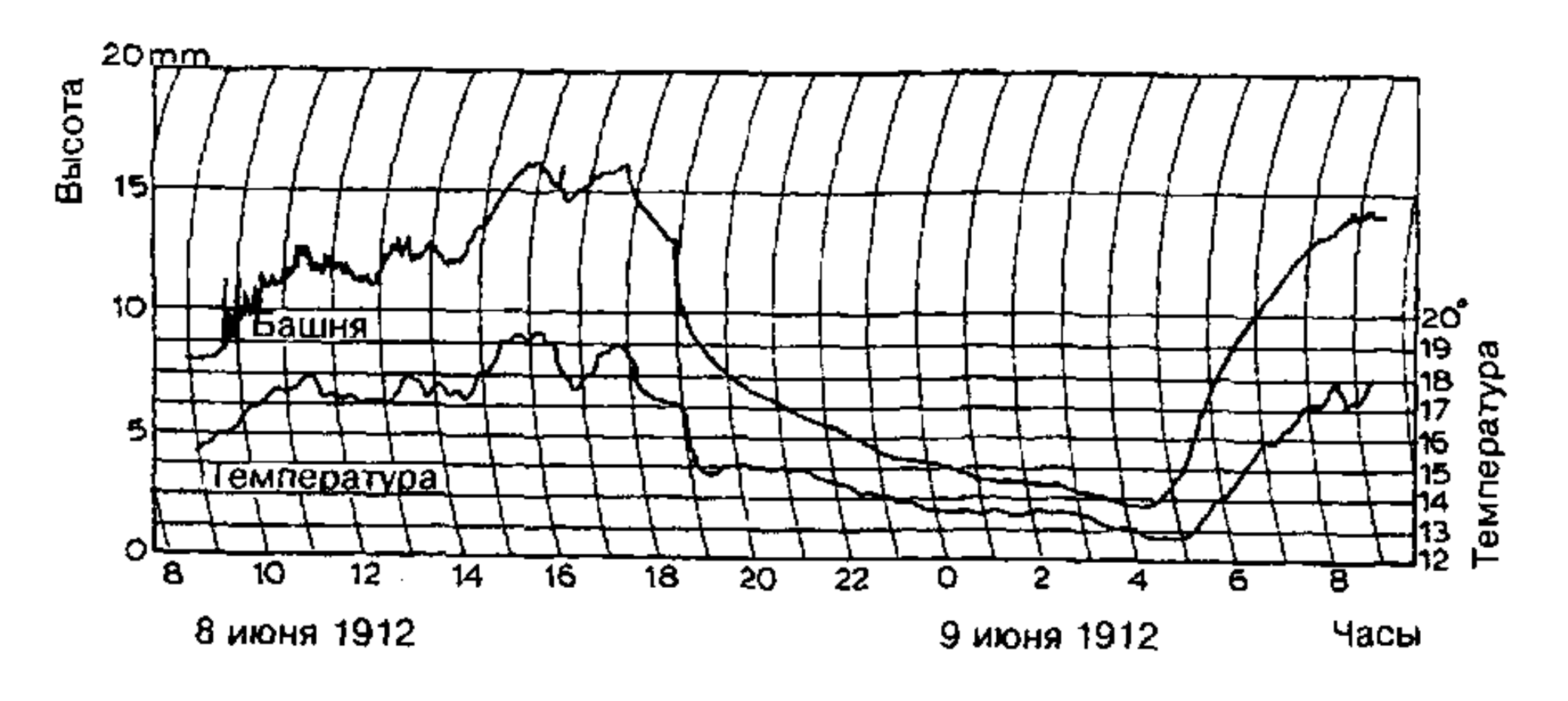


Рис. 8. Суточные движения Эйфелевой башни (ливень, который прошел в 19 часов, вызвал резкое падение температуры).

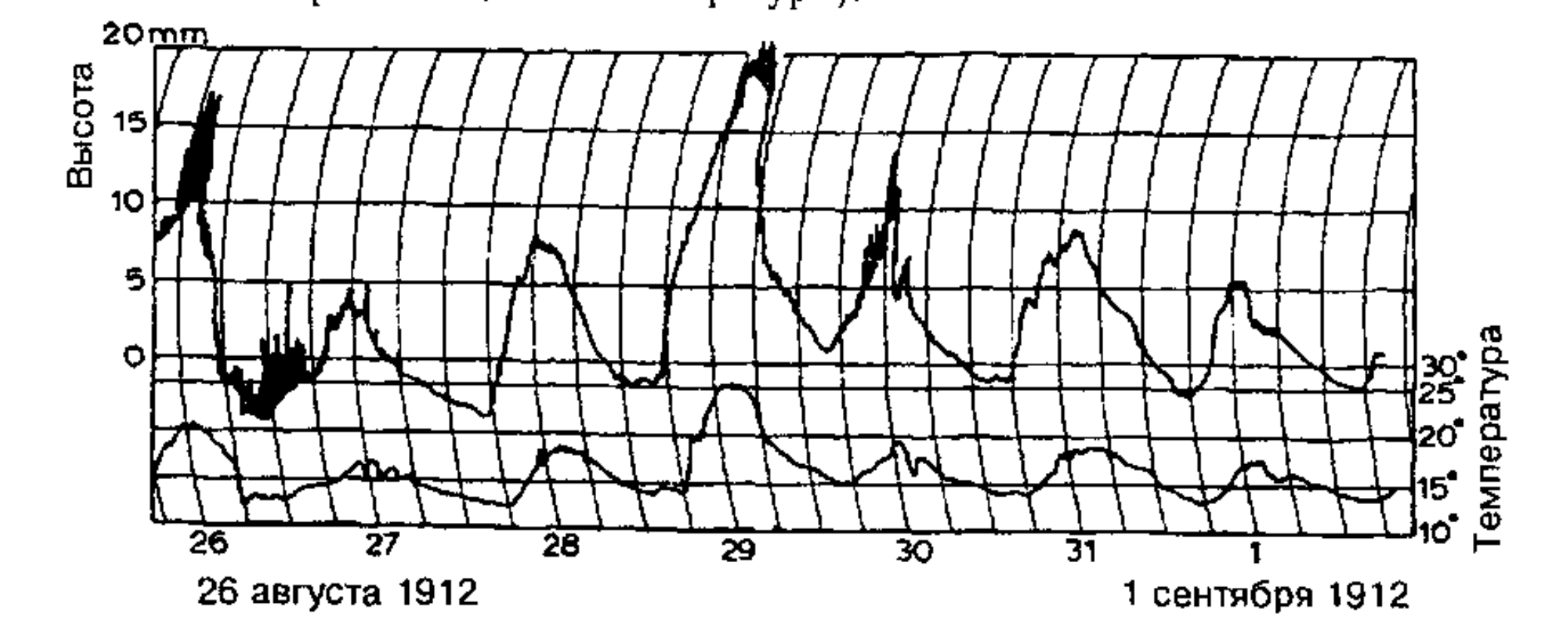


Рис. 9. Движения башни при изменчивых погодных условия летом (неделя бурной погоды).

Такого ограничения не существует в случае проверки металлических конструкций, где проволока, одним концом прикрепленная к конструкции, точно передает ее движение на записывающий инструмент.

