

АКАДЕМИЯ НАУК — СТАХАНОВЦАМ

Проф. В.К.Лебединский

# БЕСЕДЫ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

В.К.Лебединский — БЕСЕДЫ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

НАУЧНО - ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ  
АКАДЕМИЯ НАУК — СТАХАНОВЦАМ  
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ ПРЕЗИДЕНТА АН СССР акад. *В. Л. КОМАРОВА*

Проф. В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ

# БЕСЕДЫ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
проф. *В. А. ОСТРОУМОВА*

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР  
МОСКВА 1940 ЛЕНИНГРАД

Ответственный редактор  
акад. С. И. Вавилов

## ОТ РЕДАКТОРА

Обычно авторы популярных сочинений об электричестве ставят себе целью достигнуть наиболее полного и точного изложения намеченного материала без помощи высшей математики, и существует целый ряд прекрасных книжек, в которых эта цель достигается с большим успехом. Однако это не делает их доступными широким кругам читателей, а кажущаяся элементарность изложения лишь утомляет.

Иные соображения руководили автором этой книжки. Своим многолетним научным и педагогическим опытом, давшим нашему Союзу целые поколения талантливых физиков и опытных инженеров-электриков, он воспользовался для выяснения, какие именно вопросы, какие стороны современного учения об электрическом токе представляют для нашей учащейся молодежи наибольшие затруднения, что тормозит интенсивное усвоение этого предмета, что угнетает зарождающуюся собственную научную инициативу, попытки к самостоятельному мышлению. Близость к учащимся, к их нуждам и радостям постижения новых областей знания дала возможность автору подметить те приемы изложения, тот методический подход, который позволил бы начинающим электрикам кратчайшим путем подняться до уровня современной науки и стимулировал бы их самостоятельность.

Все это нашло отражение как в содержании, так и в форме изложения предлагаемого нашим читателям введения в одну из интереснейших и важнейших областей точного знания.

В полных курсах электричества и магнетизма наши читатели найдут более подробное и более строгое изло-

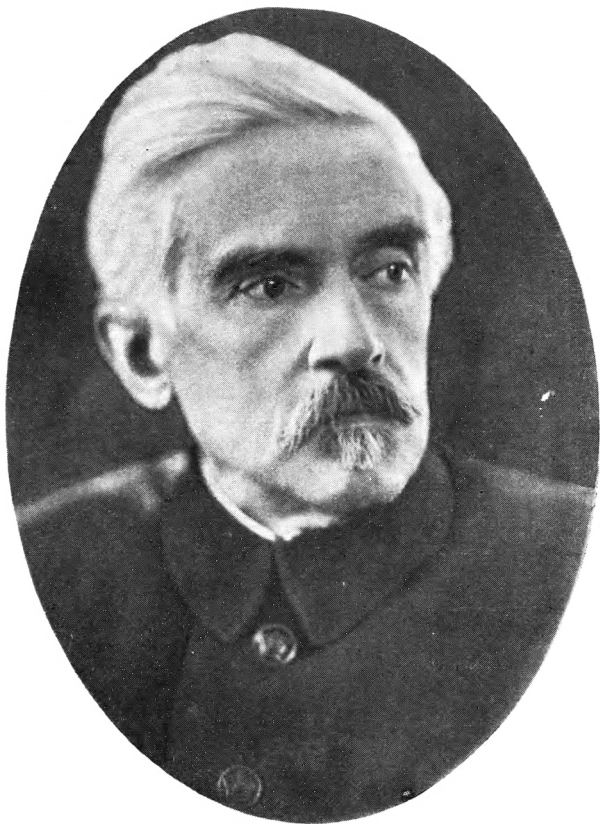


жение предмета, если интерес, который вызовет у них чтение этой маленькой книжки, побудит их к дальнейшему изучению предмета, причем самое изучение этих серьезных и объемистых сочинений станет тогда для них несомненно более легким, увлекательным и осмысленным.

Особенно полезной будет эта книжка тем молодым электрикам, охваченным волной стахановского движения, которые стремятся в кратчайший срок освоить, проработать и продумать все то, что привело человечество к современному изумительному развитию нашей научно-технической мощи, дабы скорее испытать и свои молодые силы в творческой работе обновленного общества.

Проф. Б. Остроумов





В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ (1868—1937)

*Фото 1936 г.*

## В. К. Лебединский

(Б и о г р а ф и ч е с к и й о ч е р к)

11 июля 1937 г. скончался один из популярнейших русских физиков, Владимир Константинович Лебединский, доктор технических наук, профессор ленинградского Института инженеров железнодорожного транспорта и Военно-медицинской академии.

Его многогранная личность и широкий размах литературной и научно-технической деятельности неразрывно связаны с развитием и распространением точных и технических наук в нашем Союзе и с проникновением их в самую толщу населения.

Талантливый популяризатор и оригинальный мыслитель, он умел новейшие успехи физики сделать доступными и понятными для всех, чья мысль стремилась охватить современный прогресс науки. Чутко прислушиваясь к нуждам, стремлениям и чаяниям нашей учащейся молодежи, он сумел сделаться ей близким и завоевать в ее среде самую теплую симпатию и исключительный авторитет. Имя В. К. Лебединского сделалось дорогим многим тысячам молодых электриков и любителей физики и радиотехники, которые имели возможность слушать его лекции или увлекались, читая его многочисленные статьи и популярные книжки. Многие ныне уже известные инженеры и видные специалисты категорически заявляют, что на выбор специальности и на первые успехи их самостоятельных работ оказало решительное влияние блестящее изложение основ современной науки, которое было так свойственно В. К. Лебединскому. Его меткие формулировки, его умение поставить проблему, выделив суще-

ственное от второстепенного, оставляли в памяти неизгладимый след. Вот почему в самых отдаленных уголках нашего Союза внезапная смерть Владимира Константиновича вызвала такое чувство искренней и глубокой скорби у тысяч людей не только как потеря выдающегося ученого, но и как потеря близкого, дорогого человека.

В. К. Лебединский родился в г. Петрозаводске в 1868 г. в семье преподавателя истории в средней школе. Это высокое звание учителя слилось в его сознании с авторитетом отца и наложило с первых же дней сознательной жизни своеобразный отпечаток на всю его деятельность. Владимир Константинович с самого раннего детства проявляет исключительную жажду к знанию, к изучению природы. Он пользуется всеми доступными ему средствами для расширения своего кругозора, не ограничиваясь механическим запоминанием фактов и рассуждений, а всем своим существом переживая ту гигантскую творческую работу, то напряжение мысли, которые привели человечество к современным блестящим успехам точного естествознания.

Старая школа давала мало простора его пытливому уму и только в Петербургском университете в 1887 г. в среде целой группы своих талантливых сверстников, ставших потом также выдающимися учеными и специалистами, Владимир Константинович получает наконец возможность удовлетворить свою жажду к знанию и к самостоятельной оригинальной научной работе.

Иван Иванович Боргман, тогда еще молодой физик, увлек его своим полным энтузиазма изложением работ Фарадея и Максвелла и направил его внимание к тем изумительным техническим приложениям электрической энергии, которые непосредственно вытекали из этих работ. Доклады изобретателя беспроводной телеграфии Александра Степановича Попова об его замечательных экспериментах (1895 — напечатаны в 1896 году) воспринимались Владимиром Константиновичем с особенной ост-

ротой и напряженным интересом. Они-то и определили характер всей дальнейшей его научной работы.

К этому времени Владимир Константинович уже оканчивает университет (1891 г.) и успевает приобрести педагогический опыт в преподавании физики. Он состоит членом Русского физико-химического общества и около этого времени (в 1895 г.) печатает свою первую экспериментальную работу «О некоторых опытах с катушкой Румкорфа»<sup>1</sup>. Опыты были проделаны в Петербургском электротехническом институте, где Владимир Константинович читает в это время «Курс переменных токов» и организует специальную лабораторию по этому предмету.

Так началась научная и педагогическая работа Владимира Константиновича, продолжавшаяся непрерывно всю его жизнь. Она сосредоточивалась главным образом на учении об электрических и магнитных явлениях и на вопросах, связанных с распространением радиоволн. Эта работа в конце концов стяжала всеобщее признание В. К. Лебединского пионером русской радиотехники.

Литературная работа Владимира Константиновича началась в то же время. С 1893 г. он принимает самое деятельное участие в издании журнала «Электричество», где помещает множество статей, заметок, обзоров и рецензий, относящихся к новейшим успехам науки, привлекающая внимание русских электриков к самым важным открытиям в этой области.

В 1906 г. Владимир Константинович принимает на себя редактирование «Журнала Русского физико-химического общества» (часть физическая). Вскоре он добивается основания при нем отдельного популярного журнала «Вопросы физики» и привлекает к участию в нем самых живых и талантливых популяризаторов того времени.

Параллельно с расширением литературной работы разрастается и педагогическая деятельность Владимира Кон-

---

<sup>1</sup> Журнал Русского физико-химического общества, т. 27.

стантиновича в высшей школе. С 1899 по 1913 год он преподает физику на курсах Лесгафта и Лохвицкой-Скалон, а затем в Военном инженерном училище. В Политехническом институте читает «Курс электромагнитных колебаний» (1906—1913); работает и в ряде других высших учебных заведений. В 1913 г. Рижский политехнический институт избирает его профессором по кафедре физики.

Вместе с интенсивной педагогической деятельностью Владимир Константинович продолжает экспериментальные работы. В 1896 г. он принимает участие в экспедиции на р. Лену в селение Чекурское для наблюдения полного солнечного затмения. При этом ему удается впервые получить фотографию обращения солнечного спектра. За эти годы Владимир Константинович печатает целый ряд оригинальных работ, обративших на себя внимание специалистов и получивших впоследствии дальнейшее развитие в работах учеников Владимира Константиновича и других ученых. Вот некоторые из них: «О действии ультрафиолетового света на искру»<sup>1</sup>, «Действие магнитного поля на положительные заряды»<sup>2</sup>, «О свойствах электрической искры»<sup>3</sup>, «Исследование явлений в индукционной катушке с помощью трубки Брауна»<sup>4</sup>, «О резонансе не связанных и связанных систем»<sup>5</sup>, «Сопротивление электрической искры»<sup>6</sup>, «Практические методы измерения излучения»<sup>7</sup>, «О некоторых случаях разделения радиации»<sup>8</sup>, «Электропроводности при соответствующих температурах»<sup>9</sup>, Исследование трансформатора переменного тока<sup>10</sup>, «Ре-

<sup>1</sup> Электричество, 1900, № 7, 10—11; Журнал Русского физико-химического общества, 1908.

<sup>2</sup> Электричество, 1900, № 12—13.

<sup>3</sup> Журнал Русского физико-химического общества, 1901.

<sup>4</sup> Там же, 1901.

<sup>5</sup> Электричество, 1905, № 11—12.

<sup>6</sup> Журнал Русского физико-химического общества, 1906.

<sup>7</sup> Там же, 1906.

<sup>8</sup> Там же, 1908 и 1909.

<sup>9</sup> Там же, 1908.

<sup>10</sup> Там же, 1909 и 1916.

зультаты изучения солнечных спектрограмм 1896 г.»<sup>1</sup>, «О причинах понижения температуры с поднятием над поверхностью земли»<sup>2</sup>, «Ионизация, производимая движущимися наэлектризованными частицами»<sup>3</sup>.

В 1906 г. Владимир Константинович издает книжку «Электромагнитные волны и основания беспроволочного телеграфа», послужившую началом целой серии изданий, посвященных этому вопросу.

В 1911 г. он редактирует сборник классических работ «Электрические колебания волны», служивший многие годы основным пособием при изучении радиотехники.

В 1913 г. Владимир Константинович защищает в Москве диссертацию на степень магистра физики.

В этот период своей деятельности Владимир Константинович, с одной стороны, в качестве редактора самого солидного русского физического журнала напряженно следит за прогрессом науки, а с другой, — все более и более сближается с учащейся молодежью. Он, как может быть никто, воспринимает и ясно сознает огромный разрыв, который в то время существовал между триумфальным шествием точной науки и темнотою народною (не исключая и интеллигенции того времени).

Воспринимая жизнь как целое, будучи по своей натуре художником, а по своему образованию энциклопедистом, твердо убежденный в том, что наука лишь тогда выполняет свое назначение, когда она делается достоянием всех трудящихся, Владимир Константинович употребляет все свои силы, все доступные средства для того, чтобы облегчить проникновение точного знания в широкие народные массы. Он делается убежденным популяризатором науки и обращается к изучению этого своеобразного искусства. Вдумываясь, как любящий отец или брат, в психологию учащейся молодежи и молодых ученых, в их умствен-

---

<sup>1</sup> Там же, 1909.

<sup>2</sup> Там же, 1911.

<sup>3</sup> Там же, 1912.



ный рост, Владимир Константинович пытается нащупать те затруднения, те подводные камни, которые задерживают этот рост, подчас парализуя начинающееся робкое научное мышление. Он пытается указать им кратчайшие пути для достижения цели. Рисуя широкие перспективы, открывающиеся перед мыслящим человеком при углубленном изучении природы, четко намечая цель отдельных этапов умственной и учебной работы, он вдохновляет молодежь на новые усилия и знакомит ее с тем интеллектуальным удовлетворением, которое получается в результате такой сознательной работы над самим собой.

Из-под пера Владимира Константиновича выходят десятки популярных статей и обзоров, он читает популярные лекции, издает учебники, выступает на собраниях и съездах и т. д. Эта напряженная работа оставляет все меньше и меньше досуга, и его собственные исследования, отличающиеся всегда остроумием и оригинальностью, часто остаются незаконченными, неопубликованными.

Не все могли понять мотивы такой своеобразной деятельности Владимира Константиновича и много препятствий стояло на его пути. Только чуткое сердце подруги жизни, Юлии Илларионовны устроило. Будилович, неизменно до конца дней поддерживало его в своеобразной и многогранной работе. Их семейный очаг привлекал своей теплотой и молодежь, и старых маститых ученых. Он служил центром, около которого объединялись люди разных направлений мысли, разных специальностей, — люди, искавшие среди столкновений мнений новых путей к познанию природы.

Разразившаяся в 1914 г. мировая война не дала Владимиру Константиновичу возможности выполнить начатые и намеченные им работы. Рижский политехнический институт был эвакуирован в Москву, а потом прекратил работу. Огромные потрясения, которые вызвала война во всем человеческом обществе, пробуждение новых народных сил, победа пролетариата и создание нового общест-

венного строя — весь этот вихрь событий, так преобразивший весь мир, захватил и увлек Владимира Константиновича к новым задачам, к новым возможностям, к выполнению новых социальных обязанностей.

Чуткий и вдумчивый, он остро воспринимал тот изумительный исторический процесс, участником которого он являлся. Одним из самых первых он примкнул к новой власти рабочих и крестьян и посвятил весь остаток своей жизни строению нового государства. Он старался при этом сделать свою работу максимально целесообразной и продуктивной, с юношеским энтузиазмом отдавая для нее все свои силы и весь накопленный им опыт. В сущности, ведь только революция и могла осуществить мечту всей его жизни сделать науку достоянием всего народа. Если за 27 лет своей литературной деятельности до революции он успел дать около 100 различных печатных работ, то за 20 лет существования нашего Союза число их оказывается вдвое большим.

С неутомимой энергией принимается Владимир Константинович за решение новых проблем, выдвинутых бюкшей ключом жизнью молодого советского государства. Огромные пространства его, делающие столь трудной связь между отдельными его частями, необходимость тесного единения всех около новой власти для отпора внешних и внутренних врагов, потребность в четкой координации всех органов нового Союза республик — все это, конечно, заставило Владимира Константиновича обратить внимание на то исключительное значение, которое в этих условиях приобретала беспроволочная связь. Вновь вспомнились работы Попова, свои собственные юношеские мечты и увлечения.

Однако для овладения этим чудом новейшей техники не было кадров. Нужно было быстро обучить тысячи специалистов в этой области, нужно было изготовить для них десятки тысяч новых приборов и инструментов. Владимир Константинович яснее, чем кто-либо другой, соз-

навал эту острую необходимость в специалистах и сделал все, что было в его силах, чтобы дать нашему Союзу новое необходимое средство связи.

По его инициативе и под его редакцией при Народном комиссариате почт и телеграфов в 1918 г. начинает издаваться журнал «Телеграфия и телефония без проводов». В 1920 г. редакция этого журнала переводится в организованную, согласно указаниям В. И. Ленина, Нижегородскую радиолaborаторию. Здесь Владимир Константинович вместе с основателем Радиолaborатории В. М. Лещинским, а после его смерти с новым руководителем исследовательских и технических работ в ней, своим учеником проф. М. А. Бонч-Бруевичем и с целым рядом других энтузиастов беспроводной связи развивает особенно интенсивную деятельность.

Он входит в совет Радиолaborатории и в течение нескольких лет является его председателем, организует издание второго журнала «Радиотехник», предназначенного для более широкого круга читателей, чем журнал «Телеграфия и телефония без проводов», читает лекции, пишет статьи, преподает в университете, организует празднование 25-летней годовщины изобретения радиотелеграфа А. А. Поповым, организует съезды физиков и радиотехников, привлекает к работе в журналах и к сотрудничеству в Радиолaborатории виднейших русских специалистов и т. д.

В результате этих напряженных усилий Владимира Константиновича в нашем Союзе зарождается и быстро разрастается мощная волна радиолюбительства, охватившая в короткое время сотни тысяч молодых людей, и ставшая скоро неиссякаемым источником прекрасных кадров как для быстро развивавшейся радиопромышленности, так и для службы связи.

Такая напряженная и разносторонняя работа, требовавшая концентрации всего внимания, всех мыслей, всех сил, требовавшая непрерывного накопления нового тех-

нического опыта, новых знаний, почти не давала возможности Владимиру Константиновичу продолжать оригинальные экспериментальные исследования, прерванные мировой войной, хотя он не оставлял надежды заняться ими вновь в более благоприятной обстановке.

Мы должны вспомнить, какие трудности переживало наше государство в первые годы своего существования: голод, разруха, война, блокада, внутренние враги — вот те условия, в которых протекала деятельность Владимира Константиновича в эту эпоху изумительного революционного энтузиазма.

Было необходимо, чтобы единственный печатный орган, из которого русские радисты черпали свои сведения об успехах наших отечественных работ и о заграничных научно-технических новинках, журнал «Телеграфия и телефония без проводов» выходил без перебоев. И вот при Радиолaborатории организуется собственная типография, где на ручном станке печатаются и выпускаются в срок его номера.

Благодаря усилиям Владимира Константиновича и других сотрудников Радиолaborатории, сплотившихся около него, журнал выходил непрерывно в течение 11 лет — до 1929 г., когда он был переведен в Ленинград и получил название сначала «Техники радио и слабого тока», а потом «Известия электротехнической слаботочной промышленности».

Все это время до самой смерти Владимир Константинович являлся одним из деятельнейших членов редакции этой преемственной серии журналов.

А между тем русская радиотехника уже превратилась в мощную передовую отрасль индустрии, развилось радиовещание, телевидение, и Владимир Константинович получил возможность с чувством внутреннего удовлетворения убедиться, что его усилия увенчались полным успехом, что избранное им направление в работе было совершенно правильным и его цель достигнута. Можно было обратить

взоры на другие области науки и техники, перейти к решению новых задач.

Уже в 1926 г., не прерывая теснейшей связи с Радиолaborаторией и с журналом, Владимир Константинович переезжает в Ленинград и занимает кафедру физики сначала в Медицинском институте, потом в Военно-медицинской академии, а в Институте железнодорожного транспорта — кафедру физических основ электротехники. Хотя годы и давали себя знать, литературная деятельность Владимира Константиновича не прерывается, а становится еще более разносторонней. Высшая квалификационная комиссия присуждает ему степень доктора технических наук без защиты диссертации.

Отдаваясь, несмотря на пошатнувшееся здоровье, с обычным увлечением учебной работе в новой реформированной школе, Владимир Константинович уделяет значительное внимание вопросам, касающимся учебных пособий и методики преподавания. В соответствии с достижениями современной науки Владимир Константинович заново в значительно расширенном объеме перерабатывает и подготавливает к печати второе издание сборника «Электрические колебания и волны» и, кроме того, пишет новую и совершенно оригинальную популярную книжку «Беседы по электричеству», где он в необычной форме пытается набросать доступную самому широкому кругу читателей картину современного состояния учения об электрических и магнитных явлениях. Эту работу он успевает закончить всего за несколько дней до своей внезапной кончины.

В последние годы реформа высшей школы дала ему полную возможность вновь возвратиться к экспериментальной исследовательской работе.

На склоне дней, после 45 лет неутомимой разносторонней деятельности, несмотря на свои слабеющие силы, Владимир Константинович обращается к изучению одной из труднейших и интереснейших областей физики — проблеме магнетизма железа. Явление Баркгаузена воспроиз-

водится им в совершенно новой и оригинальной обстановке, позволяющей обнаружить в нем новые детали, и гораздо глубже, чем это делали до сих пор, проследить за механизмом перемещений вещества при намагничивании. Намечаются и другие работы, но неумолимая смерть обрывает эту поистине трудовую жизнь, целиком посвященную общественному служению и исполнению своего общественного долга.



## ОТ АВТОРА

Эта книга предназначена для наших юношей, девушек и всех заинтересовавшихся наукою об электричестве с великими жизненными приложениями электромагнитного поля. Автор предполагает в читателе некоторое знакомство с физикой вообще и электричеством в особенности, хотя бы в объеме курса средней школы; в живом уме эти первоначальные сведения приводят к вопросам, сомнениям, влекут к более подробному знанию. Поддержат, полнее развить эту здоровую инициативу, направить к ответам на тревожащие вопросы или, по крайней мере, указать, как, в чем, где искать эти ответы — такова цель моей книги.

Я старался достичь этой цели, дав из различных областей учения об электричестве примеры возникновения вопросов, их решения, примеры неувязок нашего знания, узлов, в которые оно запутывается иногда так, что, казалось бы, не найти концов, и примеры их распутывания.

Тут я должен отметить, что между такими примерами имеется, может быть, кое-что неважное, несущественное, но почему-либо близкое мне; я привел именно их не из личных побуждений, неуместных в такой книге, но потому, что я выбирал случаи, которые могу рассказать наиболее ясно или с наибольшею жизненностью.

По той же причине искания более жизненного материала, а также желая опираться на реальные интересы нашей советской молодежи, я нередко использую действительные случаи из жизни нашей высшей школы, слова и мысли, действительно высказанные кем-либо из лиц, с которыми мне приходилось, иногда совершенно случай-



но, сталкиваться. Нередко они, сами авторы, так и оставались для меня неизвестными.

Пользуюсь случаем просить их извинения, если кому-нибудь из них это почему-то не понравится или покажется, что их высказывания мною переданы неправильно. Пусть только каждый из товарищей не упускает из виду, что переданное мною может быть не его высказыванием, а кого-либо другого, хотя и мало отличающимся от того, с чем и он обращался ко мне.

И для тех, кому приходится руководить занятиями нашей молодежи в области электричества, эта книжка, я думаю, может оказаться полезною.

Ленинград 20 VI 1937 г.

## І. Электродвигатель

### Почему вертится электродвигатель

Мой попутчик — он по своему занятию ботаник — при виде проходившего мимо нас трамвая задал мне вопрос, видимо, давно интересовавший его: «Что такое электродвигатель?»

Этот вопрос, не имевший никакого отношения к предыдущему нашему разговору, поставил меня в недоуменное положение. Слово «электродвигатель» вызвало во мне представление о ряде серийных электромоторов на заводе, о разнообразии типов по конструкции, по мощностям, по габариту, кпд (коэффициенту полезного действия), целесообразности. Но сразу же блеснула мысль, что ничего этого не нужно моему собеседнику; да и непонятно было бы ему. Его интересует, как электричество может двигать.

Рукой можно двигать; пар давит на поршень и двигает его; мы видим, как струя воды при поливке улицы толкает перед собою по поверхности гудрона мелкие предметы. Как электричеством это делается — самое центральное место для понимания электродвигателя.

И я начал объяснение.

— Вы знаете, что такое электрический ток?

— Да, вполне. Это электроны бегут по проволоке.

Этот ответ меня поставил в определенное отношение к собеседнику: во-первых, он совсем элементарен в своих сведениях по электричеству и поэтому знает «вполне» то, что мы, электрики только отчасти знаем; отсюда следует, во-вторых, что можно с этого понятия, как совсем твердого у него, давать дальнейшие объяснения.

— Так вот представьте себе, что по проволоке идет электрический ток. А сбоку от нее — магнит; он, так сказать, «смотрит» на нее своим полюсом: тогда эта проволока с током задвигается и будет двигать за собою все, что с ней связано. Это и есть электродвигатель. Довольно существенно при этом (признаюсь — подумал про себя: «скромно сказано!»), что эта проволока с током будет двигаться не к магниту и не от него, а мимо него, мимо полюса; когда она пройдет свой путь мимо него, наш электродвигатель кончился.

Тут я заметил, что вопрошавший удовлетворяется ответом и даже более, чем я этого ожидал. «Как полезно, — подумал я, — ввести в объяснение движение, процесс; как легко объяснять динамические явления». И хотя и не вызываемый дальнейшими вопросами, а скорее из сожаления к собеседнику, который удовлетворился таким кратким объяснением, я добавил:

— Ну дальше уже техника сделала так, что, когда одна проволока с током пройдет мимо полюса, на ее месте оказывается другая, которая также задвигается, как первая, потом третья; все это завертится, и опять подойдет первая, вторая и т. д. Двигатель работает сколько угодно времени.

Собеседник сочувственно кивает головою:

— Это, конечно, уже все понятно; дальше — техника.

Но мне захотелось закрепить в нем его новое знание и в то же время подчеркнуть, что в основе действия электродвигателя лежит такой важнейший факт, как действие магнита на проводник с током. Я добавил:

— Это было открыто в 1820 г. датским физиком Эрстедом. Собственно он открыл обратное: магнитный полюс, находясь около проводника с током, двигается и притом так, чтобы пройти мимо него. Но — вы понимаете? всякому действию имеется противодействие...

Видно было, что мой ботаник считает вопрос исчерпанным; интерес его уже иссяк. «Это физика начинается», вероятно, подумал он. И мы перешли к другим темам.

## В электродвигателе работа производится странным образом

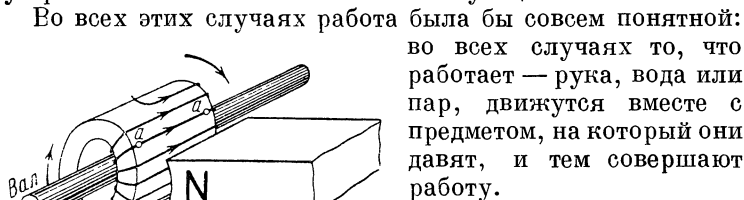
Теперь оставим нашего ботаника; он не спросил самого интересного: что в электродвигателе является «работником», двигателем в собственном смысле слова. В ботанике этот вопрос, вероятно, задается редко, а в физике он встает на каждом шагу.

Физик во всяком явлении усматривает работу: земля валит на себя все, что не подперто, не закреплено, ветер сгибает деревья; молекулы нагретого пара напирают и двигают поршень в цилиндре; какие-то силы в луче света, падающего на листья растения, движут молекулы и атомы и части атомов — электроны и ионы — и вызывают этим растение к жизни.

Чтобы совершилась работа, необходимо взять, ухватить предмет с некоторою силою и двигать против той силы, которая мешает ему двигаться. Если мы поднимаем 1 килограмм на 1 метр (в данном случае двигаем его против силы тяжести), совершаем 1 килограммометр работы; если комар (около 1 миллиграмма) поднимается в воздухе на 1 сантиметр, он совершает работу (опять против силы тяжести), равную 1 эргу. Эта работа в  $10^{-8}$  раз меньше 1 килограммометра. Когда свет, копошась в атоме растения, вырывает из атома один электрон, он совершает работу (против силы, тянущей электрон обратно к атомному ядру) в несколько «вольт-электронов». Эта недавно введенная мера работы очень невелика; она годна как раз для атомных и молекулярных процессов: 1 вольт-электрон почти в тысячу миллиардов раз меньше эрга; точнее  $1 \text{ вольт-электрон} = 1,591 \cdot 10^{-12} \text{ эрга}$ .

В нашем электродвигателе, если его рассматривать только в главных чертах, имеется магнит и пред ним якорь, т. е. кольцо, обмотанное проволокой (фиг. 1). Когда по этой обмотке пущен ток, причем электроны по-

бегут по виткам *aa* слева направо, сейчас же якорь завертится, витки *aa* пойдут вниз, и задвинется все, с чем скреплен вал двигателя. Мы могли бы сами совершить эту работу, перебирая пальцами по виткам; если сопротивление вращению у якоря не слишком велико, мы заставили бы его вращаться. Можно было бы привести это колесо во вращение падающей водой или струей пара, устроив вместо обмотки соответствующие лопасти.



Фиг. 1. Схема работы электродвигателя

Во всех этих случаях работа была бы совсем понятной: во всех случаях то, что работает — рука, вода или пар, движутся вместе с предметом, на который они дают, и тем совершают работу.

В электродвигателе именно нет ничего этого. Необходимо лишь, чтобы перед якорем находился полюс магнита (фиг. 1),

который не должен никуда двигаться; достаточно одного его присутствия, конечно при непременном условии, чтобы по обмотке (по виткам *aa* якоря) проходил электрический ток.

Это действительно занятно. Тут какая-то особенность электрического мира: ведь напрасно было бы ожидать, чтобы мельничное колесо или турбина завертелись в стоячей воде или какой-нибудь другой неподвижной жидкости, или в каком-либо неподвижном, хотя бы и очень горячем, паре. Тем более они не завертелись бы только от того, что около них было бы что-нибудь поставлено, хотя бы это был человек, — неподвижный, с неподвижными руками.

Это происходит только с якорем электродвигателя, по обмотке которого идет ток, с якорем, находящимся около магнитного полюса. Каким же образом в нем совершается работа?

Вопрос нами поставлен вполне определенно; вся обстановка явления ясна, и такое явление происходит несомненно: много миллионов электродвигателей непрерывно действуют на земном шаре, подтверждая возможность такого совершения работы.

### В чем же заключается особенность действия электродвигателя

Мы поставили пред собой вопрос, как действует неподвижный магнит на обмотку якоря, когда по ней идет ток. Объяснения, даваемые физиками по вопросам об электричестве, носят особый характер; они отличаются, например, от обычного рассказа о том, как действует локомотив на прицепленный к нему поезд. Здесь, если иметь чертеж или макет, легко объяснить всю непрерывную связь частей машины; такие технические термины, как «поршень», «штанга», «кривошип», «эксцентрик» и т. п., могут быть заменены другими, более понятными словами, или легко разъясняются соответствующим показом.

Совсем другое в науке об электричестве: фиг. 1 дает уже все, что может дать чертеж (схема) электродвигателя в основных его чертах. Но этот чертеж, как мы видим, включает в себе загадку — отсутствует связь между якорем и полюсом. Для разъяснения ее физик делает от себя какое-то дополнение, ставящее все части схемы в непрерывную связь.

Есть одна общая недомолвка в схеме паровоза и в схеме электрической: никто не изображает на чертеже паровоза тех мятущихся молекул пара, которые заполняют цилиндр под поршнем и которые своим давлением на поршень, происходящим от их неупорядоченного движения, вызывают всю работу машины. Этот молекулярный мир на чертеже иногда обозначают только словом «пар» или штриховкой. Точно так же лишь стрелками обозначают, что по проволоке идет ток, предоставляя воображению смот-

рящего на схему составить себе картину движущихся в этом направлении электронов.

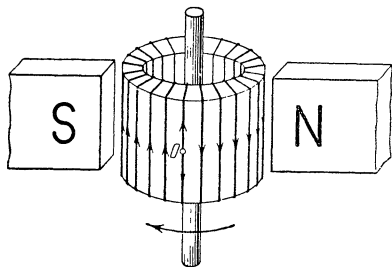
Возможно, что и недостающая на чертеже связь между магнитом и проволокой такого же свойства и потому выпадает из чертежа.

Наконец, еще об одном резком отличии электрической схемы. В механической машине связь отдельных частей так очевидна, что ни для кого не будет затруднительным представить себе, в какую сторону задвигнется один конец какого-либо рычага или завертится данное колесо эксцентрика при движении другого конца рычага в заданном направлении. В электрической схеме это настолько решительно неизвестно, что необходимо просто затвердить данные опыта. Относительно фиг. 1 было указано, что передние витки якоря задвигнутся вниз (а задние вверх). Опыт показывает, что так бывает при данном полюсе и данном направлении тока.

Это не имеет никакого объяснения; остается только твердо запомнить. Опыт показывает, что при обратном токе и вращении якоря будет обратное, а если при этом изменить и полюс магнита, то вращение получится прежнее. Этими электрическими законами постоянно пользуются. Если, например, подавать ток в якорь в точке  $O$  (фиг. 2), ток разветвится в обе половины якоря. Пусть часть его, направившаяся вниз, пойдет по виткам правой половины, а направившаяся вверх — по виткам левой; теперь понятно, что на якорь с такими токами можно действовать двумя противоположными полюсами, и это будет выгодно и удобно в конструктивном отношении: полюс  $S$  движет витки налево (если поместить глаз на место этого полюса), а полюс  $N$  будет помогать ему; весь якорь непременно завертится так, как указано большой стрелкой.

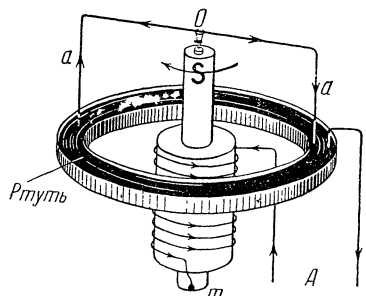
Если в якорь пустить ток обратного направления (стрелки тока на витках обмотки перевернутся), а полюсы оставить прежние, якорь завертится в обратную сторону.

Следовательно, если в обмотку пустить наш городской переменный ток, который сто раз в секунду меняет свое направление, двигатель при постоянных полюсах не успеет никуда повернуться. Ток будет пущен, а якорь не завертится. Нужен постоянный ток одного направления.



Фиг. 2. Схема якоря электродвигателя

На фиг. 3 изображен другой тип электродвигателя, самый старинный (Фарадей. 1824), но несколько измененный по современному. Ток от  $A$ , пройдя обмотку электромагнита, входит в точке  $m$  в сердечник, затем в  $O$  входит в рамку  $aa$ , вращающуюся вокруг  $O$  и погруженную своими концами в круглую канавку, наполненную ртутью. Схема показывает, как ток разветвляется от точки  $O$ ; полюс электромагнита находится против проволок  $a$ , с током и рамка обязательно завертится. Такой двигатель можно питать переменным током, потому что как только переменится направление тока в проводниках  $aa$ , полюс  $S$  в электромагните заменится на полюс  $N$ , а мы уже упоминали, что одновременно изменив и ток и полюс на обратные, мы получаем движение провода в прежнем направлении. Изменение полюса произойдет потому,



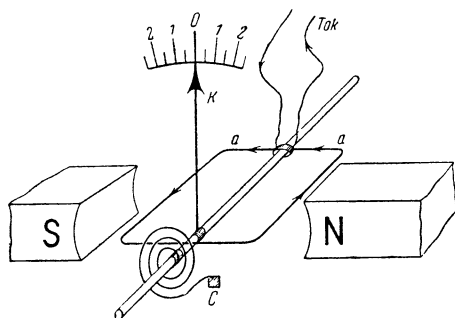
Фиг. 3. Схема опыта Фарадея с движением проводника под действием магнита



что тот же ток идет по обмотке электромагнита, а от его направления зависит, какой полюс появляется в верхней части сердечника электромагнита.

### Ищем закон электромагнитной силы

Опыт показывает, что электродвигатель приходит во вращение и совершенно определенно учит нас, в какую именно сторону. Построив прибор по схеме фиг. 1, 2



Фиг. 4. Схема гальванометра Дпре—  
д'Арсонваля

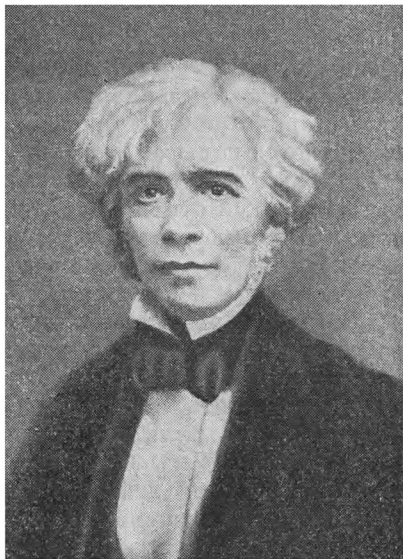
или 3, мы знаем наверно, что он придет в действие, и легко определим, в каком направлении. Но какая сила будет действовать на каждый виток, какова ее величина—этого мы не будем знать наперед. Конечно, можно будет и это узнать на опыте, затормозив двигатель и определив, какая требуется

сила для этого торможения. Таким устройством (фиг. 4) очень часто пользуются: пусть известно, какая сила должна быть приложена к проволокам *аа*, чтобы спираль *с*, тормозящая ее вращение, закрутилась на известный угол, показываемый стрелкой *К*; тогда мы можем, наоборот, определить эту закручивающую силу, когда она, например, получается от присутствия магнита, если увидим, на какой угол магнита повернет нашу рамку с током и, следовательно, на какой угол закрутится спираль.

Мы будем знать с помощью торможения искомую силу, но только для данного прибора, пущенного в действие при данных условиях. Всякое изменение в устройстве

его или в условиях его действия заставили бы снова делать опыт. Никакое предвидение невозможно. Такое знание называется чистым эмпиризмом. Такое примитивное знание не дает возможности что-либо рассчитать, проектировать. Эмпирик не имеет никакой руководящей мысли и не рассуждает, а только изменяет свои опыты в случайных направлениях и затем пробует. Можно себе представить, сколько напрасного труда тратит он и, с другой стороны, каким опасностям он подвергается, блуждая среди всевозможных явлений природы без всякого руководства; достаточно вообразить себе случай, что такому эмпирику предоставили бы стать за машиниста на паровозе под парами.

Бывает, что великий исследователь оказывается на мгновение эмпириком, когда он случайно открывает новое явление, к которому он не шел и о котором он не думал и не мог думать, так как это явление выходило из рамок всего, что до тех пор ему было из вестно. Так были открыты Рентгеном «икс-лучи», называемые ныне рентгеновыми лучами. Так же было открыто Эрстедтом то явление, которое впоследствии вылилось в работу электродвигателя. Превращение этого голого эмпирического факта в закон природы, позволяющий заранее пред-



Фиг. 5. Михаил Фарадей

видеть, какой результат даст нам опыт, произошло в руках величайшего физика, представлявшего собою противоположность чистому эмпирику, в руках Фарадея (фиг. 5), на каждом шагу своей работы руководившегося своими соображениями и стремившегося проследить закономерную связь между отдельными опытами. Сам Эрстедт почти не сдвинулся с позиции чистого эмпирика. Промежуточное место между Эрстедтом и Фарадеем и по времени своей работы, и по характеру своего мышления занимает Ампер. Он дал правило, позволяющее определить, в какую сторону пойдет проводник с током под действием магнитного полюса.

Итак, мы приступаем к выводу силы действия электродвигателя, к отысканию закона этого действия. Мы видим, что не простое любопытство ведет нас к этому, хотя и оно, конечно, не исключается. Главное заключается в том, что мы не хотим оставаться простыми наблюдателями того, что происходит вокруг нас в природе, и рабскими послушниками результатов случайного опыта; мы хотим иметь «свой голос» в явлениях физического мира, управлять его событиями.

Рассуждаем. Если по проводам якоря (фиг. 1) не идет ток (ток равен нулю), действия не происходит. Будем в дальнейшем это действие магнита на витки якоря называть электромагнитною силою. Магнит действует только на движущиеся по проводу электроны, а не на сам провод, и, конечно, на все движущиеся электроны; следовательно, чем больше их движется, т. е. чем больше (сильнее) ток, тем сильнее электромагнитная сила. Опыт в точности подтверждает это. Если мы будем измерять ток, считать, сколько электронов за каждую секунду пропускается через электродвигатель, то увидим, что, например, при 5 амперах в обмотке якоря на якорь действует электромагнитная сила ровно в 5 раз большая, чем при одном ампере, т. е. при  $6 \cdot 10^{18}$  электронах, пробегающих в секунду через каждое сечение проводника.

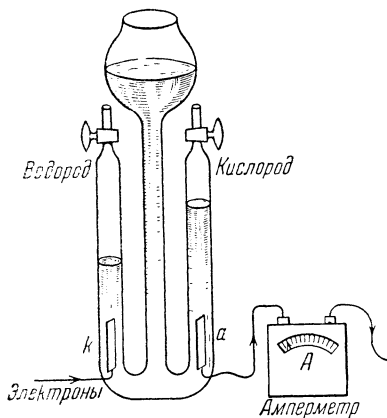
Это настолько твердо известно, что электрики постоянно пользуются обратным заключением. Мы видели, что прибор, изображенный на фиг. 4 и называемый гальванометром Дебре — д'Арсонваля, измеряет силу действия магнита на ток; по этой силе заключаем о величине тока. Если при тех же полюсах спираль закрутилась на угол в  $3\frac{1}{2}$  раза меньший, значит ток в приборе идет в  $3\frac{1}{2}$  раза меньший. Этот прибор является обычным типом амперметра, особенно для малых (слабых) токов. Он легко измеряет (при соответственном устройстве) миллионные и десятимиллионные доли ампера, не говоря уже о часто применяемых миллиамперах (0,001 ампера).

