

В. Брэгг  
ИСТОРИЯ  
ЭЛЕКТРО-  
МАГНЕТИЗМА



ОГИЗ • ГОСТЕХИЗДАТ • 1947

**В. Г. БРЭГГ**

# **ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА**

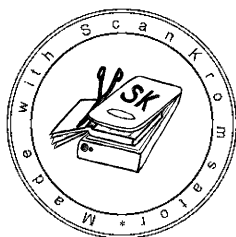
**ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО  
М. П. ШАСКОЛЬСКОЙ**

**ОГИЗ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1947 ЛЕНИНГРАД**

## АННОТАЦИЯ

Лекция крупнейшего английского учёного В. Брэгга рассчитана на широкий круг читателей.

Являясь прекраснейшим образцом научно-популярного изложения, она не только рассматривает основы электромагнетизма, но и вводит читателя в творческий процесс их созидания. Она будет полезна всякому интересующемуся электромагнитными явлениями и в особенности тем, кому предназначал её автор,— начинающим специалистам, впервые сталкивающимся с современной сложной электро- и радиоаппаратурой.



Scan AAW

Редактор *А. Е. Соломонович*. Техн. редактор *М. С. Бондарев*. Подписано к печати 16/ХІ 1946 г. 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> печ. л. + 2 пол. вклейки авт. л. 2,14 уч.-изд. л. 2,2 титл. зч. в печ. л. 38,900. Тираж 25.000 экз. А 11733. Цена книги 70 к. Заказ № 1622.

3-я типография «Красный пролетарий» треста «Полиграфкнига» Огиза при Совете Министров СССР. Москва, Краснопролетарская, 16.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале 1941 г. выяснилась настоятельная необходимость в значительном количестве людей, способных управлять новыми техническими средствами войны в воздухе. Таких людей надо специально обучать, поскольку без понимания и умения нельзя быстро освоить принципы новых приборов.

В большинстве своём эти приборы, особенно те из них, которые употребляются в радиосвязи, являются приборами электрическими. Основные принципы, на которых базируются современные достижения электромагнетизма, в значительной мере были открыты и исследованы в лабораториях и аудиториях Королевского института. Поэтому руководители Королевского института решили предложить свою помощь в обучении специалистов, чтобы по возможности внести свой вклад в общее дело. Предложение было принято, и было решено, что некоторое количество учащихся Авиационного учебного корпуса в Лондонском округе посетит Королевский институт, где я расскажу им кое-что об истории электромагнитных открытий, на которых должна основываться их будущая работа. Эта лекция воспроизведена здесь с изменениями соответственно литературной форме.

Цель лекции — дать беглый очерк того, как постепенно осознавались основные принципы электромагнетизма, и коротко описать вклад в науку её главных деятелей. Несомненно, конечный результат является делом многих, и полный обзор должен содержать больше подробностей, чем можно охватить в одной лекции.

Кроме упомянутых здесь исследователей, нужно было бы говорить ещё об очень многих других. Но моей задачей было показать, как одна идея приводила к другой в развитии, которое неизбежно было медленным, вследствие того, что электричество и магнетизм неосвязаемы. К осязаемому результату приводит лишь их взаимодействие.

Ни электричество, ни магнетизм нельзя ощущать непосредственно каким-либо органом чувств, но в сочетании они определённым образом действуют на нас. Поэтому особенно интересно изучать те методы, при помощи которых пионеры науки постепенно разгадывали эти скрытые действия и объясняли нам правила, на которых мы так много строим.

История открытий быть может непосредственно и не нужна работнику радио и других областей техники, если его дело и его мысли ограничиваются умением владеть своими приборами. Однако, многим помогает и доставляет удовольствие изучение эволюции тех приборов, которыми они пользуются. Я надеюсь, что эта маленькая книжка сможет дать необходимый исторический материал. Но я возлагаю на неё ещё большие надежды. Конечно, среди обучающейся молодежи найдутся лица, которые захотят углубить свои знания. Если они это сделают, у них будет больше возможностей для новых открытий. Это важно, поскольку сочетание основных знаний с непосредственным и непрерывным приложением их на практике есть наиболее плодотворный источник новых идей, гораздо более эффективный, чем какой-либо из этих факторов в отдельности. Применение науки в нынешней войне особенно выявило важность этого принципа; нельзя его забывать и на будущее время.