Изучение вертикальных движений Эйфелевой башни, которое интересно уже само по себе, ясно демонстрирует разнообразие областей, где может применяться данная методика.

Проволока из инвара весьма облегчила эту операцию. Эта проволока, закрепленная нижним концом за колышек, вбитый в землю, другим

концом была привязана к рычагу, установленному на второй платформе башни и приводящему в действие записывающий инструмент. Демпфирующее устройство, выполненное в комплекте с рычагом, медленно возвращало его в положение, которое он должен был занимать под действием прямой проволоки, когда она на мгновение сгибалась под порывами ветра. Эксперимент показал, что, каким бы порывистым не было движение воздуха, все равно время от времени бывали периоды спокойствия, достаточно длинные, чтобы рычаг успел вернуться в положение покоя. Таким образом, его предельные положения показывали реальное движение башни, а своеобразный хвост, начинающийся с огибающей, записывал порывы ветра.

На рис. 8 и 9 приведены два примера наблюдаемых движений. Первый был получен при использовании записывающего барабана, который совершал один оборот в сутки, а второй — с помощью барабана, совершавшего один оборот в неделю. Нижние кривые были получены с помощью термографа.

При внимательном рассматривании двух серий кривых невозможно не удивиться их чрезвычайному подобию: каждый малый изгиб одной находит своего двойника в другой. Таким образом, Эйфелева башня, несмотря на свой огромный вес, ведет себя как гигантский термометр с очень высокой чувствительностью.

Измерение времени

Как только приборы для измерения времени стали достаточно точными, почти сразу стало ясно, что их действие подвержено влиянию температуры. Тогда были сделаны попытки оградить их от этого влияния с помощью устройств, известных под названием компенсаторов, эффективность которых была продемонстрирована полуторавековым опытом, хотя они еще более усложняли и без того сложные механизмы настенных и наручных часов.

Ранее я упоминал о причинах изменений в функционировании наручных часов, вызванных колебаниями температуры; они весьма отличаются от причин, характерных для настенных часов, так что эти проблемы нужно было решать по отдельности.

Компенсированный маятник настенных часов. Из различных компенсирующих устройств, изобретенных для устранения влияния температуры на маятники часов, самым широко распространенным несколько лет назад был компенсатор Грэма, который использовал направлен-

ное вверх расширение ртути в сосуде, прикрепленном к маятниковому стержню, для компенсации его направленного вниз расширения.

Обработанный различными способами инвар способен к любому возможному расширению между двумя близкими к нулю предельными значениями, а груз из подходящего металла, прикрепленный к муфте ранее выбранного стержня, будет компенсировать его удлинение своим расширением вверх.

Преимуществ у данной схемы много. Помимо присутствия жидкости в колеблющейся системе маятник Грэма имеет недостаток, состоящий в том, что реальная компенсация получается лишь в том случае, когда температура внутри часов однородна по всей высоте — условие, которое полностью удовлетворяется только в правильно сконструированных установках.

Заметим, что именно для этой цели нестабильности обыкновенного инвара не имеет значения, поскольку состояние часов время от времени нужно проверять, чтобы медленное изменение их суточной скорости не внесло ошибку в измерение времени. После нескольких лет действия это изменение сократится до двух или трех сотых секунды в год.

Компенсирующая пружина наручных часов. Часы, оснащенные стальной балансирной пружиной и латунным балансиром, отстают, как мы видели, примерно на 11 секунд на градус в день, причем почти все это отставание объясняется изменением модуля Юнга металла, из которого сделана пружина. Таким образом, становится ясно, какой корректирующий механизм необходим для часов.

В «морских часах» Фердинанда Бертхуда этот механизм включает биметаллическую пластинку, которая автоматически изменяет рабочую длину пружины. В 1775 году Арнольд изобрел компенсирующий балансир, который очень скоро усовершенствовал Ирншоу и который состоит из диаметрального рычага, из двух концов которого выступают полукруглые биметаллические пластинки: внутри стальные, а снаружи латунные. С ростом температуры они загибаются внутрь к оси, уменьшая тем самым момент инерции сборки в среднем пропорционально изменению, которое испытывает модуль упругости балансирной пружины.

Если пружинную сталь заменить никелевой сталью такого состава, чтобы максимальный или минимальный модуль приходился на обычные температуры, то часы, оснащенные монометаллическим балансиром, будут функционировать одинаково при некоторых двух допустимых пределах температуры окружающей среды, например, при 0° С и 30° С, а в промежутке между ними будут забегать или отставать более всего

при 15° С. Тенденция кривой такова, что максимальное забегание вперед (отставание происходит только при использовании сплавов с низким пределом упругости) составит 20–25 секунд в день по сравнению с их ходом при крайних температурах, что в двенадцать или пятнадцать раз меньше, чем несовпадения, наблюдаемые в случае со стальной балансирной пружиной. Этот прогресс часовщики сочли столь важным, что компенсирующей пружиной ежегодно оснащаются почти три миллиона часов.

Исправление вторичной ошибки хронометров с помощью встроенного балансира. Балансир Арнольда и Ирншоу не обеспечивает полной компенсации влияния температуры на скорость хода часов. В 1775 году Фердинанд Бертхуд заметил «вторичную ошибку», которую Дент нашел в 1832 году для балансира и которая состоит в том, что часы, оснащенные стальной балансирной пружиной, скомпенсированной балансиром из стали и латуни, забегают вперед на 2–3 секунды в день при 15° С, если точно функционируют при 0° С и 30° С.

Для исключения ошибки Дента были приложены значительные усилия. Мы увидим, каким образом рациональное использование никелевых сталей обеспечило очень простое средство достижения этой цели.

Причина ошибки Дента заключается в следующем: модуль упругости балансирной пружины изменяется в зависимости от температуры согласно определенной кривой OS (рис. 10a). Действие балансира, в свою очередь, контролируется разностью расширяемостей латуни OL и стали OA, которые выражены функциями с приблизительно равными коэффициентами β. Следовательно, их разность OB будет линейной, а алгебраическая сумма OS и OB, т. е. OC, дает квадратичный остаток.

Теперь заменим OA кривой OAN (рис. 10b), представляющей расширяемость никелевой стали с отрицательным коэффициентом β. Разностью с OL станет кривая OB, которую можно сделать симметричной кривой OS, вследствие чего во всех ее точках алгебраическая сумма будет равна нулю.

В 1899 году я провел проектные расчеты для такого балансира, изготовленного из слаборасширяющейся стали, содержащей 45 % Ni, а в 1900 году два производителя хронометров из Швейцарии П. Д. Нарден и П. Дитисгейм с его помощью достигли полной температурной компенсации.