Мы собрались диктовать законы природе. Тут нужна сугубая осторожность. На ряду со смелостью — прежде всего строгая обдуманность.

Если бы мы, например, проверяли наш закон пропорциональности электромагнитной силы величине тока с амперметром типа, показанного на фиг. 4, который на этом законе основан, мы ничего не доказали бы. Можно «доказывать», что угодно, положив в основу доказательства как раз то, что требуется доказать, но этим никого не убедишь. Первое измерение тока в нашем приборе необходимо произвести каким-нибудь способом, совершенно независимым от электромагнитной силы. Основной способ определения числа электронов, проходящих через провод в 1 секунду, употребляемый и для проверки всякого амперметра на заводе, изготовляющем электроизмерительные приборы, состоит в счете электронов по выделенному ими при электролизе количеству вещества, например водорода. Каждый атом водорода служит для переноса одного электрона, а в каждом куб. сантиметре выделенного водорода имеется  $6 \cdot 10^{23}$  атомов (при нормальных условиях). Кроме наблюдения за прибором, в котором происходит выделение водорода (вольтметр), при этом необходимо еще смотреть на часы, чтобы узнать, сколько выделяется атомов за каждую секунду.

Таков основной способ определения величины тока (фиг. 6).

Однако тем, что мы ввели понятие об электрическом токе, мы еще не закончили подсчета числа электронов, находящихся в витке якоря над действием магнита. Величина тока не дает, не определяет числа всех электронов, движущихся по какому-нибудь проводнику длиной  $l$ ; она дает только число электронов, проходящих через какое-либо поперечное сечение провода, например число электронов, выходящих с поверхности  $k$  (фиг. 6) в разлагаемую токком жидкость вольтметра.



Фиг. 6. Газовый вольтметр<sup>1</sup>

Опыт показывает, что электромагнитная сила пропорциональна еще и длине  $l$  проводника с током. При этом имеется в виду тот случай, когда все участки этой длины находятся под совершенно одинаковым действием магнитного полюса. Считая, что электромагнитная сила зависит не только от величины тока, но и от длины провода, мы действительно учитываем все электроны, находящиеся под действием магнита.

Теоретическое толкование

Подходим к математическому выражению. Давно уже, более 400 лет тому назад, физические законы стали выра-

<sup>1</sup> «Вольтметром» называют прибор, при помощи которого можно по количеству выделившегося вещества судить о количестве протекающего электричества. Его не следует смешивать с «вольтметром», измеряющим электрическое напряжение в вольтах. Примечание редактора.

жать математическими формулами; неясное стремление к этому выступало еще раньше.

Когда не подошли еще к пользованию математикой, пользовались сравнениями. Сравнение действительно в некоторой мере объясняет, особенно если оно удачно, метко; оно дает понять общий остов двух сравниваемых явлений и этим самым поясняет этот остов, поясняет, в чем сущность явления. Математика выявляет эту сущность в совершенной форме.

Я бы мог сравнить магнитный полюс, находящийся вблизи провода, по которому идет ток, с опытным гидравликом (водяным инженером), который смотрит на текущую воду и оценивает расход воды в килограммах по сечению водопровода и скорости течения; гидравлик помножает сечение на скорость и на удельный вес жидкости. Пусть это в какой-либо мере сравнимо с тем, что нужно для определения электромагнитной силы, но тотчас же является возражение: гидравлик только смотрит и оценивает; ведь не изменяет же он русло течений, а магнитный полюс действует при этом на пробегающие электроны со своею электромагнитною силою.

Мы хотим выразить, что электромагнитная сила пропорциональна силе тока, которую назовем буквой  $I$ , и длине провода  $l$ . Небольшое знание математики позволит нам написать

$$\text{электромагнитная сила } f = BI l, \quad (1)$$

где  $B$  обозначает коэффициент пропорциональности.

Перейдя на математический язык, мы берем на себя известные обязательства; наши заключения теперь должны вытекать из законов математики. Алгебра учит, что, изменив знак (поставив минус) у одной части написанного нами уравнения, например правой, мы тем самым изменяем знак другой части (левой). Изменить знак в правой части это значит взять ток  $I$  отрицательным, т. е. текущим в обратном направлении; алгебра учит, что при

этом и электромагнитная сила изменится на обратную.

Мы видели, что это вполне подтверждается опытом.

Если бы в нашей формуле было поставлено не  $I$ , но  $I^2$ , изменение электромагнитной силы на обратную не последовало бы за изменением направления тока, так как правая часть содержала бы квадрат  $I$  и не изменила бы своего знака при изменении знака самого  $I$ .

Приближаемся к тому, что связывает собою магнитный полюс и проводник с током

В нашей математической формуле имеется еще третий множитель  $B$ . Мы уже назвали его коэффициентом пропорциональности. Но в этом коэффициенте должно выражаться то третье обстоятельство, без которого также не было бы электромагнитной силы и двигатель не вертелся бы, как он не вертелся бы без тока, т. е. при  $I=0$ . Это обстоятельство есть присутствие магнита. Буква  $B$  обозначает действие магнита. На тот же провод  $l$  при том же токе  $I$  он действует сильнее (получится больше  $f$ ), если находится ближе. Кроме того он сам может быть более действующим (сильный электромагнит) и менее действующим. Это значит, что  $B$  может быть и большою величиной, и малой, т. е. выражается иногда большим числом, иногда малым, в зависимости от полюса. Если перед якорем поставим другой, обратный полюс магнита,  $B$  необходимо будет считать отрицательной величиною, тогда и электромагнитная сила обернется на обратную, т. е. якорь будет вращаться в обратную сторону.

Мы будем иметь полное согласие с опытом.

## Р а з г о в о р   ф и з и к а   с   м а т е м а т и к о м

Ф и з и к. Верно ли я с вашей точки зрения учитываю роль, участие магнитного полюса, в величине электромагнитной силы, поставив просто множитель  $B$ ?

М а т е м а т и к. Совершенно верно, поскольку это

согласно с опытом, т. е. дает обратное действие при перемене полюса. Так же верно, как учет длины провода и тока по нему в виде остальных двух множителей. Все эти три множителя равноправны и могут быть поставлены, кстати скажу, в формуле в любом порядке, так как произведение не зависит от порядка множителей.

**Физик.** Но ведь величину тока, а тем более — длину  $l$  провода я понимаю. Я рассуждал о них. А этот магнитный множитель мне совсем непонятен!

**Математик.** Вполне допускаю это различие. Но от этого магнитный множитель не становится менее уместным, менее выразительным. От этого нашего незнания он не будет менее правильно действовать.

**Физик.** Я неясно выразил свой вопрос и поэтому получил ответ не на то, о чем хотел спросить. Я и сам понимаю, что электромагнитная сила действует независимо от того, ясно ли это для меня или для кого-нибудь еще. Но я хотел спросить другое: ведь то, что я написал в формуле магнитный множитель, — это моя выдумка; может быть, магнитное участие следовало бы выразить в виде делителя или, я не знаю как, в виде слагаемого, что ли... Ведь когда я помножал величину тока на длину  $(I \times l)$ , я соображал, что так нужно сделать, чтобы учесть все движущиеся электроны, находящиеся под действием магнита. Это произведение не было моей выдумкой. Оно дается и опытом.

**Математик.** Вопрос ясен. Да, можно было бы написать не  $B$ , а например  $100 B$ . Формула выглядела бы так: электромагнитная сила  $f = 100Bl$ . (2)

Можно было бы  $B$  написать в знаменателе. Написать  $B^2$  было бы плохо; это не соответствовало бы опыту, так как  $B^2$  остается положительным и при отрицательном  $B$ . Поставить действие магнита в виде второго слагаемого было бы также плохо, так как это выражало бы, что и без магнита, когда  $B=0$ , электромагнитная сила существует



(первое слагаемое останется), что не согласно с опытом. В формуле выбрано, согласно опыту, самое простое выражение для участия магнита. Так и мы всегда поступаем; мы говорим: начинаем с простейшей функциональной зависимости и переходим затем к более осложненной, если этого потребуют новые открытия.

В данном случае выбрана простая пропорциональность или «линейная зависимость».

**Ф и з и к.** Остается один вопрос. Если одинаково возможно написать и  $B$ , и  $100 B$ , а значит и  $10^9 B$ , и все это в смысле усложнений очень незначительно, то как же вычислять электромагнитную силу по этой формуле?

**М а т е м а т и к.** Конечно, необходимо на чем-нибудь раз навсегда остановиться. Например, пишем просто множитель  $B$  (коэффициент равен единице). Теперь я вам прямо скажу: не зная, каким образом магнит, находящийся в стороне, действует на электроны нашей проволоки с током, мы утверждаем, что он действует своим «бэ». И вот, если это  $B$  для данного случая можно измерить, т. е. выразить числом, то это число и вставляют в формулу — оно будет характеризовать собой данный магнит. Я не физик и не мог бы перечислить различные случаи, в которых проявляется это же  $B$  и которые могли бы служить для измерения его, но, полагаю, что наша формула — самый важный из этих случаев. Ее и можно взять за исходную для определения числа  $B$ .

Для этого обратимся к прибору (фиг. 4). Узнаем, например, с помощью вольтметра, какова величина тока, измерим  $I$  и  $l$ , измерим электромагнитную силу  $f$ , хотя бы с помощью закручивания пружины, и по нашему уравнению найдем  $B$  для данного магнита, находящегося на данном расстоянии:

$$B = \frac{f}{Il}; \quad (3)$$

только нужно помнить, что нельзя  $I$  измерять в амперах (А), а  $l$  — в сантиметрах (см) и  $f$  — в динах. Амперы

и сантиметры не совместимы. Если возьмем за основу амперы, то длину следует измерять в четвертях земного меридиана ( $10^9$  см), а если сантиметры, то величину тока нужно измерять десятками ампер. Выберем последнее; тогда электромагнитная сила получается в динах (приблизительно миллиграммы).

Например:  $I = 50$  А,  $l = 20$  см,  $f$  (электромагнитная сила)  $= 1$  кг  $= 10^6$  дин. Получаем приблизительно:  $10^6 = B \cdot 5 \cdot 20$ , откуда  $B = 10\,000$  (гауссов).

$B = 1$  гауссу, если при токе в 10 А на каждый сантиметр провода с этим током действует электромагнитная сила в 1 дину.

Теперь, полагаю, все так ясно и определенно, что вам остается только этому  $B$  дать название.

### Д а е м   н а з в а н и е   н о в о м у   п о н я т и ю

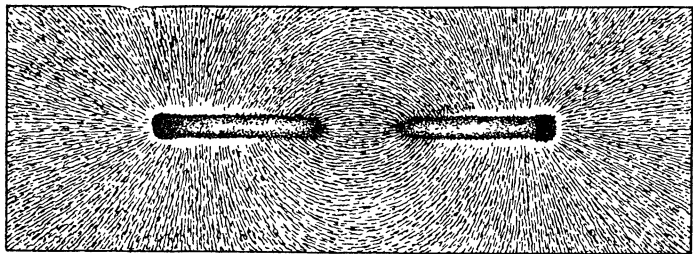
Последняя фраза математика немного похожа на насмешку или издевательство, но на самом деле он дал ответ полный, серьезный и искренний; для него больше ничего не нужно; он не физик и не техник. И мы, вводя математику в свои соображения, должны суметь стать на точку зрения математика. Если он спрашивает о названии (термине), то и это — их обыкновение; ведь вернул же он в свое объяснение математический термин: «функциональная зависимость», «линейная зависимость»; не обошелся без них! Терминология весьма упрощает научное общение и взаимное понимание.

Самый хороший термин тот, который един, употребляется всеми без исключения. Это еще не достигнуто в интересующем нас действии магнита. Говорят: «магнит действует своим магнитным полем»; «вокруг магнита действует его силовое поле»; «из северного полюса магнита исходит поток магнитной индукции; южный полюс, наоборот, собирает в себя этот магнитный поток». У некоторых авторов эти слова обозначают не совсем одно

и то же. Установим пользоваться исключительно последним из приведенных выражений — «поток магнитной индукции».

Оно напоминает нам вид магнитного спектра, получаемого при посыпании магнита железными опилками (фиг. 7).

Опилки расположатся цепочками, имеющими разительное сходство с застывшими окаменевшими струйками жидкости. Вот откуда взялось слово «поток». Слово «индукция» часто употребляется в физике, когда желают указать, что одно явление вызывает другое. Мы



Фиг. 7. Фотография магнитного спектра

знаем «электростатическую индукцию», когда электрический заряд вызывает индуцированные заряды в окружающих проводниках, «магнитную индукцию» в железе, намагничение его под действием магнитного полюса и пр.

Нужно помнить, что взятое нами в кавычки выражение является лишь образным выражением для характеристики тех явлений, которые мы наблюдаем около магнитного полюса.

«Поток магнитной индукции» остается столь же неподвижным, как и тот полюс, из которого он как бы вытекает или в который как бы втекает.

Опыт учит нас, что действие магнитного полюса на проводник с током будет сильнее —  $B$  будет больше, если мы этот проводник поместим там, где линии магнитного спектра — застывшие струйки магнитного потока — расположены гуще, например у самых полюсов (фиг. 7).

Удобно считать единицей густоты магнитного потока такую густоту его, когда на проводник длиной в 1 см при токе в 10 А он действует с силой в одну дину. Это и будет единица магнитного потока, равная одному гауссу. В зависимости от намагничивания магнита меняется и его магнитный поток.

В нашей формуле  $B$  характеризует, таким образом, густоту (плотность) магнитного потока в том месте, где находится проводник с током.

Замена южного полюса северным, например, на фиг. 1, возбуждает мысль о том, что поток, входящий в полюс, заменился потоком исходящим, т. е.  $B$  изменило свой знак в нашем уравнении соответственно изменению направления потока.

физику известны случаи, когда магнитный поток может быть предвычислен (расчет электромагнита). Так предвычислялись и осуществлялись на деле рекордные по своей величине потоки в сотни тысяч и миллион гауссов. Их получают с большими затруднениями и на очень короткое время, в небольшом объеме; обходится это очень дорого. Обычно техника пользуется  $B=10\,000$ ,  $20\,000$ ,  $30\,000$  гауссов.

И вот, если мы ожидаем, что  $B=25\,000$  гауссам, и будем пропускать ток в 10 А, причем длина провода  $l=aa$  (фиг. 1) будет равна 15 см, а в потоке магнита будут всегда находиться 20 витков якоря, то электромагнитная сила будет<sup>1</sup>:

$$f=25\,000 \cdot 15 \cdot 20 \text{ дин} \cong 7\frac{1}{2} \text{ кг (приблизительно).}$$

Когда якорь продвинется на 1 см = 0,01 м, будет совершена работа  $7,5 \cdot 0,01 = 0,075$  кг.

---

<sup>1</sup> Гауссы в этом примере как раз совместимы с сантиметрами, ведь  $I=10$  А.

Мы с вами поднялись на высокую гору. С вершины этой горы нам ясно для любого случая, изображаемого схемой фиг. 1, какую работу совершает электродвигатель.

В то же время мы видим, какую ясность и какое удобство для пользования, для подсчета вносит математическая формула.

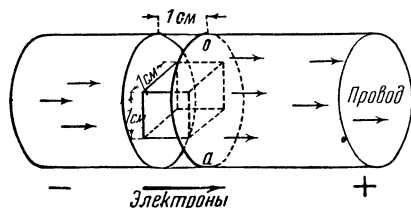
### Л о р е н ц о в а с и л а

Подыдемся еще на одну ступень. Всмотримся в нашу формулу:

$$f = BIl. \quad (1)$$

Я полагаю, что из предыдущего вполне ясно, в какой мере опыт диктует эту формулу (произведение  $I \times l$ ) и в какой мере она отражает не что иное, как наше умение подойти к описанию явления (множитель  $B$ ).

Всмотримся во второй множитель. Что мы называем силой или величиною тока? Количество электричества, проходящее за одну секунду через сечение проводника.



Фиг. 8. Схематическое изображение движения электронов в проводнике

Пусть каждый электрон представляет собою заряд  $e$ ; если мы имеем  $N$  электронов, они все вместе представляют собою количество электричества  $Q = Ne$ .

Наша проволока как бы наполнена свободными электронами, они все движутся в одну сторону, когда идет ток. Обозначим буквою  $n$  число свободных электронов в каждом кубическом сантиметре проволоки. Все эти электроны до последнего пройдут через сечение  $ao$  (фиг. 8) проводника за какое-то время; это время будет 1 сек, если скорость движения электронов равна 1 см в 1 сек<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ведь самый далекий от  $ao$  электрон нашего кубика находится на расстоянии, равном 1 см.

Если она равна  $u$ , то все наши  $n$  электронов пройдут через сечение  $ao$  в  $\frac{1}{u}$  секунды; за целую секунду пройдет  $u$  таких порций из  $n$  электронов; они пронесут с собою количество электричества  $Q = nue$ .

Это и есть величина тока? Нет, потому что мы рассчитали электричество, прошедшее только через  $1 \text{ см}^2$ ; в сечении  $ao$  может быть  $s$  таких квадратных сантиметров. Следовательно, величина тока

$$I = snue. \quad (4)$$

Если это понятно, то наша формула для электромагнитной силы может быть переписана так:

$$f = Bsnuel = Buensl. \quad (5)$$

Теперь рассмотрим в самое последнее выражение. Произведение  $sl$  есть объем цилиндрического проводника с сечением  $s$  и длиной  $l$ ; оно выражает, сколько в этом объеме кубических сантиметров, а  $n$  обозначает, сколько электронов в каждом кубическом сантиметре; следовательно, произведение  $nsl$  дает подсчет всех электронов, своим движением образующих ток и находящихся в каждый момент во всем проводнике; назовем это их число  $N$ .

На все эти движущиеся электроны действует магнитный поток, общей силой  $f$ . Значит, на каждый электрон действует сила в  $N$  раз меньшая, назовем ее  $f_0$

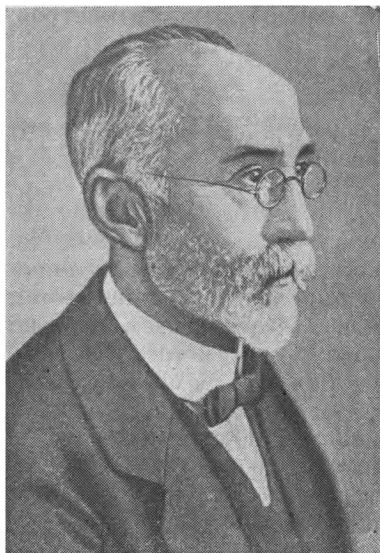
$$f_0 = \frac{f}{N} = Bue. \quad (6)$$

В этой главе мы говорим об электродвигателе. Мы все время держались того представления, что при работе электродвигателя магнитный полюс действует на движущиеся электроны обмотки якоря. Теперь мы вывели формулу силы действия магнитного потока на один движущийся электрон — мы сможем эту силу высчитать! В нашем вопросе об электродвигателе дальше идти уже не-

куда; последняя формула раскрывает закон самого мелкого по электронной теории, самого низового элемента всего явления, которое происходит при работе электродвигателя.

Раскрытие таких элементарных, основных законов является большим успехом в науке. Значение их всегда

оказывается выходящим далеко за пределы того частного явления, которое послужило поводом к их выводу. Так и наша последняя формула, называемая по имени главного основателя электронной теории Лоренца (фиг. 9) формулой Лоренца, заключает в себе гораздо больше, чем объяснение того, как действует электродвигатель.



Фиг. 9. Гендрик-Антон Лоренц

Формула говорит определенно, что магнитное поле действует только на электрон, движущийся относительно этого поля. (Лоренц вообще считал, что электрические и магнитные силы могут действовать только на электроны: электрическая сила —

как на движущийся, так и на неподвижный, магнитная — только на движущийся); действительно,  $f_o = 0$ , если  $u = 0$ , при каком бы то ни было большом потоке магнитной индукции  $B$ . Формула говорит, далее, что сила этого элементарного действия пропорциональна скорости электрона.

Полезно заметить еще одно общее соображение: мы получили выше формулу

$$I = sne. \quad (4)$$

Возможно ли из этого уравнения определить ту среднюю скорость электронов  $u$ , какая соответствует данному току  $I$ ? (Заряд электрона  $e$  хорошо известен.) Нет, невозможно, потому что нам неизвестно число  $n$ .

Дело в том, что вольтметр с часами показывает, сколько электронов проходит в секунду; но это зависит не только от скорости их и сечения провода, но еще от густоты их скопления в проводнике. Так говорит формула, но то же самое легко поясняется и сравнением. Если мимо нас движется непрерывный поток людей, то мы можем увидеть в одну секунду одинаковое число человек, и если они бегут на большом расстоянии друг от друга, и если медленно движутся, но очень сплоченным строем.

Относительно проводника мы никогда не знаем, много ли электронов в каждом его  $1 \text{ см}^3$  и движутся они медленно, или их мало, но они обладают большою скоростью. В этом вопросе физика находится еще в стадии предположений. Несомненно лишь, что в различных проводящих материалах число  $n$  различно; возможно, что оно зависит от температуры.



## II. Мощность и работа электрического генератора

### А м п е р ы   и   в о л ь т ы

— Товарищ профессор, — останавливает меня незнакомый студент, — я давно у вас хотел спросить: почему недостаточно включить в цепь только амперметр; почему нужен еще вольтметр? Ведь амперметр показывает, сколько электронов; если их больше — значит все действие будет больше... У меня часто об этом спрашивают, и я не знаю, как объяснить. Объясните, пожалуйста.

Вопрос этот очень элементарен. И если студент был электрик, то естественно, что он улавливал меня наедине, стесняясь об этом спрашивать, как это часто бывает со многими.

В те дни я как раз интересовался историею нашего решения этой задачи: зачем необходим вольтметр? Этому решению и ста лет еще не минуло. В уме промелькнуло: «Сколько умниц-электриков первой половины прошлого века только еще чувствовали этот вопрос, не умея его даже поставить».

Дневная работа была в разгаре; ни у вопрошавшего, ни у меня времени для долгих разговоров совсем не было. Ответ должен был быть краткий, быстрый, решительный и в то же время доходящий, вразумительный, так как он, очевидно, жизненно требовался.

Я ответил:

— Конечно, амперметр верно покажет, сколько электронов, т. е. сколько их проходит в секунду. Но электроны то бывают разные, — с большей энергией и с меньшей. Этого амперметр не различит.

- А! электроны бывают разные...
- Да, и поэтому нужен еще и вольтметр.
- Очень вам благодарен. Извините, пожалуйста.

## Инструмент и машина

Современный физик очень внимательно следит за энергией. Работа может быть совершаема только за счет энергии. Молоток плотника вбивает гвоздь своею кинетической энергией. То же самое, только в гораздо большем масштабе, делает паровой молот. То же делает и каждый электрон в проводнике с током, когда он (электрон), разлетевшись, ударяется о молекулу меди; она получает толчок от этого удара, приходит в движение большее, чем имела до этого, и медь провода или вольфрамовая нить лампы накаливания в общей своей массе нагревается.

Тут кстати отметить, что слова: «электроны бегут по проводу» нельзя понимать совсем буквально, их путь постоянно прерывается встречей с молекулами, при которой они отдают свою кинетическую энергию, т. е., так сказать, останавливаются, после чего снова набирают скорость. Если мы говорим о скорости электронов по проводу, то не думаем о какой-то постоянной скорости, с которой они пробегают всю длину проводника: при этом нужно думать о некоей средней скорости, с которою электроны якобы пробегают свободный путь между двумя соударениями (фиг. 8).

Можно ли сказать, что каждый электрон и все они вместе взятые работают, ударяя по молекулам? Я отвечу на это другим вопросом: работает ли молоток плотника? Конечно, он при ударе израсходует всю свою кинетическую энергию, но эту энергию он только что получил от руки плотника и по израсходовании сейчас же снова получит с новым взмахом руки рабочего. Молоток не есть машина, а инструмент, придаток к руке, который направляет работу машины или, в данном случае, человека

к определенному результату. Машина преобразует энергию из одной формы в другую, ее работа помощью различных инструментов может быть направлена в различные стороны (на различные цели).

Электроны проводника являются только «инструментом». Должна быть машина, которая бы восстанавливала затрачиваемую ими энергию, которая бы вновь приводила в движение остановившиеся электроны и ускоряла движение тех, которые еще движутся в своем свободном пробеге. Такая машина называется электрическим генератором, она превращает какую-нибудь другую энергию в электрическую. Через движение электронов и через их столкновения с молекулами электрическая энергия генератора обращается на нагревание. Обычные генераторы — аккумулятор, динамомашинa.

Генератор движет электроны — значит, у него есть «электродвижущая сила» (эдс); она измеряется в вольтах (V). Величина ее и есть то первое, самое главное, что характеризует всякий генератор. Например, обычный свинцовый аккумулятор имеет электродвижущую силу, равную приблизительно 2 V.

## Почему же необходим вольтметр

Как это генератор управляет движением всех свободных электронов провода, имеющего часто длину в несколько десятков, сотен и даже тысяч (океанский кабель) километров? Это было бы легче понять, если бы электроны двигались вдоль всего провода, как вода проталкивается, движется по водопроводной трубе; тогда действие генератора было бы похоже на работу водонапорной башни. Он проталкивал бы электроны сплошным потоком по всему проводу.

На самом деле это явление сложнее. Генератор во всяком участке проводника, на каждой длине свободного пробега движет электроны как бы каждый в отдельности, причем везде, во всех сечениях, ток проходит один и тот

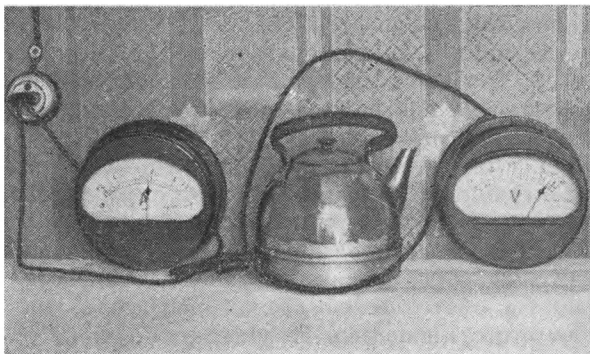
же, т. е. одно и то же число электронов приходит и уходит за каждую секунду. Вся его электродвижущая сила должна распадаться на части и большею частью ложиться на те места, где или мало электронов на куб. сантиметр, или где они чаще встречаются с молекулами, меньше имеют свободного пробега, или где сужается провод; короче сказать — где большее «электрическое сопротивление» (обозначают обычно буквой  $R$ ).

Большая электродвижущая сила увеличивает среднюю скорость электронов в узком или плохо проводящем месте провода, и таким образом осуществляется одинаковость тока по всей цепи.

То, что мы сказали, есть закон Ома.

$$I = \frac{V}{R}. \quad (7)$$

Мы видим, что при одном и том же токе требуется различная работа генератора над каждым электроном



Фиг. 10. Включение амперметра и вольтметра в цепь, питающую электрический чайник (амперметр последовательно, вольтметр параллельно)

в разных участках цепи, и соответственно этому выделяется в них не одна и та же энергия за каждую единицу времени. Измерив только величину тока, мы об этом важнейшем обстоятельстве не получаем еще никакого сведения.

Необходим на ряду с амперметром еще и вольтметр, включенный параллельно, которым можно измерить, какая электродвижущая сила действует в том или ином участке цепи (фиг. 10).

Только тогда мы сможем определить работу генератора в каждом участке цепи, а, следовательно, и во всей цепи.

### Особая помеха движению электронов в обмотке якоря и электродвигателя

Теперь обратимся к электродвигателю. По обмотке его якоря пропускается ток от генератора; некоторая часть всей электродвижущей силы идет на поддержание этого тока; обмотка нагревается. Но, кроме того, якорь вращается и совершает механическую работу; потребная на это энергия сообщается тем же генератором; следовательно, генератор должен давать еще добавочную энергию, т. е. сообщать электронам добавочные вольты.

Это исключительно важный момент в понимании использования электроэнергии.

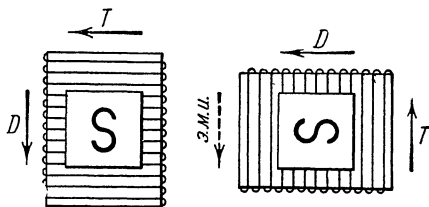
Прежде всего отметим, что якорь вертится под действием электромагнитной силы, которая определяется током и магнитным потоком и направлена так, как показывает фиг. 2. Но отсюда отнюдь не следует, что магнитный поток за свой счет совершает работу вращения якоря. Сколько бы оборотов ни сделал двигатель, магнитный поток от этого нисколько не уменьшается; он не тратится, его энергия остается при нем. Он является в чистом виде инструментом, направляющим энергию генератора на совершение механической работы. Работа совершается, значит, только за счет тока, т. е. за счет генератора.

Как это происходит? На фиг. 11 изображен тот же якорь, что и на фиг. 1, только в несколько другом положении относительно смотрящего. Направление движения электронов обозначено стрелкой  $T$ .

Пусть перед якорем находится полюс  $S$ . Поток электронов, движущихся справа налево, будет этим полюсом сдвигаться вниз (стрелка  $D$ ). Якорь вертится.

Разве это движение витков вниз вместе со всеми своими электронами не есть в то же время второе движение электронов? Конечно, да!

Повернем чертеж на  $90^\circ$  (фиг. 11а); теперь стрелка  $D$ , изображающая второе движение электронов, направлена так, как стрелка  $T$  на предыдущем чертеже. Так как и это «второе» движение электронов происходит в том же магнитном потоке, то в результате его будет неизбежно появляться сила, движущая электроны вниз, т. е. по направлению стрелки электро-магнитной индукции, против тока (стрелка  $T$ ), против электродвижущей силы генератора.



Фиг. 11. Фиг. 11а.  
Движение якоря аналогично току

Движение якоря аналогично току

Следовательно, как только якорь завертится, в его обмотке является особая помеха для прохождения того тока, вследствие которого якорь вертится.

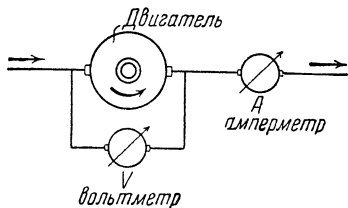
Эта помеха, действующая на каждый электрон (по формуле Лоренца  $f_0$ ), совершенно не зависит от сопротивления обмотки, но исключительно — от скорости вращения якоря ( $u_n$ ). Она называется обратной электродвижущей силой электродвигателя. Если генератор и в присутствии этой новой помехи поддерживает ток в якоре, то, значит, он побеждает и эту помеху, прикладывает к двигателю добавочные вольты, как раз равные обратной электродвижущей силе (чтобы ее уравновесить).

Затормозим двигатель и в то же время будем пропускать через него ток, например, 5 А. Пусть вольтметр покажет, что для этого нужно 5 В. Теперь пустим двигатель в ход; вольтметр будет показывать все больше вольт — 10, 20, 50 В — по мере того, как скорость вращения якоря будет возрастать, при том условии, что сила тока остается постоянной (5 А).

### Мощность генератора

Так в узком месте провода, или в плохом проводнике, или в вертящемся электродвигателе генератор затрачивает большую часть своей электродвижущей силы, сообщает электронам большую энергию, чем в широком месте, в лучше проводящем материале, в заторможенном двигателе. Генератор дает большую энергию — значит большая энергия и выделяется в этих случаях. Движущиеся электроны — инструмент для генератора: они тотчас же отдадут в провод все, что получили от генератора и что тотчас же получают от него снова; отдают или в виде тепла (нагревание провода в электрическом чайнике), или в виде механической работы (вращение якоря).

Электродвижущая сила измеряет энергию, даваемую на каждый электрон. При токе в один ампер один вольт даст энергию в один джоуль ( $10^7$  эргов) на каждые  $6 \cdot 10^{18}$  электронов в секунду. Амперметр показывает только одно: сколько таких групп электронов, сколько кулонов проходит в секунду. Если теперь помножить вольты на амперы, получим число, показывающее, какую энергию в секунду отдает генератор в электрическую цепь, т. е. с какою «мощностью» он работает, нагревая проводник или подерживая ток в моторе или в ином электрическом приборе.



Фиг. 12. Мотор постоянного тока с включенными в цепь амперметром и вольтметром

Произведение вольтампер в таком случае называют ваттами (W). Один вольтампер и есть один ватт.

**П р и м е р.** Если двигатель (фиг. 12) постоянного тока в заторможенном состоянии берет на себя 5 V при токе в 10 A, а когда вращается 55 V при том же токе, то 500 W потребляется на его механическую работу, а на нагревание идет только 50 W.

### Историческая справка

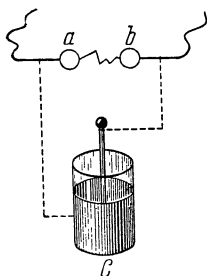
Это важное сведение, что ток (например, число ампер) нужно помножить на электродвижущую силу, называемую иногда «электрическим напряжением» (вольты), чтобы получить мощность, выделяемую электрическим током в электрической цепи, по которой он протекает, вылилось в ясную и определенную нашу современную форму далеко не сразу.

Что-то в этом роде чувствовалось и старыми электриками, когда они производили различные опыты. Например, Перевощиков (Москва) в своем «Руководство к опытной физике» более ста лет тому назад (1833) пишет: «Соединение противоположных электричеств всегда сопровождается светом, который обыкновенно называют электрическими искрами. Притом сила сего света зависит от силы стремления соединяющихся электричеств, следовательно от сопротивления среды, окружающей наэлектризованные тела, и также от количества скопившегося электричества...» Здесь он говорит о силе света, т. е. о мощности выделяемой световой энергии; говорит о частном виде энергии, потому что тогда еще не было того широкого понимания ее, каким обладаем мы. Он видит перед собою искру, потому что старые электрики с этой формой электрического тока были более всего знакомы. Наконец, он представляет себе ток как соединение двух электричеств, стремящихся одно к другому; тогда, конечно, не было еще электронной теории.

То, что он утверждает, мы представляем себе таким



образом: для проскакивания искры между шариками *a* и *b* (фиг. 13) необходимо известное напряжение, например 30 киловольт (kV)=30 000 V; при большем расстоянии между шариками нужно будет большее напряжение: «каждой длине искры соответствуют свои вольты». Такой «искромер» часто служит вольтметром для высоких напряжений. Но искра может быть тощей, синеватой или жирной, яркobelой, смотря по тому, мало или много электричества мы пропустим через нее. Например, если мы (фиг. 13) параллельно искромеру включим конденсатор — известную всем лейденскую банку *C*, он возьмет на себя большой заряд, чтобы зарядиться до искрового напряжения, и этот заряд при 30 kV превратит тощую искру в жирную.



Фиг. 13. Проскакивание искры от генератора высокого напряжения с конденсатором

В этом явлении так резко разделены вольты и амперы! Понятно, что при всей смутности тогдашних представлений истинное понятие о двух факторах выделяемой энергии в явлении искры могло просачиваться.

Искра — явление сложное, переменчивое, зависящее от внешних условий, как влажность, атмосферное давление, электрическое состояние воздуха и многое другое. Ток по проводнику — более простое явление, несравненно менее зависящее от внешних условий. Это — не электрический пробой, он не требует для своего осуществления определенных вольт. Ток по проводнику идет под всякими вольтами и по величине своей определяется именно этими вольтами и сопротивлением провода, по формуле Ома. Приняв это во внимание, мы получаем, что мощность, отдаваемая генератором данному проводнику, равна:

$$\text{вольты} \times \text{амперы} = \frac{\text{вольты в квадрате}}{\text{сопротивление}}.$$

Это выражение показывает, что в тех случаях, когда известно сопротивление, мощность, а следовательно и работа генератора в данном участке цепи определяется по одним вольтам; величины тока нет надобности даже и определять.

## Н о в ы й   в и д   г е н е р а т о р а   э л е к т р о - э н е р г и и

Теперь, читатель, я бы хотел проделать над вами один опыт. Если он удастся, мы будем награждены этою удачею. Если не удастся, я беру всю ответственность на себя, считая, что эта неудача доказывает только неясность изложения всей этой главы.

Опыт заключается в одном вопросе, и содержание вашего ответа на этот вопрос будет представлять собою либо удачу, либо неудачу.

Я. Читатель, не пришла ли вам в голову мысль об одном изобретении необычайной важности при чтении вышеизложенного?

Ч и т а т е л ь. Нет. И я даже не понимаю, как могла она прийти, когда я видел пред собою только бумагу с тем, что на ней напечатано.

Я. Вы обратили внимание на объяснение, что такое электрогенератор. Запомнили его главное свойство — давать электродвижущую силу и тем производить всю многообразную работу в цепи электрического тока?

Ч и т а т е л ь. Положим что так.

Я. Вполне ли вы усвоили, как электродвигатель поглощает энергию, или, лучше сказать, соответствующую часть энергии генератора? Во-первых, — не правда ли? — своим сопротивлением, как всякий проводник? а во-вторых, — что он противопоставляет току?

Ч и т а т е л ь. Обратную электродвижущую силу.

Я. Именно так... Вы уже догадались? Или вас смущает слово: «обратная»? Да, она обратна току по своему направлению. Но направление есть направление, и только.

Самое важное то, что это есть электродвижущая сила. Значит, вертящийся двигатель есть в то же время и ...

Ч и т а т е л ь. Генератор!

Я. Эта мысль уже зародилась в вашей голове при объяснении электродвигателя?

Ч и т а т е л ь. Конечно, да. Но что же тут особенного: в него необходимо послать ток; значит, от какого-то генератора — и тогда он даст свою электродвижущую силу; но у нас она была и без этого, раз был генератор?

Я. Все это верно, но добавим немного воображения. Ведь не то требуется, чтобы по якору двигателя шел ток, а то, чтобы он вертелся...

Ч и т а т е л ь. Следовательно, если мы его завертим от руки, или падающею водою, или ветром, он все равно будет давать свою обратную электродвижущую силу!

Я. Только теперь слово «обратная», пожалуй, совсем уже не нужно. Чему она теперь обратна? Не существует теперь того тока, которому она противодействовала. Эта электродвижущая сила сама может дать ток и, конечно, по своему направлению, соответствующему движению, а не обратный.

Изобрели мы с вами, читатель, или не изобрели, но несомненно могли бы из предыдущего сделать такой вывод: вращая якорь двигателя, затрачивая чисто механическую работу, мы получаем электрическую энергию. Это такой генератор, в котором механическая энергия переходит в электрическую. Испробовав на опыте, мы получили бы полное подтверждение. В примере двигателя, приведенном выше, если бы нам удалось придать ему ту самую скорость вращения, которую он имел при 10 А, наш бывший двигатель (а теперь генератор) показал бы на вольтметре свои 50 V; это — те 50 V, которые приходилось преодолевать постороннему генератору, когда он приводил наш мотор во вращение. Мотор превратился в динамо-машину.

Следует вполне оценить всю верность и плодотворность

такого понимания работы электродвигателя, которое позволяет делать замечательные выводы, богатые по содержанию. Всегда рекомендуется сделать все возможные выводы; это лишний раз подтверждает верность нашего понимания и может повести к расширению наших знаний, к новым открытиям.

### Элементарный случай электромагнитной индукции

Если мы не сделали этого в данном случае, то утешением может служить, что и никто этого не сделал, и это никогда не было нужно. История науки шла таким образом, что верное понимание электродвигателя было получено тогда, когда генерация электроэнергии из механической энергии была уже давно (около полстолетия) известна. Динамомашинка была построена и пущена в ход раньше того электродвигателя, который мы при наших рассуждениях все время воображали пред своими глазами.

Не могло случиться, чтобы электродвижущая сила, происходящая от механического движения, была открыта помощью вращения, ибо та конструкция, которую мы называет якорем, была изобретена после и на основании этого открытия. Без него эта конструкция не имела бы ни цели, ни смысла, а потому никому не могла притти в голову.

Открытие было сделано на каком-то другом предмете, из которого последовательным совершенствованием произошел якорь двигателя. Якорь заключает в себе этот предмет, но лишь как свой основной элемент. Что же это такое? Из каких элементов состоит эта простая вещь — якорь?

Конечно, из витков проволоки. Каждый виток или, лучше сказать, та его сторона, которая обращена к полюсу магнита, и есть основное в якоре. Открытие этой электродвижущей силы, которую мы будем называть

«электродвижущей силой электромагнитной индукции» — слово «индукция» приобретает еще новый смысл! — было сделано просто с куском проволоки  $ab$  (фиг. 14), который двигали мимо полюса, например вниз; тогда проволока  $ab$ , пока ее двигали, действовала как генератор: в ней появлялась электродвижущая сила, которая сгоняла электроны влево.