Где возможно, иллюстрации в этой книге воспроизведены с подлинных рисунков. Если читатель видит перед собой рисунки, которыми сопровождалась первая лабораторная заметка или подлинная статья, это как бы вводит его в непосредственное общение с исследователем. Схемы, иллюстрирующие работы Фарадея, скопированы с оригиналов на полях его дневника.

Цепочка из чередующихся медных и железных звеньев — это воображаемая модель, которой я пользовался при объяснении основных принципов электромагнетизма. Все эти принципы самостоятельны, и взаимодействие их становится ясным, когда импульс, несущий энергию, проходит по цепочке. Я надеюсь, что эта модель окажется полезной также и в книге.

В. Г. Б.

---



ВОЛЬТА



ЭРСТЕД



АМПЕР



ОМ

Портреты Эрстеда, Ампера и Ома воспроизведены из F. Grassi, *La fisica e l'Elettrotecnica* (Ф. Грасси «Физика и электротехника»), а портрет Вольта из *L'opera di Alessandro Volta* («Сочинения» Александра Вольта).



ДЭВИ



ФАРАДЕЙ



КЛЕРК МАКСВЕЛЛ



ГЕРЦ

Портреты Дэви и Фарадея печатаются благодаря любезности директоров Королевского института; портрет Клерка Максвелла взят из *The Life of Clerk Maxwell* by L. Campbell and W. Garnett («Жизнь Клерка Максвелла» Л. Кэмпбелла и В. Гернетта), а портрет Герца из *The Works of Hertz* by sir Oliver Lodge («Elektrician») («Труды Герца» сэра Оливера Лоджа).

## I

Постепенное разгадывание законов электромагнетизма в течение последних полутора веков является одним из самых удивительных достижений науки во все времена. По первым открытиям Вольта и Эрстеда нельзя было предугадать все возможности их следствий. Но Ампер, Араго, Ом и Дэви ушли далеко вперёд; затем последовал Фарадей со своими опытами, создавшими новую эпоху. Клерк Максвелл придал открытиям Фарадея математическую форму и развил теорию электромагнитных волн, примером которых является свет. Передача и использование электромагнитной энергии — дело рук многих хорошо известных людей нашего времени. Электромагнетизм пользуется теперь почти всюду, в малом и в большом, от электрического звонка или швейной машины до движения кораблей и поездов или освещения городов. Одним из наиболее удивительных его применений является радио. Немногие открытия возбудили такой всеобщий интерес. Многие из тех, для кого специально предназначена эта книжка, будут применять законы электромагнетизма на практике, когда приступят к военной службе. Наиболее важным практическим приложением является беспроводная телеграфия.

Передача энергии и сигналов на большие расстояния как по проводам или по кабелю, так и без провод никогда не перестанет казаться чудом. Правда, мы знаем свет и тепло, пронизывающие пространство в виде волн, в действительности, как мы увидим дальше, электромагнитных. Наши глаза это — приёмники, приспособленные для обнаружения и анализа световых волн. Многие из процессов природы зависят от передачи энергии в форме тепла. Но обычные электромагнитные волны не вызывают никаких ощущений в человеческом теле. Ни один из органов чувств не годится для восприятия тех волн, которыми мы пользуемся в радиотехнике. В самом деле, мы не можем непосредственно видеть или осязать или слы-



шать ни электричества, ни магнетизма, ни какого-либо электромагнитного действия. Это придаёт особый интерес истории постепенного развития наших знаний об основных принципах электромагнетизма. Мы можем лишь восхищаться терпением и мудростью тех, кто пробирался наугад в новую страну, в которой обычные средства пионеров науки отказывались служить, и ни одно из открытий нельзя было предвидеть или угадать.

В дальнейшем я собираюсь кратко описать отдельные этапы в продвижении к современному пониманию. Попытка предпринять такой обзор может показаться претенциозной, ибо путь был слишком длинным и трудным.

Но сами по себе основные принципы не трудны. Лишь открытие их было трудным, поскольку продвигаться приходилось вслепую. Перед исследователем на каждом шагу открывалось много дорог, по любой из которых он мог сделать свой следующий шаг, и всё было так ново, что предвидение казалось невозможным. Много проб и много усилий мысли нужно было, чтобы удержаться на правильном пути. Теперь, когда поиски на сегодня закончены, сравнительно несложно оглянуться на пройденный путь.