С того момента новый балансир полностью вытеснил старый практически во всех прецизионных хронометрах. Таким образом, компенсаторы устарели не только благодаря исключению вторичной ошибки, но и по-

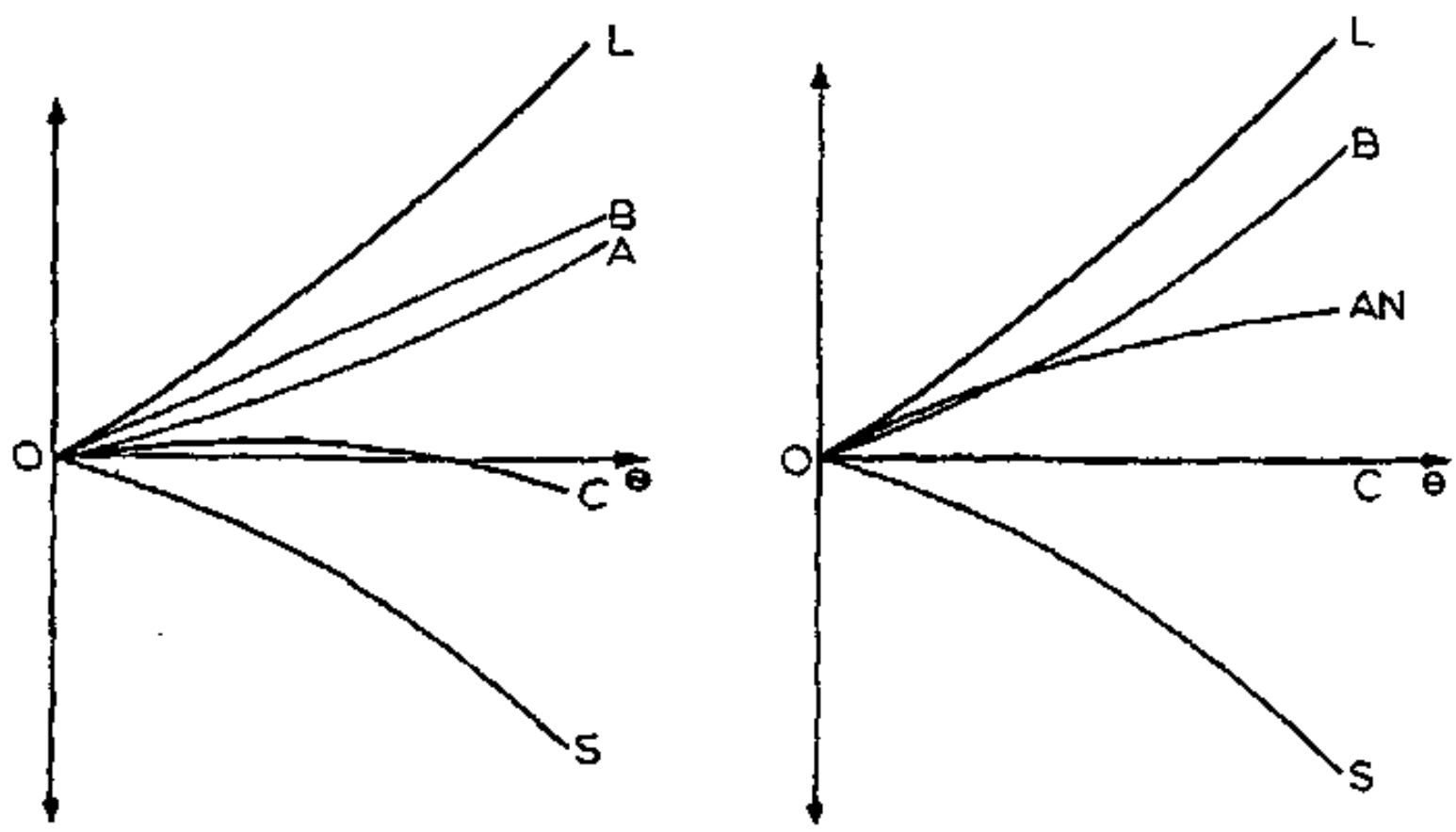


Рис. 10. a, b. Диаграммы, на которых показана причина вторичной ошибки хронометров и принцип ее исправления.

тому, что как только хронометры избавились от этой ошибки, особую важность приобрело исправление меньших дефектов. В действительности, ход современных лучших хронометров в четыре-пять раз точнее, чем двадцать лет назад.

Полное решение проблемы компенсации с помощью элинварной балансирной пружины. В течение более чем десяти лет я считал, что использование никелевых сталей привело ко всем, какие только возможны, фундаментальным усовершенствованиям компенсирующих механизмов. Тем не менее, где-то в 1912 году у меня возникло слабое подозрение, что можно найти полное решение проблемы компенсации. При изучении тройных сплавов я столкнулся с одновременным уменьшением аномалии расширяемости и термоупругости.

В течение следующего года был начат ряд экспериментов, в которых использовались две серии сплавов с изменяющимся содержанием никеля и с 5-и и 10-и процентными добавками хрома. Максимальный термоупругий коэффициент второй серии уже был очень близок к коэффициенту элинвара, так что небольшой модификации состава оказалось достаточно для получения сплава для изготовления балансирных пружин, которые в соединении с монометаллическими балансирными колесами гарантировали, что снабженные ими часы шли примерно одинаково при разных температурах и были почти свободны от вторичной ошибки. Таким образом, проблема была почти решена. Затем, через некоторое

время, эксперименты возобновились и внезапно привели к изготовлению балансирных пружин, которые, в соединении с должным образом выбранным монометаллическим балансиром, образовывали стабилизирующее устройство, почти полностью невосприимчивое к изменениям температуры.

Даже самые компетентные производители хронометров рассматривают столь простое решение долго стоявшей проблемы как полный переворот. Однако сама его простота, если настаивать на ее сохранении, таит в себе небольшой недостаток.

Огромное преимущество новой комбинации состоит в том, что она, с первой попытки, подводит очень близко к идеалу, благодаря соединению балансирной пружины, имеющей низкий постоянный термоупругий коэффициент, с должным образом расширяющимся балансиром. Для промышленного производства металл балансира будет подбираться к требованиям балансирной пружины настолько точно, насколько это возможно; диапазон расширений между инваром и латунью обеспечивает обширное поле для таких действий. Тем не менее, как только комбинация найдена, она, по крайней мере непосредственно в этом виде не подходит для постепенных и тщательных изменений, что делает задачу регулятора искусством, столь сложным и восхитительным одновременно.

Для немедленного сокращения данного диапазона до его точных размеров я должен сказать, что в настоящее время часто изготавливается комбинация балансирной пружины и монометаллического балансира. Ошибка данной комбинации, вызванная температурой, составляет менее одной сотой ошибки, которая имела бы место при использовании стальной пружины.

В настоящее время ситуация такова, что, тогда как раньше компенсирующую пружину использовали только в обыкновенных наручных часах, сейчас она занимает все более важное место в прецизионных часах; в настоящее время она по-прежнему не используется лишь в прецизионных хронометрах. Однако эта пружина только-только появилась, поэтому было бы самонадеянно полагать, что она достигла предела своего совершенства с первой попытки.