Историческая правда требует сказать, что не совсем этот опыт был началом открытия электродвижущей силы электромагнитной индукции, а очень похожий на него.



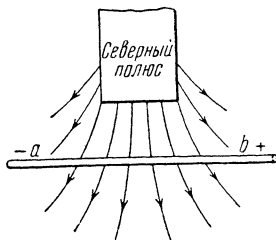
Фиг. 14. Схема опыта получения э. д. с. индукции при движении проводника в магнитном поле

Явление, изображаемое на фиг. 14, конечно, происходит и, конечно, это есть основной элемент процесса электромагнитной индукции, повторяющейся во всех бесчисленных формах ее применения; все динамомашины, трансформаторы, приемные радиоантенны как основанные на электромагнитной индукции представляют по существу своему то, что показано на фиг. 14.

Но открытие электромагнитной индукции не началось именно с этого основного случая. Обнаружить его, понять его, понять, какие перспективы он раскрывает, — все это и теперь для нас является делом большой трудности, хотя в то же время и большой важности для понимания электрических процессов.

В самом деле. Обратимся опять к фиг. 14. Мы знаем, что явление происходит, если провод  $ab$  движется мимо полюса. Слово «мимо» означает, что движение не происходит ни по направлению к полюсу, ни от него. Казалось бы, при таком движении менее всего можно было бы ожидать какого-либо действия со стороны полюса, его присутствие совершенно безразлично. Ведь часто, когда мы говорим: «я прошел мимо чего-нибудь», то за этим следует: «и даже не заметил».

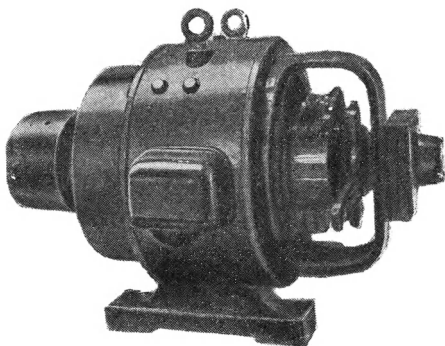
Но дело совершенно изменяется, если мы будем думать не столько о полюсе, сколько об его магнитном поле, о магнитном потоке, входящем в полюс S или выходящем из него (N), как изображает фиг. 15. Теперь нам представляется, что провод  $ab$  может не трогать этого потока как раз тогда, когда идет к полюсу или от него, и наоборот режет поток, а значит затрагивает его, проходя мимо полюса. Подобно этому можно опустить косу к земле или поднять ее вверх, не затрагивая выросших из земли колосьев; но нельзя двигать косу вдоль или мимо земли, не перерезая колосьев.



Фиг. 15. Поток магнитной индукции вызывает э. д. с. электромагнитной индукции

Итак, нам проще не думать о полюсе, а думать о магнитном потоке его, и сказать, что электромагнитная индукция тока в проводе происходит при перерезании или «пересечении» им (проводником) потока магнитной индукции.

В чем же она выражается? Мы сказали, что провод становится генератором, он дает электродвижущую силу. Чтобы освоить эту фразу в полном ее значении, необходимо очень ясное



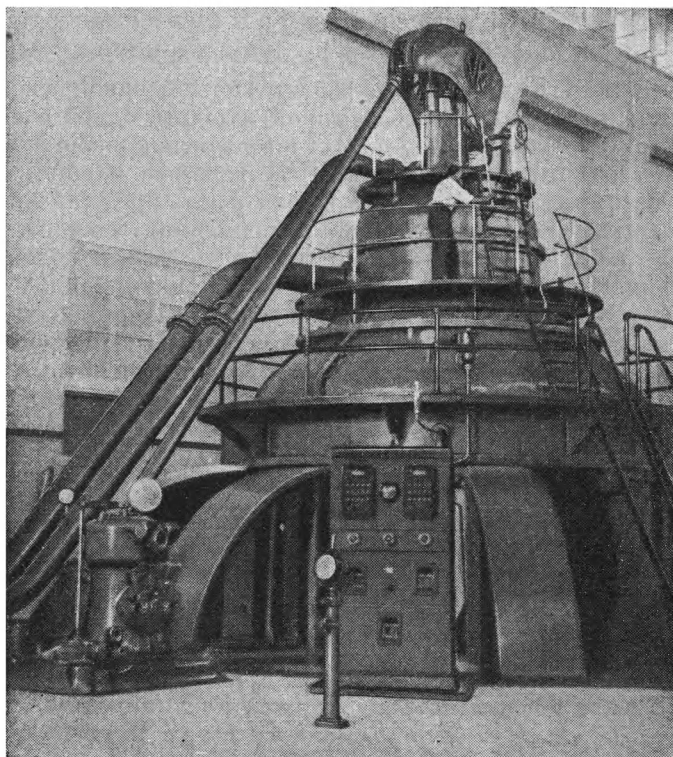
Фиг. 16. Динамомашина постоянного тока

и твердое понятие об электрическом генераторе. Естественно сомневаться, можно ли какой-то один проводок  $ab$  назвать генератором, когда мы привыкли этим

словом обозначать большие динамомашинны на электростанции, с шумом вертящиеся, дающие в провода ток для освещения, для моторов у станков, для трамвайных моторов. Но, во-первых, всякий генератор и динамо в частности может быть отключен от линии, питающей все его приемники (фиг. 16); он является тогда «разомкнутым» и не отдает своей электроэнергии. При этом, во-вторых, он тем не менее обладает своей электродвижущей силой, которая производит только то, что его электроны отгоняются к одному, например, к левому зажиму, а правый поэтому оказывается плюсом, как лишенная части своих электронов. Генератор сгоняет электроны к одному (в данном примере к левому) своему полюсу или зажиму, пока он это может делать, т. е. пока сила, возвращающая электроны назад, на место, еще может быть побеждаема электродвижущей силой генератора. Чем больше его электродвижущая сила, тем больше электронов, несмотря на их взаимное отталкивание, он может собрать на своем отрицательном полюсе; заряд его полюсов и является мерой электродвижущей силы разомкнутого генератора. Это заряджение происходит, вообще говоря, очень быстро, и после его совершения уже ничего нового не будет происходить. Но лишь только наш генератор остановится или его электродвижущая сила уменьшится, тотчас же электроны, в первом случае — все, а во втором случае — отчасти, через провода генератора возвратятся на свои нормальные места. Полюсы динамомашины разрядятся.

Нельзя дотрагиваться до полюсов действующего, хотя бы и разомкнутого мощного генератора; они сильно заряжены.

Все это верно и относительно нашего провода *ab* (фиг. 14 и 15). Пока он движется мимо полюса, он представляет собою в полном смысле слова маленький разомкнутый генератор, но только вместо опаснейших зарядов мы имеем на его концах совершенно ничтожные заряды, которые трудно даже обнаружить самыми чувствительными при-



Фиг. 17. Мощная динамо гидроцентрали «Свирь 3»

борами. В том-то и дело, что фиг. 14 изображает один, совсем маленький элемент всякой большой машины, которая действует, потому что в ней, во всех ее элементах вызывается электромагнитная индукция.

Когда рассматривают работу большой машины, то мысленно в своем воображении и во всех расчетах складывают действия всех таких ее элементов (фиг. 17).



## Основной (элементарный) закон электромагнитной индукции

Великое дело понимать работу каждой одной элементарной части какой-либо сложной машины, одной ячейки ее, самой низовой ячейки. Из комплексной работы всех ячеек и организуется целое — все действие машины.

Поэтому мы воспользуемся нашим ясным представлением элементарного случая электромагнитной индукции (фиг. 14 и 15), выразим закон его действия и тем самым подойдем к пониманию работы самой сложной индукционной машины. Провод  $ab$  при своем движении (например, вниз) должен перерезать магнитный поток. Чтобы это происходило, прежде всего должен существовать магнитный поток; назовем его  $B$ . Чем больше длина провода, тем большую ширину потока он при движении захватывает; назовем эту длину  $l$ . Наконец, провод  $ab$  должен двигаться, т. е. иметь скорость; назовем ее  $V$ . Направление движения конечно должно быть перпендикулярно как к  $l$ , так и к  $B$ .

Индуктированная электродвижущая сила зависит от всех этих величин в одинаковой степени, т. е. мы пишем:

$$\text{электродвижущая сила индукции } V = Blv. \quad (8)$$

Формула эта показывает, что при перемене направления  $B$  или  $v$  электродвижущая сила индукции заменяется на обратную, т. е. если  $ab$  движется вверх, то слева будем иметь плюс, справа минус; это совершенно согласно с опытом. Такое же превращение произойдет и в том случае, если мы движем  $ab$  вниз, но перед южным полюсом, а не северным ( $B$  меняет свое направление).

Расчетная формула имеет вид:

$$\text{индуктированные вольты } V = 10^{-8}Blv, \quad (9)$$

причем  $l$  и  $v$  выражаются в сантиметрах,  $B$  — в гауссах. Если например  $B = 1000$  гауссов,  $l = 5$  см,  $v = 1$  м/сек, то электродвижущая сила индукции  $V = 0,005$  вольт.

Мы получили очень малый результат, потому что имели в виду постоянный магнит и движение проволоки  $ab$  (фиг. 14 и 15) от руки. Представим себе другой, тоже вполне осуществимый случай, когда поток создается хорошим электромагнитом ( $B=20\,000$ ), провод движется со скоростью 5 м/сек и имеет длину 10 см и когда, кроме всего этого, мы имеем  $n=100$  таких проводников, как  $ab$ , соединенных последовательно, т. е. таким образом, чтобы их электродвижущие силы складывались в одну в  $n$  раз большую, тогда получим по формуле (9): электродвижущая сила индукции  $V=Bnlv \cdot 10^{-8}$  или.

$$V=100 \cdot 20\,000 \cdot 10 \cdot 500 \cdot 10^{-8}=100 \text{ вольтам.}$$

Для нашего численного примера ответ: 100 вольт.

Так производится подсчет электродвижущей силы всякой динамомашины, всякого устройства, действующего на основании электромагнитной индукции.

Если бы мы показали нашу расчетную формулу математику, он остался бы очень доволен: все учтено, формула проста, красива. Может быть он спросил бы только после недолгого раздумья:

— Какую скорость обозначает буква  $v$ ?

Мы ответили бы:

— Скорость движения провода.

Он возражает:

— Гм... Это для меня неясно, почему именно провода?

Мы удивились бы его непониманию:

— Да ведь провод длиной  $l$  движется, а буква  $v$  поставлена сразу за  $l$ , рядом с  $l$ .

Он настаивает на своем вопросе:

— Что у вас движется, этого формула не выражает; она утверждает только, что происходит движение со скоростью  $v$ .

Вы мне должны разрешить написать так:

$$\text{электродвижущая сила } V=Bv \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ вольтов.} \quad (9)$$

Теперь и по-вашему, если смотреть, что в формуле «рядом с чем», выходит, что скорость  $v$  одинаково правильно может быть отнесена и к  $B$ ;  $v$  не пришта к  $l$ ; и вот я ее отношу к  $B$  и говорю, что та же электродвижущая сила получится, если провод неподвижен, а поперек его движется магнитный поток со скоростью  $v$ ; только он должен двигаться вверх, чтобы относительное перемещение провода и потока было тем же самым. Так говорит ваша формула. А если на самом деле не так, то она неверна.

Конечно, математик был прав. Явление, как показывает опыт, несколько не изменится, — чтобы ни двигалось, лишь бы  $B$  и  $l$  надвигались одно на другое (перерезались одно другим) со скоростью  $v$ ; формула выражает это и потому она верна.

### III. Магнетизм и электричество

#### Магнитное притяжение

Я верчу в руках этот черный, довольно тяжелый камень, магнитный железняк, слегка обточенный; он обыкновенно имеется в старых физических кабинетах и числится под названием: «естественный магнит». Этому образцу (фиг. 18) около 150 лет. Камень черный, весом около 2 кг, оправлен в бронзовую резную оправу; к оправе приделаны цепи с кольцом, на которых он может быть подвешен. К нижней его поверхности пристал кусок железа; он также называется часто «якорем»; его довольно трудно отодрать от магнита; к нему приделан крюк, к которому можно подвешивать различные гири, чтобы узнать, какой вес может удерживать магнит. Бывает в некоторых образцах, что этот вес оказывается в десятки раз больше веса самого магнитного камня.

Красивая, даже, может быть, ценная оправа этого старинного прибора показывает, что в старину высоко оценивали, приходили в восхищение, видя, как этот камень сильно притягивает железо. Только железо! Через железо, с помощью крюка на якорю, конечно, можно подвесить и всякий другой предмет.

Когда магнит держит на весу например гирю в 4 кг и не дает ей падать, он побеждает, пересиливает всю огромную землю, которая также, ведь, притягивает гирю к себе, т. е. вниз.

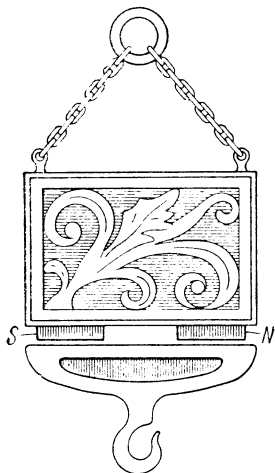
Вы скажете: «Что же тут удивительного, чем тут восхищаться. Я могу, взяв в руку кольцо магнита, держать не только то, что держит магнит, но и его самого вместе (6 кг);

я не позволяю всему этому падать и, значит, «пересиливаю» землю еще на большем весе»

Но не о том разговор Согнутые пальцы представляют собою крюк; на хорошем крюке можно подвесить и тонны (подъемный кран); на крюке вещь держится, как на подпорке. Магнит же не удерживает, как крюк, не подпирает; он притягивает железо, как земля притягивает к себе все предметы; вот почему его действие можно сравнивать с действием земли. Нам не удастся удержать рукою никакого, даже самого легкого грузика, если просто приложить его к руке снизу, как якорь приложен к магниту. В нас нет этого магнитного притяжения. А в магните есть; вот оно-то и удивляет.

Мы сравниваем действие магнита с действием земли. Если такое сравнение кажется неожиданным, то это только потому, что мы привыкли думать: «Тела падают», и мысль:

«Земля притягивает к себе все тела» остается позади. А в этом, конечно, сущность дела. Таково же и действие магнита. Это внутреннее сходство так велико, что мы выдвигаем его вперед, хотя и знаем великое различие между притяжением к земле, т. е. всемирным одинаковым (ньютоновским) тяготением всех тел ко всем, и магнитным притяжением, которое очень различно по отношению к различным телам, различным по своему составу; тут железо так резко выделяется между всеми остальными веществами, что раньше думали, исходя из грубого опыта, что только оно и притягивается магнитом. И до сих пор



Фиг. 18. Естественный магнит (старинный)

реннее сходство так велико, что мы выдвигаем его вперед, хотя и знаем великое различие между притяжением к земле, т. е. всемирным одинаковым (ньютоновским) тяготением всех тел ко всем, и магнитным притяжением, которое очень различно по отношению к различным телам, различным по своему составу; тут железо так резко выделяется между всеми остальными веществами, что раньше думали, исходя из грубого опыта, что только оно и притягивается магнитом. И до сих пор

электротехника пользуется железом как главным материалом в тех случаях, когда применяет магнитное действие.

## Магнетизм средневековья

Триста пятьдесят лет тому назад, когда еще не появилось понятия о ньютоновской силе, единственно действующей во вселенной, движущей, управляющей, устрояющей миры, вдумчивый ум (Гильберт «О магните», 1600 г.) усматривал в магнитном действии главную, если можно так выразиться, пружину мирового механизма; его представления были очень туманны и в этом смысле несравнимы с кристальной ясностью ньютоновской теории (пока она казалась совершенно достаточной). Гильберт (фиг. 19) полагал, что небесные тела окружены сферами своего магнитного действия и влияют друг на друга в местах соприкосновения этих сфер. В его рассуждениях было много еще более древнего, ты-



Фиг. 19. Людвиг-Вильгельм Гильберт

сячелетней давности аристотелевского метода мышления.

Мысль о мировом, космическом значении магнита выпячивалась еще одним удивительным свойством магнитного стержня самостоятельно поворачиваться одним своим концом к северу, к полярной звезде, к полюсу мира, во-

круг которого по древним представлениям вращается весь мир. Гильберт опроверг ложное мнение о роли полярной звезды и объяснил поворот магнита действием земного магнитного полюса; космическое значение магнетизма он видел лишь в намагниченности отдельных небесных тел.

Но сохранилось и даже пышно расцвело одно наследие от того предрассудка, что полярная звезда находится в близкой связи со всеми магнитами на земле. Петр Марикур, живший в глубоком средневековье, за три столетия до Гильберта в своем сочинении о магнитах (1269) перенес слово «полюс», это многозначительное, великое, «священное» слово для тогдашней астрономии и вообще для тогдашнего представления о мире, перенес это слово на магнит. Он назвал полюсами концы магнита, обращающиеся к полюсам вселенной.

Не только название «магнитные полюсы» сохранилось во всеобщем употреблении, множество физических состояний, а иногда явлений, тождественных в известном смысле и в то же время противоположных по своим действиям, как два полюса магнита, называются «полярными»; так например, поляризованная молекула, полюсы аккумулятора или динамомашин, диполь (отправительная заряженная антенна). Примером неудачного употребления этого названия является «поляризованный свет» — термин, введенный Ньютоном и происшедший от его любимого представления о свете, как о частичках, которые при «поляризации», думал он, становятся параллельными — все поворачиваются в одну сторону.

Марикур был военным человеком; он усердно занимался магнетизмом также и во время своих больших походов. Военное дело было одною из первых областей жизни, которая вызывала к прогрессу техническую мысль. Естественно, что у Марикура возникли чаяния о возможности использовать магнитный камень. В своем сочинении он утверждает, что если магнитный камень обто-

чить в виде вполне правильного шара и направить его полюсами (т. е. линией полюсов) точно по оси мира, т. е. по линии, соединяющей полюсы мира, то такой шар завертится. Он не сделал такого прибора, но рекомендует это испытать своим читателям и добавляет: «Если выйдет, вы насладитесь, если нет, — вините свое малое искусство» (несовершенная обточка шара).

«Конечно, нет!» — утверждаем мы через 660 лет после Марикура. Ведь предложение делал человек, не имевший понятия о работе, об энергии, коэффициенте полезного действия машины. Им, видимо, руководила мысль, что если обточить и установить «в совершенстве» магнитный шар, то этот магнитный шар войдет в сонм небесных тел, попадет в гармонию с ними (аристотелевские мысли) и вследствие этого завертится вокруг оси мира. Мы-то знаем, как на самом деле вращается двигатель с помощью магнита и как он работает, если нагрузить его ось. Шар Марикура остановился бы от малейшей нагрузки, так как тотчас исчезла бы необходимая «гармония»; фантазия рассыпается, как только подойдешь к ней с реальной стороны!

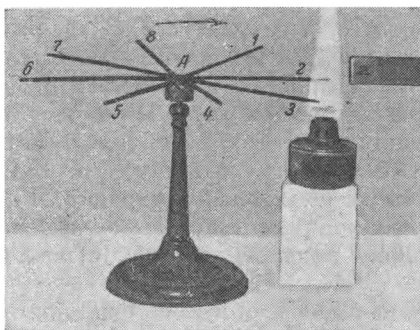
В сочинении Марикура находится описание еще одного прибора: зубчатое колесо с попеременно железными и серебряными зубцами, находящимися под действием магнитного полюса. И оно не придет в движение!

Магнитное притяжение может сдвинуть железо, может его двигать, приближая к полюсу, а затем — только держать. В этом положении магнитная энергия минимальна, и необходимо вывести железо из этого положения или поставить другое, новое тело с магнитными свойствами, чтобы движение повторилось; необходимо вторжение какой-то другой добавочной посторонней энергии (ср. электрогенератор для электромотора).

Возьмем несколько железных спиц, насаженных радиально на общую шайбу А (фиг. 20); пусть против спицы 2 находится магнитный полюс; эту спицу раскаляют ог-



нем газовой или спиртовой горелки. Железо теряет свои магнитные свойства, будучи раскалено приблизительно до  $700^{\circ}$ . Придадим прибору толчком вращение в направлении стрелки. Если мы ухитримся все-таки расположить спицы так, чтобы спица 3-я была еще нагрета, когда спица 2-я перестанет притягиваться магнитом, а спица 1-я еще мало подогреется, то спица 1-я потянется к полюсу и т. д.; прибор будет продолжать вертеться, несмотря на трение (нагрузку). Здесь вмешалась тепловая энергия.



Фиг. 20. Магнитная мельница

То же самое и с земным притяжением: Волховские пороги непрестанно вертят наши турбины, потому что все новые массы воды появляются на их гребнях. Здесь вмешивается солнечная энергия, которая испаряет воду с поверхности водоемов; эти пары в виде осадков (дождь, снег) пополняют водю верховья Волхова.

Я упомяну еще об одном изобретателе такого же фантастического склада. Мы перенесемся в XVI в., в Италию; Баттисто Порто (фиг. 21) очень интересовался способами передавать сообщения на расстояние и притом так, чтобы такое сообщение могло быть прочитано только адресатом. Вопрос этот был очень жизненный; всякий посланец, проходя по местности, разделенной на маленькие, воюющие между собой государства, на каждом шагу рисковал быть задержанным. Между прочими способами Порто рекомендовал (1589 г.) следующий: два лица, желающие

сообщаться на каком бы то ни было расстоянии, готовят себе два магнита, одинаковых и сделанных непременно из одного куска магнитного камня; оба магнита могут вращаться над листами, на которых по кругу означены все буквы алфавита. Если два таких прибора поставить в двух разных местах, хотя бы «в Москве и в Каире», одинаково ориентируя их относительно звезд, то за каждым передвижением одного магнита с буквы на букву последует передвижение другого по тем же буквам. Эту фантазию обсуждали военные люди, находя очень важным осуществление ее, например, в условиях осады какого-нибудь города.

Между фантазиями Марикура и Порты прошло 400 лет; медленно подвигались вперед приемы рассуждений о физических явлениях! Но все же в фантастическом проекте Порты заметен прогресс: отсутствует желание непосредственно

включиться в космос, ослабла мысль о тесной, повседневной связи того, что происходит на земле, с тем, что происходит во всем мире (астрологическая тенденция), а главное — в явление движения второго магнита, движения сколь угодно продолжительного и повторяемого, вмешивается работа руки, движущей первый магнит. Это — настолько существенный, рациональный штрих, что проект Порты, неосуществимый сам по себе, справед-



Фиг. 21. Баттисто Порты

ливо считается первым исторически зафиксированным предугаданием телеграфной связи (осуществлена в 1837 г.), а может быть лучше сказать, — радиосвязи. Действительно, в его оговорке о необходимости двух магнитов одного происхождения, двух, как тогда говорили, «симпатизирующих» магнитов, чувствуется современная идея о резонансе, на котором основано устройство наших радиоприемников.

Прошли два столетия. Высокопарное и в то же время лишенное всякого конкретного содержания средневековое представление о магнетизме выродилось; магнит перестал быть чем-то космическим; но что-то сверхъестественное значилось за ним еще долгое время.

В XVIII в. фантазер, врач Месмер, исцелял от болезней, поводя магнитом вблизи тела больного. Однако он стал замечать, что одни его движения рукой («пассы») без всякого магнита производят иногда такое же действие. Так было начато лечение гипнозом, но еще и теперь людей, производящих гипноз, часто называют магнетизерами. И теперь еще можно услышать фразу вроде: «магнетизм ее глаз действует на меня неотразимо». Бессмысленность этих выражений, вероятно, признается уже и теми, кто их употребляет.

## Э л е к т р и ч е с к о е   п р и т я ж е н и е

На ряду с земным и магнитным притяжением с древнейших времен был известен еще один вид притяжения — электричество; янтарь, потертый обо что-нибудь, притягивает к себе легкие предметы: пылинки, паутинку, обрезки тонких ниточек.

Этот маленький факт, впоследствии колоссального жизненного значения, не затерялся в течение двух тысячелетий, но им не занимались так, как магнетизмом. Оно казалось менее интересным: притяжение очень слабо, появляется только после того, как натрут янтарь, исче-

зает, если провести пальцем (особенно влажным) по поверхности янтаря. Последние два обстоятельства для нас особенно ценны (ведь это генерация электроэнергии и последующее использование ее!), но на старинных наблюдателей все это производило впечатление тех же магнитных явлений, только ничтожных, неустойчивых, искусственных. Электричество не отделялось от магнетизма.

Гильберт впервые ввел некоторую ясность. Во-первых, он привел доказательства тому, что электрические (слово, введенное им) и магнитные явления не одно и то же. Одно из доказательств состояло в таком наблюдении: магнит притягивает железо и в воздухе и в воде, янтарь же, погруженный в воду, не притягивает легких предметов (это, конечно, потому, что в воде он разэлектризовывается). Во-вторых, Гильберт, испробовав различные вещества, пришел к заключению, что не один янтарь электризуется от трения, но и много других тел. Он назвал их электрическими.

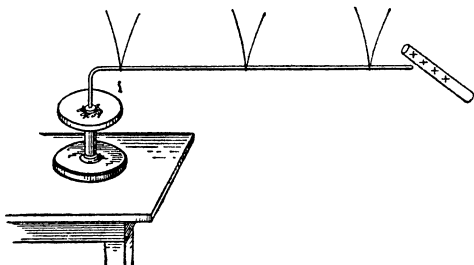
Электрическое притяжение перестало быть чем-то исключительно редким. Здесь выразилось искусство Гильберта производить опыты, наблюдать даже очень мало заметные явления, но в дальнейшем своем заключении Гильберт сделал крупную ошибку, путавшую электриков целое столетие.

По всей вероятности, Гильберт был бы очень удовлетворен, если бы оказалось, что все тела электризуются от трения; но его опыт показал другое, и он подчинился опыту. Наука уже не подходила к природе на крыльях фантазии. Беда была в том, что в этой своей части опыт Гильберта был «облывный». Он нашел, что целый ряд тел не может быть наэлектризован трением; такие тела Гильберт назвал неэлектрическими. Если посмотреть его список таких неэлектрических тел, то оказывается, что все они — проводники электричества, например металлы, вода, уголь и т. п. Гильберт исключил провод-

ники; он признал их неучаствующими в электрических явлениях. Эта грубая ошибка произошла потому, что Гильберт не знал об электрической проводимости; он вообще ничего не знал об электрических явлениях, кроме электрического притяжения. Учение Гильберта о неэлектрических телах не было прогрессом, а регрессом, на целое столетие закреплявшим науку на ступени убогого знания.

## П р о в о д и м о с т ь

XVII век ознаменовался великими успехами в математике и механике; в этом веке было основано учение о газообразных телах, определена скорость света и заложены основания нашего понимания всех главнейших световых



Фиг. 22. Опыт Грея с электропроводностью

явлений. Только наука об электричестве не сдвинулась с прежних позиций. Это произошло, наконец, в XVIII веке, и с тех пор, прогрессируя все с большею скоростью на протяжении всего XIX века, наука дошла до современного богатого и сложного содержания.

Дело началось с возникновения понятия о проводимости. Грей (1729) заметил, что «неэлектрик» (по Гильберту) электризуется, если им дотронуться до наэлектризованного места «электрика»; при этом он оказывается

наэлектризованным по всей своей поверхности — электричество распространяется по неэлектрику. Грей подвешивал на шелковинках к потолку все более длинные куски медной проволоки и наблюдал, что ее дальний конец всегда обнаруживает электрическое притяжение легких тел, когда до ближнего дотрагиваются наэлектризованной трением о кожу стеклянной трубкой (фиг. 22). Таким образом было установлено, что гильбертовский неэлектрик есть проводник, и что «электрическое тело» есть непроводник или изолятор. И затем уже стало ясным, почему проводник нельзя наэлектризовать, держа его в руке: электричество растекается по нему и через руку уходит в землю. Непонимание этого и привело Гильберта к его ошибочному заключению. Получилось загадочное для современного уха утверждение: «Неэлектрик может быть наэлектризован трением, но только если его поддерживать через электрик». Долгое время одним это удавалось получить, другие отрицали такую возможность. Профессор Медико-хирургической академии в Петербурге В. В. Петров, смелый, усердный и серьезный исследователь электрических явлений, получил электризацию металлических предметов (при условии самой тщательной изоляции их) и вообще проводников, например тела человека. Вместо трения он применял, как он выразился, «стегание». Эти его опыты были описаны в 1804 г. И все же, — так цепко держатся предрассудки! — в учебнике физики Ивана Двигубского, вышедшем в Москве в 1808 г., сказано (стр. 212—213): «Стекло, алмаз, сухой воздух, воск, сера, смолы, слоновая кость, шерсть, перья, волосы животных делаются электрическими посредством трения и называются телами электрическими... их называют также непроводниками... телами неэлектрическими или проводниками называются тела, которые получают электрическую силу посредством сообщения (а не трения. — В. Л.) и передают ее чрезвычайно скоро другим телам».

Исследования Василия Петрова были совсем неизвест-

ны иностранным ученым (это были первые книги по электричеству на русском языке). Они, как мы видим, остались неизвестными и его соотечественникам. Лишь в 80-х годах прошлого века его сочинения были изъяты из забвения студентом Петербургского университета, очень интересовавшимся физикой, А. Л. Гершуном; он случайно во время зимних каникул наткнулся на них в городской библиотеке г. Вильно. С тех пор Петров стал известен у нас (см., например, «Курс физики» О. Д. Хвольсона) и за границей.

В 1892 г. небольшой электростанции на Выборгской стороне было присвоено имя В. Петрова, но эта станция давно уже перестала существовать. Были сделаны другие предложения увековечить память Петрова, но и они остались невыполненными. Лишь советское правительство, всегда высоко ценящее научные заслуги, достойно почтило нашего пионера науки об электричестве; Президиум ЦИК СССР 8 июня 1935 г. по предложению т. С. Орджоникидзе постановил присвоить светотехнической лаборатории Московского энергетического института имя академика В. Петрова и в ознаменование столетия со дня смерти первого русского электротехника установить в трех институтах ежегодную премию за лучший дипломный проект. В г. Обояни, на родине Петрова, также постановлено увековечить его имя.

## К а ч е с т в о   и л и   м а т е р и я ?

Что же происходит с проводником или изолятором, когда они электризуются и получают способность притягивать легкие предметы? Что такое электричество?

Мы находим два ответа у людей, увлекшихся изучением электрических явлений в XVIII веке.

1) Электричество есть особое состояние вещества, скажем к примеру, «особое дрожание молекул». От этого наэлектризованное тело обнаруживает свое новое качество.

2) Электричество есть особое вещество. Все электрические явления происходят от его свойств. Это оно производит например притяжение легких тел. Электризуя, мы «вкрапливаем» это вещество; при этом в изоляторе оно остается в месте вкрапливания, в проводниках оно растекается по всей поверхности; именно «растекается», «впитывается», «расплывается», как жидкость. Понятие проводимости подкрепляло, если даже не создавало, мысль об «электрической жидкости», и до сих пор, когда уже давно ни в каких учебниках не пишется о ней, мы говорим: «электрический ток течет по проводнику».

Эта жидкость — невесомая, потому что электризация тела не увеличивает его веса. Конечно, это утверждение очень опрометчиво, фантастично, сильно напоминает средневековые и особенно странно после установления Ньютоном закона всемирного тяготения. Однако сам великий авторитет Ньютона являлся тут некоторой поддержкой: он оставил после себя учение, что свет есть особая «световая» жидкость, истекающая из светящегося тела, выбираемая им в окружающее пространство, причем это тело не уменьшается в своем весе. Но Ньютон оставался верен себе и считал, что световая жидкость притягивается телами, с которыми она приходит в соприкосновение на своем пути (отсюда, по Ньютону, происходит преломление света и диффракция), это притяжение обязывало предположить, что она притягивается и землю, т. е. весит.

Теорию электрической жидкости восприняло несравненно большее число физиков, чем теорию качества. Не только проводимость, но и другие электрические явления по мнению внимательных наблюдателей лучше объяснялись жидкостью. Например, электрическая искра испускает яркий свет. Один из искуснейших наблюдателей XVIII века, Гауксби (1709 г.), говорит: «Свет есть материя; может ли качество порождать материю? Нет! Следовательно, электричество есть материя».

Когда мы слышим такие схоластические утверждения,



хочется возразить. И действительно, ведь одновременно с ньютоновским в XVII веке появилось другое (Гюйгенса) понимание света — это волны, расходящиеся от источника света, дрожание окружающей его среды, а в таком случае свечение искры очень понятно. Если электричество есть особое движение молекул тела, то это есть переход одного движения в другое. Но Гауксби был сторонником ньютоновской теории истечения!

Теория электрической жидкости побеждала, несмотря на большие трудности на ее пути. В 1733 г. произошло большое событие: Дюфе объяснил в короткой и четкой статье, что различные случаи электрических движений просто объясняются, если принять, что существует не одно электричество, а два; они оба суть электричество и в этом смысле одинаковы, но в некотором отношении прямо противоположны. Одно образуется при трении стекла («стеклянное»), другое — при трении смолы («смоляное»). Одноименные электричества взаимно отталкиваются, разноименные — притягиваются.

Слова «невесомая жидкость» обозначали настолько растяжимое, неопределенное понятие, что ничего не стоило принять существование двух электрических жидкостей.

В магнетизме к тому времени давно уже была установлена противоположность разноименных полюсов и отталкивание между одноименными; и это было, пожалуй, понятно в той же мере, как проявление особых двух жидкостей, или «флюидов», которых, таким образом, к концу XVIII века оказалось шесть: по две электрических и магнитных, световая и тепловая (теплород). Только земное, мировое притяжение осталось без жидкости; тут слишком велики тела! Они сами отвечают за свои качества без какого-либо вкрапления посторонней примеси.

## В. Франклин

К концу XVIII века знаменитый в истории США гражданин Франклин (фиг. 23), прослышав об европейских

успехах в изучении электрических явлений, очень заинтересовался ими. Он на десять лет отошел от политической деятельности, устроил свою лабораторию и с большим успехом воспроизвел и повел дальше опыты своих английских друзей с электрической машиной, с лейденскими банками и другими конденсаторами, с электрическими искрами, увеличивая их длину, мощность и различные действия. Франклин не только любовался производимыми им явлениями, но и вникал в их физический смысл, широкий физический здравый смысл, а не узкий электрический, удовлетворяющийся принятием каких угодно, случайно приходящих в голову, «электрических» гипотез.



Фиг. 23. Вениамин Франклин

При электризации всегда получается два противоположных заряда равного количества: если мы хотим в данном месте стекла получить трением «стеклянное»

электричество, то в это время обязательно на другом трущемся о стекло предмете получится столько же «смоляного». Франклин возымел удивительно смелую мысль, что это легко понять, если представить себе, что электричество одно и распределено в некоторой норме, с известной равномерностью по всему миру; электризуя, мы отнимаем его от одного предмета и переносим на другой; в первом

создается одна ненормальность — недостаток (бедность), во втором — обратная, избыток (богатство). Равномерность, устойчивое равновесие нарушено, создана неравномерность, чреватая событиями. Разряд, искра и есть такое событие, возвращающее мир вновь к равновесию.

Во всей этой картине, насыщенной мыслями политического деятеля, нехватает с физической стороны только одного — понятия об энергии. Ненормальность электрического состояния — это и есть, говорим мы, запас электроэнергии; разряд есть использование ее — превращение электроэнергии в другие формы энергии. Накопление больших зарядов приводит к разряду, сокрушительному по своим действиям. Такова молния, утверждал Франклин, доказав непосредственным опытом, что грозовые тучи наэлектризованы; и мечтой его как друга человечества было устроить громоотвод, т. е. приспособление, не позволяющее зарядам накопиться вблизи здания. Острие, укрепленное на крыше и соединенное с землею проводом, должно было производить тихий, медленный разряд, служа как бы клапаном, непрерывно действующим по мере накопления зарядов.

Франклин останавливался на вопросе, которое из двух электричеств — «смоляное» или «стеклянное» — представляет собою накопление, избыток и которое — недостаток. Для теории разряда это безразлично, поскольку, скажем мы, в явлениях превращения электроэнергии при разряде играют роль только эта разность, противоположность, полярность двух состояний. Различные доводы, которые он сам считал малоубедительными, склонили его к представлению, что избыток, богатство электричества получается на стекле, что, натирая стекло, мы накапливаем на нем электрическую жидкость, а смола или сера, наоборот, отдают ее при трении из своего нормального запаса. В виду этого он назвал «стеклянное» электричество «плюсом», или положительным, а «смоляное» — «минусом», или отрицательным. Эти два обозначения Франк-

лина сохранились до настоящего времени, хотя теперь они и являются очень часто неудобными.

Вы уже чувствуете, как близко подходил Франклин к современному представлению об электрическом заряде. Он не знал только, что его «смоляное» электричество есть избыток электронов, а лишенное части своих электронов вещество обнаруживает противоположный «положительный» заряд. Эта картина ясно обрисовалась только в конце XIX столетия, когда человеческая мысль смогла, наконец, глубже проникнуть в строение вещества.

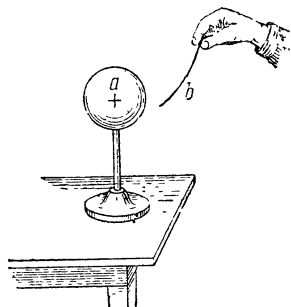
Электрическая теория грозовых разрядов и устройство громоотвода (на практике, как оказалось, далеко не всегда действующего) были главными основаниями славы Франклина как электрика.

Мы особенно подчеркиваем его теорию одной электрической жидкости (унитарная теория) с ее представлениями о равновесном распределении электричества при нормальном состоянии тел и о нарушении равновесия при заряде. Электрическое притяжение в мыслях Франклина отступало куда-то на задний план. Его последователи, однако, возвращались к этому старинному притяжению; они приспособляли унитарную теорию, например, следующим образом (Эпинус, петербургский академик): электричества взаимно отталкиваются — этим объясняется взаимное отталкивание двух положительных зарядов; электричество и обычное вещество взаимно притягиваются — этим объясняется взаимное притяжение противоположных зарядов; и, наконец, чтобы объяснить взаимное отталкивание двух отрицательных зарядов, следует предположить, что обычное вещество отталкивается другим таким же. Это последнее предположение находилось в таком противоречии с ньютоновским всемирным тяготением, что не могло встретить сочувствия и послужило главной причиной недолгого признания унитарной теории. А все-таки очень интересна эта попытка Эпинуса как-то соединить, связать между собою два основные

в физике притяжения — земное (ньютоновское) и электрическое. Магнитное притяжение ни Франклин, ни его сторонники не рассматривали.

### Электрическая энергия и разность потенциалов

Электрики XVIII века не останавливались на полдороге; они не успокаивались на слове, на названии и доискивались, что оно обозначает. «Жидкость» уже есть какое-



Фиг. 24. Электрическое притяжение

то объяснение слова «электричество». Точно так же они искали объяснение электрического притяжения, той «работы», которую оно может совершить. В самом деле, допустим, что мы имеем заряженный шарик *a* (фиг. 24), например, положительно заряженный. Перед ним мы держим обрывок нитки *b*. Почему нитка притягивается? Как это так она притягивается? Что заставляет ее преодолевать свой вес, земное притяжение?

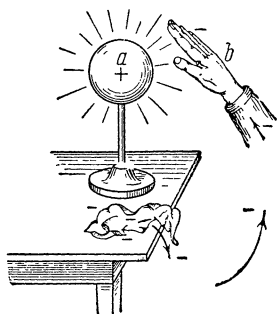
Ничто в обстановке этого простого опыта не подсказывает ответа на появившиеся вопросы. А между тем стоит только разрядить шар, например, дотронувшись до него другой рукой, притяжение прекратится. Нитка повиснет вертикально. Что же при этом изменилось?

Оставалось фантазировать. И вот французский электрик Нолле настаивал на такой картине: всякая жидкость испаряется, окружена своими парами; и электрическая жидкость выбрасывает свои пары (эксхалация), выходящие из шара *a*; они расталкивают окружающий воздух; образуется разряженное пространство вокруг нашего

шара, и воздух, вторгающийся в это разряженное пространство, толкает перед собою нашу нитку, а мы говорим, что она притягивается. Если вдуматься в это объяснение, оно кажется смешным. Поднимаются явные возмущения, которые не желал знать Нолле только потому, что он хотел во что бы то ни стало объяснить электрическое притяжение. Прежде всего, конечно, нужно вспомнить, что оно происходит ничуть не хуже и в том случае, если и шар, и нитка заключены под колокол, из которого выкачан воздух.

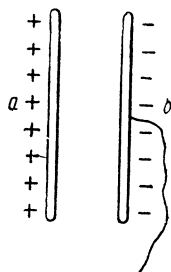
Франклин горячо, ожесточенно возражал против таких объяснений не по мелочам, не в том смысле, что в них замечаются те или иные неувязки, которые можно подправить добавочными предположениями, но принципиально. Он не мог согласиться, чтобы притяжение объяснилось выходом электричества; выход электрической жидкости, как с острия франклиновского громоотвода, есть уже разряд. Все самое ценное в его представлениях — проводимость, разряд, электрический ток — все было бы спутано и испорчено, если бы встать на точку зрения Нолле.