Прежде чем это сделать, позвольте мне описать современное положение и изложить четыре основных принципа, на которых построено учение об электромагнетизме. Тогда мы сможем, оглянувшись назад, увидеть, какой из этих принципов раскрывался на каждом этапе. В этом своеобразном случае уместно заглянуть в конец повести, прежде чем начать читать её.

Для изложения четырёх основных принципов придётся употреблять термины, с которыми можно освоиться только на опыте. Но сейчас для наших целей их можно объяснить достаточно просто. Мне показалось удобным воспользоваться описанием некоего эксперимента, который легко можно себе представить, хотя он никогда в действительности не ставится. Представим себе цепочку, сделанную из чередующихся медных и железных колец (рис 1). С помощью этого устройства мы легко сможем воспроизвести четыре экспериментальных результата, нашедших своё выражение в четырёх основных принципах.

Замыкая ключ  $K$ , мы посылаем ток от батареи в первое медное кольцо. Следующее кольцо, сделанное из железа, намагничивается. В то время как магнетизм в этом кольце растёт, — но не после того, как он достиг своего максимума и стал постоянным, — в третьем звене,

сделанном из меди, возникает ток. Тогда в четвёртом звене, сделанном из железа, появляется магнетизм, затем ток в пятом звене, медном, и так далее до конца цепочки. Таким образом, какой бы длинной ни была цепочка, импульс доходит до самого её конца. Это прототип всех

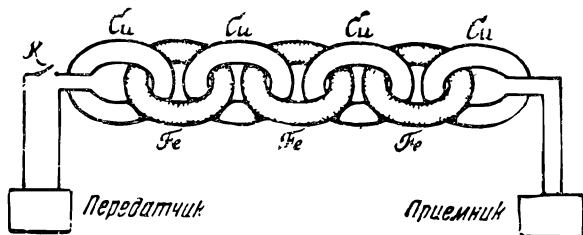


Рис. 1. Когда ключ  $K$  замкнут, источник электрической энергии посылает ток в первое медное звено. Этот ток намагничивает первое железное звено, а возрастание намагничивания вызывает ток во втором медном звене, и т. д. В результате вдоль цепочки бежит импульс, попадающий в её конце в приёмник.

электромагнитных методов передачи энергии, особенно в форме переменных токов или беспроводочной телеграфии.

Рассмотрим теперь эти явления ближе.

1. Ток в медном звене вызывает магнетизм в следующем за ним железном звене. Это первый из четырёх принципов. Но величина возникшего магнетизма определяется не только величиной тока. Эта величина зависит от материала кольца — от природы железа или стали; она была бы гораздо меньше, — хотя и не равна нулю, — если бы кольцо было сделано из латуни или из дерева. На самом деле возникает лишь стремление вызвать магнетизм и именно это стремление, а не полученный магнетизм, пропорционально току. Успех этого стремления зависит от материала, на который оно действует. Мы называем это стремление «магнитодвижущей силой». Это не очень удачный термин, но он служит своей цели. Первый из четырёх принципов тогда гласит: *движущееся электричество создаёт магнитодвижущую силу.*

2. Магнитодвижущая сила действует на железное кольцо и вызывает некий эффект. Мы говорим, что железное кольцо намагничивается. Если в нём сделать вырез, то один из краёв выреза станет северным полюсом, а другой — южным полюсом. Величину этого эффекта можно измерить и выразить количественно. Если бы кольцо

было сделано из латуни или из дерева и даже если бы никакого кольца вообще не было, эффект там всё же существовал бы, но величина его была бы гораздо меньше. В последнем случае его наличие можно обнаружить, как обычно, по расположению железных опилок, рассыпанных в пространстве вокруг медного кольца, по которому идёт ток. Этот эффект мы называем «магнитной индукцией». Так мы приходим ко второму основному принципу: *Магнитодвижущая сила стремится вызвать магнитную индукцию, причём результат зависит от сопротивления, которое она встречает.*