Простота нового компенсирующего механизма влечет за собой множество преимуществ. Биметаллические пластинки беспрестанно досаждают регулировщикам, которые видят в них возможную причину нестабильности; деформации, вызванные центробежной силой, требуют уверенности в том, что большие и малые дуги остаются изохронными при малейших изменениях формы балансирной пружины; наконец, прямоугольная форма и регулировочные винты увлекают за собой воздух,

тем самым создавая «барометрический коэффициент», значение которого достаточно велико, чтобы изменения атмосферного давления при некоторых обстоятельствах становились существенной причиной изменений скорости хода при современном состоянии хронометрии. С другой стороны, поперечное сечение монометаллического балансирного колеса несложно свести на конус, тем самым максимально возможным образом сокращая увлечение воздуха. Все эти разнообразные моменты усиливают относительные преимущества новой балансирной пружины и должны оправдать смягчение условий, управляющих конечными пределами компенсации.

Заключение

Давайте оглянемся на происхождение исследований, о результатах которых я только что рассказал. Основная проблема заключалась, по сути, в том, чтобы найти металл, качества которого обеспечили бы возможность его использования для изготовления эталонов длины, которые были бы недорогими и одновременно удовлетворяли бы требованиям метрологии. Было найдено начальное решение, которое требовало лишь небольшого усовершенствования, причем именно в процессе поисков этого небольшого усовершенствования выявилась неожиданная аномалия, которая явила собой прямое проявление борьбы между различными состояниями железа, которому соединение с никелем придает неожиданные свойства, создавая целый класс сплавов, свойства которых, пока уникальные, удовлетворяют достаточно неожиданным образом пожеланиям, которые метрологи сформулировали бы, если бы заранее не предполагалось, что металлы не могут обладать такими свойствами.

Тогда эта проблема расширилась: от измерений длины, которые были единственной целью первоначальной программы, мы перешли к измерениям времени как к прямому и, в некоторой степени, очевидному следствию, так как истина в том, что в метрологии все взаимосвязано и тщательно выполненное измерение обязательно влечет за собой обобщения.

Вся программа исследования требовала постоянного сотрудничества производства и лаборатории. Огромное преимущество такого сотрудничества в наше время понимают все, и было бы излишне слишком много говорить о нем, разве что для того, чтобы подчеркнуть эту особенность данной работы.

Когда весной 1896 года Société de Commentry-Fourchambault & Decazeville начала помогать программе исследований, которые без этой

помощи не продвинулась бы дальше своих начальных этапов, руководители этой компании даже не предполагали, что будут вознаграждены чем-либо, кроме удовлетворения от действенной помощи, оказанной научному исследованию. Но тщательное изучение, которому подверглись сплавы, а также все возрастающие жесткие требования, предъявляемые к составу и обработке сплавов, привели к созданию в совместно исследуемой области своего рода прецизионной металлургии, результатом которой стало изготовление продуктов, которые несколько лет назад считались невозможными.

Это был новый и неожиданный результат в области прецизионных измерений. Прецизионные измерения, требующие неослабевающих и время от времени весьма трудоемких усилий людей, посвятивших себя их исследованию, невозможно было проводить, не ориентируясь на свет идеала. Для самого исследователя этот идеал, поддерживаемый верой в полезность — пусть даже очень отдаленную — каждой бескорыстной попытки, во все времена является главным оплотом и советником всех его начинаний.

Высшее одобрение, которые вы только что вынесли моей работе, выдвигает на первый план задачу, которая простирается более чем на четверть века в прошлое, и поэтому я чувствую себя обязанным выразить свою глубочайшую благодарность прославленным членам Нобелевского комитета Шведской академии наук, а также памяти Альфреда Нобеля. Из поколения в поколение мои потомки будут с гордостью смотреть на великолепный диплом и медаль лауреата Нобелевской премии, которые навеки останутся свидетельством вашей доброты и уважения. Но я также хочу выразить вам свою благодарность от имени Международного бюро, которому я служил в течение тридцатисеми лет и существование которого в настоящее время отражает поразительные перемены, происходящие в мире. Я также приношу вам благодарность от имени метрологии, на которую присуждение мне Нобелевской премии проливает яркий свет, так что теперь ее можно рекомендовать в качестве профессии. И, наконец, я выражаю благодарность от имени двух стран, с которыми связана моя жизнь: Швейцарии, гражданином которой я являюсь и которую я оставил подготовленным к жизни, и Франции, где я познакомился со столь ценимыми мной друзьями.

Биография

Шарль Эдуард Гильом родился 15 февраля 1861 года во Флерье (Швейцария). Его дед уехал из Франции во время революции по по-

литическим причинам и занялся часовым делом в Лондоне. Его дела продолжили три его сына, но отец Шарля, Эдуард, в конце концов, вернулся и поселился во Флерье.

Среднее образование Гильом получил в Невшателе, после чего поступил в Федеральный технологический институт в Цюрихе, где получил докторскую степень. Некоторое время он служил офицером в артиллерии, а затем в 1883 году начал работать ассистентом в Международном бюро мер и весов. В 1902 году он стал заместителем директора, а с 1915 года до самого ухода на пенсию в 1936 году он был директором этого бюро. С 1936 года до самой смерти он оставался Почетным директором бюро.

Во время своей короткой карьеры военного Гильом изучал механику и баллистику, но его первые исследования в бюро были связаны с термометрией. Он занимался важными исследованиями по корректированию стеклянных ртутных термометров и отвечал за тщательную калибровку термометров, используемых в бюро для определения температурных расширений эталонов длин. Он участвовал в первой работе над международным метром, а также определил объем одного килограмма воды с помощью контактного метода.

Случайное наблюдение Гильомом коэффициента расширения сплава никеля с железом привело к систематическому исследованию целой серии сплавов и открытию инвара — сплава с очень низким коэффициентом расширения, элинвара — сплава с термоупругим коэффициентом, равным практически нулю, т. е. с постоянным модулем Юнга, в значительном диапазоне температур, а также множества других полезных сплавов. Области применения инвара были определены очень быстро, и данный материал стал использоваться для измерения геодезических базисных линий. Этот сплав широко применяется для изготовления прецизионных инструментов, например, термостатов и маятников астрономических часов. Балансир Гильома, обеспечивающий полную компенсацию в высококачественных наручных часах и хронометрах и исключающий вторичную ошибку, был усовершенствован с помощью пружины, сделанной из элинвара.

Исследования Гильома описаны во множестве статей, опубликованных бюро. Помимо многих других работ, он написал *Études thermométriques* (Исследования термометрии, 1886 г.), *Traité de thermométrie* (Трактат по термометрии, 1889 г.), *Unités et Étalons* (Единицы и эталоны, 1894 г.), *Les rayons X* (Рентгеновские лучи, 1896 г.), *Recherches sur le nickel et ses alliages* (Исследования никеля и его сплавов, 1898 г.), *Le vie de la matière* (Жизнь материи, 1899 г.), *La*

Convention du Mètre et le Bureau international des Poids et Mesures (Метрическая конвенция и Международное бюро мер и весов, 1902 г.), *Les applications des aciers au nickel* (Применение никелевых сталей, 1904 г.), *Des états de la matière* (Состояния материи, 1907 г.), *Les récent progrès du système métrique* (Последние достижения метрической системы, 1907, 1913 гг.). Его книга *Initiation à la Mécanique* (Введение в механику) была переведена на несколько языков.

Гильому присвоили звание Гранд-офицера Почетного легиона; он был назначен почетным доктором университетов Женевы, Невшателя и Парижа. Он был президентом Французского физического общества и членом, почетным членом или членом-корреспондентом более чем двенадцати ведущих академий наук Европы.