Довершим наше современное понимание опыта, показанного на фиг. 25, проследим явление во всей его последовательности. Шар *a* заряжен положительно (потерял часть своих электронов), потому что его потеряли шерстяною тряпкою, которая при этом зарядилась отрицательно (приобрела лишние электроны); ее положили на стол; отрицательное электричество (электроны) по столу, по полу, через тело наблюдателя, его руку, перейдет на нить как на предмет, ближайший к шару; оно притягивается



Фиг. 25. Электрическое поле вокруг заряженного шара

положительным зарядом шара. Теперь получился Франклиновский заряженный конденсатор (фиг. 26); на его пластинках  $a$  и  $b$  имеется та разность (избыток и недостаток), о которой говорил Франклин. Мы же теперь обычно говорим: в нашей системе проводников, в конденсаторе имеется «разность потенциалов» (Грин, 1828). Это не совсем то же самое, «разность потенциалов» действительно зависит от накопления электричества на обкладке  $a$ , но она зависит еще и от местонахождения заряда  $b$ ; «разность потенциалов» падает с приближением  $b$  к  $a$  («увеличивается емкость конденсатора»).



Фиг. 26. Конденсатор Франклина (схема)

Дело в том, что энергия всей этой заряженной системы определяется не только самим зарядом (числом электронов), но еще и этой «разностью потенциалов». Если мы позволим заряду (электронам) переходить с  $b$  на  $a$ , например, приделав к  $b$  острие, начнется разряд; тогда и заряд и энергия будут убывать. Если же мы вполне сохраним изоляцию между  $b$  и  $a$ , но позволим им приближаться друг к другу, разряда не будет, но энергия все-таки будет убывать: электроны, оставаясь в прежнем числе, совершат при сближении проводников  $a$  и  $b$  некоторую работу, помогая их движению, и, следовательно, в новом положении будут обладать меньшей энергиею; это мы и называем падением (уменьшением) «разности потенциалов». С этой точки зрения можно «разность потенциалов» характеризовать как работоспособность двух противоположных единиц заряда, двух противоположных единиц количества электричества. Энергия конденсатора Франклина тогда могла бы быть представлена как произведение из количеств электричества в одном из двух равных, но противоположных зарядов (количества электронов) на «разность потенциалов» между ними (их работоспособность), но на

самом деле процесс заряда и разряда конденсатора оказывается несколько сложнее.

Дело в том, что при зарядке конденсатора по мере накопления на его обкладках все больших и больших количеств электричества возрастает и сам заряд и «разность потенциалов» — добавление новых порций электричества делается все труднее, требует все большей и большей работы. При этом возрастает работоспособность всех накопленных на его обкладке электронов. Поэтому при оценке всей работы заряда нужно принимать во внимание не работу в самом начале заряда, когда она равна нулю (нет «разности потенциалов»), и не работу в конце заряда, когда она достигает максимума (окончательная, наивысшая «разность потенциалов», достигнутая при заряде), а следует взять среднюю величину, т. е. половину окончательной разности потенциалов.

То же и при разряде: если медленно разряжать конденсатор через проводник с большим сопротивлением, то вначале, когда разность потенциалов еще высока, пойдет сильный ток — работоспособность электронов будет большая, по мере стекания заряда разность потенциалов будет падать, работоспособность электронов, их энергия, будет уменьшаться, ток будет ослабевать, пока не исчезнет в момент полного выравнивания потенциалов. Значит, и при разряде нужно принимать во внимание не всю разность потенциалов начала разряда, а половину ее. Поэтому энергию, накапливаемую в конденсаторе, нельзя считать просто произведением из заряда на разность потенциалов, а нужно это произведение разделить еще на два.

Электродвижущая сила генератора, которую мы меряем в вольтах, разделяет два противоположных заряда (гонит электроны в одну сторону) в проводнике, создает, следовательно, на концах его разность потенциалов, в точности соответствующую электродвижущей силе его. Естественно, что и эту разность потенциалов мы можем измерять вольтами.



Очевидно, что конденсаторы разных размеров для зарядки их до одинакового числа вольт потребуют разного количества электричества, разного числа электронов на отрицательной пластинке. Естественно возникает необходимость оценки «электроемкости» конденсаторов и введения особой единицы для измерения этой электроемкости. Ее называют «фарада» в честь Фарадея и выбирают так, чтобы для зарядки конденсатора в одну фараду до разности потенциалов в один вольт было бы как раз достаточно одного кулона ( $\approx 6 \cdot 10^{18}$  электронов).

Тогда заряд конденсатора при  $V$  вольт будет выражаться формулой

$$Q = CV, \quad (10)$$

где  $Q$  — кулоны,  $C$  — фарады, а  $V$  — вольты. Энергия же конденсатора  $E$ , выраженная в джоулях (джоуль =  $10^7$  эргов), будет равняться

$$E = \frac{QV}{2} = \frac{CV^2}{2} \text{ джоулей.} \quad (11)$$

Введя понятие об энергии и разбивая электроэнергию на два множителя (заряд и разность потенциалов), мы в громадной степени уточняем франклиновское понимание и делаем все явление вполне понятным с энергетической точки зрения. Будучи основательно знакомым с этой теорией, можно легко вычислить энергию заряженного конденсатора при заданных условиях, можно определить и силу электрического притяжения одной пластинки другой, но «как действует эта сила?» остается необъяснимым. Самый вопрос этот при решении такой задачи не будет даже и возникать.

Например, конденсатор, заряженный до 1000  $V$  при размерах пластинок в 130 см<sup>2</sup> и расстоянии между ними в 1 мм, обладает энергией приблизительно 500 эргов и силой притяжения между пластинками в 5 г. Если разность потенциалов увеличить в 10 раз, то и энергия и сила притяжения увеличатся в 100 раз и т. п.

## Кулон

Такие успехи сулила и выполнила к середине XIX века теория электрического потенциала, ставшая окончательно ясной после установления закона сохранения энергии. Попытки разгадать способ действия электрического притяжения временно перестали интересовать электриков. Электричества действуют друг на друга, не сходя со своих мест, действуют на расстоянии, издали. Такова уж должна быть природа электрической жидкости! Интересен может быть только закон этого действия, т. е. закон зависимости его от величины расстояния.

После того как многие экспериментаторы (начиная с Грея) уже догадывались о характере этого закона, а Кавендиш в работе своей, долгое время остававшейся неизвестной, дал ему определенное математическое выражение, окончательное установление его было сделано Кулоном на основании его опытов в 1785 г.

В той же серии опытов Кулон определил и закон, по которому изменяется магнитное притяжение в зависимости от расстояния между полюсами; он оказался тождественным по форме с законом для электричества.

Этот общий закон для электричества и магнетизма совпадал и с ньютоновским законом всемирного тяготения.

$$f = k \frac{m_1 \times m_2}{r^2}. \quad (12)$$

Формула выражает и электрическую силу взаимодействия между зарядами, и магнитную — между полюсами, и ньютоновскую — между обычными, незаряженными и немагнитными массами вещества.

Мы переходим от одного случая притяжения к другому простым переходом от одного понимания буквы  $m$  к другому. Эта буква будет обозначать или количество электрической жидкости, или количество магнитной жидкости, или величину массы обычного вещества. Во всех случаях

знаменатель с одинаковой ясностью, определенностью лаконично утверждает: «Сила притяжения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния». Для электричества и магнетизма закон одинаково применим и к случаям отталкивания.

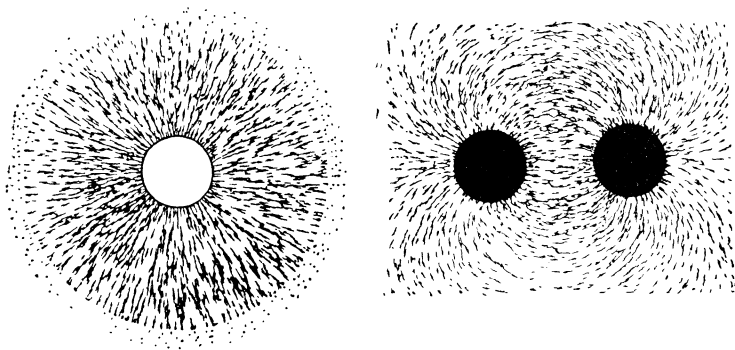
Совпадение с Ньютоном имело для Кулона и всей последовавшей науки очень большое значение. Ньютон глубоко верно понимал физические явления и благодаря этому совпадению он как бы подтверждал, если можно так выразиться, результаты измерений Кулона и его предшественников.

Это же совпадение, с другой стороны, укрепляло самое представление об электрических и магнитных жидкостях, ибо оно говорило о том, что они ведут себя, как обычные реальные массы. Наконец, это же совпадение окончательно снимало с очереди вопрос о том, как происходит притяжение; оно происходит так же ясно и просто, как притяжение Земли к Солнцу, Луны к Земле и всякого камня, падающего на землю, или маятника, качающегося в часовом механизме.

Ньютоновская (и кулоновская) формула есть математическое выражение. Она относится к простейшему случаю: Солнце и Земля на громадном расстоянии, два заряда на маленьких шариках и т. п. Но дело математики сделать из нее выводы для каких угодно сложных случаев: три тела, взаимно отталкивающихся, миллиард зарядов, взаимно действующих, бесконечное множество заряженных точек, так или иначе заряженных... И математики начала XIX века, многие из которых были крупнейшими математиками мира (например, Гаусс, считающийся первым математиком после Ньютона), усердно принялись за разрешение этих проблем. Создались особые отделы математики, ведущие к разрешению вопросов, связанных с применением формулы Ньютона — Кулона.

Электрическое или магнитное поле, т. е. пространство, окружающее наэлектризованные или магнитные тела, изучалось во всех его точках. Для всякой точки оказалось

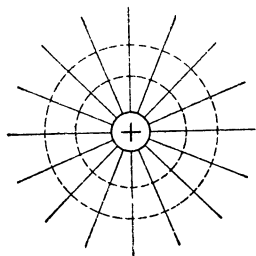
возможным хотя бы приближенно вычислить, какая сила обнаружится в ней, если туда поместить соответствующую электрическую или магнитную «массу». Математик выследил, как изменяется эта сила от точки к точке; он проводил линии, так называемые «силовые линии», которые своими отрезками (или лучше сказать: направлением касательных) создавали картину того, как красиво и причудливо изменяется направление этих сил. Это было названо



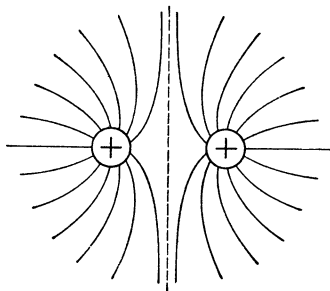
Фиг. 27 и 27а. Волокна асбеста в масле дают картину электрического поля вокруг одного заряженного шара и вокруг двух шаров с противоположными зарядами (по А. Эйхенвальду)

«топографией поля». Если в густом масле, хорошем диэлектрике, разболтать мелкие кусочки асбеста или кристаллики хинина, имеющие продолговатую форму, то они расположатся по направлению электрических силовых линий (фиг. 27 и 27а) и дадут наглядную картину электрического поля (А. Эйхенвальд). Вот например, ход силовых линий между двумя одинаковыми по знаку (одноименными) зарядами (фиг. 28а) и двумя разноименными (фиг. 28б). Эти линии имеют интереснейшие математические свойства; возьмем, например, один заряд  $Q$  (фиг. 28) на маленьком шаре; так как рядом никакого другого за-

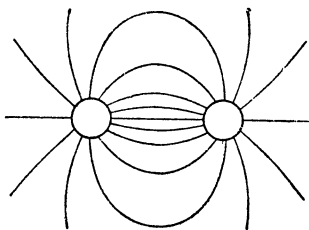
ряда мы не помещаем, то все его силовые линии будут идти, как радиусы, расходящиеся во все стороны из центра <sup>1</sup>.



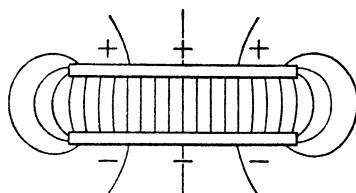
Фиг. 28. Электрическое поле одного заряда (теорема Гаусса)



Фиг. 28а. Электрическое поле двух одноименных зарядов



Фиг. 28б. Электрическое поле двух разноименных зарядов



Фиг. 28в. Электрическое поле плоского конденсатора

Будем считать, что наш заряд дает  $4\pi Q$  силовых линий—столько мы провели их на чертеже. Теперь напомним закон Кулона в таком виде:

$$f = k \frac{4\pi Q \times 1}{4\pi r^2}. \quad (13)$$

<sup>1</sup> Если бы мы приблизили еще второй заряд, то радиальные силовые линии обоих пришлось бы сложить, и математика показывает, что получилась бы фиг. 27а или 28а.

Умножением числителя и знаменателя на  $4\pi$  мы несколько не исказили нашу формулу. Что значит единица, поставленная рядом с  $Q$ ? Она означает, что где-то на расстоянии  $r$  мы поставили (вообразили) второй и именно «единичный» заряд. Что же мы получили? Все число силовых линий  $4\pi Q$  мы поделили на поверхность того шара с радиусом  $r$ , на котором находится наш единичный заряд; этим мы вычислили, сколько силовых линий пройдет сквозь каждую единицу поверхности шара. И вышло: если считать, что заряд  $Q$  образует  $4\pi Q$  силовых линий, то везде вокруг него на единичный заряд на расстоянии  $r$  будет действовать сила  $f$ , равная помноженному на  $k$  числу силовых линий, проходящих сквозь единицу поверхности, — равная, можно сказать, «густоте» силовых линий в этом месте (теорема Гаусса), помноженной на число  $k$ .

Но только не забудем, что это все вообразимо; все относится к тому случаю, когда мы поместим в электрическое поле электрический единичный заряд (а в магнитное — единичный полюс). А если не поместим? — Никаких сил нет, и остаются только математические формулы и чертежи. Для математика это не представляет никакого неудобства; но что делать физику в таком «воображаемом» поле?

К 30-м годам прошлого века математики уже закончили в главных чертах свою работу. Физики, увлеченные ими, стали физико-математиками. Новые физические понятия не оплодотворяли научную почву. Кулоновское учение об электричестве и магнетизме завершилось. Но прогресс нашего знания на этом не остановился. Он получил дальнейшее развитие благодаря человеку, давшему новое понимание электромагнитных явлений.

### К чему стремился Фарадей

Фарадей не мог быть увлечен математическими красотоми. Родившись (1791) в семье лондонского рабочего, он получил лишь самое начальное образование. Даль-

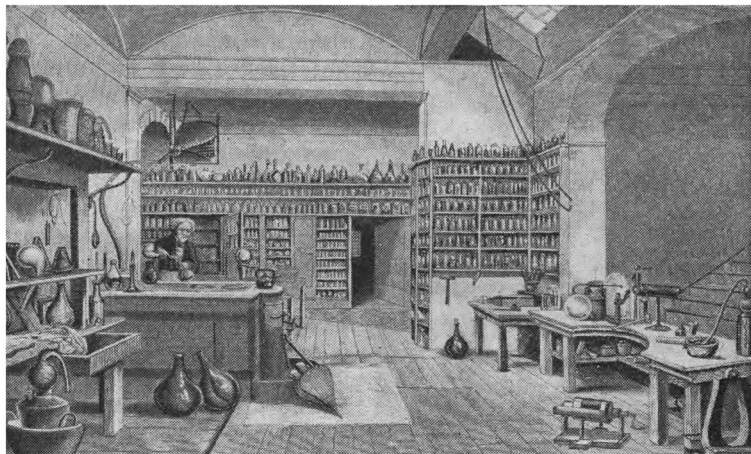
нейшие свои знания он приобретал самообучением — по книжкам; благоприятным обстоятельством было то, что Фарадей работал подмастерьем у переплетчика. Его увлекала не математика, а реальное знание; он зачитывался книгами по химии и физике; некоторые заказчики его хозяина помогли ему разобраться в трудных местах. В 1813 г. он оставил переплетное мастерство и поступил служителем в лабораторию знаменитого тогда физико-химика Дэви. Здесь началось его серьезное обучение; скоро он стал уже удивлять своих товарищей по лаборатории своими собственными исследованиями. В 1813—1815 гг. он совершил с Дэви путешествие по Европе. Это был для Фарадея настоящий университет: он увидел самых выдающихся физиков и химиков Европы, присутствовал при их работах и беседах. Многие относились к Фарадею, как к восходящему светилу науки, но... он был служителем Дэви; это давала чувствовать жена его господина. Возникали острые конфликты, и был момент, когда Фарадей хотел все бросить и возвратиться в свою лондонскую переплетную. Если бы это случилось, прогресс человеческой жизни получил бы длительную отсрочку, и, может быть, мы бы еще не имели той «электрификации», которой теперь окружены.

В 1825 г., после смерти Дэви, Фарадей стал директором его лаборатории. Он работал в ней до 1862 г., ежедневно, кроме праздничных дней и дней болезни или отъезда на отдых. Здесь он сделал все свои величайшие открытия (фиг. 29).

Его открытия представляли собою как бы развертывание программы, с которой он вышел на научное поприще. Шаг за шагом, с великой настойчивостью, несмотря ни на какие неудачи, иногда многолетние, он получал на неопровержимых опытах все новые доказательства правильности своего основного воззрения на электричество и магнетизм. И вышло так: для Фарадея его открытия были подтверждением его основных представлений,

а для человечества они складывали фундамент всей последующей многообразной электротехники.

В чем же заключались фарадеевские взгляды? Сметались последние остатки средневековой науки. Наука переживает трагедию Фауста; человек, погрузившийся было до последних пределов в старую науку, вдруг сбрасывает с себя все это знание, как бессодержательное,



Фиг. 29. Лаборатория Фарадея

пустое по существу, и ищет жизненного знания, зовет к себе действительность такую, как она есть и как бы сложна она ни оказалась; он не боится ее ослепляющего сверкания.

Я учился в университете в 80-х годах (в Петербурге), приблизительно через 50 лет после главнейших моментов деятельности Фарадея; наш старый профессор физики Петрушевский был далек от понимания фарадеевского учения и рассматривал открытия Фарадея формально,



в трактовке физико-математиков. Другой наш физик, Боргман (фиг. 30), молодой профессор, был уже фарадеевистом; он старался передать нам фарадеевские воззрения и свое восхищение ими. Нескольких из нас он увлек; по окончании университета мы много лет продолжали



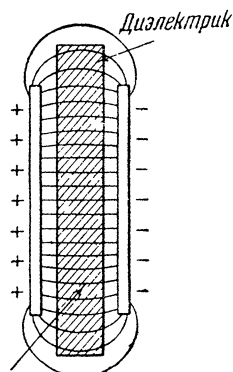
Фиг. 30. И. И. Боргман

вникать в фарадеевское учение по сочинениям самого Фарадея и его лучших последователей; работали коллективно в кружке, работали и индивидуально. Мы готовились стать сами учителями фарадеевского направления. Видя, какую огромную важность имеет оно для нарождавшихся уже тогда наших электротехников, мы перевели несколько больших физико-технических книг и писали сами, поскольку могли. Теперь, когда мне около 70 лет, я вижу, что мы работали неорганизованно, что нас было мало и что сделали мы немного.

Я вижу, как современные, новые теории начинают излагаться, и притом точно и авторитетно, с наших кафедр не через 50 лет, а может быть через 5 дней после своего опубликования; большие группы учеников воспринимают их, пишутся объяснительные статьи для техников и — что самое главное — с научными новостями идут прямо на заводы, в цехи. Наука сливается с самой жизнью!

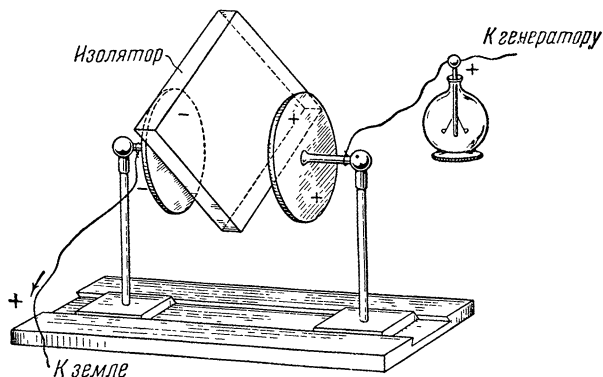
На вопрос, в чем заключается учение Фарадея, я могу ответить лишь тем, что дало для меня его изучение.

Фарадей не признавал электрическое поле заполненным лишь воображаемыми геометрическими силовыми линиями; этим линиям он придавал физический смысл; фиг. 27 и 28 для фарадеиста не топографические (символические) чертежи, а картинное изображение некоего физического явления, представляющего собою электростатическое поле. Такое же поле заполняет и пространство между обкладками конденсатора (фиг. 28в). Всякий неподвижный электрический заряд окружен таким «поток» электростатической индукции», неподвижным «застывшим потоком», напоминающим нам неподвижный «поток магнитной индукции». В конденсаторе (фиг. 31а и 31б)



*Поток электростатической индукции в конденсаторе*

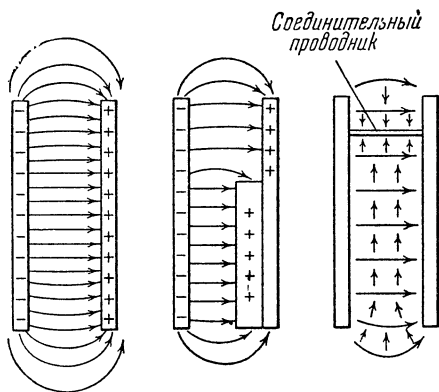
Фиг. 31а. Схема потока электростатической индукции в плоском конденсаторе с диэлектриком



Фиг. 31б. Устройство конденсатора Франклина

весь поток сгущен в пространстве между пластинками, в «диэлектрике» (фарадеевское название «межэлектрик»), в стекле лейденской банки.

Этим своим потоком заряд как бы распространяется на окружающее пространство (сам оставаясь на месте), связывается с окружающим миром; заряд перестал быть чем-то уединенным, обособленным. Этот поток произ-



Фиг. 32. Схема распределения потока электростатической индукции в конденсаторе и его исчезновение при замыкании пластинок проводником. Поток устремляется в промежуточный проводник и там исчезает

водит действие на окружающие тела, в которые он вошел, т. е. они реагируют на его присутствие; он материализует электрические действия, например, электрическое притяжение. Сам заряд, если хотите, назовем его электрическим жидкостью, уже перестает быть интересным.

Техник следит лишь за местами прохождения потока электростатической индукции и, зная, как реагируют различные материалы на этот по-

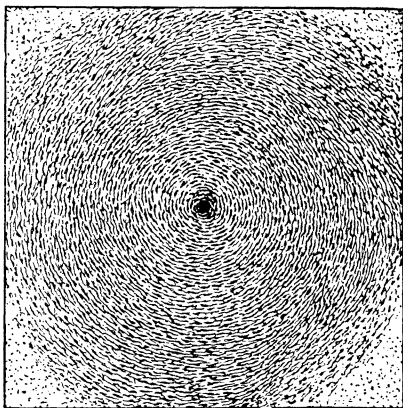
ток, определяет его электрические действия. Эти материалы должны быть изоляторами; электростатический поток индукции проходит только по изоляторам, и то свойство, которое определяет их поведение в электростатическом потоке, называется их диэлектрическим свойством.

Попадая в проводник, поток электростатической индукции исчезает, обрывается на его поверхности, образуя на ней «индуцированный» заряд. Если в конденсаторе

(фиг. 32) мы приставим к правой обкладке металлическую пластинку, поток индукции исчезнет в толще этой пластинки: положительное электричество передвинется по проводнику по направлению к отрицательному. Если соединить пластинки конденсатора проводником, он разрядится, поток индукции исчезнет совсем.

Таков же был фарадеевский подход и к магнитному притяжению. От магнитного полюса (северного) распространяется по окружающей среде «поток магнитной индукции». Все действия этого полюса суть результаты прохождения магнитного потока сквозь различные материалы: эти последние различаются между собою своею «магнитной проницаемостью», своею различной реакцией на тот физический процесс, который представляет собою магнитный поток. Магнитная сила притяжения, подобно электрической, оказывается зависящей от свойств среды. Куски железа и

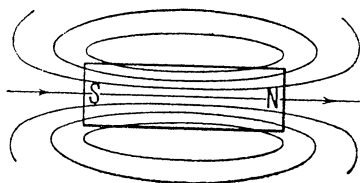
других магнитных материалов намагничиваются, когда сквозь них проходит поток магнитной индукции, и в окружающем их пространстве к магнитным силам, создаваемым намагничивающим их потоком, прибавляются магнитные силы от появившихся на них полюсов. Поток магнитной индукции, как мы уже знаем (опыт Эрстедта), появляется и около проводника, по которому течет ток, — оно окружает проводник кольцеобразно (фиг. 33).



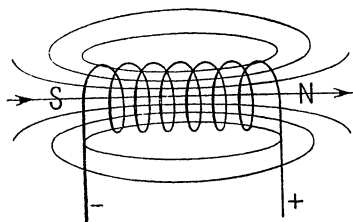
Фиг. 33. Магнитное поле вокруг проводника, по которому течет электрический ток

Однако в магнетизме имеются важные особенности.

Во-первых, не существует такого материала, который бы поглощал магнитный поток, прерывал бы его, как проводники — электрический. Для магнитного потока нет проводников. Нередко говорят: «магнитная проводимость», «магнитопровод», но — это за неимением более



Фиг. 34. Поток магнитной индукции от постоянного магнита



Фиг. 35. Поток магнитной индукции от обмотки электромагнита

подходящих слов; во всяком случае в этих выражениях «проводимость» и «провод» обозначают лишь места, через которые проходит магнитный поток, но отнюдь не такие, в которых он исчезает.

Во-вторых, всякий магнит (фиг. 34) или электромагнит (фиг. 35) имеет два полюса; через южный поток возвращается обратно в тело, с которого он начинается; внутри этого тела поток не может быть прерванным, исчезнувшим, из какого бы материала оно ни было сделано, как это мы только что видели; значит, магнитный поток

проходит его насквозь (фиг. 34 и 35) и таким образом возвращается к месту своего начала. Магнитный поток всегда замкнут. Не существует концов магнитного потока, которые мы, подобно концам электрического, могли бы считать местами, где скапливается магнитная жидкость (магнитные заряды). По фарадеевской теории магнетизма, магнитной жидкости вовсе не существует — существует только поток! Таким образом представление о

потоке индукции для магнетизма получает исключительно важное значение.

В электротехнике все проектирование и понимание действия дигамашин, электродвигателей, трансформаторов и до настоящего времени основывается на ясном представлении о магнитном потоке индукции. Первая научно-техническая книга на русском языке по фарадеевской теории (Боргмана) так и называлась «Магнитный поток».

### Действие через среду

Меня могут спросить, почему я говорю: «поток индукции», а не «силовой поток». Я согласен с теми, которые утверждают, что эти два выражения обозначают не одно и то же и что они оба необходимы при изложении фарадеевских взглядов: он рассматривал электрическое и магнитное поле с двух сторон— со стороны количества и со стороны качества.

Поясним это на электрическом примере. Поток электрической индукции измеряет то, что раньше определяли, как количество электричества (например, число электронов). Заряду  $Q$  на проводнике соответствует  $4\pi Q$  линий (или точнее сказать трубок) потока индукции в окружающем пространстве. Тогда на расстоянии  $r$  через единицу поверхности, как мы указывали, проходит

$$\frac{4\pi Q}{4\pi r^2} = \frac{Q}{r^2}$$

линий индукции. Такова густота потока индукции. Это его количественная мера.

Но каково его действие, например, на единицу противоположного электричества, помещенную внутри вещества, например— в масле, в воде и пр. — на расстоянии  $r$ ? Какова там его «качественная» мера? Это действие есть уже действие среды, окружающей единичный заряд; среда приобрела свойство действовать на него, потому что по ней

проходит поток индукции, — это ее реакция, как мы говорили выше. Различные диэлектрики окажут различное действие сообразно материалу, из которого они сделаны; это и определяется их «диэлектрической постоянной»  $\epsilon$ . Условились считать так: чем слабее действие электрического поля, чем слабее его «качество» внутри вещества, тем больше  $\epsilon$ , т. е., выражая это математически, (см. формулу 13):

$$f_1 = \frac{Q \times 1}{\epsilon r^2}. \quad (14)$$

По сравнению с законом Кулона здесь введено существеннейшее изменение. Сила  $f_1$  зависит не от расстояния только, но и от состава среды. Заряд  $Q$  действует теперь не сам, но через посредство среды.

Если мы будем характеризовать поле с качественной стороны, силами  $f_1$  в различных точках, мы будем говорить о силовом потоке.

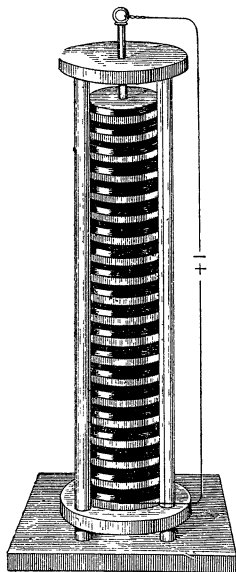
Все это в полной мере относится и к магнитному полю.

Нечто в этом смысле Фарадей подозревал и относительно земного притяжения. Для решения вопроса он соорудил какую-то экспериментальную установку. Но, видимо, опыт решительно не удался; Фарадей никогда о нем не рассказывал. И все новейшие попытки доказать значение среды при ньютоновском притяжении неизменно оканчивались неудачей.

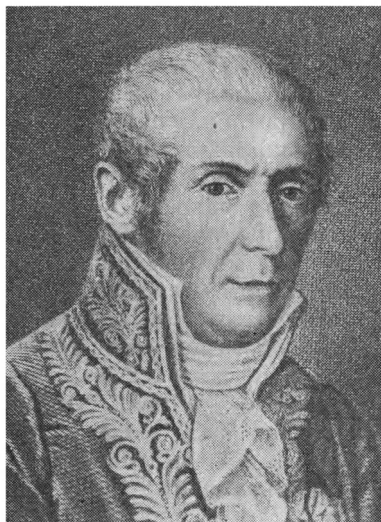
## Электрические генераторы XIX века

Первая половина XIX века была особенно богата открытиями. В 1800 г. появился вольтов столб (фиг. 36) — батарея «элементов», открытых А. Вольтою (фиг. 37) несколько раньше. И наш В. В. Петров соорудил такой столб из 4200 медных и цинковых кружков; несколько из этих кружков сохранились по настоящее время в Военно-медицинской академии. С таким мощным генератором Петров получил разряд между угольными

электродами, удививший его своею яркостью; «темный покой довольно ясно освещен быть может», — писал Петров в 1802 г. Действительно, электрическое освещение было впервые введено с помощью «вольтовых дуг» (80-е годы).



Фиг. 36. Вольтов столб



Фиг. 37. Алессандро Вольта

С помощью генератора Вольты было получено электрическое разложение сложных химических веществ, и Фарадей дал свои знаменитые законы электролиза. С тем же генератором Эрстедт обнаружил магнитное действие электрического тока, и, наконец, в 1831 г. с помощью тех же «элементов» Вольты Фарадей открыл электромагнитную индукцию и указал новый принцип устрой-



ства более совершенного генератора электроэнергии — динамомашины.

С появлением генератора Вольты, а затем индукционных генераторов, вопрос о природе электричества отступил на второй план до конца XIX века; слишком много интересного и непосредственно приложимого к жизни обнаружилось в явлении электрического тока! Единственно, что занимало еще умы электриков в области этого вопроса, — это было доказательство тождественности электричества, получаемого от «элементов» и через электромагнитную индукцию, с тем старинным электричеством, которое получилось от трения. И Фарадей неоднократно доказывал это на своих опытах. О тождестве заключали из того, что электричество, от какого бы источника оно ни получалось, всегда способно произвести одни и те же явления, например, электрическую искру. Несмотря на многочисленные доказательства этого рода, многие авторы относились к отождествлению с некоторой осторожностью. Не говоря уже о Петрове, который называл электричество от вольтова столба «гальвани-вольтовой жидкостью», даже во второй половине XIX века во многих учебниках иностранных и русских можно было видеть, что учение об электричестве от «элементов» выделяется в особую главу под названием «Гальванизм».

## IV. Свет и электромагнитные волны

### Э л е к т р о э н е р г и я

Наше широкое понятие об энергии и ее превращениях началось с 40-х годов прошлого века. Сначала казалось, что это — фантазия увлекающихся людей; солидные ученые не понимали и не соглашались, что энергия разлита по всему миру, принимает различные формы, преобразуется, всегда оставаясь энергией, всегда сохраняясь в своем количестве. К 60-м годам это стало общепризнанным.

Тепло перестало быть «теплородом» (тепловая жидкость) и стало пониматься как одна из форм энергии; начались рассуждения об электрической, магнитной и световой формах энергии.

Наличие энергии в каком-либо предмете указывает на то, что над ним была совершена работа; при этой работе энергия работника перешла в новую форму энергии — накопилась. И эта новая энергия, через новую работу, может превращаться опять в иную форму или в несколько новых форм. Преобразования энергии и совершаемая работа подсчитываются на основании закона сохранения энергии. Понятие об энергии, связанной с работой, дало возможность объяснить и подсчитать неисчислимое количество явлений в их взаимной связи. Паровая техника, гидравлика, транспорт стали на твердом основании. Мало того, закон сохранения энергии, по мнению Ф. Энгельса, «служит основанием более глубокого исследования самого процесса превращения, того великого основного процесса, в познании которого заключается все познание природы» <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ф. Энгельс, Анти-Дюринг. Госиздат. 1931, стр. 9.

Каждый раз, когда мы получаем электрический заряд, возникает электроэнергия. При этом работу, равную возникшей энергии, совершает генератор, получающий как раз столько же энергии на свое питание. Наша электроэнергия может теперь совершить работу, либо сдвигая пластинки конденсатора (фиг. 32) (получается кинетическая энергия пластинок), либо нагревая проволоку, если мы ею соединим пластинки (тепловая энергия), либо разлагая соли или кислоты (химическая энергия).

Где находится электроэнергия, пока конденсатор еще не разряжен?

Ответ: «В конденсаторе» — уклончивый ответ, и, вероятно, сам отвечающий при этом думает: «В пластинках; в электричестве, которым они заряжены». Действительно, раз они связаны взаимным притяжением, могут двигать одна другую, они и обладают энергией — энергией связи.

Так, камень, поднятый над полом, обладает «потенциальной энергией»; она выявляется в его энергии падения (кинетической).

Фарадей не имел нашего понятия об энергии, хотя часто был очень близок к нему, когда вдумывался в то, что происходило пред ним в его опытах. Мы не знаем, что Фарадей ответил бы на наш вопрос. Ближайшие его сверстники, физико-математики, восхищались его открытиями, видоизменяли его опыты, старались применить их, подводили под них свою теорию, применяя уже, и даже с необычайным блеском, закон превращения и сохранения энергии. Но они ни в какой мере не были способны мыслить по-фарадеевски, потому что они были физико-математиками. Для них было неприемлемо самое главное, на чем основывался Фарадей. «Физический смысл силовых линий» может интересовать, полагали они, только человека, не владеющего математикой. Для умеющего пользоваться математическими форму-

лами эти формулы сами по себе достаточны и с исчерпывающей полнотой описывают явление.

Для не умеющего читать формулы, действительно, приходится конкретизировать математические выражения, делать осязаемыми геометрические линии, представляя их в виде стержней или веревок, а площади и объемы, — складывая квадратики из бумаги или деревянные кубики. Для умеющего мыслить формулами не нужны эти приемы обучения.

Но не для пояснения или обучения Фарадей искал «физический смысл силовых линий». Он полагал, что, если математики прекрасно описывают электрическое поле своими формулами, это не значит, что в самом реальном, материальном поле ничего нет; он полагал и доказывал в течение всей своей жизни, что не признавать ничего физического за геометрическим построением «силовых линий» — ошибочно и это ведет к дальнейшим ошибкам; и, наоборот, желая нащупать то реальное (поток индукции), что заполняет электрическое или магнитное поле (и может быть описано формулами), он открыл существование диэлектрической постоянной, открыл электромагнитную индукцию и действие магнита на луч света (так называемое магнитное вращение плоскости поляризации).

Однако отчетливо связать образование потока индукции с затрачиваемой на это работой Фарадею тем не менее не удалось. Только более углубленное понимание законов превращения энергии дало нам возможность исчерпывающим образом ответить на вопрос, поставленный в заголовке этого раздела. Это было сделано Кларком Максвеллом.

## Электромagnetизм

В конце 60-х годов начал слагать свою теорию Максвелл (фиг. 38). Это был математик, с юношества выказавший большие математические способности. Он родился

в год открытия электромагнитной индукции (1831) и в своем зрелом возрасте видел Фарадея на вершине его славы. Это был очень живой ум; он живо заинтересовался оригинальными взглядами Фарадея и поставил себе задачей изучить их близко и во всей полноте. Максвелл видел, что учение Фарадея резко отличается от представлений, которыми пользовались физико-мате-



Фиг. 38. Д. К. Максвелл

матики кулоновского направления; но в этом 30-летнем математике не было и тени презрения к фарадеевским способам мышления. Наоборот, он решил начать изучение электрических и магнитных явлений исключительно по Фарадею и лишь потом перешел к авторам противоположного лагеря.

В результате этой работы появилось (1873) знаменитое сочинение Максвелла: «Трактат об электричестве и магнетизме», в котором Максвелл решительно и безоговорочно объявляет себя на стороне Фарадея. Он, так вчи-

тавшийся в сочинения Фарадея, отмечает, что Фарадей мыслил, как математик, — «как математик» — по исчерпывающей определенности введенных им понятий и логической последовательности делаемых им выводов. Фарадею не доставало только умения облечь свои мысли в математические формулы, и Максвелл изложил в своем «Трактате» взгляды Фарадея на математическом языке.

Это было большим событием. Теория Фарадея получила

несравненно более точную формулировку. Не только бессмертные открытия Фарадея, но и его мысли, его философия стали содержанием науки XIX века.

Разница между сторонником Фарадея и его противником перестала быть похожей на различие между недоучкою и человеком, математически образованным; для чтения и понимания книги Максвелла нужен большой математический багаж. Разница эта заключалась в одном: признает ли человек, что может быть взаимодействие между несоприкасающимися телами, «перелетающее» через расстояние, или не признает этого и считает, что такое взаимодействие может быть только передаваемо через среду, от точки к точке.

После Максвелла прошли целые десятилетия, в течение которых его теория, или, как часто выражаются, «фарадеев-максвелловская теория» разъяснялась, прорабатывалась, расширялась и углублялась.

Я был свидетелем многих моментов этого исторического процесса и могу сформулировать такое общее впечатление: при элементарном изложении фарадеевские взгляды проще дают большой объем сведений; при математическом изложении — проще кулоновская теория дальнего действия. К ней прибегают и теперь для ускорения и упрощения выводов, но она чаще заставляет, так сказать, не договаривать, и в ней чувствуется отсутствие той близости к реальному материальному миру, какая несомненно видна в книге Максвелла.

Понятие о потоке индукции у Максвелла поставлено в основание изложения. И на наш вопрос, где находится энергия заряда, он, можно сказать, от имени Фарадея, определенно и подчеркнуто отвечает: в том объеме, который заполнен потоком индукции. Не в пластинках конденсатора (фиг. 31 и 32) заключается электроэнергия, но в изоляторе, находящемся между ними.

Максвелл указал даже, как вычислить плотность энергии в электростатическом поле, т. е. количество энергии,

в каждой единице его объема: оно оказалось равно произведению густоты потока электростатической индукции на густоту силового потока (создаваемого ею в среде), деленному на  $8\pi$ . То же самое относится и к магнитному полю.

Вот эта-то, вычисленная Максвеллом, распределенная в пространстве, окружающем наэлектризованное тело, энергия и придает потоку индукции реальность, характеризующую воззрение Фарадея. Она делает электрическое (а равно и магнитное) поле реальным не только в среде, но и в пустоте.

Он показал и теоретически, и экспериментально, что при разряде конденсатор начинает действовать на магнитную стрелку, помещенную между его обкладками, а в проводниках, помещенных в изменяющемся магнитном поле, должны обнаруживаться электрические заряды.

После исследований Максвелла стало невозможным думать раздельно об электричестве или о магнетизме. Эти две главы из старых учебников физики слились в одно учение «электромагнетизм», которое вскоре поглотило, включило в себя, и целый ряд других отделов, и, в первую очередь, учение о свете.

Мало того, Максвелл установил удивительную математическую связь между энергией электростатического поля и энергией поля магнитного, которая исчерпывающим образом объяснила, почему при движении проводника в магнитном поле должна создаваться электрическая энергия и почему при движении электричества по проводнику непременно должен образоваться поток магнитной индукции. Он свел это к процессу преобразования электрической энергии в магнитную и обратно; за счет убывания первой растет вторая; и это происходит в том самом пространстве, в том объеме, который пронизывают линии магнитной и электростатической индукции.