В 1888 году Шарль Эдуард Гильом женился на мадемуазель А. М. Тауффлиб. У них было трое детей. Он умер 13 мая 1938 года.

Альберт Эйнштейн

«за его заслуги перед теоретической физикой и, особенно, за открытие закона фотоэлектрического эффекта»

Альберт Эйнштейн

Основные понятия и проблемы теории относительности

Лекция, прочитанная на собрании естествоиспытателей северных стран в Гётеборге[1] 11 июля 1923 г.

Если рассмотреть ту часть теории относительности, которую в настоящее время можно считать, в известном смысле, надежным достоянием науки, то обнаружатся два аспекта, играющие ведущую роль в этой теории.

Во-первых, в центре всего рассмотрения стоит вопрос: существуют ли в природе физически выделенные (привилегированные) состояния движения? (Физическая проблема относительности).

Во-вторых, фундаментальным оказывается следующий гносеологический постулат: понятия и суждения имеют смысл лишь постольку, поскольку им можно однозначно сопоставить наблюдаемые факты. (Требование содержательности понятий и суждений).

[1]Эта лекция была прочитана не по случаю вручения Нобелевской премии, а потому в ней не идет речь об открытии фотоэлектрического эффекта.

Оба эти аспекта можно уяснить, если применить их к частному случаю, например, к классической механике. Сначала мы видим, что в каждой точке, занятой материей, существует привилегированное состояние движения, именно: состояние движения материи в рассматриваемой точке. Однако обсуждаемая проблема по существу только начинается с вопроса: существуют ли физически выделенные состояния движения для протяженных областей? С точки зрения классической механики на этот вопрос следует ответить утвердительно: такими физически выделенными состояниями движения являются состояния движения инерциальных систем.

Это высказывание, как и вообще все основы механики в том виде, как ее обычно излагали до теории относительности, далеко не удовлетворяет сформулированному выше «требованию содержательности». Движение можно понимать только как относительное движение тел. В механике, говоря о движении вообще, подразумевают движение относительно системы координат. Но такое понимание не соответствует «требованию содержательности», если систему координат рассматривать просто как нечто воображаемое. Обратившись к экспериментальной физике, можно убедиться, что в ней система координат всегда представлена «практически абсолютно твердым» телом. При этом, далее, делается допущение, что такие твердые тела можно расположить в покое друг относительно друга, *подобно телам евклидовой геометрии. В той мере*, в какой мы вправе считать абсолютно твердое измерительное тело существующим, удается привести в соответствие с «требованием содержательности» как понятие «системы координат», так и понятие движения материи относительно этой системы. Вместе с тем такое понимание позволяет согласовать (применительно к нуждам физики) с «требованием содержательности» и евклидову геометрию. Таким образом, вопрос о справедливости евклидовой геометрии приобретает физический смысл; справедливость ее предполагается как в классической физике, так и в специальной теории относительности.

Инерциальная система и время определяются в классической механике лучше всего совместно, -с помощью подходящей формулировки закона инерции: оказывается возможным установить такое время и сообщить системе координат такое состояние движения (инерциальная система), чтобы по отношению к ней материальные точки, не подвергающиеся действию сил, не испытывали ускорения; кроме того, по отношению к этому времени допускается, что оно может быть измерено одинаково устроенными часами (системами с периодическим процессом), исходя из любого состояния движения, и что результаты этих измерений

будут совпадать. В таком случае имеется бесконечно много инерциальных систем, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, а следовательно, и бесконечно много физически выделенных состояний движения, равноценных между собой. Время абсолютно, т. е. не зависит от выбора конкретной инерциальной системы; оно определяется большим числом признаков, чем это логически необходимо, что, однако, как предполагается в механике, не должно приводить к противоречиям с опытом. Отметим прежде всего, что логическая слабость этого представления с точки зрения требования содержательности заключается в том, что у нас нет никакого опытного критерия для установления того, свободна ли материальная точка от действия сил, или нет; поэтому понятие «инерциальная система» остается до некоторой степени проблематичным. На этот пробел, анализ которого приводит к общей теории относительности, мы пока не будем обращать внимания.

В изложенном рассуждении об основах механики понятие абсолютно твердого тела (а равно и понятие часов) играет фундаментальную роль, которую с известным основанием можно оспаривать. Абсолютно твердые тела осуществляются в природе лишь приближенно, и притом даже не с любой степенью приближения; таким образом это понятие не удовлетворяет строго «требованию содержательности». Далее, представляется логически неоправданным предпосылать всему физическому рассмотрению понятие абсолютно твердого (или просто твердого) тела, а затем, в конечном счете, строить его (тело) на атомистической основе, исходя из первичных физических законов, которые, в свою очередь, сами построены с помощью понятия абсолютно твердого измерительного тела. Мы упоминаем об этих методологических недостатках потому, что они в таком же смысле присущи и теории относительности в том ее схематическом представлении, которое мы здесь излагаем. Разумеется, было бы логически более последовательным начать с существа самих физических законов и только к этому существу предъявить «требование содержательности», т. е. отнести на самый конец установление однозначной связи с миром опыта, вместо того, чтобы осуществлять ее в несовершенном виде уже для одной искусственно изолированной части теории, а именно: для пространственно-временной метрики. Однако мы еще не продвинулись достаточно далеко в установлении первичных законов природы, чтобы пойти по этому более совершенному пути, не рискуя потерять твердую почву под ногами. В конце наших рассуждений мы увидим, что в новейших исследованиях уже содержится попытка осуществления этого логически более последовательного метода, основанная на идеях Леви-Чивиты, Вейля и Эддингтона.

Из сказанного выше становится также ясно, что следует понимать под «привилегированными состояниями движения». Они являются привилегированными в смысле формулировки законов природы. Системы координат, находящиеся в таких состояниях движения, отличаются тем, что сформулированные в этих координатах законы природы принимают наиболее простой вид. Согласно классической механике, физически выделенными в этом смысле являются состояния движения инерциальных систем. Согласно классической механике, можно различить (абсолютно) неускоренные и ускоренные движения; далее, в классической механике существуют скорости только относительные (зависящие от выбора инерциальной системы), а ускорения и вращения — абсолютные (не зависящие от выбора инерциальной системы). Выразим это так: согласно классической механике существует «относительность скорости», но не «относительность ускорения». После этих предварительных замечаний перейдем к основному предмету нашего рассмотрения — теории относительности — и охарактеризуем принципиальную сторону ее развития вплоть до настоящего времени.

Специальная теория относительности представляет собой результат приспособления основ физики к электродинамике Максвелла – Лоренца. Из прежней физики она заимствует предположение о справедливости евклидовой геометрии для законов пространственного расположения абсолютно твердых тел, инерциальную систему и закон инерции. Закон равноценности всех инерциальных систем с точки зрения формулирования законов природы специальная теория относительности принимает справедливым для всей физики (специальный принцип относительности). Из электродинамики Максвелла – Лоренца эта теория заимствует закон постоянства скорости света в вакууме (принцип постоянства скорости света).

Для того чтобы можно было согласовать специальный принцип относительности с принципом постоянства скорости света, необходимо отказаться от предположения о существовании абсолютного (совпадающего для всех инерциальных систем) времени. Таким образом, мы отказываемся от гипотезы, что одинаково устроенные, произвольно движущиеся и должным образом отрегулированные часы идут так, что показания любых двух из них при встрече друг с другом совпадают. Каждой инерциальной системе приписывается свое, особое время; состояние движения инерциальной системы и ее время определяются, в согласии с требованием содержательности, тем, что по отношению к ней должен выполняться принцип постоянства скорости света. Существование определенной таким образом инерциальной системы, равно как и спра-

ведливость закона инерции в этой системе, постулируются. Для каждой из инерциальных систем время измеряется покоящимися относительно этой системы и одинаково устроенными часами.

Этими определениями вместе с гипотезами, скрытыми в предположении об их непротиворечивости, однозначно устанавливаются законы преобразования пространственных координат и времени, при переходе от одной инерциальной системы к другой, так называемые преобразования Лоренца. Их непосредственный физический смысл состоит во влиянии движения относительно рассматриваемой инерциальной системы на форму абсолютно твердых тел (лоренцово сокращение) и на ход часов. Согласно специальному принципу относительности, законы природы должны быть ковариантны относительно преобразований Лоренца; таким образом, теория дает критерий, которому должны удовлетворять общие законы природы. Она приводит, в частности, к видоизмененному ньютоновскому закону движения материальной точки, в который скорость света в вакууме входит в качестве предельной скорости, а также к осознанию одинаковой природы энергии и инертной массы.

Специальная теория относительности привела к значительным успехам. Она примирила механику с электродинамикой. Она сократила число логически независимых друг от друга гипотез в электродинамике. Она сделала неизбежным методологический анализ основных понятий. Она объединила законы сохранения импульса и энергии, выявила единство массы и энергии. Однако она все же не могла нас вполне удовлетворить — даже независимо от квантовых трудностей, в действительном разрешении которых до сих пор оказывались бессильными все теории. Так же как и классическая механика, специальная теория относительности сохраняет выделение некоторых привилегированных состояний движения — состояния движения инерциальных систем — по сравнению со всеми остальными состояниями движения. С таким сохранением, собственно говоря, труднее примириться, чем даже с выделением одного единственного привилегированного состояния движения, как это делалось в теории покоящегося светоносного эфира, ибо в этой теории по крайней мере мыслилось реальное основание для такого выделения, а именно: светоносный эфир. Более удовлетворительной должна представляться теория, которая с самого начала не выделяет никакого привилегированного состояния движения. Далее, вызывает сомнение уже упомянутая выше неясность в определении инерциальной системы или в формулировке закона инерции. Эти сомнения приобретают решающее значение в свете опытного закона равенства инертной и тяжелой массы, как показывает нижеследующее рассуждение.

Пусть K — инерциальная система без поля тяжести, K' — система координат, равномерно ускоренная относительно K. Тогда поведение материальных точек по отношению к системе K' будет таким же, как если бы K' была инерциальной системой, в которой существует однородное поле тяготения. Таким образом, в свете известных из опыта свойств поля тяжести определение инерциальной системы оказывается несостоятельным. Напрашивается мысль о том, что каждая, любым образом движущаяся система отсчета, с точки зрения формулировки законов природы, равноценна любой другой и что, следовательно, для областей конечной протяженности вообще не существует физически выделенных (привилегированных) состояний движения (общий принцип относительности).

Последовательное проведение этой идеи требует еще более глубокого видоизменения геометрико-кинематических основ теории, чем специальная теория относительности. Дело в том, что вытекающее из последней лоренцово сокращение приводит к следующему результату: по отношению к системе K', произвольно движущейся относительно некоторой инерциальной системы K (свободной от поля тяготения), законы евклидовой геометрии для пространственного расположения абсолютно твердых (покоящихся относительно K') тел несправедливы. Тем самым теряет смысл, с точки зрения требования содержательности, и декартова система координат. Аналогично обстоит дело и в отношении времени: его определение относительно системы K' на основании показаний одинаково устроенных покоящихся относительной часов или на основании закона распространения света уже не имеет смысла. Обобщая, приходим к следующему результату: поле тяготения и метрика представляют собой лишь различные формы проявления одного и того же физического поля.

К формальному описанию этого поля можно прийти путем следующего рассуждения. Для любой бесконечно малой окрестности точки в произвольном поле тяготения можно указать локальную систему координат в таком состоянии движения, что по отношению к этой локальной системе координат не существует поля тяготения (локальная инерциальная система). Для этой инерциальной системы и для этой бесконечно малой области результаты специальной теории относительности мы вправе считать справедливыми в первом приближении. В каждой точке пространства-времени имеется бесконечно много таких локальных инерциальных систем; они связаны между собой преобразованиями Лоренца. Последние характеризуются тем, что они оставляют инвариантным «интервал» ds между двумя бесконечно близкими событиями, определяемый

равенством

$$ds^2 = c^2dt - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Этот интервал может быть измерен с помощью масштабов и часов, так как x, y, z, t означают координаты и время, измеренные по отношению к локальной инерциальной системе.

Для описания пространственно-временных областей конечной протяженности нужны произвольные координаты в четырехмерном многообразии, обеспечивающие не что иное, как однозначное обозначение каждой из точек пространства-времени четырьмя числами x_1, x_2, x_3, x_4, и отвечающие непрерывности этого четырехмерного многообразия (гауссовы координаты). Математическое выражение общего принципа относительности состоит в том, что системы уравнений, выражающие общие законы природы, имеют одинаковый вид во всех таких системах координат.

Так как дифференциалы координат локальной инерциальной системы выражаются линейно через дифференциалы dx_ν некоторой гауссовой системы координат, то при использовании последней для интервала ds между двумя событиями получается выражение вида

$$ds^2 = \sum g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu \quad (g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}).$$

Величины $g_{\mu\nu}$, являющиеся непрерывными функциями координат x_ν, определяют метрику четырехмерного многообразия, поскольку ds определен как величина, измеримая с помощью масштабов и часов (абсолютная). Но именно эти величины $g_{\mu\nu}$ описывают в гауссовой системе координат также и поле тяготения, единство природы которого с физической причиной, определяющей метрику, было нами установлено ранее. Частный случай справедливости специальной теории относительности в конечной области характеризуется тем, что при подходящем выборе системы координат величины $g_{\mu\nu}$ в этой конечной области не зависят от координат x_ν

Согласно общей теории относительности, закон движения материальной точки в чисто гравитационном поле выражается уравнением геодезической. Действительно, геодезическая является математически наиболее простой кривой, переходящей в прямую в частном случае постоянных $g_{\mu\nu}$. Таким образом, здесь мы имеем дело с переносом закона инерции Галилея в общую теорию относительности.

Установление уравнений поля сводится математически к вопросу о простейших общековариантных дифференциальных уравнениях, кото-

рым могут быть подчинены гравитационные потенциалы $g_{\mu\nu}$. Эти уравнения определены тем, что они должны содержать производные от $g_{\mu\nu}$ по x_ν не выше второго порядка, причем эти производные должны входить в уравнение только линейно. В свете этого условия, рассматриваемые уравнения оказываются естественным переносом уравнения Пуассона ньютоновской теории тяготения в общую теорию относительности.