## Распространение электромагнитного поля

В истории развития нашего знания электричество и свет нередко связывались. Древнейшие примеры этого: янтарь (по-гречески «электрон») — первое тело, электризовавшееся от трения, — в то же время считался обладающим удивительным свойством впитывать в себя лучи Солнца; долгое время держалось мнение, что магнит размагничивается под действием красных лучей света и т. п.

Это, конечно, только курьезы по сравнению с великим принципом, который был высказан Максвеллом в его «Трактате об электричестве» относительно света. К тому времени прошло уже около 50 лет, как была отвергнута ньютонова теория истечения света, считавшаяся самым верным учением о световых явлениях в течение 150 лет; лишь очень немногие физики за это долгое время высказывались против нее; к ним относятся два петербургских академика, Ломоносов и Эйлер. Но в первой четверти XIX века уже все стали на сторону волновой теории: свет есть волны, распространяющиеся от источника света со скоростью (в «пустоте») в 300 000 км/сек.

Так как никто не знал предметов, по которым волны распространялись бы с такою чудовищною скоростью, а также не знали и вещества, которое бы непрерывно, сплошь заполняло все междузвездное и межуатомное пространство, то было признано нео ходимым предположить его существование; оно было н зв но старинным аристотелевским словом «эфир». По явлениям света старались определить, изучить свойства этого всемирного или «светоносного» эфира. Он заполняет собою не только междузвездную пустыню, но и ту пустыню, которая находится между молекулами, атомами и составными частями атома всякого тела; этот межуатомный эфир и является средою, по которой распространяется свет, проходящий сквозь тела, например, воздух, стекло.



Максвелл установил, что всякое изменение (колебание) электрического поля (изменение его энергии) вызывает вокруг себя изменяющееся магнитное поле, которое, в свою очередь, вызывает изменяющееся электрическое поле, и все это распространяется во все стороны, от места первоначального изменения, в виде так называемой «электромагнитной волны». Изменение магнитного поля (например, появление его и постепенное нарастание около электромагнита, через обмотки которого пропускают все более и более сильный ток) происходит не мгновенно во всем пространстве. Магнитной энергии нужно время, чтобы заполнить его с определенной плотностью. То же можно сказать и об электрическом поле. Следовательно, превращение магнитной энергии в электрическую и обратно может произойти лишь постепенно, плавно, хотя и с изумительной быстротой. Поэтому естественно явился вопрос: с какой же скоростью происходят эти процессы в электромагнитном поле, когда по нему пробегает волна. Максвелл имел основание утверждать, что электромагнитные волны распространяются со скоростью света, и действительно он показал на ряде примеров, что, если вычислить скорость, с какой может меняться электростатическое поле в каком-либо прозрачном диэлектрике при движении зарядов на его поверхности, она оказывается совпадающею со скоростью света в этом прозрачном теле. Из этого он заключил, что свет — это электромагнитные волны; такое утверждение и есть то, что мы выше назвали великим принципом.

По Максвеллу, электромагнитная волна есть колебание того же светоносного эфира.

Понятие «электромагнетизм» стало очень широким; под него подошли все световые явления. И с другой стороны, все, что мы знаем о свете, было перенесено на электромагнитные процессы.

Прежде всего — светоносный эфир. Согласно принципу Максвелла, потоки индукции электростатической

и магнитной проходят в эфире; и если, например, тело неспособно поддерживать в себе электростатическую индукцию, т. е. является проводником, не изолирует, оно не может пропускать сквозь себя и световые волны, т. е. должно быть непрозрачно (металлы, уголь). Такое тело не может поддерживать в себе эту игру перехода электростатического потока в магнитный и обратно, какой представляет собою электромагнитная волна; таков уж эфир в его межуатомных промежутках!

Такое понимание связи между проводимостью и непрозрачностью (удивительной связи!) представляет собою эффектное следствие теории Максвелла.

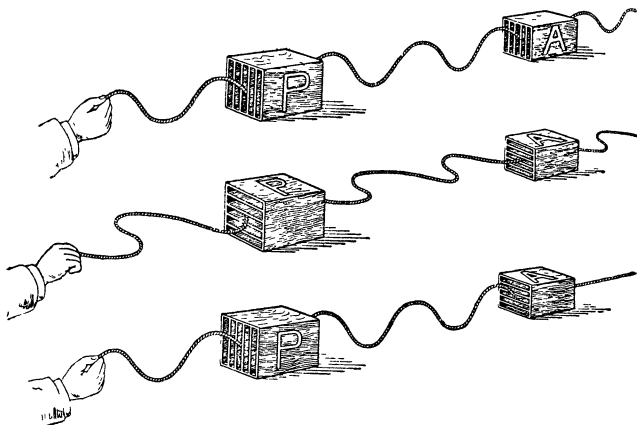
То соображение, что потоки индукции образуются в эфире, высказывавшееся уже и самим Фарадеем, сделало эти потоки более реальными и в то же время еще более приблизило эфир к представлениям физиков: он стал, так сказать, менее гипотетичен; московский проф. А. Г. Столетов утверждал (90-е годы), что это наиболее знакомое нам из всех веществ в природе, а Д. И. Менделеев уже искал для него место в своей всеохватывающей периодической системе, как он находил в ней место для всех новооткрываемых химических элементов.

Нельзя ли на основании законов распределения электромагнитной энергии поближе ознакомиться с характером того возмущения в эфире, того толчка, который мы воспринимаем, как световую волну?

### Давление света

Лучи света давят на поверхность того тела, на которое они падают; они заставляют его удаляться от источника света. Так выходило по ньютоновской теории истечения; обычное давление, например, водяной струи или струи ветра может служить простым пояснением этой мысли. Примитивным наблюдателям даже казалось, что они наблюдают действие светового давления (повышение уровня воды в р. Дунае при восходе Солнца).

Пионер волновой теории света, современник и оппонент Ньютона, Гюйгенс так и предполагал, что в луче света происходят колебания вдоль луча (продольные колебания — сжатия и расширения), как в звуковых волнах в воздухе; такие волны производят давление на препятствие, например, на барабанную перепонку уха; оно служит лучшим способом измерять силу звука. То же



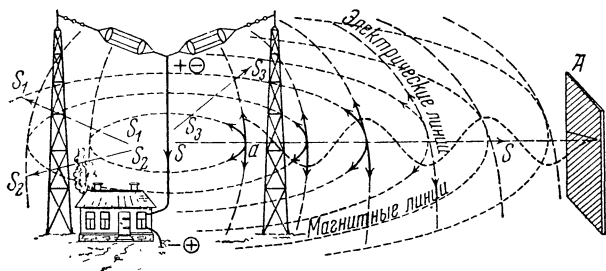
Фиг. 39. Поперечная волна распространяется вдоль резинового шнура — она «поляризована»

получается, если считать световую волну продольной, в которой сила действует по направлению ее распространения.

Но наша современная волновая теория света, основанная в начале XIX века, исходя, главным образом, из явлений поляризации света, твердо установила, что световая волна не может быть продольной. Она скорее похожа на волну, которая побежит по резинового шнуру, конец которого мы рукой приведем в колебательное движение (фиг. 39). Электрические и магнитные силы в ней направ-

лены перпендикулярно лучу. В ней происходят сдвиги и срезы поперек луча, а не продольные сжатия. Такая волна не производит давления; для пояснения можно напомнить, что тяжелый предмет, повешенный на гвоздь, «срезает» гвоздь, но не вдавливают его в стену перпендикулярно к ее поверхности.

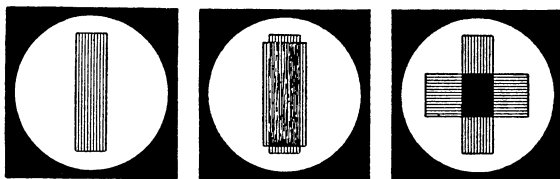
Только после перехода на точку зрения Максвелла волновая теория вновь стала предсказывать световое давление. В нескольких словах остановимся на этом: электромагнитная волна поперечна в том смысле, что электриче-



Фиг. 40. Схема распространения поперечной электромагнитной волны от радиостанции — направление электрических и магнитных силовых линий всегда перпендикулярно к линии распространения

ские и магнитные поля — потоки электрической и магнитной индукции, которые несутся вдоль луча  $S$ , — сами перпендикулярны этому лучу. На фиг. 40 изображено электромагнитное поле радиостанции в точке  $a$ : через мгновение оно возникает в другой точке, правее  $a$ , и т. д., передвигаясь поперек своего направления. Очевидно, что при одном и том же направлении луча, направление потоков индукции может быть разным в зависимости от направления антенны. Это и проявляется у световых волн в виде так называемой поляризации света, когда ему приходится проникать сквозь кристалл турмалина (фиг. 41),

обладающий разной прозрачностью для потоков разного направления благодаря своему строению и расположению в нем молекул. Поэтому теория Максвелла вполне соответствует тому, что необходимо для объяснения явлений поляризации. Но у линий электростатической, а также и магнитной индукции существует еще как бы взаимный распор в стороны; поток индукции всегда, сколько это возможно, расширяется. Это так просто и убедительно показывают фиг. 7, 27, 28, 33, 34 и 35. Вот этот-то распор и целый ряд других свойств поля заставили Максвелла признать, что, хотя свет представляет



Фиг. 41. Турмалиновые кристаллы, сложенные в разных направлениях

собой поперечные колебания, он все-таки должен давить на препятствие (как, например, давит на  $A$  электрическая волна) (фиг. 40). Таким образом вышло, что этим давлением, если оно существует, устанавливается справедливость электромагнитной теории света и опровергается простая теория «механических» поперечных колебаний в эфире. Световое давление очень мало; даже яркий солнечный свет давит на площадку в  $1 \text{ см}^2$  с силою всего лишь  $6 \cdot 10^{-5}$  миллиграмма.

Наш искуснейший экспериментатор XIX века П. Н. Лебедев (фиг. 42) после долгих попыток проделал этот тонкий опыт; он доказал, что свет оказывает давление, по величине согласное с вычислениями Максвелла. Электромагнитная теория света получила веское подтверждение.

И в то же время свет, который мы привыкли считать только греющим, фотографирующим, действующим на наш глаз, впервые произвел на опыте механическое давление (поворот чрезвычайно миниатюрной вертушки, подвешенной на тончайшей нити). как механический двигатель (фиг. 43).

Опыт, проделанный так успешно П. П. Лебедевым, доставил ему большую известность между физиками; вскоре он был повторен в Англии. И сам П. Н. Лебедев был очень удовлетворен своим успехом; «для такого опыта стоило жить», — говаривал он между своими близкими.

Световое давление, можно сказать, дополняет ньютоновское притяжение; оно представляет собою ту противоположность, которую согласно диалектике природы требует всемирный закон тяготения.

Конечно, при этом нужно понимать, что сила тяготения, с которою, например, наше Солнце собирает, соединяет в одно целое все планеты нашей системы, не зависит от его температуры; тогда как давление света, излучаемого Солнцем, отбрасывающее все тела от Солнца, зависит от яркости его свечения, т. е. от его температуры.

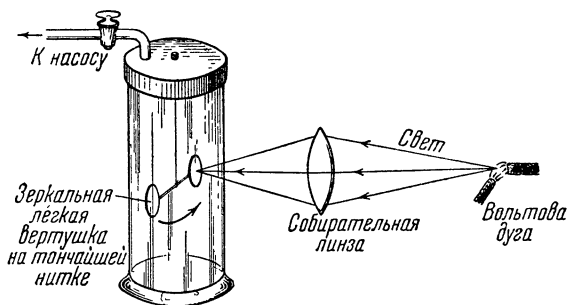
Вычисление показывает, что с уменьшением размеров притягиваемого тела световое давление начинает сравни-



Фиг. 42. П. Н. Лебедев

ваться по величине, а затем превышает ньютоново тяготение. Этим может быть объяснено отталкивание кометных хвостов от Солнца.

Вот неожиданный на первый взгляд вывод из теории Максвелла, бросающий новый свет на космические процессы. Опыт светового давления производится в масштабе вселенной!



Фиг. 43. Схема опыта П. Н. Лебедева со световым давлением

### Масса и энергия

Если выбрать между двумя теориями света—механические поперечные колебания и колеблющееся электромагнитное поле, то существование светового давления заставляет отбросить первую и признать вторую. Но если, наоборот, не задаваясь наперед никакою теориею, начать с того, что существует давление света, и испросить себя, что такое свет, то напрашивается прежде всего ответ: свет есть струя, движущаяся масса — соображение, близко напоминающее ньютонову теорию истечения. Современные физики не отбрасывают этого здравого вывода, все совершенствуя в то же время «электромагнитное» учение о свете.

Мы полагаем, что чем с более различных сторон мы

подходим к явлению, тем лучше понимаем его многогранную реальность.

Да, световую энергию, эту распространяющуюся со скоростью света энергию электромагнитного поля, можем действительно рассматривать как физическую материю: она обладает массой — «инертностью», которую мы легко узнаем, разделив энергию на квадрат скорости ее движения, т. е. на  $(3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек})^2$ . Это пока еще не значит, что мы отождествляем энергию и массу; эти два понятия остаются совершенно различными, как и были. Это значит, что мы в энергии отыскиваем массу, определяем степень ее инертности.

Такое утверждение мы теперь уже позволяем себе понимать совсем широко, отнюдь не ограничиваясь одной световой энергией. Например, такой расчет: в 1935 г. всеми электростанциями СССР была выработана электроэнергия в  $32 \cdot 10^9$  калорий. Она включает в себе массу приблизительно в 1 кг. Следовательно, мыслимо, пожертвовав одним килограммом инертного вещества, получить всю электроэнергию нашего Союза в размере 1935 г. Так мы можем мыслить, но не можем этого сделать, потому что лишь в очень неясной форме соображаем, как это в природе делается, т. е. как массу какого-либо тела можно превратить в массу, отыскиваемую нами в энергии. Разработка этого вопроса — величайшая задача техники будущего.

Когда мы говорим о массе потока световой энергии, мы говорим о массе, скрываемой нами в электромагнитном поле. Электрический и магнитный потоки индукции, связанные друг с другом, при своем изменении и распространении, по Максвеллу, представляют собой движение энергии и, следовательно, обладают массой. Они материальны.

Вот к какому существенному выводу пришли мы относительно фарадеевских «физических силовых линий». Без этого результата мы имели бы энергию (электромагнитную) без материи.



## Световой резонанс

Световым давлением не исчерпываются основные свойства света. Вторым таким свойством является «световой резонанс».

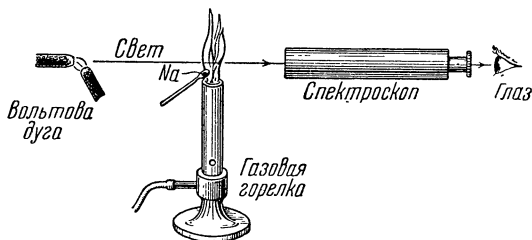
Резонанс давно известен в области звуковых явлений; предмет, способный звучать в известном тоне, приходит в звучание, когда на него идут звуковые волны с частотой, соответствующей этому тону — энергию этих волн он поглощает; эти волны его раскачивают. Волны с другой частотой проходят мимо, не поглощаются; они не вызывают резонанса. Всякий предмет, способный колебаться и при этом накапливать запас колебательной энергии, например, качели, способен поглощать энергию лишь своей частоты. Качели раскачаются только тогда, когда частота толчков будет как раз совпадать с частотой их качаний, — это известно всякому.

Оказалось, что совершенно так же вещество (разреженный газ или пар), способное светиться известным цветом, испускает само этот свой свет всякий раз, когда на него падают световые волны лучей именно этого цвета. Оно сначала поглощает падающую на него энергию световой волны — накапливает ее, а потом выбрасывает, делаясь само источником света.

Явление светового резонанса можно наблюдать таким образом: зажигается горелка (фиг. 44), в которую насыпана поваренная соль; глазом рассматривают спектр испускаемого горелкой света; спектр получается с помощью спектроскопа. Спектр оказывается очень простым; в нем нет ни красного, ни зеленого, ни голубого и фиолетового цветов, а только желтая линия (натровое пламя). Теперь зажигают вольтовую дугу, т. е. гораздо более яркий источник, расположенную так, как показано на фиг. 44. Спектр вольтовой дуги имеет все цвета. Но в обстановке данного опыта в нем не будет хватать желтого: глаз наблюдателя увидит сплошной яркий спектр

с черной полоской между красным и зеленым, где должен быть желтый свет. Стоит только потушить дугу или заслонить ее свет, наблюдатель опять увидит вместо богатого спектра с черным перерывом одну желтую полосу (обращенный спектр).

Этот опыт показывает, что натровое пламя из всего разнообразия световых волн поглощает только те, которые само может испускать, на которые оно (т. е. атомы натрия в пламени) резонирует.



Фиг. 44. Схема опыта обращения спектра натрия

Тут является вопрос: если атомы натрия раскачиваются желтым светом вольтовой дуги, почему же мы не видим их желтых лучей? Без дуги мы их видим, хотя атомы натрия светят тогда сами по себе, от одной своей энергии пламени, не получая добавочной энергии резонанса.

Ответ: вольтова дуга во много тысяч раз ярче натрового пламени. Рассматривая спектр дуги, мы прикладываем (адаптируем) наш глаз на яркий свет, и потому он не воспринимает слабого света пламени; без дуги глаз адаптирован на слабый свет пламени и воспринимает его. Что же касается до натриевого света, возбуждаемого дугой, то он может быть и ярким, но излучается пламенем во все стороны, а не только по тому направлению, по которому распространяется свет дуги, и та часть его энергии, которая попадает в спектроскоп и затем в глаз,

мало прибавляет к свету натрия, который, как я только что сказал, уже не воспринимается глазом. Однако мы можем увидеть его, рассматривая пламя сбоку в другой спектроскоп, так чтобы свет от дуги не попадал в глаз непосредственно.

Описанный опыт очень показателен и глубоко интересен, однако наладить его не так просто, как это описано. Но в самой природе это явление происходит в грандиозном виде; нужно только суметь уловить его. Дело в том, что спектр Солнца, такой же сплошной, как и спектр вольтовой дуги, при ближайшем рассмотрении оказывается испещренным множеством тонких черных полосок. Является предположение, что эти черные линии получаются потому, что свет от солнечной поверхности проходит сквозь слой, облетающий солнечный шар и состоящий из различных газов, так называемый обращающий слой. Эти газы, если бы мы наблюдали только их свет, дали бы как раз те цвета, которые отсутствуют в солнечном спектре. Но как это сделать?

Это делается само собой во время полного солнечного затмения, когда Луна только что покрывает весь диск Солнца, но еще не покрывает обращающего слоя; этот момент непременно будет, так как обращающий слой облетает Солнце и, следовательно, как бы он ни был тонок, выступает за его края. Если уловить этот момент, и если верно наше объяснение черных линий резонансом света, то мы увидим черный фон и на нем столько ярких линий, сколько черных в солнечном спектре (фиг. 45).

Лучше, конечно, запечатлеть это поразительное явление на фотографической пластинке, чем наблюдать глазом. Часто нет возможности, при всей серьезности и опытности наблюдателя, ручаться, что он действительно видел то, что с великой страстностью хотел увидеть.

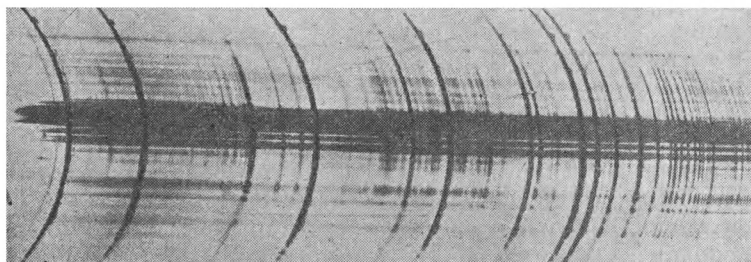
Первые фотографии обращенного солнечного спектра были получены в 1896 г. в нашей стране.

Я расскажу, как все произошло, не потому, что считаю

это особо важным событием; рассказ мой введет читателя в жизненную обстановку выяснения серьезного научного вопроса, близким свидетелем которой я был лично.

Полное солнечное затмение в 1896 г.

Наша общественность недавно была заинтересована большим астрономическим событием — полным солнечным затмением 19 июня 1936 г. На одну или две минуты земная природа в полосе затмения, днем, лишается сво-



Фиг. 45. Обращение спектра Солнца. — Фотография (негатив) края солнечного диска в момент затмения, сделанная при помощи спектрографа (видны выступы раскаленной атмосферы Солнца — «протуберанцы»). Снимок сделан в 1936 г. и совершенно подобен первому подлинному снимку, сделанному В. К. Лебединским в 1896 г., который утрачен.

его дневного светила. В экономике природы это событие отразится ничтожно мало, но небо, а отчасти и атмосфера — с первого мгновенья полной фазы и до конца ее — приобретают необычный вид и необычные свойства. Наблюдать это — центральная задача наблюдателей.

Облачность, туман в некоторой, а иногда и в полной мере могут сделать эту задачу невыполнимой для наблюдателя, остающегося на поверхности земли. Все приготовления, сборы, путешествие, установка приборов на

месте наблюдения, все труды и волнения до самого последнего момента перед затмением находятся перед опасностью полного срыва при неблагоприятной погоде.

Современная авиация обеспечивает почти полную независимость от этого фактора. Пользуясь ею, и в эти драгоценные минуты человек чувствует себя полным властелином в преследовании своей цели. Авиация дает возможность производить наблюдения на большой высоте, подняв наблюдателя со дна атмосферного океана.

Сорок лет тому назад, когда из Ленинграда (тогда Петербурга) 2/14 мая выехала далекая солнечная экспедиция, ни о какой авиации мы и не мечтали; и вступая в вагон московского поезда, конечно, нельзя было стряхнуть мысли: «А какова-то будет погода через 2 месяца 26 дней около полудня в селении Чекурском Восточной Сибири, в которое мы отправляемся?»

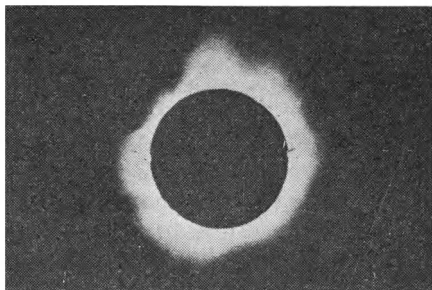
Наша экспедиция из 5 человек отправлялась двумя партиями. Астроном университета Н. А. Тачалов и я составляли первую партию; трое товарищей остались, ожидая получения из-за границы окончательной монтировки необходимых приборов. Нашей обязанностью было — подготовить все на месте наблюдения.

Железная дорога была в то время построена уже до Томска. 17 мая мы выехали из Томска в приобретенном там тарантасе. Мы ехали днем и ночью. Через 9 дней мы были в Иркутске. С 3 июня мы поплыли вниз по р. Лене на лодке; через двое суток мы смогли пересечь на пароход и 11/23 июня я высадился в Чекурском (около 8500 км от Ленинграда). Н. А. Тачалов на некоторое время задержался в Киренске для проверки хронометра; это был в то время последний на Лене телеграфный пункт.

Сколько раз случайные попутчики, лодочные гребцы, пароходная публика спрашивали: «Что же вы будете делать, если будет дурная погода?» Деловые люди смотрели на нас с оттенком укоризны, смешанной с жалостью: «Такие траты, потеря времени и труда, а результат —



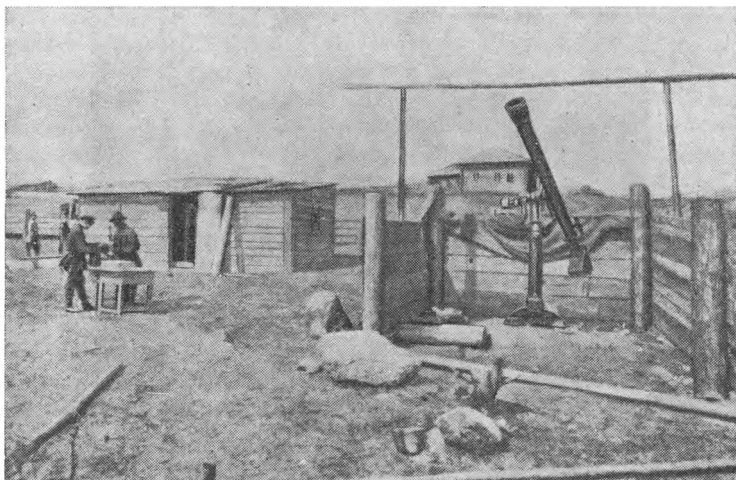
Фиг. 46. Вид на большой коронограф (на правом берегу р. Лены)



Фиг. 46а. Солнечная корона (1896) по фотографии А. Г. Вучиховского

в зависимости от глупого случая». — «Этого требует наука», — иногда отвечал я на недоуменные вопросы.

На следующий день по приезде я начал необходимые постройки, которых было три; самым затруднительным являлось сооружение на противоположном, правом гористом берегу Лены деревянной трубы (длиной около



Фиг. 46б. Наблюдательная станция на левом берегу р. Лены (слева видна камера, вделанная в стену сарая)

40 м) для коронографа (фиг. 46 и 46а). Ежедневно два раза переезжали Лену, имеющую в том месте ширину в 2 км. На левом, чекурском, берегу строили довольно большой сарай для так называемой призматической камеры (фиг. 46б), которая и должна была сфотографировать изображение солнечного спектра (фиг. 45 и 46б) и помост с навесом для экваториала.

Кочующие тунгусы, когда приближались со своими

оленьими стадами к Чекурскому, интересовались и нами, и нашими постройками, и целью нашего приезда; один молодой тунгус искренне и громко расхохотался, узнав, откуда мы и зачем мы приехали, и, как бы чувствуя потребность вернуться к реальности, очнувшись от сна, стал рассказывать о том, как ему хочется поскорее вернуться в тайгу. Другой тунгус, старый, вдумчивый, с философским складом ума, объявил мне, что он много раз видел солнечное затмение («кюн такара»). Но известно, что в среднем в данной местности затмение повторяется лишь через 200 лет; он, видимо, считал затмением внезапную густую дождевую или снежную тучу. Молодежь из более развитых выражала удивление, как это мы, хотя бы и «улахан тойоны» (большие люди), знаем, когда произойдет затмение; и мне с новой, горькой, стороны представлялся столь возможный случай неблагоприятной погоды; при большой облачности эффект полного солнечного затмения получается очень слабым; при некоторой недоверчивости легко может показаться, что затмение «не состоялось». И тогда я, молодой последователь науки, казавшийся себе ее проводником, в умах окружающих представился бы обманщиком или глупым, легковверным затейником. Я старался предупредить эту возможность, объяснить мощь науки; переводчиками для меня были казак, а в более трудных случаях — местный учитель М. В. Попов; он очень любил свое учительское дело. Один из его учеников с большим одушевлением декламировал наизусть стихи Пушкина, а это было немалым достижением учителя: отцы его учеников, хотя и русские по происхождению, совершенно забыли русский язык и говорили по-якутски (селение Чекурское было основано в конце XVIII века).

К середине июля мои постройки были закончены. Но мои товарищи — А. Л. Гершун, Ф. И. Блумбах и механик Ган — еще не приехали. Оказалось, что последний элемент оборудования экспедиции — чувствительные фо-



топластины прибыли из-за границы лишь 11 июня; поэтому вторая партия выехала из Петербурга 12 июня, на другой день моего прибытия на Чекурское. Ее переезд был труднее нашего; она везла с собою около двух тонн инструментов, закупоренных в ящиках.

К нервующему ожиданию приезда товарищей, к мысли о возможности их опоздания присоединилось неожиданно обнаружившееся тревожное обстоятельство. В нашей местности долгое время стояло ведро; вследствие этого к концу июля кругом нас загорелась тайга; лесные пожары («палы») охватывали полукольцом селение Чекурское. Один раз огонь подошел так близко, что пришлось всем жителям мобилизоваться на борьбу с пожаром. Обычно в воздухе лишь слегка чувствовался запах гари, но весь свод неба целиком был молочно-голубоватый; солнце казалось медно-красным диском; на него можно было спокойно смотреть незащищенными глазами. Местные жители говорили, что это явление повторяется ежегодно. Нам при отъезде были сообщены приблизительные метеорологические данные для среднего течения Лены, но такое закрытие Солнца на целый день дымовой завесой осталось совершенно непредусмотренным.

Можно представить себе впечатление товарищей, прибывших, наконец, 20 июля (1 августа) к вечеру, за 8 дней до затмения. Они уже к концу своего путешествия на пароходе вошли в полосу палов и с тревогою смотрели на красный диск полуденного Солнца.

Приступили к установке и окончательной выверке приборов.

Через несколько дней атмосферические условия резко изменились; целые дни шел дождь; некоторая проверка наших установок могла производиться только ночью, по звездам. Между прочим, оказалось, что сарай для моей призматической камеры был выстроен не совсем в соответствии тому объективу, который был привезен

из-за границы. Пришлось в стене его проделать отверстие и поместить фотографическую камеру вне сарая. За день до затмения проглянуло Солнце на несколько минут между тучами. Накануне, 8 августа, оно смотрело на наши установки целых  $4\frac{1}{2}$  часа и как раз около полудня. День 9 августа с раннего утра обещал прекрасные условия: небо было безоблачное; продолжительные дожди совершенно притушили лесные пожары; прозрачность воздуха была необыкновенная.

С величайшим рвением мы доканчивали все приготовления; наблюдатели разделились на две группы для правого и левого берега Лены; в обеих репетировали по секундам все, что нужно было делать каждому из участников. В 11 часов 49 минут 35 секунд началось затмение. Через 10 минут должна была наступить полная фаза. Все насторожились у своих приборов. На нашем берегу громко подавалось время по расписанию. Вдруг за несколько секунд до начала полной фазы подача времени на нашем берегу прекратилась. Раздался возглас: «Часы остановились». В мгновение я решил оставить тот прибор, в который должен был наблюдать глазами, и подбежал к камере своего сарая. Этой камерой нужно было заснять моменты самого начала полной фазы и самого конца ее. Что-то как бы подтолкнуло меня, что я могу уловить эти моменты на-глаз, если сделаю все шесть снимков. Это было бы невозможно, если бы камера была, как предполагалось, внутри сарая.

Я щелкнул три раза. Полное затмение началось. Я увидел яркую зеленую корону, распахнувшуюся вокруг темного диска Луны, заслонившей Солнце. Хотя я много читал про эту корону, но все-таки, увидев ее впервые, я поразился тому, что на небе существует вокруг Солнца еще такая громадная яркая корона фантастического очертания. Замигали звезды, запели птицы. Прошло две с половиной минуты; я подумал, что пора улавливать конец полной фазы, и сделал последние три снимка.

Корона исчезла, и из-за края луны брызнул ослепительный серп солнечного света: затмение кончилось.

Началась радость законченного дела.

Явление произвело большое впечатление на чекурских жителей. Неудачно было одно: мы предупреждали, что наблюдать затмение следует через закопченное стекло; многие женщины поняли так, что вообще нельзя смотреть, и всю полную фазу простояли с низко опущенными головами.

Причина остановки хронометра так и осталась невыясненной.

В ту же ночь Гершун и Блумбах проявили все снимки; два из моих оказались удачными: на них впервые получились спектрограммы того газового слоя, который окутывает поверхность Солнца и дает черные линии в солнечном спектре (фиг. 45). Слово «впервые» не совсем точно; несколькими часами раньше того же 9 августа 1896 г. такая же спектрограмма была получена автоматическим методом (а не «на-глаз», как это вышло у меня) на Новой Земле англичанином Шеклтоном, участником экспедиции Баден Пауэла.

Экспедиции 1896 г. были особенно удачными; многие из последовавших солнечных затмений, например, 1907 г., ничего не дали вследствие неблагоприятной погоды.

Прошло сорок лет. Мы живем в совсем обновленной стране. Это отразилось и на таком узко специальном деле, как наблюдение солнечного затмения. Кроме сотрудничества авиации, кроме более широкой тематики современных солнечных экспедиций, что относится к общему прогрессу человечества, поражаешься большому числу лиц, готовых у нас участвовать в наблюдении. Вспоминаю, как трудно было найти подходящего участника поездки на р. Лену. Также трудно было Русскому астрономическому обществу (профессорам Глазенапу и Егорову) собрать те 8000 руб., в которые обошлась наша чекурская экспедиция. А снарядить ее без содействия нескольких иностранных фирм было уже совсем невозможно.

Таким образом, явление светового резонанса, наблюдаемое в узких условиях лабораторного опыта, устанавливается объективно, фотографически, в широкой мировой обстановке, далеко выходящей за пределы наших лабораторий, устанавливается для всех паров и газов, из которых состоит атмосфера Солнца. Световой резонанс получает универсальное значение.

### Электрический резонанс

Максвелл обогатил наше понятие о свете, объяснив его электромагнитную природу. Ближайшие последователи Максвелла поставили исследование в обратном направлении; для них Максвелл был человеком, впервые заговорившим об электромагнитных волнах; они пошли по его следам в этом направлении и изучали, насколько электромагнитные волны обнаруживают в себе природу света. Первым был Герц (80-е годы); он первый получил на опыте электромагнитные волны, определил скорость их распространения ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек.), отражал их, преломлял, поляризовал, наблюдал их диффракцию (фиг. 48).

Для получения электромагнитных волн Герц воспользовался разрядом конденсатора. Он обратил внимание на то, что когда между обкладками конденсатора проскакивает искра, мы можем получить так называемый «колебательный разряд». Пластинки его не только разряжаются, но «перезаряжаются»: заряженная отрицательно получает положительный заряд и наоборот. Искра тогда превращается как бы в целую вереницу искр, следующих друг за другом и пропускающих электрический ток то в одну, то в другую сторону. Электроны в ней качаются, как качели, с одной пластинки к другой, пока эти колебания не затухнут. Переменный ток, бегущий через искру, образует вокруг нее переменное магнитное поле. Оно исчезает в тот момент, когда пластинки конденсатора оказываются заряженными, и достигает наибольшей силы в момент перезарядки. Появляющиеся попеременно вокруг колеб-

лющего конденсатора потоки электростатической и магнитной индукций распространяются волнами во все стороны, унося с собою и ту энергию, которая затрачивалась на их образование.



Фиг. 47. Генрих Герц

Частота колебаний, а следовательно и частота волны будет зависеть от размеров конденсатора и тех проводников, сквозь которые происходит разряд. Большой конденсатор даст более редкие колебания.

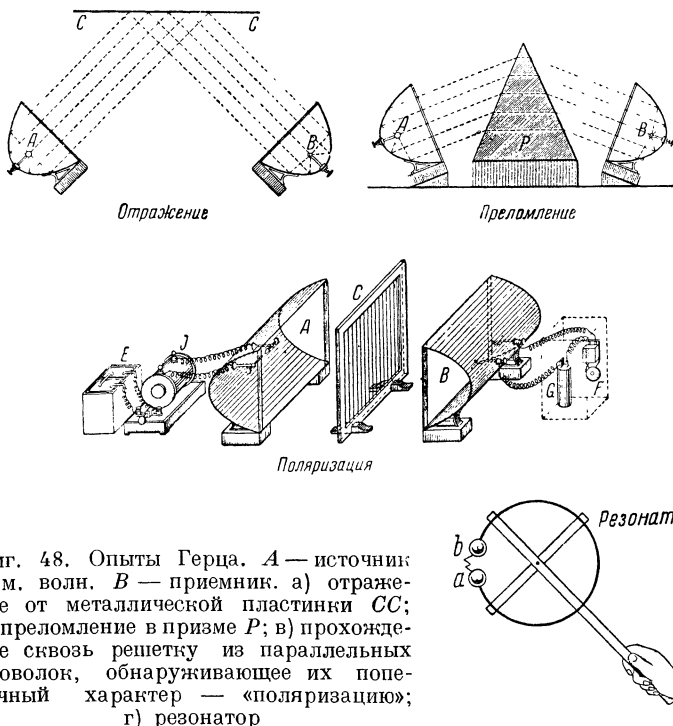
Нужно только было найти способ обнаружить эти волны. Генрих Герц (фиг. 47) воспользовался тем, что электромагнитные волны, как и звуковые, и световые, возбуждают резонанс.

Воспользоваться резонансом было совершенно необходимо. Излучение энергии в опытах Герца было очень слабо; он шел ощупью и не умел получить

электромагнитных лучей значительной мощности. Принять такое излучение, установить, что оно есть на самом деле, очень трудно. Глаз ведь не мог тут проявить своей необычайной чувствительности: волны Герца шли с частотой около 300 миллионов в секунду, а глаз воспринимает частоты только около миллиарда миллионов в секунду. Оставалось одно—воспользоваться резонансом. Резонатор

собирает энергию нескольких волн, сотни, тысячи волн; каждая отдельная волна дает ему очень мало энергии, но ряд волн раскачивают его достаточно для того, чтобы он показал их присутствие.

Резонатор Герца был очень прост по своему устройству; это был круг (фиг. 48) из проволоки, закрепленной на



Фиг. 48. Опыты Герца. *A* — источник э. м. волн. *B* — приемник. а) отражение от металлической пластинки *CC*; б) преломление в призме *P*; в) прохождение сквозь решетку из параллельных проволок, обнаруживающее их поперечный характер — «поляризацию»; г) резонатор

деревянной крестовине, с перерывом между шариками *a* и *b*. Размеры проволоки и шариков определяли время для заряда и разряда этого маленького конденсатора *ab*.

Резонанс заключался в том, что электромагнитные волны подходили как раз в этот промежуток времени.

Резонатор раскачивался, шарики заряжались до все большего напряжения, и, наконец, проскакивали между ними крохотные искорки. Если они проскакивали, это показывало, что в том месте, где находится резонатор, действительно проходят электромагнитные волны. При этом необходимо было все время следить за тем, чтобы излучатель электромагнитных волн точно сохранял свою частоту, на которую отвечает резонатор.

Герц достигал расстояний в несколько метров. Трудны были эти первые наблюдения, ничтожны получаемые эффекты (крохотная искорка). Неудивительно, что когда спрашивали Герца, возможно ли техническое применение его опытов для передачи сигналов, он отвечал: «Конечно, нет».

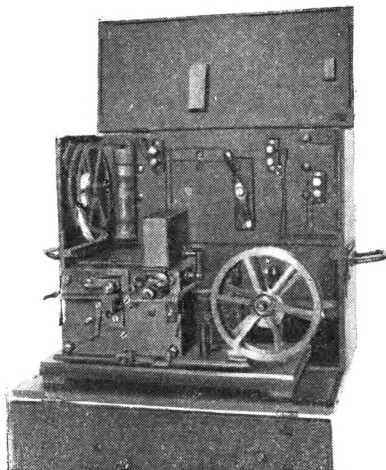
### З а р о ж д е н и е   р а д и о т е х н и к и

Продолжатели работы Герца были очень многочисленны; и к этому делу П. Н. Лебедев приложил свое искусство экспериментирования. Особенно выделялись опыты Лоджа; он увлекательно описал их в своей книге «Работа Герца». Этою книгою зачитывался А. С. Попов (фиг. 50). Воспроизводя опыты Герца по Лоджу, он сконструировал и демонстрировал в 1895 г. свой приемник (фиг. 49) с приемной антенной и усилителем, с которым в следующем году впервые в мире публично принял радиотелеграмму на расстоянии 250 м, состоявшую из двух слов: «Генрих Герц», на ленте аппарата Морзе.

Маркони с большою таинственностью показывал действие своего приемника в 1896 г. в Лондоне; приемник Маркони оказался поразительно схожим с прибором Попова. В виду этих фактов большинство современных специалистов и прежде всего сам Лодж признают за А. С. Поповым первенство изобретения радиотелеграфа.

За 40 лет радиопередача значительно усовершенствовалась. Наши радиостанции излучают мощность в сотни

киловатт; приемники с усилителями громко говорят и звучат, как оркестр, на расстояниях в тысячи километров. Явление электрического резонанса остается главным принципом радиотехники, но уже не столько потому, что на резонаторе можно уловить электромагнитные волны, идущие с очень далекого расстояния (это делают уси-



Фиг. 49. Радиостанция А. С. Попова (приемная)



Фиг. 50. А. С. Попов

лители), сколько потому, что, настроив приемник на резонанс, мы можем выделить из хаоса всевозможных радиоволн ту волну, которая распространяется от интересующей нас радиостанции. В настоящее время «в эфире — те-снота»; он густо заполнен электромагнитными волнами Максвелла самых разнообразных частот.



## V. Об электрической искре

Студенты-электротехники 2-го курса собирались на заседание своего кружка. Трудное дело ходить на эти заседания после дневной работы — слушания лекций, занятий в лаборатории; впереди еще занятия дома — решение задач к завтрашнему дню. Но кружок все же живет.

К сегодняшнему заседанию было вывешено объявление, что будет делать доклад профессор-доктор («хочет поддержать кружок») на тему «Электрическая искра в истории учения об электричестве». Но придет ли еще он? В прошлый раз не пришел, и его заменил молодой сотрудник кафедры.