Указанный ход рассуждений привел к теории тяготения, содержащей в качестве первого приближения теорию Ньютона и, сверх того, позволяющей рассчитать движение перигелия Меркурия, отклонение луча света в гравитационном поле Солнца и красное смещение спектральных линий, согласующиеся с результатами наблюдений[1].

Чтобы завершить построение фундамента общей теории относительности, необходимо еще ввести в нее электромагнитное поле, которое вместе с тем представляет собой, по нашему теперешнему убеждению, тот материал, из которого нам надлежит построить элементарные образования материи. Удается также без труда перенести максвелловские уравнения поля в общую теорию относительности. Такой перенос вполне однозначен, если только допустить, что эти уравнения не содержат производных $g_{\mu\nu}$ выше первого порядка и что в локальной инерциальной системе они справедливы в их обычной (максвелловской) форме. Далее, уравнения гравитационного поля легко удается дополнить электромагнитными членами таким (предписываемым уравнениями Максвелла) способом, чтобы они учитывали гравитирующее действие электромагнитного поля.

Эти уравнения поля не дали какой-либо теории материи. Поэтому, чтобы включить в теорию действие весомых масс как источников поля, пришлось (как и в классической физике) ввести в нее материю в приближенном, феноменологическом представлении.

Этим исчерпываются непосредственные следствия принципа относительности. Обратимся теперь к проблемам, примыкающим к изложенному. Уже Ньютон осознал, что закон инерции неудовлетворителен в одном отношении, о котором здесь не было до сих пор упомянуто; в нем не указывается никакой реальной причины физического выделения состояний движения инерциальных систем по сравнению со всеми другими состояниями движения. В то время как за гравитационные свойства материальной точки ответственными считаются наблюдаемые материальные тела, для инерционных свойств материальной точки указы-

[1]Впрочем, для красного смещения согласие с результатами наблюдений еще не вполне надежно.

вается не какая-либо материальная причина, а фиктивная (абсолютное пространство, или инерциальный эфир).Это хотя и не является логически недопустимым, но оставляет чувство неудовлетворенности. По этой причине Э. Мах требовал видоизменения закона инерции в том смысле, что инерцию следовало бы понимать как сопротивление тел ускорению по отношению *друг к другу*, а не по отношению к «пространству». При таком понимании следует ожидать, что ускоренные тела одинаково ускоряюще действуют на другие тела (ускорительная индукция).

Изложенное толкование еще больше подкрепляется общей теорией относительности, которая устраняет разграничение между эффектами инерции и тяготения. Оно сводится к требованию, чтобы поле $g_{\mu\nu}$ полностью, с точностью до несущественного произвола, обусловленного свободой выбора координат, определялось материей. В пользу требования Маха говорит еще и то, что, согласно уравнениям поля тяготения, ускорительная индукция действительно существует, хотя и является столь слабым эффектом, что возможность ее прямого обнаружения с помощью механических опытов исключена.

Требованию Маха можно удовлетворить в общей теории относительности, если рассматривать мир пространственно конечным и замкнутым. Благодаря этой гипотезе оказывается также возможным считать среднюю плотность материи в мире *конечной*, в то время как в пространственно бесконечном (квазиэвклидовом) мире она должна была бы обратиться в нуль. Однако нельзя умолчать о том, что для такого выполнения постулата Маха приходится ввести в уравнения поля член, который не основан на каких-либо опытных данных и ни в коей мере не обусловлен логически остальными членами этих уравнений. По этой причине указанное решение «космологической проблемы» пока нельзя считать вполне удовлетворительным.

Теперь особенно живо волнует умы проблема единой природы гравитационного и электромагнитного полей. Мысль, стремящаяся к единству теории, не может примириться с существованием двух полей, по своей природе совершенно независимых друг от друга. Поэтому делаются попытки построить такую математически единую теорию поля, в которой гравитационное и электромагнитное поля рассматриваются лишь как различные компоненты одного и того же единого поля, причем его уравнения, по возможности, уже не состоят из логически независимых друг от друга членов.

Теория тяготения (т. е. риманова геометрия — с точки зрения математического формализма) должна быть обобщена так, чтобы она охватывала также и законы электромагнитного поля. К сожалению, при этой

попытке мы не можем опереться на опытные факты, как при построении теории тяготения (равенство инертной и тяжелой массы), а вынуждены ограничиться критерием математической простоты, который не свободен от произвола. В настоящее время наиболее успешной представляется основанная на идеях Леви-Чивиты, Вейля и Эддингтона попытка заменить риманову метрическую геометрию более общей теорией аффинной связи.

Для римановой геометрии характерно предположение, что двум бесконечно близким точкам можно сопоставить «интервал» ds, квадрат которого является однородной квадратичной функцией дифференциалов координат. Отсюда следует (при выполнении некоторых условий вещественности) справедливость евклидовой геометрии в любой бесконечно малой области. Таким образом, каждому линейному элементу (или вектору) в некоторой точке P сопоставляется параллельный и равный ему линейный элемент (или вектор) в любой заданной бесконечно близкой точке P' (аффинная связь). Риманова метрика определяет некоторую аффинную связь. Если же, наоборот, математически задана аффинная связь (закон бесконечно малого параллельного переноса), то в общем случае не существует такого римановского мероопределения, из которого ее можно было бы вывести.

Важнейшее понятие римановой геометрии, на котором основаны и уравнения тяготения, — «кривизна пространства» — в свою очередь основывается исключительно на «аффинной связи». Если задать такую аффинную связь в некотором континууме, не основываясь с самого начала на метрике, то получается обобщение римановой геометрии, в котором все же сохраняются важнейшие выведенные ранее величины. Находя наиболее простые дифференциальные уравнения, которым можно подчинить аффинную связь, мы вправе надеяться, что натолкнемся на такое обобщение уравнений тяготения, которое будет содержать в себе также и законы электромагнитного поля. Эта надежда и в самом деле оправдалась, но мы не знаем, можно ли рассматривать полученную таким образом формальную связь как действительное обогащение физики, пока из нее не будут получены какие-либо новые физические связи. В частности, теорию поля можно будет признать удовлетворительной, по моему мнению, лишь тогда, когда она позволит описать элементарные электрические частицы с помощью решений, не содержащих особенностей.

Наконец, не следует забывать, что теорию элементарных электрических образований нельзя отделять от вопросов квантовой теории. Перед лицом этой наиболее глубокой физической проблемы современности

пока оказалась бессильной и теория относительности. Но если когда-нибудь в результате решения квантовой проблемы форма общих уравнений и претерпит дальнейшие глубокие изменения, — пусть даже совершенно изменятся самые величины, с помощью которых мы описываем элементарные процессы, — от принципа относительности отказываться никогда не придется; законы, выведенные с его помощью до сих пор, сохранят свое значение по меньшей мере в качестве предельных законов.

Биография

Альберт Эйнштейн родился 14 марта 1879 года в Ульме в Вюртемберге (Германия). Шесть недель спустя его семья перебралась в Мюнхен, где он впоследствии поступил в гимназию Луитпольда и получил начальное образование. Затем семья переехала в Италию, и свое образование Альберт продолжил в Аарау (Швейцария), а в 1896 году он поступил в Федеральный технологический институт в Цюрихе, чтобы получить образование учителя физики и математики. В 1901 году, когда он защитил диплом, одновременно с ним он получил швейцарское гражданство и, не сумев найти работу преподавателя, принял должность технического ассистента в Швейцарском патентном бюро. В 1905 году Эйнштейн получил докторскую степень.

Во время работы в патентном бюро, а также в свободное время он создал большую часть своих потрясающих трудов, и в 1908 году был назначен приват-доцентом в Берне. В 1909 году он стал адъюнкт-профессором Цюрихского университета, в 1911 году — профессором теоретической физики в университете города Прага, а на следующий год вернулся в Цюрих, чтобы получить аналогичную должность. В 1914 году Эйнштейна назначили директором Физического института им. Кайзера Вильгельма, а также профессором Берлинского университета. В 1914 году он стал гражданином Германии и оставался в Берлине до 1933 года, когда по политическим причинам он отказался от своего гражданства и эмигрировал в Америку, чтобы стать профессором теоретической физики в Принстоне. В 1940 году он принял американское гражданство, а в 1945 году — ушел на пенсию.

После Второй мировой войны Эйнштейн был ведущей фигурой в движении за создание Мирового правительства. Ему было предложено стать президентом Израиля, от чего он отказался, но вместе с доктором Хаимом Вейцманом основал Еврейский университет Иерусалима.

Судя по всему, Эйнштейн обладал ясным взглядом на проблемы физики и намерением их решить. У него была своя собственная стратегия, он обладал способностью визуализировать основные этапы на пути к своей цели. Свои огромные достижения он считал не более, чем подготовительными этапами на пути к следующему успеху.

В начале научной работы Эйнштейн осознал неадекватность некоторых аспектов механики Ньютона, и из его попытки примирить законы механики с законами электромагнитного поля родилась специальная теория относительности. Он работал с классическими проблемами статистической механики, а также с проблемами, где эти задачи сливались с квантовой теорией: это привело к объяснению броуновского движения молекул. Он исследовал тепловые свойства света с низкой плотностью излучения, и его наблюдения заложили основы фотонной теории света.

В начале своей карьеры, еще в Берлине, Эйнштейн постулировал, что правильная интерпретация специальной теории относительности также должна давать и теорию гравитации, а в 1916 году опубликовал статью по общей теории относительности. За это время он также сделал немалый вклад в решение проблем излучения и статистической механики.

В 1920-е годы Эйнштейн начал построение единой теории поля, хотя не прекращал работать и над вероятностной интерпретацией квантовой теории. Этим он продолжал заниматься и после переезда в Америку. Он сделал вклад в статистическую механику, разработав квантовую теорию одноатомного газа, а также выполнил ценную работу, связанную с вероятностями атомных переходов и релятивистской космологией.

Выйдя на пенсию, Эйнштейн продолжал работать над объединением основных концепций физики, приняв противоположный для большинства физиков подход — геометризацию.

Работы Эйнштейна, безусловно, широко известны, и наиболее важными из них являются «Специальная теория относительности» (*Special Theory od Relativity*, 1905 г.), «Относительность» (*Relativity*) [перевод на английский язык, 1920 и 1950 гг.], «Общая теория относительности» (*General Theory of Relativity*, 1916 г.), «Исследования теории броуновского движения» (*Investigations on Theory of Brownian Movement*, 1926 г.) и «Эволюция физики» (*The Evolution of Physics*, 1938 г.). Среди его ненаучных работ, вероятно, самыми важными являются «О сионизме» (*About Zionism*, 1930 г.), «Зачем нужна война?» (*Why War?*, 1933 г.), «Моя философия» (*My philosophy*, 1934 г.), «Из моих последних лет» (*Out of My Later Years*, 1950 г.).

Альберт Эйнштейн получил множество почетных степеней доктора наук, медицины и философии от многих европейских и американских университетов. В 1920-е годы он читал лекции в Европе, Америке и на Дальнем Востоке. Он был награжден членством всех ведущих научных академий во всем мире. В признание его работы он получил множество наград, включая медаль Копли Лондонского королевского общества, присужденную ему в 1925 году, и медаль Франклина института Франклина в 1935 году.

Талант Эйнштейна, как и следовало ожидать, привел к тому, что он очень много времени проводил в интеллектуальном уединении, а для расслабления очень большую роль отводил музыке. В 1901 году он женился на Милеве Марич. У них было два сына. Их брак распался, и в 1917 году Эйнштейн женился на своей двоюродной сестре, Эльзе Эйнштейн, которая умерла в 1936 году. Он умер 18 апреля 1955 года в Принстоне, Нью-Джерси.

Интересующие Вас книги нашего издательства можно заказать почтой или электронной почтой:

subscribe@rcd.ru

Книги также можно приобрести:

1. Москва, ФТИАН, Нахимовский проспект, д. 36/1, к. 307, тел.: 332-48-92 (почтовый адрес: Нахимовский проспект, д. 34).
2. Москва, ИМАШ, ул. Бардина, д. 4, корп. 3, к. 414, тел. 135-54-37.
3. МГУ им. Ломоносова (ГЗ, 15 этаж).
4. Магазины:

   Москва: «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40)
   «Московский дом книги» (ул. Новый Арбат, 8)
   «Библиоглобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6)

   С.-Пб.: «С.-Пб. дом книги» (Невский пр., 28)

Нобелевские лекции по физике

1901–1921

Дизайнер М. В. Ботя
Технический редактор А. В. Широбоков
Корректор М. А. Ложкина

Подписано в печать 16.12.02. Формат 60 × 84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,25. Уч. изд. л. 22,87.
Гарнитура Антиква. Бумага офсетная №1.
Тираж 1000 экз. Заказ № 5402.
Издание подготовлено совместно
редакцией журнала «Успехи физических наук»
117071 Москва, Ленинский просп., 15
Тел. (095) 236-30-54, 190-42-44, 955-03-25
E-mail: ufn@ufn.ru http://www.ufn.ru
Лицензия на издательскую деятельность №040522 от 12.09.97

и АНО «Институт компьютерных исследований»
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.
Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.
http://rcd.ru E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ГИПП «Вятка».
610033, г. Киров, ул. Московская, 122.

1910

Йоханнес Дидерик
Ван дер Ваальс
1837-1923

1911

Вильгельм Вин
1864-1928

1912

Нильс Густав Дален
1869-1937

1917

Чарльз Гловер Баркла
1877-1944

1918

Макс Планк
1858-1947

1919

Йоханнес Штарк
1874-1957

1913

Хейке
Камерлинг-Оннес
1853-1926

1914

Мах фон Лауэ
1979-1960

1915

Уильям Генри
Брэгг
1862-1942

Уильям Лоуренс
Брэгг
1890-1971

1920

Шарль Эдуард Гильом
1861-1938

1921

Альберт Эйнштейн
1879-1955

ISBN 5-93972-186-9
9 785939 721868

интернет-магазин
OZON.ru
13731686