Диспетчер назначил для кружка одну из самых отдаленных аудиторий. Председатель, длинный, с серьезным озабоченным лицом, несколько суетится: как бы не вышло, что студенты не найдут места заседания.

Собралось 25 человек. Ровно в назначенный час входит доктор. Он, как обычно, приветливо улыбается. Сел.

— Товарищи, — начал докладчик, — вы, как современные электрики, много думаете и много уже знаете о приложениях электричества к жизни. Вы понимаете, что обозначается словами: приложение электричества, или будем лучше говорить: приложение электрической энергии; ею пользуются как энергией, легко передаваемой, быстро распространяющейся, легко распределяемой, легко превращающейся в другие формы и легко получаемой из различных других видов энергии; она может быстро растрачиваться, а может и долгое время сохраняться в своем виде.

Наконец, еще одно качество: с помощью электрической энергии, через ее носителя — электрон, мы входим во внутренний состав молекулы и даже атома, видоизменяем их; изменяя атом, мы изменяем свойства материала и пользуемся его новыми свойствами.

Световой луч может также произвести большие изменения в атоме, но ведь он не что иное, как электрический процесс.

Все это очень ценные качества электроэнергии, которые делают ее приложения незаменимо важными для жизни.

Вот стариннейший пример приложения электроэнергии: ломит руку, можно бы потерять ее и этим попробовать облегчить боль. Но можно помощью трения получить в электростатической машине электроэнергию и передать ее больной руке. Часто оказывается, что электроэнергия является самою подходящею формою энергии для лечения; должно быть, потому что она вторгается в молекулу, в атом, из которых состоит организм, и производит в них как раз желательные изменения.

В неорганической природе происходят грандиознейшие электрические явления, между ними самое обычное — грозовой разряд. Я просто не понимаю, что мы с вами думали бы о молнии, если бы не знали, что это есть обыкновенная электрическая искра, хотя и очень больших размеров, к которым, однако, уже приближаются в лабораторных установках, работающих при миллионах вольт. Что мы думали бы, к которому из многочисленных фантастических и суеверных представлений о грозовом разряде мы примкнули бы?!

Но это время прошло. Мы знаем, что молния представляет собою разряд, нейтрализацию электричеств, скопившихся в облаках и на поверхности земли, таких же самых электричеств, которые мы наблюдаем в наших земных приборах.

Решение вопроса о тождестве этих электричеств было главным пунктом для понимания грозового разряда, после того как всем электрикам стало ясным подобие молнии и электрической искры: и та и другая проис-



Фиг. 51. Франклин пускает змей  
(по старинной гравюре) <sup>1</sup>

ходят по ломаной линии, причиняют вред животным, воспаляют горячее, плавят металлы, ярко светят, сопровождаются шумом и даже одинаковым запахом.

Франклин предложил соорудить на крыше какого-либо здания металлический шест с острием; если в атмосфере есть обыкновенное электричество, рассуждал он, то оно будет всасываться острием и проводиться по шесту к наблюдателю, находящемуся на крыше, который будет воспроизводить с ним обычные электрические опыты. При этом Франклин давал указания, как сделать опыт более безопасным. Английская академия наук, оповещенная о предложении Франклина, не сочла воз-

можным даже рассматривать его, как явно сумасбродное. Опыт был оборудован в Марли, близ Парижа, Далибаром, но произошел случайно в отсутствие последнего

---

<sup>1</sup> На всех старинных гравюрах сын Франклина изображается мальчиком, а исторически его возраст был 22 года.

в грозу с ливнем: от шеста получились искры, наводившие ужас на присутствующих.

Однако Франклин не был вполне удовлетворен этим опытом. «Огонь» был получен в Марли с недостаточно высоких мест (высота шеста около 12 м); это было все еще земное электричество. Франклин запустил змей, снабженный острьями, в самую тучу, держа веревку, когда змей достаточно высоко поднялся, через шелковую ленту (фиг. 51). От конца веревки, когда началась гроза, были получены искры, необычайно восхитившие Франклина; ведь этим опытом было доказано, что молния есть электрическая искра, т. е. все его предположения получили подтверждение.

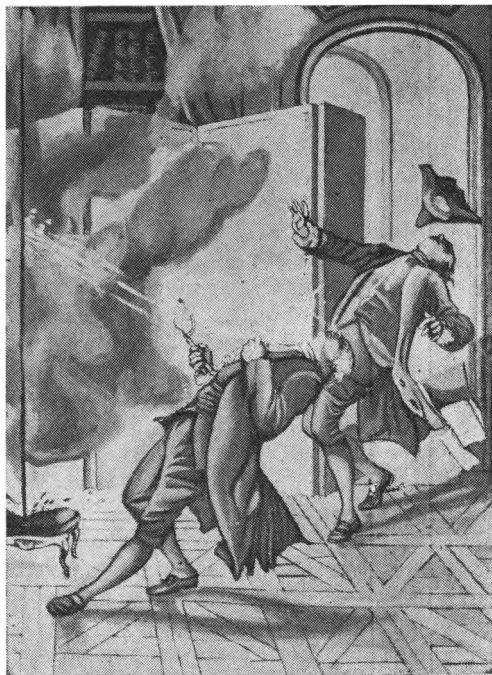
Этот опаснейший опыт Франклин произвел в США, в Филадельфии, при нем не было посторонних свидетелей; был только его 22-летний сын. Опыты эти повторялись Ломоносовым в Петербурге в 1753 г., с мая до 26 июля, до того рокового дня, когда был убит товарищ Ломоносова, академик Рихман (фиг. 52), находившийся, видимо, слишком близко от провода, собиравшего атмосферное электричество.

После того как было доказано электрическое происхождение грозы, многие другие явления природы стали рассматриваться как «приложения электричества»: северное сияние, тайфун, смерч, даже землетрясение и болиды. Подозревали влияние атмосферного электричества на произрастание растений.

Причиной электризации, генератором электроэнергии люди XVIII в. считали трение, например, трение капелек воды о воздух; естественно, что они могли думать только о той единственной форме генерации, которую имели сами в своих электростатических машинах трения. В конце своего доклада я вам напомним наши современные предположения по этому вопросу.

А теперь разрешите представить вам электрическую искру в несколько другом аспекте. В начале ноября

1780 г. Гальвани (фиг. 53) в Италии, вращая свою электрическую машину, заметил, что каждый раз, когда проскакивала искра, лягушачьи лапки, находившиеся вблизи, вздрагивали; лапки были недавно отрезаны у лягушки.



Фиг. 52. Смерть академика Рихмана

При проскакивании искры их мышцы сокращались, они приходили в движение, и судорожно выпрямлялись в коленках, как бы оживляясь; потом опять сгибались и оставались неподвижными, как мертвые, до следующей искры.

Почему у Гальвани около статической машины были лягушачьи свежепрепарированные лапки? Один историк гальванизма рассказывает, что Гальвани варил суп из лягушек. Историк хотел подчеркнуть этой подробностью, до какой степени случайно произошло великое открытие Гальвани; при этом первом шаге, поведшем впоследствии к гальванизму, дело шло всего лишь о варке супа! Но справедливость требует сказать, что лапки были приготовлены на самом деле для какой-то научной цели: Гальвани был физиологом и часто и умело препарировал животных, а особенно лягушек, как всякий физиолог, да еще тех времен.

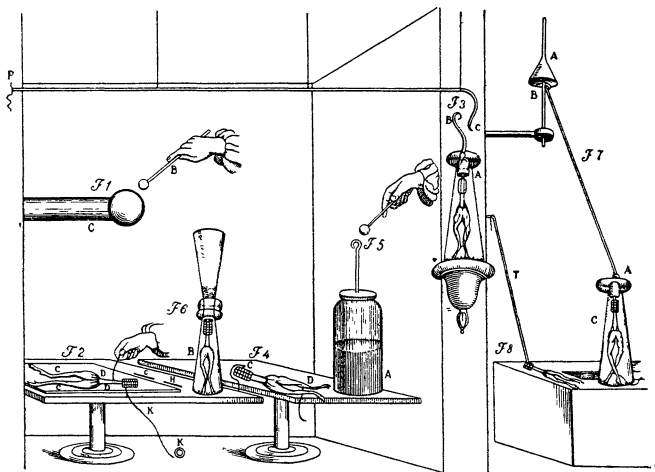
В заслугу Гальвани нужно поставить, что он заметил и заинтересовался этим временным оживлением лягушачьих лапок и в течение всего ноября и декабря, а также в 1781г. всячески видоизменял открытое им явление.

Из оставленного им описания видно, что вздрагивание происходит только тогда, когда к одному концу лапки присоединен проводник; этот проводник (провода) должен быть достаточной длины или его должен держать человек. Вздрагивание усиливается, если к другому концу лапки присоединен второй проводник, ведущий к земле (фиг. 54). Стеклопалочка, приставленная к лапке, не производит эффекта.



Фиг. 53. Л. Гальвани

Товарищи, вероятно некоторые из вас уже догадываются, что происходило у Гальвани. (С места: «Радиоприем!»). Вот именно. При разряде кондукторов электрической машины в них происходят электрические колебания, и тогда во все стороны распространяются электромагнитные волны. Их улавливает достаточно длинный провод, который мы теперь называем приемной антенной и ча-



Фиг. 54. Опыты Гальвани

стью которого может служить тело человека; от антенны электрические колебания переходят в лапку и возбуждают ее нервную систему, производят сокращение мышцы. Вы, радиолюбители, отлично знаете, как полезно бывает соединение приемника с землей, что и наблюдал Гальвани.

Он в этих первых своих опытах имел пред собою радиопередачу с необыкновенным, физиологическим, приемником. А. С. Попов, построивший через 115 лет после Гальвани настоящий технический радиоприемник, про-

бывал его действие на электромагнитных волнах, возбуждаемых грозovým разрядом; подобно этому и Гальвани наблюдал действие своей установки с лягушачьими лапками при приближении грозы. Он описывает эти опыты очень интересно: было подвешено несколько лапок; все они одновременно вздрагивали, после чего раздавались раскаты отдаленного грома. Понятно, его электромагнитные волны, распространяющиеся с той же скоростью, что и свет, приходили раньше звуковых волн грома.

Это мы с вами так понимаем первый опыт Гальвани, по крайней мере, в его главных чертах. Сам Гальвани не интересовался им с этой точки зрения и не мог интересоваться, так как для того, чтобы люди подошли к радиотехнике, нужна была еще столетняя напряженная работа физиков над электрическими явлениями. Если позволите несколько пофантазировать, то я скажу, что если бы кто-нибудь из нас попытался человеку XVIII века объяснить наше радио, то он был бы не понят и сочтен рехнувшимся. Таково это радио, наше современное «приложение электричества».

О чем же вместо этого думал Гальвани.

Теперь я уже не фантазирую; фантазия, если мы говорим с человеком XVIII века; но вовсе не фантазия, когда он говорит с нами через оставшиеся после него сочинения. Однако результат получается тот же самый: там, нам казалось, он не понял бы нас, а теперь оказывается, что и людям XX века очень трудно понять мысли Гальвани. Они были таковы.

Во-первых: по нашему представлению, искра есть разряд, использование электроэнергии, превращение ее в свет, звук, тепло, электромагнитные волны; после искры заряды исчезли, нейтрализовались; не осталось уже ни положительного, ни отрицательного электричества. Гальвани судил иначе; он считал, что искра есть выход электрической жидкости из его машины, выход в воздух, а через воздух — в окружающие тела, где эта жидкость



и производит все свои действия, а между ними и электрическую искру. Одно из действий могло быть в виде возбуждения нерва лягушачьего препарата. Допустим, что мы это поняли, что и мы начали так думать, забыв все наше учение об энергии.

Во-вторых: Гальвани считал, что возбуждение нерва есть электрическое явление, но при этом во что бы то ни стало старался доказать, что это электричество — животное электричество, производимое самим организмом, а не приходящее извне.

Для доказательства он сделал, например, такой опыт: лягушачья лапка и провод (антенна) были помещены в стеклянные сосуды; место соединения этих сосудов было тщательно замазано; и все же вздрагивание происходило. Тогда он поместил оба сосуда под колокол воздушного насоса, из которого выкачал воздух. Вздрагивание продолжало происходить. Но для Гальвани это доказывало его основную мысль: электричество не могло подползти через стекло, через замазку между сосудами, а тем более — через пустоту, так как оно, по его мнению, уходит через воздух; а следовательно сокращение мышцы производилось собственным электричеством лапки. Оставалось совершенно непонятным, что же, по его мнению, производила искра, проскакивание которой, однако, и вызывало все явление.

Для нас эти опыты только лишний раз показывают, что электромагнитные волны, как и свет, проходят через стекло и, конечно, через «пустоту». Они несут в себе электрическую энергию, и этой энергией, когда она вступает в нервы лягушачьей лапки, движутся находящиеся там электроны, производится раздражение. Все увязано, и убеждение Гальвани в том, что в организме имеется электричество, обязательно и для нас. Только мы это выражаем радикальнее: во всяком атоме имеются электроны.

Гальвани скоро оставил свои опыты с электрической

искрой. Совершенно случайно он заметил, что лапка содрогается и без всякой искры, и в тихую погоду, если к ее концам поднести провод, состоящий из двух различных металлов; в эту сторону он и направил свое исследование.

Вольта увлекся именно этим опытом и установил значение обязательного различия двух металлов. Отсюда возникла новая эпоха получения электроэнергии с помощью элементов, давшая приложениям электричества новое направление. При этом Вольта выдержал длительную борьбу с Гальвани и его сторонниками, которые и здесь искали доказательства «животного электричества».

Второй раз электрическая искра сыграла такую же роль через 100 лет. Но тогда была уже другая обстановка и другие люди смотрели на нее.

Молодому немецкому физiku Генриху Герцу было предложено его учителем проверить на опыте главное положение Максвелла, а именно, что исчезающее электрическое поле производит магнитное поле. Если вы, товарищи, этого еще не проходили, то постарайтесь теперь понять: дело не такое трудное. Представьте себе, что в изоляторе произведено электрическое поле, а затем его перестали поддерживать и оно исчезает; так вот в это время, по Максвеллу, вокруг этого изолятора возникает магнитное поле. Вы скажете: «Ведь вокруг проводника с током существует магнитное поле». Но в том-то и дело, что Максвелл утверждал, что электрическое поле, исчезающее в изоляторе, есть как бы ток. Он назвал его током смещения. Такой же магнитный поток, только обратного направления, возникает вокруг нарастающего электрического поля.

Как же Герц взялся за доказательство положения Максвелла? Он взял большой кусок серы и к концам его приставил проводники, ведущие от зажимов индуктория, который в те времена (50 лет тому назад) все называли катушкой Румкорфа; когда действовал прерыватель

катушки, в куске серы создавалось и исчезало электрическое поле. Вокруг появлялось магнитное поле и тотчас же исчезало. Вот этим-то Герц и воспользовался. Поставив вблизи проводник, он ожидал, что исчезающее магнитное поле будет индуцировать электрическое, в проводнике появится электродвижущая сила и пойдет ток.

Долгое время Герц ничего не мог получить. Вдруг раз случайно проскочила между электродами индукторная электрическая искра, и явление сразу стало обнаруживаться. Отсюда и начались знаменитые опыты Герца с электромагнитными волнами, поведшие к изобретению радиотелеграфа.

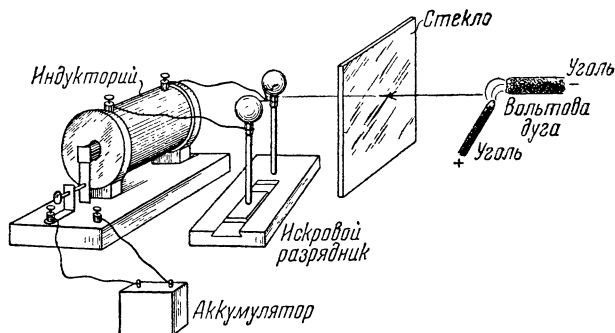
Я думаю, что скажу верно, если объясню удачу, полученную при использовании искры, тем, что она представляет собой весьма кратковременное явление. Если необходимо исчезновение электрического поля, то чем быстрее оно совершается, тем сильнее получится магнитное поле (это доказал Максвелл). Первые 10—15 лет и радиотехника пользовалась исключительно искровым возбуждением электромагнитных волн. Радиотелеграф назывался «искровым» телеграфом, радисты — «искровиками», и военные радиотелеграфисты составляли «искровую роту». Лишь мало-помалу техника пришла к выводу, что излучение радиоволн может быть получено без искры и притом более мощное, более устойчивое, легче управляемое. В настоящее время искровые радиостанции — исключение; все работают на «ламповых генераторах» или «машинах высокой частоты».

Если вам, товарищи, еще не надоело слушать мои рассказы об электрической искре (*с мест*: «Нет! Нет! Просим продолжать!»), то я перехожу к самому, пожалуй, интересному.

Началось это с Генриха Герца. Когда он получил электромагнитные волны, он стал улавливать их помощью своего резонатора. Резонатор возбуждался в тех местах, где проходили волны; при этом он не вздрагивал, как

лягушачья лапка, но его электроны так раскачивались, что получалась маленькая искорка. Это использование искры техника совсем не приняла; радиотехника возникла именно с того момента, когда был изобретен другой «волноуказатель».

Но именно на этой искорке резонатора Герц в 1887 г. заметил заинтересовавший его факт: при освещении



Фиг. 55. Схема опыта Герца с влиянием света на электрическую искру

искрового промежутка ярким светом искорка удлиняется, облегчается, происходит при меньшем напряжении, чем в темноте.

Это действие света увеличивается с укорочением длины световой волны, т. е. например, при ультрафиолетовом свете оно больше, чем при фиолетовом или голубом. Слово «больше» здесь означает, что еще меньшее напряжение уже достаточно для проскакивания искры.

Мне думается, что не существует явления, более просто и наглядно иллюстрирующего мысль Максвелла: лучи света несут в себе электрическое поле. Поглядите (*показывается опыт; общее движение, студенты пересаживаются, чтобы лучи видеть*): вот маленький индукторий

(фиг. 55), который, я знаю, и вы еще называете катушкой Румкорфа; он действует от одного аккумулятора. От его вторичных зажимов идут провода к двум шарикам; но шарики слишком раздвинуты, и вольты индуктория не достаточны для образования искры; она не проскакивает. Теперь я освещу промежуток между шариками светом от вольтовой дуги; на пути этого света нет стекол; я его фокусирую кварцевой чечевицей; это для того, чтобы не поглотить ультрафиолетовых лучей. Зажигаю дугу. Вы видите и слышите, что искры проскакивают непрерывным потоком. Ставлю на пути света кусок стекла — искрообразование прекратилось. Удаляю стекло — снова поток искр.

Вы видите, что лучи ультрафиолетового света несут с собою вольты, как бы добавляют электрическое поле к полю индуктория, делают его достаточным для пробоя воздуха.

Не помню теперь, сам ли я заметил или вычитал у кого-нибудь, что явление, открытое Герцем, «зажигание» искры производится легче, без отказа, если параллельно искровому промежутку ввести небольшую лейденскую банку. Без банки искра иногда капризничает.

Произошел такой случай. В 1900 г. в Париже была Всемирная выставка. Это была последняя парижская всемирная выставка перед войной. И только теперь к 1937 г. французы устраивают следующую выставку. К выставке было приурочено много всемирных конгрессов по различным специальностям. Был и конгресс физиков, первый в мировом масштабе. На одном из его пленарных собраний в большом зале Склодовская-Кюри (фиг. 56), сделала доклад о своем открытии радия. Показывая свойства лучей радия она, между прочим, направила их вот на такой же искровой промежуток, питаемый индуктором, какой перед вами. Лучи радия необыкновенно явственно зажигают искру. Но в данном случае у Склодовской-Кюри это «не выходило».

Физику, да и вообще экспериментатору, знакомы такие случаи; обыкновенно говорят при этом: «Вчера еще вечером все блестяще выходило, а теперь вдруг нет»... Ничтожные, непредвиденные обстоятельства — другая влажность, другое содержание углекислоты, другое атмосферное давление могли изменить ход процесса. Но, может быть, в данном случае была и другая причина, о которой скажу ниже.

К столу с приборами подошел Беккерель, открывший радиоактивность, что-то посоветовал передвинуть, но и это мало помогло. Кюри перешла к другим опытам. А я, сидевший на дальней скамейке, хотел крикнуть: «Включите лейденскую банку параллельно искре!». Я не крикнул, но, конечно, и теперь уверен, что зажигание искры удалось бы вполне, если только по редкой случайности не происходило чего-нибудь совсем другого.

После Герца электрическое действие света было предметом многочисленных исследований. Одно из первых принадлежало А. Г. Столетову (Москва), давшему верную и четкую основную характеристику явления; это доставило ему мировую известность.

Столетов назвал эти явления актиноэлектрическими. Но впоследствии за ними утвердилось название: «фотоэффект». Дело заключается в том, что свет отрывает от



Фиг. 56. М. Склодовская-Кюри

молекул или атомов электроны. Если эти электроны выбрасываются наружу, мы имеем «внешний» фотоэффект. Если они остаются внутри вещества, только освободившись из атома, происходит «внутренний» фотоэффект.

В первом случае тело заряжается положительно; во втором — изменяются его свойства, например, изолятор, наполнившийся от фотоэффекта освобожденными электронами, становится проводящим телом. Фотоэффект лежит в основе множества технических устройств: аппараты телевидения, фотогенераторы (превращение световой энергии в электрическую). Фотоэффект считается основной причиной атмосферного электричества, и генератором, питающим молнию, — это фотогенератор, питаемый, в свою очередь, солнечным светом.

«Фотоэффект» сыграл яркую роль в нашем продвижении в теории света. Он является самым ясным подтверждением существования «световых квант». Так называются те малейшие дробинки энергии, из которых, по современным воззрениям, состоит энергия светового луча. Каждый фотоэлектрон выбивается одним квантом; все детали явления рассчитываются на основании закона сохранения энергии; сравниваются кинетическая энергия вылетающего электрона и энергия кванта, откуда вычисляется скорость вылета электрона. Такой расчет прекрасно подтверждается на опыте.

Фотоэффект в искровом промежутке — исходный опыт Герца — сравнительно мало интересовал физиков; это частный случай фотоэффекта и притом еще затемняемый капризностью и далеко неполной ясностью явления искры.

Но нельзя было забыть это прекрасное явление; меня, например, оно всегда привлекало. Однажды, когда я приготавливал опыт Герца к лекциям, неудача особенно меня преследовала. Я взял для электродов искрового промежутка вместо двух одинаковых шариков латунные шарик и острое, вроде тех, которые сейчас навинчиваю. Но это не помогло делу. Никакого явления Герца не

получалось. Неудача порождает вялость, как успех подбадривает. Я что-то продолжал пробовать и ошибаясь в порядке действий; я сделал все наоборот: искра уже проскакивала в темноте, и я ее ярко осветил. Искра потухла. Я не мог бы теперь вам объяснить, как это случилось, что я не подумал при этом: «Опять какая-то неразбериха», а наоборот, вдруг воспрянувши, я объявил себе: «Это новое явление».

Долгие годы я возвращался к нему. Оно оказалось не совсем новым. В конце концов я ему придал такую форму. Смотрите.

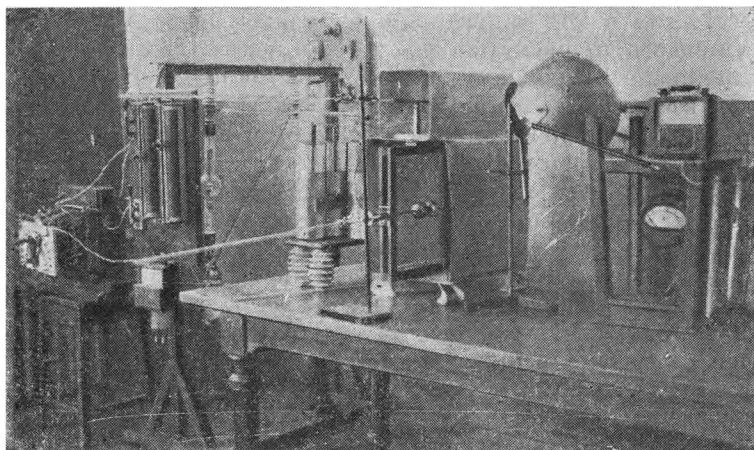
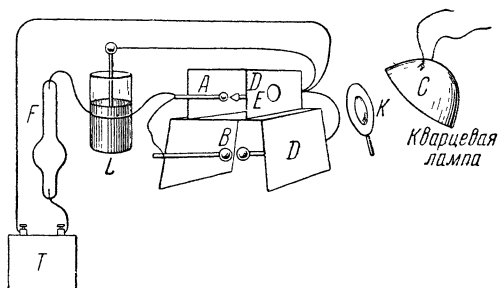
Пустим в ход индукторий. Раздвинем шарик и острие искрового промежутка так, чтобы искра изредка проскакивала. Подношу радий с расстояния около  $1\frac{1}{2}$  м. Вы замечаете — искра немного оживилась. Приближаю радий. Искра проскакивает все чаще и наконец обращается в почти непрерывный поток. Радий еще ближе — действие его лучше слабеет. На некотором расстоянии (около 40 см) — никакого действия, искра проскакивает так редко, как было в самом начале, без радия. (Не держала ли Складовская-Кюри свой радий приблизительно в этом положении?!) Приближаю еще — искра заметно реже. Еще приближаю (около 15 см) — работающий индукторий совсем не дает искры. Это под самыми мощными лучами радия!

Приборы показывают, что при этом вольты поднялись. Воздух стал лучшим изолятором, чем был прежде, его теперь труднее пробить.

Проверка: заслоняю толстой свинцовой пластинкой лучи радия — индукторий дает свою первоначальную искру. Снимаю заслон — опять полное отсутствие искры.

Так вот (с места: «Непонятно!») .. Как бы это выразить? Эффект Герца имеет свою противоположность, свое противоречие; с увеличением мощности лучей нарастает герцов эффект, но появляется и какой-то противоположный, который при некоторой мощности сводит эффект





Фиг. 57 и 57а. Фотография и схема установки для наблюдения обратного эффекта Герца по В. К. Лебединскому

Герца к нулю, а при дальнейшем ее увеличении возрастает уже как явная противоположность герцову эффекту. Это все, что я могу сказать.

За истекшие тридцать лет некоторые наши физики воспроизводили описанное мною явление; много остро-

умия было выказано при конструкции разных подробностей аппаратуры. Несколько иностранных физиков обращались к этому превращению одного эффекта в противоположный ему; последняя работа была опубликована года два тому назад; они значительно подвинули вперед все оборудование. В настоящее время доцент ЛИИЖТ Попов производит наблюдения со схемой, изображенной на этой фотографии (фиг. 57). Здесь *A* — тот искровой промежуток, который облучается, *C* — источник ультрафиолетовых лучей, *K* — кварцевая чечевица, фокусирующая их, *L* — лейденская банка параллельно искре, *B* — второй искровой промежуток с шариками, включенный параллельно *A*; он служит для измерения напряжения у *A* и показывает увеличение его при тушении; *D* — металлические кожухи, предохраняющие *A* и *B* от воздушных течений и других посторонних влияний; они делают искровые разряды менее капризными; *E* — отверстие для пропускания лучей; установка питается трансформатором *T* (40 киловольт) через кенотрон *F*, так что, по схеме, проходит ток только одного направления, шарик и острие никогда не перезаряжаются.

Я кончил, товарищи.

1 - й студент. У меня вопрос такого порядка. Вы говорили о тушении искры лучами. Таким образом можно лучами прекратить работу двигателя внутреннего сгорания. Не об этом ли писали в газетах, когда сообщали об опытах в некоторых странах, при которых все машины в некотором районе вдруг останавливались и не могли сдвинуться?

2 - й студент. Такой вопрос: вы показывали ваш опыт с радием. Значит, то же происходит и с ультрафиолетовыми лучами? На фотографии нет радия.

Докладчик. Сначала на второй вопрос: да, совершенно то же самое; мне удобнее было демонстрировать с радием. Что касается первого вопроса, то я могу только сказать, что не знаю, так же как и вы, о чем писа-

лось в газетах. Я это читал. Мне хочется прибавить, товарищи, что ни мне, никому другому из интересовавшихся явлением не приходило на ум то использование его, о котором говорит студент. Тогда вокруг нас не ходили автомобили, не летали аэропланы. Теперь можно поражаться, как возросла техническая мысль в нашей стране. Вы впервые слышите о явлении, впервые видите его, и тотчас же это применение, о котором действительно очень стоит подумать, приходит вам в голову.

3 - й с т у д е н т. Можно еще вопрос? Вы не объяснили, как происходит тушение. Ведь это совершенно непонятно. Мы усиливаем свет, а он перестает действовать. По-моему, если нельзя объяснить, так что же это...

Д о к л а д ч и к. Да, я не дал объяснения. Я только сказал вам, как выражается все явление в словах, какой его философский смысл. Некоторые дают свои объяснения; я считаю, что они еще не доказаны. Если бы я настаивал на каком-либо из этих объяснений, я бы помешал свободной мысли. Пусть кто-нибудь еще подумает; может быть явится оригинальная и очень ценная мысль. Конечно, чем больше знать, тем вернее будешь думать. Было бы очень долго сообщать все, что к этому явлению относится. Добавлю только одно: название: «тушение искры» неудачно, хотя и я его употребляю; здесь происходит другое: невозможность появления ее при очень мощных лучах. Нельзя потушить то, чего нет. Дело, следовательно, заключается в том, что искра предваряется какими-то процессами, и вот достаточно мощное излучение направляет их не в сторону образования искры, а делает ее невозможной.

Вы сказали: «усиливаем свет, а он перестает действовать» — с этим я не согласен; лучи и большой мощности продолжают действовать и даже очень действуют; воздух в освещенном промежутке (А) становится труднее пробиваемым, напряжение трансформатора повышается, и искромер, который служит вольтметром, дает большую

искру, чем без освещения. Это очень важное обстоятельство. Многие с первого взгляда на явление говорили: да это очень просто: мощные лучи выбивают так много фотоэлектронов, что воздух разрядника  $A$  становится яростным проводником, и ток без всякой искры, тихо проходит по нему. Но тогда было бы короткое замыкание, вольты трансформатора упали бы, и разрядник  $A$  не показал бы увеличения напряжения, а показал бы падение его до нуля.

Еще — в заключение. Говорят, растениеводы замечают, что хорошее освещение ускоряет, активизирует рост растения, но слишком яркий и притом ультрафиолетовый свет, наоборот, задерживает рост. Ведь это то же приложение электричества.

Товарищи, сотни лет изучают электрики электрическую искру и до сих пор открывают в ней все новые стороны; всякая реальность неисчерпаема. Так и в других явлениях природы, казалось бы вполне изученных и использованных, скрываются еще неизвестные пока стороны, еще новые возможности открытий и применений.

## VI. Кванты

### Сплошное и структурное

Всякое вещество, как железо, вода, медь, воздух, будь оно в необъятном размере (океан, атмосфера, земной шар) или небольшой величины (шарикоподшипник), представляется нам сплошным. Скважины, поры не противоречат этому представлению; они опять же сплошным образом заполнены каким-нибудь веществом, например, воздухом, водою.

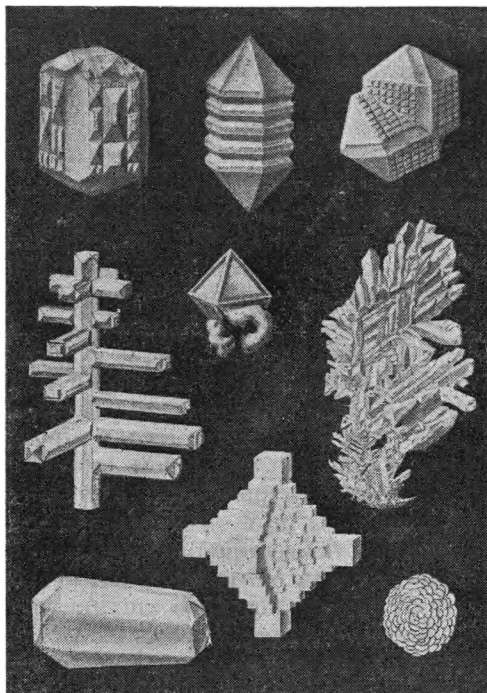
Тело движется, летит, вертится, все как сплошное, целое, неизменное. Тут уже сплошность связывается с другим представлением — о твердом теле.

Наука, рассматривающая всевозможные движения сплошного неизменного вещества, и называется механикой твердого тела. Это самый простой и законченный отдел механики.

Движение жидкости («капельно-жидкого» тела) и газа так просто рассматривать уже невозможно; жидкость, когда она движется, приходится представлять себе состоящую из слоев, струй. Слои движутся один относительно другого, скользят; обнаруживается вязкость жидкости; мы не могли бы подойти к этому важному понятию о вязкости, если бы не расслоили жидкость в своем представлении, не придали ей известной структуры. Однако такая структура еще совместима с понятием о сплошности.

Другого рода структура представляется нам при рассмотрении кристаллов. Наросший кристалл имеет определенную форму; его грани в виде определенных фигур — треугольники, четырехугольники и т. д. — наклонены друг к другу под строго определенными углами; нара-

стая из раствора, кристалл в точности сохраняет свою форму (фиг. 58). Получается впечатление, что он строится из элементов, «кирпичиков». этой самой формы, которые прикладываются один к другому своими соответственными



Фиг 58. Фотография кристаллов

гранями. Но и эта определеннейшая геометрическая структура не отрицает сплошности: можно себе представить много таких геометрических форм, которые, прикладываясь друг к другу со всех сторон, этим самым

заполняют все пространство; простейший пример — кубики, сложенные своими равными гранями.

Еще раз выступает понятие о структуре, когда мы видим, что тело деформируется, например, растягивается, скручивается, сгибается. Здесь, как при изучении движущейся жидкости, мы разбиваем тело на слои, которые скользят каждый по своему соседнему вызывая явление вязкости и упругости. Когда происходит деформация чистого сдвига слоев, вроде того, как книги, сложенные в кипу, сдвигаем одну по другой, объем всей кипы, всего тела остается неизменным; оно может представляться сплошным. И если такая только деформация — чистого сдвига — может происходить во всемирном эфире, если свет и электромагнитная волна есть распространение только такого сдвига, то ничто не мешает представлять всемирный эфир, как сплошное тело.

Этот эфир заполняет все. Мысль о сплошности получает материальное оформление. Пространство, как такое, лишенное материи, остается только для математических формул. Но в обычных телах происходит еще и другая деформация, в некотором смысле противоположная сдвигу слоев, деформация всестороннего расширения или сжатия. Если в мировом эфире возможен только сдвиг, то эта деформация в нем невозможна; эфир не сжимаем. Если обычное тело сжимается, как, например, газ, объем которого технически нетрудно уменьшить в сотни и тысячи раз, то как представить себе это явление, воображая тело сплошным? Как может оно, сжимаясь, входить само в себя?

Сжимаемость тела показывает, что оно состоит из отдельных самостоятельных элементов, частиц, молекул, пусть сплошных, но разделенных со всех сторон известным расстоянием. При сжатии расстояния между молекулами уменьшаются.

Молекулярная и атомная структура вещества явилась

основанием учения о химических превращениях. Когда приходят в соприкосновение два тела химически сродственных, они соединяются, образуя третье, новое вещество. При этом они сами, эти два исходных вещества, перестают существовать; происходит действительное превращение одних тел в другие.

Это последнее положение особенно значительно. Если два тела, «соединившись», образуют не химическое соединение, а простую смесь или сплав, они не перестают существовать в этой смеси. И ничто не мешает нам представлять их сплошными.

Чтобы понять химическое соединение как превращение, химики считают, что всякое вещество со всеми своими свойствами определяется своею молекулой, состоящей из атомов. Молекула и составляющие ее атомы суть отдельные (дискретные) образования, для каждого вещества — все, сколько бы их ни было, в точности одинаковые; они несут в себе, повторяем, причины всех свойств тела.

Изменение в составе молекул, например, включение в каждую из них нового атома, делает вещество другим, прежнее перестает существовать.

Все это дает ясное понимание химического превращения. Например, при образовании воды к каждой молекуле водорода подходит атом кислорода; при этом водород и кислород как таковые исчезают; образуется новое вещество с новыми свойствами.

В основе этого представления — молекулярно-атомическая структура вещества. При химическом соединении атомы занимают свои места в новых молекулах. Тут не может быть речи о сплошном веществе. Вещества движутся одно к другому не всей своей массой как целое, но своими атомами, из которых каждый получает свое место в одной, вновь устраивающейся молекуле. Явление в основе своей происходит не в макрокосме, но в микрокосме.



Совместным процессом развития химии и физики учение об атомическом строении, имеющее свои корни в науке древности, к концу XIX века до такой степени определилось и уточнилось, что молекулы и атомы являются для нас незыблемой реальностью.

Положим, мы имеем один грамм какого-либо вещества, например, льда, соли, железа и т. д., воспринимаемого нами макроскопически, как нечто сплошное, целое; на самом деле в микрокосме этот грамм состоит из большого числа одинаковых молекул, на каждую из которых приходится определенная часть всей массы грамма. Произвольно ли для нас это число? Выбираем ли мы его, исходя из каких-либо приблизительных оценок? Конечно, нет! Атомистическая наука стоит так высоко и твердо, что этот основной вопрос решается при многочисленных физических и химических наблюдениях вполне однозначно. Все результаты сходятся к тому, что в одной грамм-молекуле всякого вещества заключается  $6.023 \cdot 10^{23}$  молекул.

Это число Авогадро соответствует данному этапу науки. С уточнением опыта, с усовершенствованием измерительных приборов, десятичные знаки этого универсального числа все более уточняются. Уточняется, следовательно, и определение массы отдельной молекулы, массы отдельного атома.

Молекула как истинный элемент материи находится в непрестанном движении. Излишен вопрос, как объясняется первый толчок, дающий начало этому движению. Материи присуще движение, движение не отделимо от материи. Это движение в микрокосме при макроскопическом наблюдении может нам представляться покоем.

Таким образом наше макроскопически сплошное и, может быть, неподвижное вещество в реальности состоит из дискретных молекул и наполнено движением.

## Элементарные магнетики

Особый случай структуры представляет собою железо. Мы знаем, что железо, введенное в магнитное поле, намагничивается; это намагничение усиливается с усилением поля и при некоторой напряженности становится предельным. Тогда говорят, что железо намагничено до насыщения. Старинное объяснение этого состоит в следующем: железо заключает в себе готовые элементарные магнетики; но они расположены хаотически и потому, хотя сами они (в микрокосме) — магниты, в общей массе, в макрокосме не вызывают никакого намагничения всего предмета.

Посторонний магнит своим магнитным потоком поворачивает эти элементарные магнетики, но отнюдь не все сразу; они не так легко поддаются, так как действуют один на другой своими полюсами; при слабом поле поворачиваются только те, которые случайно более свободны; при этом железо уже намагничивается, но очень слабо. При усилении внешнего поля мы действуем и на более связанные элементарные магнетики; железо намагничивается сильнее; происходит следующая ступень намагничивания. Наконец, при некотором поле все элементарные магнетики повернутся, и железо окажется намагниченным до насыщения. Таким образом весь процесс намагничения получает свое объяснение, если предположить железо не сплошным, а построенным из элементарных магнетиков.

В этом объяснении говорится только о структуре железа и вообще магнитных материалов из элементарных, дискретных частей; но ничего не говорится о том, каковы они по величине, сколько их в каком-либо данном куске железа. Без ответа на эти вопросы наши элементарные магнетики — просто наша фантазия, они нереальны.

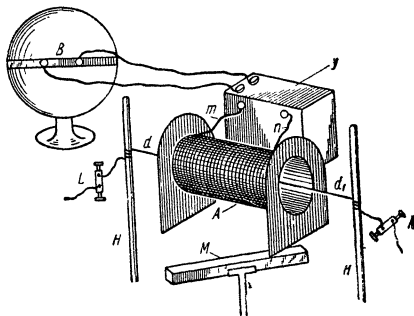
Электронная теория дала пути к вычислению величины элементарного магнетика, так называемого магнетона.

Весьма интересно, что несплошное строение магнитных материалов может быть обнаружено на опыте; есть явление (эффект Баркгаузена), которое прямо показывает, что намагничивание происходит не непрерывно, а ступенями, как мы выразились выше. Но нужно иметь в виду, что если бы каждая ступень состояла из поворачивания одного магнетика, т. е. если бы магнетики поворачивались по одному, один за другим, мы никакой непрерывности не заметили бы; слишком мелки были бы ступени, и нам казалось бы намагничивание плавно изменяющимся. На самом деле поворачиваются сразу целые группы магнетиков, одинаково подчиняющихся магнитному полю, после чего внешнее магнитное поле растет некоторое время, не производя почти никакого нового действия, пока опять не повернет целую группу, и тогда железо значительно подмагнитится. Явление происходит не слишком мелкими ступенями, а толчками с явными перерывами.

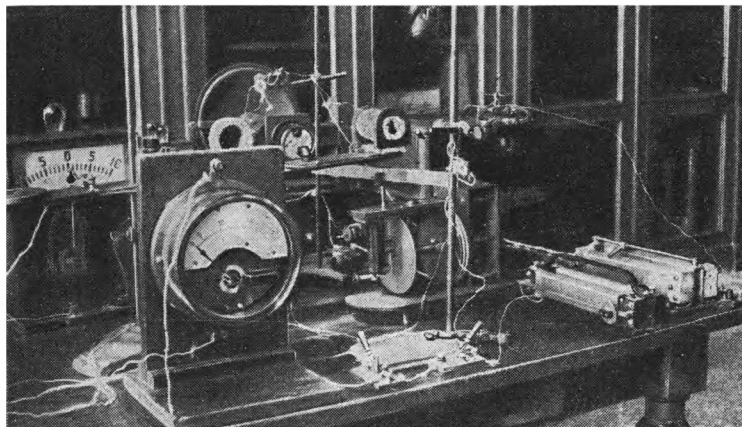
Чтобы это заметить на опыте, поступают так: кусок тонкой железной проволоки вкладывают в катушку с большим числом витков; эту проволоку подвергают действию магнитного поля то усиливающегося, то ослабевающего; каждое ее подмагничивание даст в катушке индуктированную электродвижущую силу. Также действует и каждая ступень ее размагничивания при ослабевающем поле. Ведь при этом поток магнитной индукции, идущий от поворачивающихся групп, пересекает витки катушки как в динамомашине. Хотя эти эффекты производятся целыми группами элементарных магнетиков, все же они очень слабы. Чтобы наблюдать эти прерывно появляющиеся и затем быстро исчезающие электродвижущие силы, нужно их значительно увеличить помощью усилителей и затем направить, например, в громкоговоритель; он даст нам смешанный звук (вроде хрипа), который состоит из очень высоких тонов соответственно большой скорости следования одной группы за другою. Это

будет смешанный звук, а не чистый тон, так как частота следования группы за группой все же случайна и часто меняется.

Если бы не было элементарных магнитиков, железная проволока намагничивалась бы как-то непрерывно, катушка получала бы непрерывную, постоянную (и притом необычайно малую) электродвижущую силу, через громкоговоритель шел бы постоянный ток, его мембрана не колебалась бы и мы никакого звука не услышали бы.



Фиг. 59.



Фиг. 59а. Фотография и схема установки опытов Баркгаузена по В. К. Лебединскому

Фиг. 59 изображает всю установку для такого «слушания групп элементарных магнетиков»;  $A$  — катушка; концы ее обмотки  $m$  и  $n$  ведут к ламповому усилителю  $I$ , от которого приводится в действие громкоговоритель  $B$ ;  $dd$  — кусок железной проволоки, поддерживаемый на штативах  $HH$ ;  $M$  — магнит, производящий внешнее поле; он вращается помощью электродвигателя и фрикционной передачи, помещенной под ним, и при этом создает вдоль железной проволоки магнитное поле переменного напряжения; оно слабее всего в тот момент, когда магнитный стержень перпендикулярен проволоке.

Пусть электродвигатель в ход; немедленно услышим хрипы, появляющиеся каждый раз, когда магнит приближается к параллельности с проволокой.

Это явление можно разнообразить, например, так: пустим в нашу железную проволоку ток от городской станции, воспользовавшись для этого зажимами  $K$  и  $L$ ; этот ток переменный, он прерывается 100 раз в секунду. В те мгновенья, когда он идет, магнитный стержень не действует на нашу проволоку, потому что все элементарные магнетики повинуются магнитному полю от тока и выстраиваются кругами поперек оси проволоки (явление Эрстедта). Но в те моменты, когда ток не идет, они свободны, и происходит эффект Баркгаузена; следовательно, он повторяется 100 раз в секунду. Очень короткий хрип повторяется 100 раз в секунду — ухо наше воспринимает это как звук низкого тона. В такой форме эффект Баркгаузена и громче, и интереснее.

Можно сделать еще так: имеются проволока и катушка, далее идут усилитель и громкоговоритель, как было описано, но вращающегося магнита нет. Подносим магнит, слышим какой-то звук, например, с частотой 2000 периодов в секунду. Удаляем магнит — звук пропадает. Что это значит?

Это значит, что по нашей железной проволоке проходит переменный ток с частотой 2000, что ее элемен-

тарные магнетики столько раз в секунду освобождаются и каждый раз производят эффект Баркгаузена.

В конечном счете все это показывает, что существуют эти элементарные магнетики, что железо имеет структуру.

Если ток по проволоке настолько силен, что она накаляется до  $700^{\circ}\text{C}$ , все явление перестает существовать, как оно не существует, например, при применении медной или какой-либо другой проволоки из немагнитного материала. Это потому, что при такой высокой температуре так сильно движение молекул, что их группы распадаются, рассыпаются; железо перестает быть магнитным материалом: элементарные магнетики не удерживаются в правильном положении, как их устанавливает магнитное поле, — они тотчас выскакивают из него от сильных ударов, происходящих от теплового движения.

## Э л е к т р о н

Теория атомного строения вещества перекинулась и на электричество — была постепенно разработана электронная теория. Именно к электронной теории следует отнести замечательное предвидение Энгельса (около 1880 г.): «В области электричества еще предстоит только сделать открытие, подобное открытию Дальтона, которое даст всей науке сосредоточие, а исследованию прочную (количественную) основу. Благодаря этому рыхлому, разлезлому состоянию учения об электричестве, делающему пока невозможным установление какой-нибудь всеобъемлющей теории, и возможно то, что в этой области царит односторонний эмпиризм»<sup>1</sup>. Теперь мы такую теорию имеем, и непрерывная цепь новых открытий подтверждает ее плодотворность.

---

<sup>1</sup> Ф. Э н г е л ь с, Диалектика природы, 1929, стр. 207.

Первым поводом к этому послужило явление электролиза. При электролизе вещество (например, водород, медь, серебро) движется и затем выделяется вместе с «протекающим» электричеством. Электричество является как бы связанным с веществом. При этом оказывается (законы электролиза Фарадея), что чем больше атомов продвинулось и выделилось, тем больше прошло электричества, что электричество, значит, присоединяется к веществу в микрокосме, как при химическом соединении. И так как далее подсчет показывает, что на каждую валентность одного атома всякого вещества приходится всегда одно и то же количество электричества, то и является мысль, что это постоянное количество есть атом электричества—электрон, находящий свое место при атоме вещества.

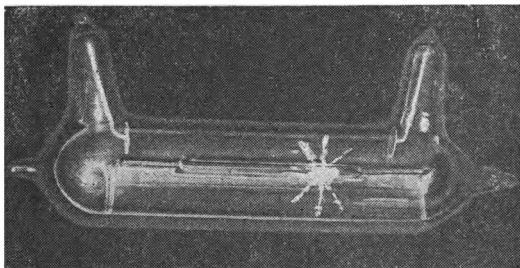
На основании такого рассуждения явление электролиза позволяет, зная число Авогадро, точно, с многочисленными проверками на различных веществах, вычислить заряд электрона.

Таким образом оказалось:

$$\text{заряд электрона} = 1.591 \cdot 10^{-19} \text{ кулона.}$$

Химия из явления электролиза дает величину заряда электрона. Совсем другое явление, разбираемое на основании законов механики, позволяет определить его массу. Через стенки стеклянного сосуда *C* (фиг. 60) пропущены металлические электроды *K* и *A*; если воздух в сосуде достаточно эвакуирован и электроды присоединены к генератору, дающему достаточное напряжение, то в сосуде образуется «поток» из электронов, дующий от *K* к *A*. Это его направление несомненно, так как определяется направлением вращения легкой мельнички, поставленной на его пути в сосуде *C*. Вращение мельнички показывает, что этот «катодный поток» как бы давит на тело, которое встречает на своем пути, как давит ветер и давит свет; но подсчеты показывают, что давление его

гораздо больше, чем давление света, по мощности равного катодному потоку. Надо, однако, подчеркнуть, что действие струи электронов на крылья мельнички не может быть в точности таким же, как действие струи воды или пара. Электроны не отскакивают, не разбрызгиваются от встречи с веществом крылышка, — припомним, сколь они мелки по сравнению с атомами! Явление должно быть значительно сложнее, в нем принимают участие и остаточные следы воздуха в трубке, но результат полу-



Фиг. 60. Электронная мельница Крукса  
(слева — анод, справа — катод)

чается тот же самый — за счет кинетической энергии электронов получается кинетическая энергия вращения мельницы (в том же направлении).

Катодный поток нагревает предметы, в которые он ударяется, но кроме того заставляет их светиться, «флуоресцировать», будто он есть свет очень короткой волны. Начинают светиться стенки сосуда. Заслон, поставленный на его пути, даст на стенке сосуда, противоположной катоду, тень, повторяющую очертание заслона; это опять показывает, что поток распространяется от катода и притом в виде прямолинейного пучка. Катодный поток обнаруживает в себе странное сочетание свойств ветра и луча света. Скорость его распространения



оказывается близкою к скорости света. Крукс, который впервые приписал этому явлению особое значение, был им столь изумлен, что стал считать катодный поток особой формой материи, «лучистой материею» («*radiant matter*»). Как будто в этом явлении мы наблюдаем особое, четвертое, состояние материи. Но не по этому пути предположения новых состояний пошло наше знание. Наука пришла к представлению, что катодный поток есть просто электрический ток, замыкающий цепь генератора на участке  $KA$ ; это есть электричество, движущееся от минуса к плюсу, т. е. отрицательное электричество.

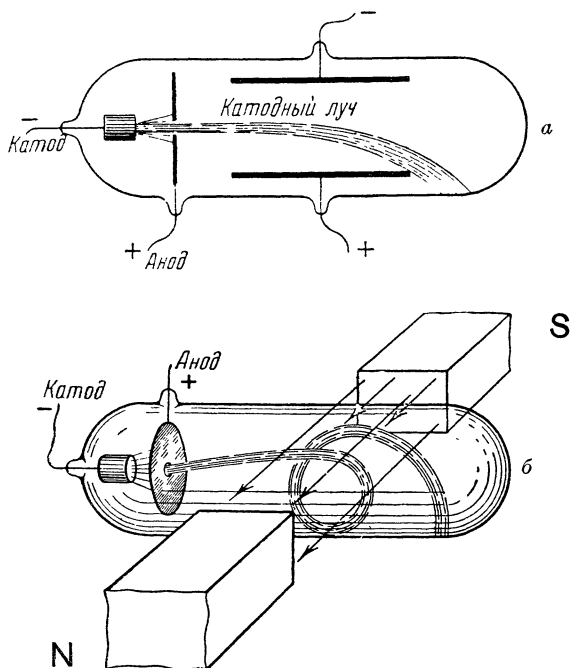
Откажемся от макроскопической сплошности катодного потока, он, как и электричество при электролизе, состоит из своих атомов, т. е. электронов, в данном случае отрицательных. Подвергнем поток действию электрического поля (фиг. 61a); теперь каждый электрон падает под действием электрической силы на положительно заряженную пластинку конденсатора; он падает, как снаряд падает под действием силы тяжести. По законам механики, зная скорость электрона и электрическую силу, действующую на него (т. е. напряженность поля и заряд электрона) и изучив параболу его падения, мы определим его массу.

Точно так же мы определим ее, если мы ухитримся подействовать на электрон точечным (сосредоточенным в очень маленьком объеме) положительным зарядом, вокруг которого он станет описывать замкнутый путь.

Наконец, также на основании законов механики, мы можем определить массу движущегося электрона, действуя на него магнитным полем, возбуждая электромагнитную силу, как мы в электродвигателе действуем на ток в проводнике (фиг. 61б).

Возможны комбинированные действия. Получается громадное разнообразие явлений, из которых определяется масса электрона. Эта величина оказывается одной из наиболее точно и разнообразно измеряемых.

Оказалось, что масса электрона  $= 9,109 \cdot 10^{-28}$  грамма,  
или  $\frac{1}{1838}$  массы водородного атома.



Фиг. 61. Движение электронов а) в электростатическом и б) в магнитном полях

### Электрон и вещественный атом

Точное определение электрона по его заряду и массе глубоко изменило наше понимание электричества. Это такая материя, реальные признаки существования которой начинаются с утверждения реальности ее атома;

все другие вещества мы узнаем макроскопически и, уже исходя из этого, судим об их атоме.

Электричество же, наоборот, прежде всего познается в микрокосме, познается как электрон. Пребывание электричества в «атомном мире» получило необыкновенно резкое выражение: атом всякого вещества включает в себе электроны, как неперенную часть своего состава. В. И. Ленин говорит: «электрон так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна».

Таким образом электричество, и именно отрицательное электричество перестало быть чем-то посторонним веществу, вливаемым в тело, когда оно электризуется, могущим не быть в этом теле (когда оно не наэлектризовано).

Древний вопрос, что такое электричество, поглотившись другим вопросом, что такое атом всякого вещества.

В конкретном виде и как первое приближение строение атома представлялось таким: всякий атом в нормальном состоянии нейтрален, т. е. не заряжен; следовательно, он включает в себе положительный заряд, равный по абсолютной величине сумме электронов данного атома.

Этот положительный заряд присущ «ядру атома». Электроны притягиваются к ядру по закону Кулона; имея известную скорость (движение не отделимо от материи) и притягиваясь к некоему центру, к точечному заряду, они описывают вокруг него, т. е. вокруг ядра, пути, соответственные законам механики.

Простейшим случаем такой системы является атом водорода, его ядро — простейшее ядро, «протон»; оно противопоставляется одному вращающемуся вокруг него электрону. Следовательно, заряд протона положительный и равный заряду электрона; его масса почти равна массе водородного атома.

Ядра всех других атомов более сложны; они состоят из нескольких протонов соответственно своему атомному весу, так, например, атом гелия приблизительно в четыре

раза превосходит атомный вес водорода. Но атом гелия имеет два крутящихся электрона; отсюда следует, что два протона из четырех, составляющих ядро гелия, нейтрализуются другими двумя электронами, заключенными внутри самого ядра.

Таким же образом описывалось электрическое строение атомов остальных элементов; число крутящихся электронов задавалось местом элемента в менделеевской системе; ядро составлялось из протонов и электронов соответственно этому числу и атомному весу элемента. Химия к этому времени окончательно стала на ту точку зрения, что все элементы составлены из одних и тех же первичных составных частей.

## Э л е к т р о н н а я   т е о р и я   с т р о е н и я в е щ е с т в а

Открытие электрона обновило и сильно продвинуло учение о самом электричестве. Однако в гораздо большей степени оно отразилось на нашем понимании строения вещества. Введение электрона в атом и последовавшая затем необходимость признания положительного атомного ядра, введение электрических сил, связующих атом в одно крепкое целое, преобразило наше понимание вещества, сделало его электрическим.

Свойства всех различных веществ стали пониматься через электроны. Возьмем, например, проводники и изоляторы: электроны атомов изолятора не могут выйти из своих атомов, поэтому электрическое поле, вошедшее в изолятор, остается не использованным; изолятор выдерживает электрическое поле; в нем может существовать электрическая энергия, не преобразуясь в другую форму. Электроны атомов проводника, например металла, наоборот, не столь связаны со своими атомами; они в известной мере свободны; электрическое поле, введенное в такое тело, приводит электроны в движение; его

энергия превращается в их кинетическую энергию, проводник нагревается, идет ток.

Электрический ток по электронной теории не представляет собою «протекания» какого-то постороннего «электричества» по телу, но передвижение его же (тела) собственных электронов. Электрический ток по проводнику есть движение отрицательного электричества, он идет по внешней цепи от минус-зажима генератора к плюс-зажиму.

Свобода электронов в проводнике понимается приблизительно так, как в химии понимают диссоциацию молекул; «электроны проводимости» свободны, — это не значит, что атомы проводника остаются без должного числа электронов, что они не нейтральны в электрическом смысле (положительно заряжены). Атомы нейтральны, но их электроны перебегают от атома к атому, они не закреплены за своими атомами. В химии не считается, что, например, молекулы поваренной соли  $\text{NaCl}$  в водном растворе диссоциированы все, они диссоциированы лишь частью, в известном проценте; также и в электронной теории проводимости не предполагается, что, например, в атоме меди все его 29 электронов (вне ядра) свободны; они свободны лишь в известном проценте. Это говорит за то, что «диссоциация», как она понимается в химии, не есть акт только внутримолекулярный, а происходит в условиях всего комплекса молекул (статистически). Аналогично этому «освобождение» электрона (в физике) есть результат взаимодействия совокупности электронов.

За этими свободными электронами металлов установилось название «электронный газ». Они мечутся в проводнике хаотически, как молекулы газа, со скоростями, увеличивающимися с повышением температуры тела. Отсюда-то и получилось объяснение того замечательного факта, что у всех чистых металлов проводимость уменьшается с повышением температуры.

Это было победой электронной теории проводимости.

Но еще большим триумфом ее было точное доказательство того поразительного факта, что металлы, лучше проводящие электричество, являются и лучшими проводниками тепла.

Однако она явно недостаточна. Влияние температуры ею указывается лишь приблизительно верно (корень квадратный от абсолютной температуры вместо первой степени, как дает опыт); она совершенно не дает объяснения сверхпроводимости (проводимость почти равная бесконечности), вдруг наступающей у многих металлов, при некоторой очень низкой температуре. Она приводит даже к нелепым выводам, если ее положения широко распространить на отдаленные от электричества отделы физики (теплоемкость). Ей недостает прежде всего знания процента освобожденных из атома электронов. Ее внутренним недостатком является также пренебрежение взаимным отталкиванием между свободными электронами и притяжением их к тем молекулам, которые в данный момент лишены нормального числа электронов, т. е. положительно заряжены. Наконец, электронный газ слишком сконцентрирован, чтобы к нему можно было применить простую газовую теорию: если предположить, что в каждом атоме меди только один электрон свободен, то окажется, что в каждом кубическом сантиметре меди газовых электронов почти в 4000 раз больше, чем молекул газа в том же объеме при обычных условиях. Первоначальная, так называемая классическая электронная теория проводимости требует пересмотра, и она непрерывно видоизменяется за последние 40 лет на основании всех новых методов физики, включая «квантовую механику» и теорию «вырожденного» газа (новая статистика).

## Э л е к т р о н ы   и   с в е т о в ы е   в о л н ы

Так же, как свойство электрической проводимости, через электроны получает свое объяснение другое основное свойство вещества — излучение света атомом.

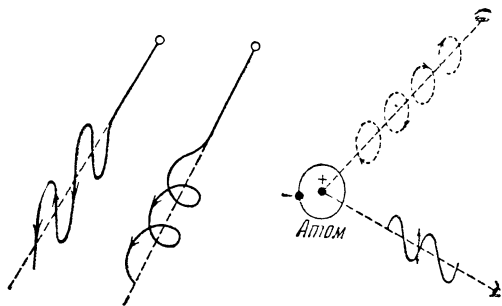
Электрон является началом расходящегося во все стороны потока электростатической индукции. Из содержания учения Максвелла можно вывести, что, если электрон вращается вокруг какого-либо центра, например атомного ядра, то по линиям его потока индукции проносятся со скоростью света волны с частотой оборотов этого вращения. По-своему это понимал и Фарадей: если качать один конец веревки (грубая картина силовой линии), закрепленной другим концом, то по веревке побегут волны.

Таким образом выходит, что само первичное представление об электрическом строении атома, как о группе электронов, вертящихся вокруг некоего центра, уже как будто дает излучение электромагнитных волн, т. е. света. Атом светит, потому что существует как таковой. Но не всякое тело всегда светит! Свет есть излучение энергии, расход энергии; атом не может вечно испускать свет, не черпая откуда-нибудь возмещения расходуемой энергии. Если он черпает ее из своего запаса, то он должен изменяться (электрон вращается все медленнее и, наконец, падает на ядро), и тогда не существует вечного неизменного атома.

Возражение очень существенно. «Но предоставим разрешать его следующим поколениям, — думали в 90-х годах прошлого века, — отбрасывая из-за него всю электронную теорию, мы рискуем выплеснуть то ценное, что в ней заключается». Это ценное: она непринужденно объясняет все разновидности светового луча; если мы смотрим по перпендикуляру к плоскости орбиты электрона, мы видим кругово-поляризованный луч (подобное крутящееся колебание распространяется по веревке, свободный конец которой мы не качаем, но крутим); если мы смотрим, держа глаз в плоскости орбиты электрона, когда его путь представляется нам прямой линией, мы видим луч плоско поляризованный; наконец, при хаотическом распределении орбит множества электронов, мы

не усматриваем определенных путей и видим хаотический, «естественный», неполяризованный свет (фиг. 62).

В 1896 г. голландскому физику Зееману пришла мысль испытать действие магнитного поля на излучение света. Он взял сильный электромагнит и поместил между его полюсами газовую горелку, в пламя которой вводил поваренную соль. В очень хороший спектроскоп он рассматривал желтую линию, которую дает светящийся атом натрия. Зееман смотрел, не изменится ли эта линия,



Фиг. 62 Схематическое изображение плоской и круговой поляризации

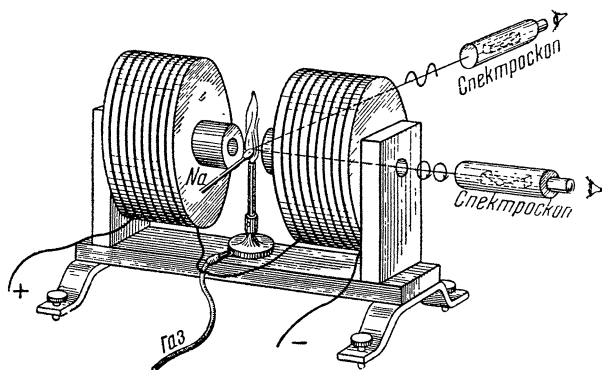
когда замыкается ток электромагнита, когда все светящиеся атомы попадают в поток магнитной индукции. Им руководила одна мысль Максвелла, что линии магнитного потока суть «вихри». Эти вихри могли бы изменить частоту оборотов вращения электронов; хороший спектроскоп должен был бы показать изменение световой частоты. Но ничего этого не произошло. Опыты были оставлены; Зееман усумнился в разумности своего предположения, что возможно нам, извне, подействовать на излучающий атом.

Но вот он вычитал у Максвелла, что Фарадей занимался опытами на подобную же тему. Фарадей ничего не полу-



чил; но разве при своих технических средствах он мог иметь 35 ампер в обмотке электромагнита, разве в 40-х годах он мог иметь в руках такой спектроскоп, какой был у Зеемана через пятьдесят лет? Живейшим образом ободрило его то, что и в голове Фарадея была та же мысль.

Зееман вторично приступил к опытам, усилив свою техническую обстановку (фиг. 63). Он увидел, что под действием магнитного поля линии натрия неизменно рас-



Фиг. 63. Схема наблюдения явления Зеемана

ширялись; то же он получил с литием. Но спектроскописты знают, что расширение линий происходит и от повышения температуры и от других побочных обстоятельств; в нем нельзя было видеть доказательство действия магнитного поля.

Тогда Зееман обратился к своему профессору Лоренцу, главному вождю тогдашней электронной теории. Лоренц рассмотрел вопрос во всей подробности, исходя из законов ньютоновской механики. Электрон, вращающийся по своей орбите, есть ток, виток «соленоида» с током;

магнитный поток нанизывает электронные орбиты перпендикулярно своим линиям. Вместо хаотически разбросанных орбит получают стройные ряды параллельных орбит; свет, испускаемый ими при возбуждении, оказывается поляризованным. Те электроны, которые случайно вращаются в том же направлении, в котором их ускоряет магнитное поле, увеличивают быстроту своего вращения; от них получается свет большей частоты, чем нормально. Для обратно вращающихся — меньшей. Поэтому при рассматривании вдоль магнитного поля спектроскоп должен дать по две линии (кругово-поляризованного света) вместо каждой одной; он должен дать так называемый дуплет (фиг. 63).

При рассматривании поперек поля, когда наш глаз находится в плоскости орбиты электрона, спектроскоп дает те же две линии, но уже плоско-поляризованные, и, кроме того, третью излучаемую нормально; все вместе составляет так называемый триплет; эта третья линия появляется от тех электронов, орбиты которых параллельны полю, на которые поле никак не действует; эти орбиты не нанизываются на линии магнитного потока.

Зееман все это увидел в 1897 г. к великому своему изумлению. Это «явление Зеемана» прогремело на весь мир, конечно — мир физиков, так как для широких кругов оно не могло быть понятным по своей геометрической и механической сложности.

Электронная теория была на вершине своего могущества. Вспоминаю, как мой учитель Н. Г. Егоров говорил мне: «Понимаешь, ведь Лоренц видит электрон в пиджачке, с галстуком, в круглой шляпе» — этим он хотел выразить, до какой степени стало ясным поведение электрона. Егоров впервые в нашей стране воспроизвел явление Зеемана, придав ему своеобразную форму.

Дуплеты и триплеты Зеемана повторялись во всех физических лабораториях мира для каждой спектральной линии различнейших веществ.

И вдруг... В данном случае это наступило слишком быстро. В те годы физика развивалась уже с небывалой быстротой. В том же 1897 г. Зееман увидал, что иногда получается четыре линии — квадруплет, вместо триплет; ему хотелось объяснить это «обращением» середины средней линии; она не раздваивалась, а только показывала два своих края, исчезнувши своею центральною частью, оставаясь в сущности единою. Но долго держаться за такое объяснение не пришлось; за опыты принялись крупнейшие оптики того времени и наблюдали случаи, когда одна линия дает в магнитном поле шесть, тринадцать и пятнадцать линий. Та простота — дуплет и триплет, — которую так искусно начертал Лоренц, исчезла, и еще более обострилось то недоумение по поводу запаса излучаемой энергии, на которое мы уже обратили внимание. Теория действительно требовала пересмотра.

1895 и 1896 гг.

Рентген открыл, что от кружковой трубки, когда она работает, исходят особые лучи; они необыкновенны тем, что проходят сквозь черный картон, сквозь большие толщи тканей, сквозь дерево и тонкие слои металлов. Они вызывают флуоресценцию (что и было причиною их обнаружения), действуют на фотографическую пластинку. Они легко проходят сквозь всю толщу человеческого тела, бросая тень от костей скелета и более слабую тень от других более или менее плотных частей организма, например сердца.

Рентген (фиг. 64) открыл это совершенно случайно, ибо ничто в современной ему физике не давало повода ожидать чего-нибудь подобного.

Фотография (теневая) внутренностей живого организма, позволяющая судить об их расположении, об их действии, о присутствии в теле посторонних предметов (пуля) и местоположении их, конечно, должна была заинтере-

совать врачей, и первый доклад о своем великом открытии Рентген сделал в заседании медиков.

Но, когда через газеты весть об открытии Рентгена распространилась, оно произвело огромное впечатление на самые широкие круги. При этом массами не руководил какой-либо специальный интерес; всех взволновала возможность увидеть то, что никогда никто не видел, — внутренность живого организма; увидеть, как бьется собственное сердце, увидеть свой скелет. Теперь, когда ежедневно почти в каждой больнице делаются десятки рентгеновских просвечиваний и никто этим не интересуется с точки зрения самого процесса, трудно понять тогдашнее увлечение: все, кто только мог, выступали с лекциями об открытии Рентгена перед толпами



Фиг. 64. Вильгельм Рентген

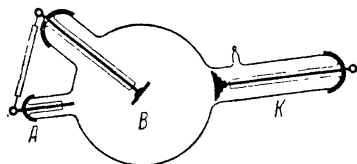
слушателей; молодые доценты соперничали числом сделанных ими популярных выступлений. За последние полвека не было подобного увлечения научным открытием.

Однако серьезный лектор, выступавший в то время на тему о лучах Рентгена, был сам в немалом затруднении: природа этих лучей оставалась загадочной. Лишь гораздо позже стало известным, что рентгеновы лучи

преломляются, обнаруживают диффракцию, могут быть поляризованы, что это есть свет чрезвычайно большой частоты, в тысячи раз большей, чем фиолетовый свет. Тогда ничего этого не знали, и Рентген сам очень удачно и осторожно обозначил это полное незнание одною буквою: он назвал открытое им явление «икс-лучами».

Лектор описывал крукову трубку обычно в той форме, которую придал ей Рентген (фиг. 65), описывал катодный поток в ней с его свойствами и заканчивал к общему восхищению снятием фотографии костяка чьей-нибудь руки.

Вспоминаю тогдашний разговор. Физик, один из тех, которым хотелось бы, чтобы никто, кроме него, не делал



Фиг. 65. Трубка Рентгена

открытий, замечает: «Для медицины икс-лучи, вероятно, будут очень ценны, но для физики... что это может дать?». Ему отвечает другой, сильно увлекшийся «рентгеном» и мучимый вопросами микрокосма: «Открытие Рентгена раскроет нам строе-

ние вещества». Это было сказано, может быть, и случайно, но оказалось верной характеристикой того, что произошло дальше.

Икс-лучи начинаются от круковской трубки. Но где именно находятся те точки, из которых они исходят? В то время круковы трубки не были так хорошо откачиваемы, как современные (трубки Кулиджа); в таких трубках ярко флуоресцирует то место стекла, противостоящее катоду, в которое ударяется электронный поток. Это-то место, все точки пятна флуоресценции и стали считать источником рентгеновских лучей.

Беккерелю представилось: не является ли испускание икс-лучей свойством всякого флуоресцирующего тела.

Чтобы испытать это, нужно вызвать флуоресценцию в каком-либо теле, осветив его, например, солнечным светом, и положить его в то же время на фотографическую пластинку, запертую в кассету. Если от этого тела пойдут икс-лучи, они пройдут сквозь стенки кассеты и произведут отпечаток; если не будет икс-лучей, отпечатка не будет, так как солнечные лучи, как известно всем фотографам, не действуют на фотопластинку, когда она заложена в кассету.

Первые опыты Беккереля ничего не дали. Он особенно надеялся на сильно флуоресцирующее вещество — уран. Повторив с ним опыт, он получил очень слабое, сомнительное действие. 26 и 27 февраля 1896 г Солнце часто заходило за тучи, а Беккерель хотел испытать длительное действие; он заложил фотопластину в кассету и вместе с ураном положил в шкаф; 28 и 29 февраля Солнце совсем не показывалось. Тем не менее Беккерель проявил пластинку 1 марта и нашел очень сильный отпечаток. Два пасмурных дня счастливо обусловили достаточно долгую экспозицию.

Можно было сделать только один вывод. уран «самопроизвольно» испускает сильно проникающие лучи.

Так была открыта радиоактивность. Это слово можно перевести: «излучательная действенность».

Лучи радиоактивных тел бывают трех сортов: альфа, бета- и гамма-лучи; последние оказались икс-лучами особенно высокой частоты; вторые — электронным потоком, подобным катодным лучам; первые же — потоком положительно заряженных частиц с массой ядра атома гелия.

Можно себе представить, как трудно было бы разобратся в этом сложном излучении, если бы физики не были предварительно ознакомлены с катодным потоком и с рентгеновыми лучами. На этих двух объектах изучения были установлены, в сравнительно простой форме, а главное — раздельно (а не в смешанном виде, как при радиоактивности) два основных вида лучей: во-первых,

вещественные лучи (как альфа- и бета-лучи), состоящие из заряженных частиц, на которые действует и магнитное, и электрическое поле, скорость которых может быть весьма разнообразной; во-вторых, лучи световые (гамма-лучи), распространяющиеся всегда с огромною скоростью, но бесконечно различные по своей частоте, т. е. быстро-те следования одной волны за другою.

Это два совершенно различные явления, хотя они и назывались одним и тем же словом «лучи»; одно—ветер, разбиваемый нами на частицы, равные между собой, имеющий «частичную» структуру; другое — сплошной ряд волн, следующих через равные промежутки времени.

### Ф о т о н и э л е к т р о н н ы е в о л н ы

Так все думали, так мы учились, так и учили. И если на экзамене на вопрос (вспоминаю такой случай), чем могут отличаться катодные потоки, отвечающий приплетал «частоту», это ему ставилось, конечно, в минус, потому что он искажал такую важную и очевидную научную классификацию явлений.

Но около десяти лет тому назад появились другие мысли, другие научные подходы. И теперь уже не может быть знающего физика, который бы не отдавал себе отчета, что эта классификация неверно была понимаема. Мы говорим теперь: поток световых лучей есть сплошное следование волн, в котором в то же время необходимо признать частичное строение; он состоит из отдельных «фотонов». Катодный поток есть прерывный ряд отдельных частиц, который в то же время движется как сплошной поток волн. С каждым движущимся электроном сопряжена волна, распространяющаяся с определенной скоростью, зависящей от скорости электрона.

Эти положения вызывают недоумение. Мы очень привыкли думать так: волна есть волна, поток частиц есть поток частиц. Мы считали ошибочным, неразумным припутывать

к представлению о потоке частоты и к представлению о волнах дискретные фотоны. А теперь именно это соединение таких противоположных представлений составляет, пожалуй, основной стержень физики микрокосма.

Наука подошла к такому соединению противоположного постепенно. Началось это в 1900 г., когда Планк высказал соображение, что можно математически подсчитать распределение энергии между отдельными участками спектра излучения накаливаемого (так называемого черного) тела, между волнами различной длины, определить, какая доля всей энергии на какой участок придется, только в том случае, если рассматривать световую энергию, как состоящую из отдельных порций — «квант», из отдельных частиц — фотонов. Без этого все формулы дают не то распределение энергии в спектре, какое наблюдается на опыте. Планк вычислил энергию одного светового кванта, или фотона, для разных цветных лучей спектра. Она оказалась пропорциональной его частоте.

Энергия фотона  $= h\nu$ , здесь  $\nu$  означает частоту световых волн, число их колебаний в секунду, а  $h$  — постоянная величина (постоянная Планка):  $h = 6.6 \cdot 10^{-27}$  эргов в секунду (фиг. 66).

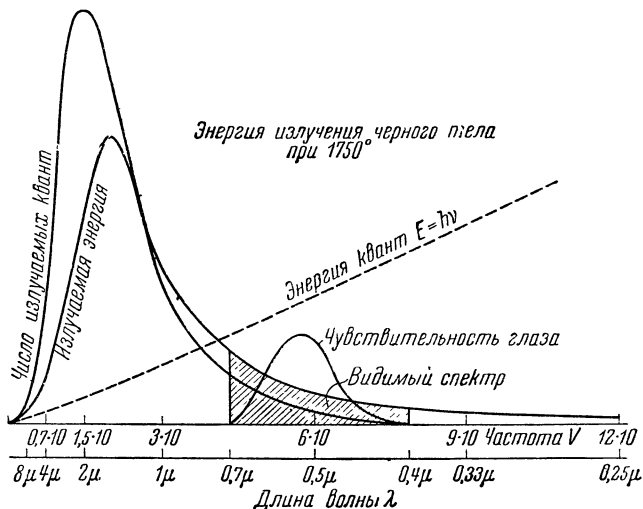
Сначала полагали, что частичное строение световой энергии сказывается только в моменты излучения и поглощения; что световая энергия, по существу не имеющая частичной структуры, накапливается до кванта перед тем, как происходят эти два явления. Но Эйнштейн высказал положение, что свет всегда состоит из квант той величины, которая указана Планком.

Свет не непрерывно подает энергию, а прерывисто, квантами. И было неправильно думать, что его фотоны следуют один за другим в каком-либо порядке, соответственно цвету, т. е. частоте света; они летят в полном беспорядке; и только за секунду, макроскопически, в среднем, число их получается всегда одним и тем же, пока яркость источника света остается одною и тою же.



Ньютон представлял себе световые частицы следующими в каком-то порядке, ритмически; поэтому он свою корпускулярную теорию мог объяснить ритмические явления света (интерференция, диффракция).

С фотонами этого сделать нельзя: они вносят в световой поток молекулярный хаос. Так как в каждом коли-



Фиг. 66. Кривые распределения по спектру: 1) энергии рас-  
каленного ( $1750^\circ$ ) тела, 2) размеров квант и 3) числа излу-  
чаемых квант

честве энергии можно найти инертность — массу, то и фотон мы можем рассматривать как массу. Эти массивные световые молекулы обогащают собою микрокосм, они входят в общую игру атомического мира. Эйнштейн первый заговорил, например, о столкновении фотона с электроном, теперь нередко рассматривается столкновение его с ядром атома.

«Фотоэффект» — выбрасывание атомом электрона под действием света есть результат столкновения фотонов с электронами атома, и чем больше световая частота, чем крупнее по своей энергии фотоны, тем с большей скоростью вылетают электроны фотоэффекта. При этом вся энергия фотона затрачивается на движение электрона.

Теория соударений применяется к фотону еще более наглядно, чем для объяснения фотоэффекта, при объяснении так называемого явления Комптона (1923). Это такой случай, когда фотон, ударившись об электрон, не отдает ему всей своей энергии, а лишь часть ее; электрон отлетает, но отскакивает и фотон, унося с собою уже меньшую энергию, т. е. по формуле Планка обладая меньшей частотой световых колебаний. Макроскопически наблюдатель видит такой поражающий процесс: на тело падает свет одного цвета (икс-лучи известной жесткости), а отражается под известным углом другого цвета (икс-лучи меньшей жесткости). Отскакивающие при этом электроны также доступны наблюдению. Все явление Комптона детально прослеживается на опыте.

## Строение атома по Бору

Ничто так не помогает понять квантовое учение о свете, как теория Бора (1913). Долгое время этот удивительный полет мысли занимал центральное место в физике, все остальное группировалось вокруг теории Бора. Попытаемся понять эту знаменитую теорию.

Хорошо было бы, если бы читатель хоть раз увидал спектр водорода. Водород испускает свет, состоящий из нескольких спектральных линий, расположенных по какому-то закону: при первом взгляде замечаешь, что эти линии все ближе друг к другу, все теснее расположены, если идти от красного края спектра к фиолетовому.

Бальмер (умер в 1898 г.) выразил этот закон математически; он был учитель геометрии, интересовался законами

симметрии и пропорций в архитектуре. он нашел закон следования частот в спектре водорода. Он дал такую единую формулу, с помощью которой можно было вычислить частоту каждой линии спектра, если дана частота предыдущей, т. е. частоту всех линий, если дана первая.

Формула Бальмера заключала в себе частоту первой линии как некоторую постоянную, для всех остальных линий серии она давала очень точные результаты.

Бор принял для атома строение, аналогичное солнечной системе, для водорода это было ядро и один электрон, вращающийся вокруг ядра. Бор исходил из электронной теории. Но он не признал того ее положения, что электрон испускает свет потому, что вращается; тогда атом водорода давал бы только одну частоту, равную частоте его вращения, а он дает серию частот. Мы должны были бы предположить, что существует столько сортов атомов водорода, сколько линий в его спектре.

Бор установил взгляд, что каждый атом водорода может испускать (конечно, не в одно и то же время) любую линию серии. При этом он предположил, что для электрона атома не все орбиты «дозволены», а только некоторые, и что электрон «светит», т. е. дает электромагнитную волну только в том случае, когда перескакивает с одной из внешних орбит на одну из внутренних. При таком перескоке он излучает один световой квант (фотон); это излучение понятно с точки зрения подсчета энергии: приближаясь к ядру, электрон теряет электрическую энергию, потому что атомное электрическое поле сокращается (как в конденсаторе при сближении его пластинок). Величина этого кванта энергии, этого фотона, определяет частоту испускаемого света по закону Планка.

При данном числе орбит возможно определенное число перескоков, с 3-й на 2-ю, с 4-й на 1-ю и т. д. Бор доказал, что, если верно выбраны дозволенные орбиты, то все возможные перескоки и дают всю серию Бальмера;

при вычислении он пользовался хорошо определенными к тому времени массой и зарядом электрона.

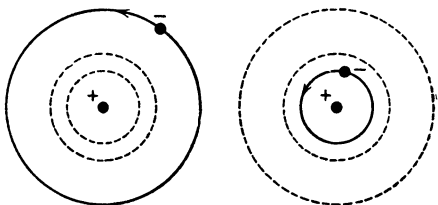
По теории Бора, чтобы заставить атом светить, необходимо его электрон предварительно снять с его орбиты и поместить на более далекую, совершить над ним известную работу, или, как теперь говорят, возбудить атом. Это возбуждение производится либо фотоном, вторгающимся в атом (тело светит, поглощая падающий на него свет), либо электроном (тело флуоресцирует под действием катодного потока, икс-лучи). Техника настоящего времени искусно использовала эти способы возбуждения атома (фиг. 67).

Отрицая непрерывное излучение электрона, вращающегося по своей орбите, Бор отверг важнейшую часть стройной теории Максвелла; зато он дал наиболее ясное, какое только мы имеем, описание излучения фотонов, или квантования света.

Движение выброшенного телом фотона сопровождается световыми волнами, причем основное качество этих волн — частота их — определяется количеством энергии каждого фотона по формуле Планка.

Теория Бора привела ко множеству ценнейших выводов и точных подсчетов.

Весьма существенно для теории Бора введенное им понятие о «дозволенных орбитах». Он держался вообще аналогии с солнечной системой, но только не в этом пункте. Астрономия не дает никаких оснований для выделения каких-либо орбит; все орбиты возможны. Механика солнечной системы по существу не изменилась бы, если бы все планеты оказались на каких-либо других орбитах,



Фиг. 67. Возбужденный и невозбужденный атом по Бору

на других расстояниях от Солнца. Все пространство вокруг Солнца сплошным образом заполнено возможными орбитами.

То, что сделал Бор, есть «квантование орбит»; действительно возможные для атомного электрона орбиты представляют собою некоторую структуру из дискретных (дозволенных) орбит; эта структура определяет возможные перескоки, которыми, как выше сказано, определяются частоты излучаемого света.

Тот спектр водорода, та бальмеровская серия, которую вы наблюдаете, глядя через спектроскоп на светящийся водород, в конечном счете — структура «дозволенных» орбит водорода.

Отметим, что слово «дозволенный» было допущено в физике, как временное, случайно попавшееся слово. Не может быть «воли» в физическом явлении. Это слово своим сарказмом хорошо подчеркивало полное непонимание того, как может существовать в пространстве, окружающем ядро, какая-то семья отборных, единственно «реальных» линий.

«Квантование орбит» было начальным шагом. Физики пошли в этом направлении дальше; квантовались различные величины; получались результаты, неслыханные раньше в механике и геометрии. Но этим приемом решались задачи, не разрешимые раньше. Можно было слышать от самих авторов такие слова: «Пробую, получаю прекрасные результаты, но ничего не понимаю»... Наконец, началось просветление.

## Еще новый тип волн

Теперь, когда все это уже высказано и использовано и прошло 15 лет, кажется такую естественную мысль (Дебройль, 1924): движение фотона сопряжено с волною — иначе свет не имел бы частоты; почему же не предположить, что движение электрона также сопряжено с каким-

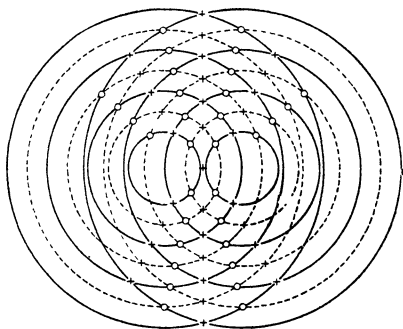
то волнением? Дебройль показал, как можно определить частоту, которую несут с собой эти особенные «электронные волны», она зависит только от массы электрона. Но длина электронной волны может быть очень различна: она зависит от его скорости. Это — не свет!

Дебройль обратил внимание на то, что боровская «дозволенная» орбита — это такая орбита, которая имеет длину, кратную длине волны движущегося по ней электрона. На «дозволенной» орбите «электронная волна» укладывается целое число раз. На всех орбитах, для которых это условие не удовлетворяется, электрон удержаться не может. Слово «дозволенный» потеряло свой насмешливый смысл; тут дело не в чьей-то воле, а в простом арифметическом соотношении.

### О п ы т н о е   д о к а з а т е л ь с т в о

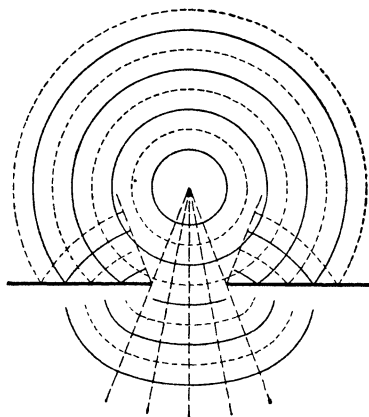
От квантования мы подошли к электронным волнам с той постепенностью, с какой развивалось познание физического мира за последние 30—40 лет. Эта постепенность несколько подготавливает к такому неожиданному, трудно осваиваемому конечному результату, каким являются электронные волны.

Фотоны, несущиеся в световых волнах, легче понимаются, чем электронные волны, сопровождающие движущийся электрон. Заметим (и это не бесполезно для недомывающего читателя), что волны Дебройля, конечно, не являются электромагнитными волнами (электрон может двигаться равномерно, прямолинейно; в этом случае он отнюдь не испускает электромагнитных волн); это не есть «излучение»: электронные волны не несут с собой энергии. Они только выражение сплошного, непрерывного фона, на котором разыгрывается такой дискретный факт, как движущаяся массивная точка (электрон). Математически этот фон получает такое же выражение, каким описываются волны.



- Усиление колебаний — „пучности“
- Ослабление колебаний — „узлы“

Фиг. 68. Интерференция двух волн



Фиг. 68а. Диффракция от края широкого отверстия

Но математика обязывает, она ведет к твердым выводам. Всякие волны, по самому своему смыслу, интерферируют между собою; два волнения при известном сочетании могут усилить друг друга, при другом — ослабить и взаимно уничтожиться (фиг. 68). Волны испытывают диффракцию, т. е. заходят за край стоящего на их пути препятствия (фиг. 68а). Если можно описывать движение электрона и целого катодного потока с помощью волн, то нужно ожидать, что этот поток проявит явления интерференции и диффракции и этим обнаружит свою волновую природу. Впервые с замечательным успехом это подтвердили на опыте Дэвисон и Джермер (1927); они поставили катодный поток в те же условия, в которых пучок рентгеновских лучей обнаруживает диффракцию, и получили диффракцию, т. е. чисто волновое явление от

движущихся электронов. Последовавшие затем опыты дали при подсчете полученных результатов отличное согласие с формулами новой, так называемой волновой, механики движущихся электронов и атомов. Оказалось, что знание законов обычной, так называемой классической, механики не может полностью объяснить движение электронов в микрокосме.

Теперь это явление многообразно используется техникой. Электронные волны, подобно лучам Рентгена, стали мощным орудием для исследования строения вещества. Появилась целая наука — «электронография».

### П о з и т р о н и н е й т р о н

Когда электрическая теория только что проникла в строение атома, электричество «отрицательное» представлялось в виде электронов, а «положительное» в виде водородных ядер — протонов.

За последнее время были наблюдаемы движущиеся электроны, которые повинуются действию магнитного поля, как всякий движущийся электрон, но с одной оговоркой: их путь отклоняется в обратную сторону; как будто эти движущиеся кванты электричества представляют собою ток не того направления, как электроны, но обратного. Если бы их пустить по обмотке якоря электродвигателя вместо электронов, он завертелся бы в другую сторону. Следовательно, их приходится рассматривать как кванты положительного электричества и целесообразно назвать «позитроны». К тому времени Дирак в своих теоретических представлениях пришел к выводу о необходимости существования квантов электричества, знака обратного электронам. Открытие позитронов явилось подтверждением теории Дирака.

Позитроны и электроны охватывают собою все понятия об электричестве. Находясь вместе, взаимоуничтожаясь, они обуславливают отсутствие электрического за-



ряда. Удар фотона гамма-лучей в систему атома может иногда произвести одновременно один позитрон и один электрон, причем сам фотон исчезает.

Около того же времени исследователи атомного ядра обнаружили еще один квант — нейтрон. Он обладает массой, приблизительно равной массе водородного атома, и, что самое главное, не несет в себе никакого заряда.

Среди квантов микрокосма появился незаряженный квант. Его роль в процессах преобразования атомных ядер, в «ядерных реакциях», оказывается очень большой. Теперешнее представление о составе атомного ядра совсем уже не то, что было раньше. Ядро атома состоит не из протонов и электронов, связанных силами электрического притяжения, а из протонов и нейтронов (с прибавлением, может быть, еще «нейтрино» — частичек с массой электрона, но без заряда), связанных силами не электрическими, а совершенно пока неизвестного происхождения.

В истории открытия нейтрона и определения его массы большое значение имеют работы (1930) Жолио и его жены Ирены Кюри, дочери Марии Складовской-Кюри, открывшей радий. Мы видим, таким образом, что с расширением наших знаний вопрос «что такое электричество» оказывается все более и более тесно связанным с вопросом «что такое вещество» в самом глубоком понимании этого слова.

## ВН. О природе электрического тока

Поместительный зал Дома культуры. Окна плотно завешаны; с улицы не попадает свет, не доходят звуки — легко сосредоточить внимание. Яркое освещение; на эстраде поставлены классные доски. Собралось 150 человек, в большинстве молодежь, проходящая в этом зале по вечерам курс электричества.

К 20 часам появился руководитель.

Он начинает с обращения к слушателям, призывая их к самой большой активности; он предлагает записками или устно выражать мысли и мнения, которые составились у обучающихся об электрическом токе.

«Об электрическом токе,— говорит он — еще нет окончательного представления (как и обо всяком другом явлении). Наука живет, развивается; она не окаменела, не завершилась, она движется новыми фактами и новыми подходами к явлению.

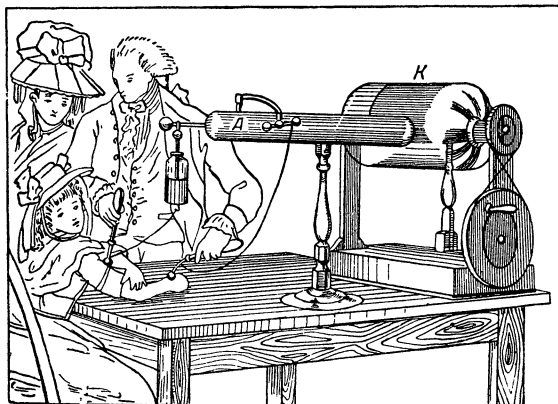
Жизнь науки, ее развитие заключается как в том, что в ней есть только что высказанная новизна, так и в том, что в ней имеются пережитки старого; они иногда очень сильны, иногда только скрытно и слабо тлеют, а иногда даже вновь оживают.

Поэтому, чтобы хорошо понять, как мы думаем о природе электрического тока, следует познакомиться и с новыми течениями мысли, и со старыми ее формами, хотя они и образовывались давно, когда люди только приступали к изучению явления электрического тока.

Немного более 200 лет тому назад было доказано, что существует два рода электричества, что эти два «противоположных» электричества взаимно притягиваются; 150 лет тому назад был установлен закон Кулона (строго

говоря, еще раньше). Эти факты являлись теми предпосылками, на которых строились первые попытки понимания электрического тока. Проводник, протянутый между двумя противоположными зарядами, позволяет им, повинующимся силе взаимного притяжения, сблизиться, столкнуться, нейтрализовать друг друга.

Я хотел бы, товарищи, чтобы вы представили себе совсем ясно всю старую обстановку явления. Это не будет бесполезно для вас.



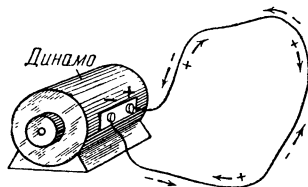
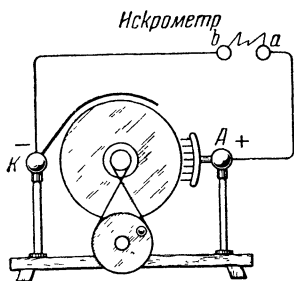
Фиг. 69. Электростатическая машина Адамса 1787 г.

Мы говорим: имеем два противоположных заряда... А кто их произвел? Откуда они взялись? Мы теперь понимаем, что их появление означает, что подействовал какой-то генератор, какая-то машина, которая на своих зажимах дает эти два противоположных заряда. Пусть это буду я, который потер стеклянную палочку о шерстяной лоскуток, или это может быть, как делали электрики XVIII века, вертящаяся электростатическая машина. На ее кондукторах *A* и *K* (фиг. 69) собрались противоположные заряды. Теперь старинный электрик приклады-

вал к кондукторам проводники, ведущие к искромеру (фиг. 70); машина вертелась, и проскакивала искра, светящая, жгучая, звучащая; значит, по проводникам шел ток.

Но не думайте, что наши предки разумели именно так. Во-первых, долгое время даже не существовало такого выражения «ток». По проводникам *Aa* и *Kb* распространялись электричества; по первому — положительное, по второму — отрицательное. За четыре года до открытия двух родов электричества было открыто свойство про-

водимости и именно под таким видом: проводник — такое тело, которое нельзя зарядить только



Фиг. 70 и 70а. Сравнение электростатической машины с динамо-машиной

в одном месте (как изолятор); заряд непременно распространится по всему проводнику.

Итак, заряды, производимые машиною, распространяются к *a* и *b*; здесь они взаимно сталкиваются и нейтрализуются; искра — это место, — скажем мы, — где электроэнергия превращается в тепло, свет и звук.

Искра есть, — скажем мы, — приемник электроэнергии, превращающий ее сразу в тепло, свет и звук. На нее было обращено все внимание наших прапрадедов; они мало думали о подводящих ток проводах, о «линии передачи», по-нашему. Поэтому и получилось то странное представление, что по *Aa* идет положительное электри-

чество, по  $Kb$  — отрицательное, а в  $ab$  происходит их столкновение.

Но прошло это время. Появились другие генераторы, также, конечно, дающие плюс и минус, не столь высоковольтные, но несравненно проще действующие, — так называемые гальванические элементы. Не для искры замыкалась их цепь, а, например, для накала проволоки или разложения сложных тел; и их цепь состояла из сплошного провода. Место, где, казалось, сталкивались электричества, исчезло. И пришлось придумать другую картину: электричество от  $A$  проходит по проводу до конца его  $K$ , а противоположное — тоже по всей цепи от  $K$  до  $A$ ; они нигде не сталкиваются, они как-то избегают прямой встречи; двигаясь по проводу, в то же время крутятся одно около другого, как бы танцуя.

Странное, временное, как бы не всерьез высказанное представление. Но вы замечаете, что оно уже ведет к тому, чтобы принимать во внимание всю цепь, соединяющую зажимы генератора (фиг. 70).

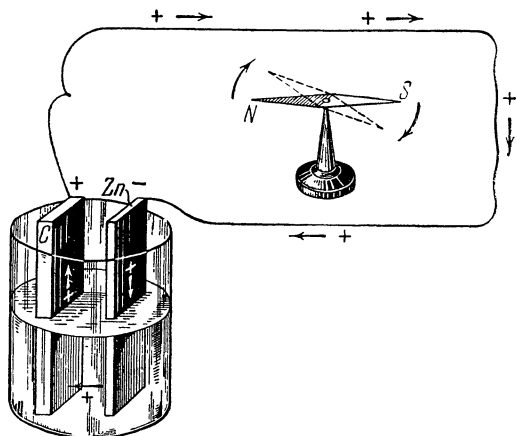
Товарищи, получена записка. (*Читает:*) «Почему лампочка, рассчитанная на 100 вольт, при включении в сеть на 140 вольт перегорает в одной точке?» Товарищи, не есть ли этот вопрос возрождение старого, старого представления? (*Общий смех. Голоса:* «Нет, это не то».) Ответ простой: не потому перегорает волосок лампочки в какой-нибудь одной точке, что в ней именно происходит столкновение и нейтрализация, а потому, что вследствие неоднородности волоска, в этой точке — наименьшее сечение, или какая-нибудь неоднородность материала, — значит, большее сопротивление, большее выделение тепла.

А вот вторая записка. (*Читает:*) «Скажите, кто изобрел электрический ток, в какой стране и в каком году?»

Товарищ, нельзя изобрести электрический ток, как не мог быть изобретен звук, свет, северное сияние, радиоволны, искровой разряд. Это явления природы, кото-

рые могут быть открыты, впервые наблюдаемы, впервые поняты, но не могут быть изобретены.

Я уже говорил, как давно электрики имели дело с электрическим током, плохо понимая, что они наблюдали. Следует считать, что Вольт в Италии в самом конце XVIII века, изобретая свой генератор (гальванические элементы), наблюдая ток от батареи элементов, первый понял самое главное, что отличает электрический ток:



Фиг. 71. Замкнутая цепь элемента и циркуляция тока

постоянный электрический ток всегда течет по замкнутой цепи и притом всегда циркулирует; например, плюс-электричество не идет только во внешней цепи от минус-зажима генератора к его зажиму, но идет далее через генератор (фиг. 71), преодолевая и его сопротивление, и таким образом возвращается к тому же минус-зажиму.

Имеются еще записки. (*Читаем:*) «Прошу пояснить суть перехода одного вида энергии в другой, в частности из механической в электрическую? — Как возникает при-

родное электричество и полезно оно в природе или нет? — Почему материальная частица становится активной, т. е. приобретает заряд, независимо от знака? — Интересно также знать природу противоположных знаков. Что же в конце концов представляет сущность электричества?»

Эти вопросы, — говорит руководитель, — отчасти предупреждают дальнейший ход нашей дискуссии, и в некоторой мере они будут освещены. Но именно только отчасти и в некоторой мере. Будем обязательно, товарищи, держаться одной нашей темы, а не раскидываться по различным, хотя бы и близким, темам. Вы задаете вопросы о природе электричества, а не о природе электрического тока; вопросы, видимо, наболевшие; особенно это видно из записки, которую я прочел последнюю. Но мы говорим об электрическом токе, как будто уже знаем, что такое электричество, или как будто для нас это не важно в данное время. Учитесь различать темы, разделять их, углублять данную тему, не запутываясь в соседних, которые могут быть гораздо труднее данной, могут оказаться даже пока что совсем неразрешимыми и этим своим свойством могут помешать работе, за которую мы принялись.

Отмечу еще, что на самом верном пути мысли тех, которые передали первую и третью записки; они говорят об энергии электрической, об активности (точнее, энергичности) заряженной материи, что нам как раз и необходимо в дальнейшем.

Согласно электронной теории электричество состоит из отдельных частиц электричества — электронов. По современному представлению о строении материи, каждый атом всякого вещества состоит из этих электронов и ядра, заключающего в себе протоны, нейтроны, позитроны. Таким образом, в настоящее время электричество не считается чем-то посторонним, отдельным от материи, которое можно только вводить в нее или отнимать от нее. Электричество — это сама материя; ее электроны — отрицательное электричество, ядра — положительное.

Названия эти ничего не говорят; ничего не изменилось бы в нашем представлении, если бы все называлось наоборот; названия эти сложились исторически; только в истории науки можно получить их объяснение.

Проводники — такие тела, в которых есть электроны, не прикрепленные к атомам; такие свободные электроны блуждают от атома к атому. В хороших (идеальных) изоляторах таких свободных электронов нет, они все закреплены за своими атомами.

Что же происходит, когда по проводнику идет электрический ток? Свободные его электроны не только продолжают блуждать между атомами, метаться в хаотическом беспорядке, но в то же время все направляются в одну сторону. В беспорядок вносится порядок. И этот порядок и есть электрический ток. Этот порядок наводит электрический генератор. Он в себе движет электроны к своему отрицательному полюсу (или зажиму), а они по внешнему проводу идут от этого полюса к положительному. Так совершается циркуляция, о которой говорил Вольт.

Никакой генератор не может произвести такого спокойного, непрерывного тока в непроводнике (изоляторе); он может только, если имеет достаточно большое напряжение, пробить изолятор, т. е. сорвать в нем электроны с их мест, и тогда они лавинообразно пронесутся через место пробоя (пример такого пробоя — электрическая искра), выделяя свет и тепло. По электронной теории, заряженное тело — то, в котором электронов больше или меньше, чем их должно быть сообразно числу имеющихся в нем атомов. Если больше, мы должны его назвать отрицательно («электронно») заряженным, если меньше, — положительно («позитронно») заряженным. То же относится и к отдельным молекулам, и к одиноким атомам; но обыкновенно заряженные атомы и молекулы называются «ионизованными». Заряженная молекула может быть плюс-ионом или минус-ионом.

Два противоположно заряженные тела или иона вза-



мно притягиваются. Их присутствие порождает электрическое поле, электрические силы, могущие двигать и вообще совершать работу. Иными словами, существование таких заряженных тел обязательно связано с существованием энергии, электрической энергии.

Электрический генератор на своих двух зажимах дает такие два заряда; этим-то он и производит электрическую энергию. Эти два заряда особенно ясны (и особенно страшны), когда действующий мощный генератор не замкнут на провода, не дает тока.

Записка: «Как ответить на вопрос, где эта энергия? как указать место ее пребывания?»

Во второй половине XIX века Фарадей, а затем, и в особенности, Максвелл учили, что электроэнергия находится в поле зарядов, в среде между зарядами. Все окружающее их пространство, т. е. все тела, находящиеся в этом пространстве, все изолирующие тела в той или иной мере насыщены этой электрической энергией. В самом обычном случае эта электроэнергия находится в воздухе, окружающем генератор.

И вот, если бы человек взялся руками за два полюса действующего генератора, то вся эта электрическая энергия направилась бы *со всех сторон* в его тело; от этого все ионы, наполняющие живой организм, ринулись бы туда, куда движет их электрическая сила. Точно так же, если бы между этими полюсами произошел пробой, электрическая энергия со всех сторон вторглась бы в место искры и сделала бы ее ужасающе мощной, как молнию; произошла бы большая авария электростанции. Конечно, в этих случаях немедленно останавливают генератор.

Но то же самое происходит и в том обычном случае, когда динамомашину просто замыкают рубильниками на внешнюю цепь. По проводам пойдет ток, задвигнутся их электроны; приемники получают электрическую энергию. Эта энергия — та же энергия поля между зажимами генера-

тора; она и теперь вторгается *со всех сторон* в провод, как в вышеупомянутом случае аварии. В то же время, пока идет ток, пока генератор действует, он продолжает возобновлять свое электрическое поле везде вокруг себя, которое своим чередом входит в провод, и приемники, таким образом, непрерывно питаются электроэнергией.

Так происходит передача энергии от генератора приемникам.

Во всем этом моем объяснении электрического тока для всех вас может быть ново и неожиданно, что приемник получает электроэнергию не по проводу, который его «питает», а с боков, со всех сторон в виде вторгающегося электрического поля, создаваемого генератором.

Таково учение Максвелла.

Остается добавить лишь одно: это рвущееся в проводник электрическое поле и образует то магнитное поле вокруг проводника с током, которое так давно и хорошо известно и многообразно использовано.

По моему мнению, товарищи, на все предыдущие записки теперь даны ответы, поскольку их вопросы имеют отношение к нашей теме. Добавлю только вопрошавшему о «природном» электричестве; прежде всего скажу, что когда-то так говорили: «электричество от трения», «электричество статическое», «электричество гальваническое», «электричество индуктированное» и т. д. Всякое электрическое состояние, в мировом бесконечном пространстве или на земле, определяется излишком или недостатком электронов. И больше ничего. Еще Фарадей за все время своей работы (приблизительно с 1830 г. до 1860 г.) очень много потрудился, доказывая самым убедительным образом, что все «электричества» одинаковы.

Автор записки яснее выразился бы, если бы написал: «Что является генератором электроэнергии в атмосфере, или в земле, или в воде, когда мы наблюдаем, например, земные токи?» Можно так поставить вопрос: «Я заметил

во время грозы, как ослепительная, извилистая 2-километровая полоса молнии перерезала темный небосвод, перекинувшись как бы мостом между двумя обрывками тучи; значит, эти две тучи были полюсами какого-то гигантского генератора, и я спрашиваю: что это за генератор?» Ответ: Солнце, которое своими лучами ионизирует молекулы воздуха, выбивая из них электроны. «Природное электричество», природные генераторы, еще очень, очень мало использованы; но они представляют собою весьма значительную мощность; если брать только грозовые разряды (по всему земному шару), то подсчеты дают на круг миллиард киловатт.

Поступило еще восемь записок. (*Читает:*) Первая: «Не совсем понятно, что ток идет вокруг проводника. Если это так, то почему же изоляция проводника прекращает ток?» Вторая: «Правильно ли полагать, что разговор идет о преимуществе теории электрического поля перед теорией магнитного поля?» Третья: «Чем обосновывается поток электричества именно от минуса к плюсу, а не наоборот?» Четвертая: «Можно ли сказать, что электричество течет по проводнику?» Пятая: «Говорится, что носителями зарядов являются электроны, но сами заряды материальны или нет? Если материальны, то как совершается механизм взаимодействия зарядов?» Шестая: «Почему разряд статического электричества идет не по прямой между двумя точками, а в виде какой-то ломаной?» Седьмая: «Можно ли понимать так, что электрическое поле может образовываться в среде, где нет воздуха, зная то, что эфир — это тоже материя, но его не выкачаешь?» Восьмая: «Какова природа электрона? Какова сущность поля и его возникновения?» (фиг. 72).

Товарищи, большинство из этих записок бьют прямо в цель. Прежде всего скажу по поводу пятой записки: нет у нас носителей зарядов. Электроны, как и позитроны, — это само электричество. Они его «несут» в таком же смысле, как каждый из нас «носит» самого себя. Они



материальны, как и все, что мы знаем, материально. Но это не вещество, как железо, уголь, серебро, хлеб, а это то, из чего построено вещество.

Теперь опять вступаем в область нашей темы. Электроны движутся по внешнему проводнику от минуса к плюсу, потому что в этом направлении их движет поле генератора; по проводникам самого генератора они движутся от плюса к минусу, а затем продолжают свой замкнутый путь, двигаясь, так сказать, в обратную сторону. Ведь ток всегда циркулирует. Но до возникновения электронной теории установился обычай считать направление тока по движению положительных ионов, т. е. навстречу электронам; и до сих пор считают, что было бы напрасным усложнением, если бы мы перевернули на обратные все чертежи и словесные правила, в которые входит направление тока. Все это осталось таким же, как изображалось и говорилось до электронной теории.

По поводу четвертой записки. Старинное выражение: «электричество течет по проводнику» часто употребляется, хотя от него очень отдает представлением, что электричество есть какая-то посторонняя проводнику жидкость. По проводнику движутся его собственные электроны. Кроме того, в этом выражении словом «течет» как будто утверждается, что каждый электрон проходит насквозь по всей электрической цепи. На самом деле это, конечно, неверно. Он проходит только тот маленький путь, который ему предоставляется до столкновения с молекулой; при этом столкновении он отдает свою кинетическую энергию молекуле, и потому проводник нагревается; следующий такой же путь проходится другим электроном и т. д. Это, однако, не похоже на эстафету, потому что все такие отдельные пробеги могут проходить одновременно.

Было бы гораздо проще представлять себе сквозной пробег электронов, но невозможно забыть про столкновения с молекулами; они, вероятно, не происходят разве

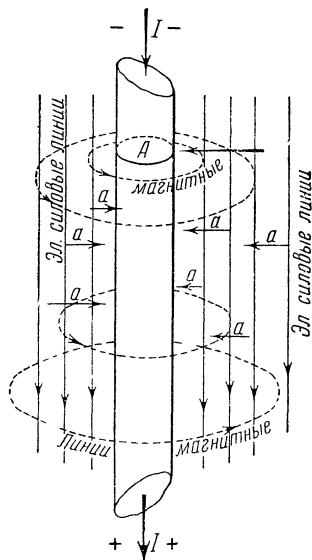
только в сверхпроводниках, в которых электроны действительно не отдают своей энергии молекулам. Однако все же так представляли себе...». (*Голос с места*: «Глупые люди восемнадцатого века».) Нет, товарищ, и девятнадцатого, и даже мы сами думаем иногда так, именно тогда, когда такое представление не мешает дальнейшим верным выводам. Вместо электрического тока получается что-то вроде водопровода, только с очень засоренными трубами: электричество продавливается между молекулами проводника, как вода между песчинками очень засоренной трубы. (*Общий смех.*) При этом,— вы замечаете? — проводник играет роль только как помеха, как сопротивление, и начинает казаться странным, что существуют изоляторы; ведь если бы мы поставили между полюсами генератора стеклянную палочку с ее молекулами и пустыми промежутками между ними, мы должны были бы получить то же явление. Да и зачем эта палочка? Воздух, находящийся между зажимами генератора, представляет между своими молекулами еще большее свободное пространство. Эти нелепые результаты, полное искажение всего явления ясно показывают, что мы на неверном пути. Электронная теория хорошо исправила все эти нелепости.

Проводник не пропускает электричества сквозь себя; он своими свободными электронами, находящимися в каждом его участке, в каждом его сечении, сам производит явление электрического тока.

Теперь остается одно: каким образом генератор, не проталкивая электроны сквозь проводник, приводит в движение его электроны и притом одновременно во всех сечениях? Тут очень помогает картина, которую я вкратце обрисовал раньше. Электрическое поле, создаваемое генератором, непрерывно входит в проводник сбоку, со всех сторон, во все его сечения и своими силами приводит в движение свободные электроны всех частей проводника и на это движение расходует свою энергию. Входя

в изолятор, не имеющий свободных электронов, оно не производит их движения, а производит только смещение имеющихся там связанных электронов.

Роль проводника как подходящего материала становится ясной. Его присутствие делает возможным прохождение тока.



Фиг. 73. Схема электромагнитного поля около проводника с током и движения электронов в нем

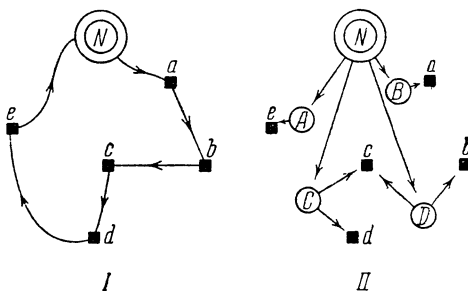
Движущееся электрическое поле производит магнитное поле со всех сторон вокруг проводника с током.

На фиг. 73 изображен отрезок провода; вокруг него электрическое поле со стрелками, указывающими, куда оно может двигать электроны; стрелка  $a$  показывает направление движения линий электрического поля; стрелки  $I$  дают направление тока в проводнике, если это направление определять по электронам. Мы видим, что здесь нет речи ни о каком токе вокруг проводника, о котором говорит первая записка. Тут произошло недоразумение.

Обратите внимание: возьмем какое-нибудь сечение  $A$  (фиг. 73); ток (электронный) идет в нем в нашем случае сверху вниз, но энергия поступает в виде электрического поля с

боков из среды. Значит, энергия не подходит к  $A$  по проводу; провод потребляет электрическую энергию, превращает ее, использует, но не передает ее. Вот как изменяется этим пониманием природы электрического тока само представление об электропередаче энер-

гии. (*Голос с места*: «Резрешите. Это вроде, как если завод дает громадную продукцию и ее распределяют не по железной дороге, а со складов».) Если вы хотите предложить такую аналогию, то ее можно изобразить (фиг. 74). Продукцию завода  $N$  можно развозить в места потребления  $a, b, c, d, e$  по железной дороге, связывающей все эти места и возвращающей пустые вагоны на завод; а можно ее распределить на склады  $A, B, C, D$ , которые будут питать места потребления. Этот второй способ будет подобием нашей картины электропередачи. (*Второй*



Фиг. 74. Схемы распределения продукции заводом I и II

*голос с места*: «Да! но как распределить?») Положим, на аэропланах. Очень трудно найти аналогию электрическим процессам. Проводник всасывает энергию окружающего поля, всасывает, потому что превращает ее в тепло, в работу, использует ее; предлагали сравнивать это с фитилем стеариновой свечи, он всасывает расплавленный стеарин, потому что уводит его вверх, к испарению и в пламя.

Когда электрическое поле неподвижно, оно не производит магнитного поля, но оно производит магнитное поле, когда движется. При движении получается элек-



ромагнитное поле. Это есть великий результат учения Фарадея и Максвелла. Он может быть выражен и обратным утверждением: движущееся магнитное поле производит поле электрическое; множество явлений объясняется по этому второму положению. Часто приходится выбирать ту или иную форму рассуждения, ставя на первое место или электрическое, или магнитное поле.

И прав автор второй записки: в той картине электрического тока, о которой я говорю, на первое место (как первопричина) ставится поле электростатическое.

Имеются, однако, попытки понимания природы электрического тока, при котором на первое место ставится магнитное поле.

Теперь, товарищи, последнее. Пусть генератор работает переменно, он производит то одно электрическое поле, то обратное; он не замкнут на цепь; при большой быстроте перемен его электромагнитное поле отрывается и улетает в окружающее пространство. Так работает отправительная радиостанция. Образуются радиоволны. Принимающая антенна как проводник, поставленный на пути этого несущегося поля, всасывает его энергию, превращая ее в радиоприемнике и в звук, и в тепло, а иногда и в свет (телевидение).

Вы видите, что наша картина для объяснения электрического тока открывает широкие горизонты. Справедливо считается, что Максвелл предугадал в своей теории возможность электропередачи энергии без помощи проводов. Этим, — не правда ли? — очень много сказано.

Поступили записки. (*Читает:*) «Почему воздух, являясь изолятором для тока в проводах, в то же время хороший проводник для радиоволн?» «Существует ли между планетами какая-либо электрическая связь помимо магнетизма?» «Почему электрические явления сопровождаются явлениями магнитными?» «Нельзя ли объяснить вращение земли с точки зрения электрической связи,

грубо сравнивая движение земли с нашими электромашинами?» «Как увязать сказанное с явлением «скин-эффекта»? «Куда уходит энергия интерферирующих электромагнитных волн и какова природа света?» «Двигаются ли электроны в условиях сверхпроводимости при температуре, близкой к абсолютному нулю?»

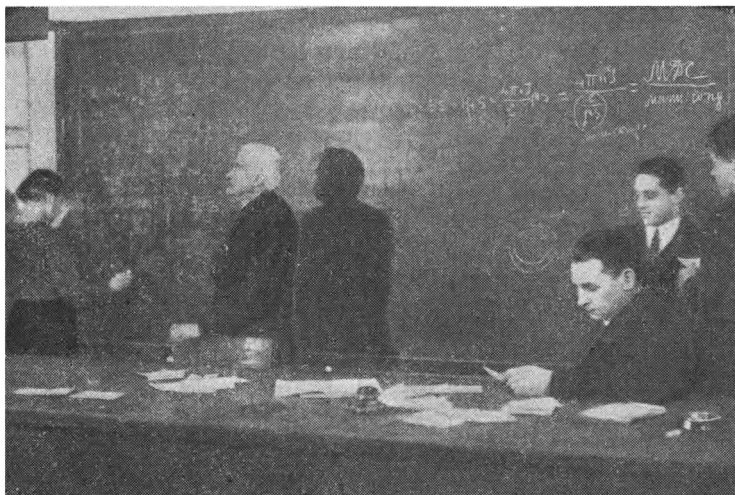
Товарищи, нередко слово, удобное и привычное слово, мешает прогрессу нашей мысли. Это бывает, когда оно слишком плотно насыщено старой теорией. «Проводник» ... Я объяснял вам, как это слово связалось с XVIII веком, с представлением о распространении электричества по телу. Максвелл произвел великую революцию, приведшую к величайшим результатам, можно сказать, к чудесам техники. Вы видели, что по его теории проводник поглощает электромагнитную энергию, уничтожает ее как таковую. И все-таки называем его проводником!

Воздух, как и всякий другой изолятор, пропускает электромагнитную энергию, не поглощая, не трогая ее. И, пожалуй, его за это можно назвать «проводником». Но тогда в каком же противоречии будет это название с тем же словом, применяемым к «действительному», т. е. 200-летнему проводнику, например, меди.

Чувство этого противоречия и вызвало первую из записок, которые я прочел.

Третья записка исходит, очевидно, от человека, хорошо осведомленного в вопросах электротехники. Не знаю, было ли бы интересным для всех, если бы я отвечал на нее подробно. Скажу только, что когда быстро сменяющиеся электромагнитные волны входят в провод (как всегда со всех сторон, с боков), они поглощаются его поверхностным (по-английски «скин») слоем и не доходят до его сердцевины. Это совсем похоже на то, как температурные годовые колебания воздуха проникают в толщу земной коры через ее поверхность. Они проникают не глубоко, и, например, в Восточной Сибири

можно наблюдать уже на глубине метра вечную мерзлоту, т. е. никогда не оттаивающий лед; в этом вечном льде тысячи лет сохраняются в свежем виде трупы мамонтов. Это тоже «скин-эффект». Он наблюдается всегда, если энергия с известной частотой периодически поступает в тело с поверхности его.



Фиг. 75. В. К. Лебединский среди молодежи

О сверхпроводимости я уже немного сказал. Это еще очень мало понятное явление. Вопросы второй и четвертый совсем выходят из пределов сегодняшней дискуссии.

Мы кончаем, товарищи. На заключение я отложил еще одну записку. *(Читает)* «Весь ученый мир отверг теорию силовых трубок Фарадея. Почему вы ее придерживаетесь?» Товарищ верно отмечает, что все, что я говорил о природе электрического тока, берет начало

из теории Фарадея; его теории нужно считать немного более ста лет. За это время, особенно за последние 30-40 лет, появилось много совершенно новых течений мысли в науке о физических явлениях. И высказываются уже попытки объяснить электрический ток с точки зрения волновой механики, объяснить действие проводника как среды туманной для электронных волн, применить к его электронам новую, современную статистику Ферми и Зоммерфельда. Конечно, наука последних лет более совершенна; она может объяснить такие свойства электрического тока, которых мы с вами сегодня и не касались.

Я уверен, что через несколько лет все это будет излагаться в этой комнате перед такою аудиториею, какую сейчас представляете вы. Но в данный момент я считал более продуктивным стоять на более доступной точке зрения. И если мне удалось выяснить, как получают энергию эти яркие лампочки и как врываються к нам сюда радиоволны через эти стены и занавески, радиоволны, которые мы могли бы также легко принять простым радиоприемником и комнатною антенною, — если это удалось выяснить, то моя цель достигнута. Это поможет вам разобраться и в новых течениях мысли, оценить последние достижения науки. Для этого, однако, вам придется затратить еще некоторые усилия и время.

В этой записке, товарищи, сказано: «Весь ученый мир...» Действительно, у многих электриков нашего времени прежний живой интерес к фарадеевским потокам индукции электрической и магнитной, материализующим электромагнитное поле, сменился на безразличное отношение — их взоры устремлены на другие стороны тех же явлений. Но не у всех; некоторые из вас, вероятно, читали, что не так давно, в 1930 г., в Ленинграде происходила большая дискуссия о природе электрического тока, на которой выступал очень убежденный защитник фарадеевских взглядов акад. В. Ф. Миткевич.

Позитроны, нейтроны и их взаимоотношения с электронами и фотонами более всего интересуют современных физиков; но все это пока еще не приведено в ясную связь с вопросами, о которых мы сегодня с вами беседовали. Все это не помогло бы нам разобраться в природе электрического тока и в его приложениях. Мы отклонились бы от нашей темы.

Ленинград,  
20. VI. 1937

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| От редактора . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3  |
| В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ. (Биографический очерк) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 5  |
| От автора . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 17 |
| I. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| Почему вертится электродвигатель (19). В электродвигателе работа производится странным образом (21). В чем же заключается особенность действия электродвигателя (23). Ищем закон электромагнитной силы (26). Теоретическое толкование (30). Приближаемся к тому, что связывает собою магнитный полюс и проводник с током (32). Разговор физика с математиком (32). Даем название новому понятию (35). Лоренцова сила (38). |    |
| II МОЩНОСТЬ И РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 42 |
| Амперы и вольты (42). Инструмент и машина (43). Почему же необходим вольтметр (44). Особая помеха движению электронов в обмотке якоря и электродвигателя (46). Мощность генератора (48). Историческая справка (49). Новый вид генератора электроэнергии (51). Элементарный случай электромагнитной индукции (53). Основной (элементарный) закон электромагнитной индукции (58).                                            |    |
| III. МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 61 |
| Магнитное притяжение (61). Магнетизм средневековья (63). Электрическое притяжение (68). Проводимость (70). Качество или материя? (72). В. Франклин (74). Электрическая энергия и разность потенциалов (78). Кулон (83). К чему стремился Фарадей (87). Действие через среду (95). Электрические генераторы XIX века (96).                                                                                                  |    |
| IV. СВЕТ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 99 |
| Электроэнергия (99). Где находится электроэнергия, пока конденсатор еще не разряжен? (100). Электромагнетизм (101). Распространение электромагнитного поля                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (105). Давление света (107). Масса и энергия (112). Световой резонанс (114). Полное солнечное затмение в 1896 г. (117). Электрический резонанс (125). Зарождение радиотехники (128).                                                                                                                                                                                |     |
| V. ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРЕ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 130 |
| VI. КВАНТЫ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 150 |
| Сплошное структурное (150). Элементарные магнетики (155). Электрон (159). Электрон и вещественный атом (163). Электронная теория строения вещества (165). Электроны и световые волны (167). 1895 и 1896 гг. (172). Фотон и электронные волны (176). Строение атома по Бору (179). Еще новый тип волн (182). Опытное доказательство (183). Позитрон и нейтрон (185). |     |
| VII. О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 187 |

Технический редактор *Е. И. Шнобель* Корректор *А. И. Новакович*

Сдано в набор 31 III 1940 г. Подписано к печати 16/X 1940 г. АНИ № 1238 РИСО № 638. Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Объем 6<sup>1</sup>/<sub>2</sub> печ. л. и 1 вкл., 9 уч.-изд. л. В печ. листе 50650 тип. зн. А 28266. Тираж 20 000 экз.

Набор и матрицы 1-ой Образцовой типографии Огиза РСФСР треста „Полиграфкнига“, Москва, Валовая, 28 Заказ № 1527.

Отпечатано с матриц в типографии Маттисена, г. Тарту ЭССР Валликрави № 4 — Заказ № 342 — 1940 г.

ЦЕНА 4 РУБ. 50 К.