3. В то время, как в железном кольце под влиянием магнитодвижущей силы возрастает индукция, в третьем звене, сделанном из меди, возникает сила, стремящаяся привести в движение электричество. Она известна под названием электродвижущей силы. Эта сила существует только во время роста магнитной индукции в железном кольце: как только индукция достигает максимальной величины, электродвижущая сила исчезает. Рост индукции можно описать как движение магнетизма. Хотя это и не совсем правильно, но возможно, так как тот же самый эффект возникает при перемещении магнита около медного кольца. Как это движение, так и получение магнитной индукции *in situ* в звеньях нашей цепочки описываются одними и теми же терминами. Так мы приходим к третьему принципу: *Движущийся магнетизм создаёт электродвижущую силу.*

4. Электродвижущая сила приводит в движение электричество во втором медном кольце. Там появляется ток, величина которого зависит не только от электродвижущей силы, но и от сопротивления материала кольца. Четвёртый основной принцип гласит: *Электродвижущая сила вызывает электрический ток, величина которого зависит от сопротивления.*

Итак, имеется полный цикл:

Движущееся электричество создаёт магнитодвижущую силу.

Магнитодвижущая сила создаёт магнитную индукцию.

Изменение или движение магнитной индукции создаёт электродвижущую силу.

Электродвижущая сила приводит в движение электричество, и затем всё начинается сначала.

Симметрия этих положений, повидимому, нарушается употреблением термина «магнитная индукция» во втором

принципе по сравнению с «электричеством в движении» в четвёртом, но, как мы увидим ниже, вместо фразы «приводит электричество в движение» вернее было бы говорить «создаёт электрическую индукцию». Рассмотрение этого вопроса мы пока отложим.

Все применения электромагнетизма основываются на этих четырёх принципах, которые действуют в правильной последовательности. Однако, в деталях эти применения существенно различаются. Например, при передаче энергии роль медного звена играет длинная кабель, а первое движение электричества может быть вызвано не батареей, а каким-либо источником. При беспроводной передаче металлические звенья цепочки могут быть заменены тем, что мы называем эфиром; на первый взгляд это трудно понять, но я надеюсь, что это будет ясно в дальнейшем.

Отметим ещё раз, что как только прекращается изменение тока в первом медном кольце, т. е. как только становится постоянным намагничивание первого железного кольца, прекращается и дальнейшая передача импульса вдоль цепочки. Только пока происходит изменение магнетизма в железном кольце, возбуждается электродвижущая сила в следующем медном звене. При выключении уже установившегося тока или при изменении его направления другой импульс отправится по тому же пути вдоль цепочки. Таким образом, при многократных переключениях вдоль цепочки побегит серия импульсов, подобно ряду волн.

Вернёмся теперь к началу нашей истории. Проследим ход открытий и по возможности познакомимся последовательно с теми событиями, которые привели к установлению каждого из четырёх основных принципов.

## II

Первый принцип был установлен датчанином Эрстедом. Он мог это сделать потому, что наблюдения Гальвани и Вольта позволяли уже представлять себе движение электричества в виде тока по металлической проволоке. Никто, конечно, не понимал, что такое электричество; было только известно, что нечто передаётся по проволоке, и естественно было предположить, что движется электричество, хотя направление его движения было выбрано совершенно произвольно.

Гальвани обнаружил, что мускулы лапки лягушки сокращаются под действием разряда электрической машины. Мускулы сокращались также, когда тело лягушки лежало на металлической пластинке, и скальпель, проходящий через нерв, касался пластинки. Это было в 1780 г. Вольта предположил, что в последнем опыте имел значение тот факт, что там действовали два металла. Ему уже было

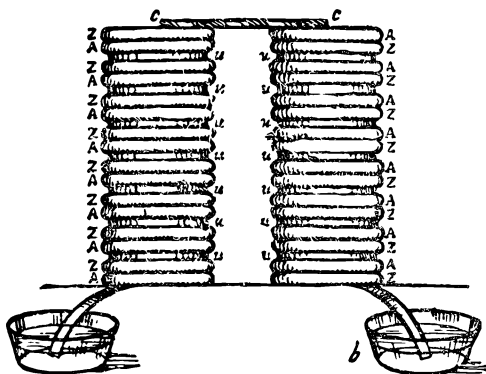


Рис. 2. Рисунок Вольтова столба, воспроизведённый со стр. 262 «Собрания сочинений Вольта», опубликованного Итальянской электротехнической ассоциацией под названием «L'opera di Alessandro Volta» (Z — цинк, А — серебро, u — влажная прокладка).

известно, что если положить две металлические пластинки, например медную и цинковую, одну над языком, а другую под языком так, чтобы они соприкасались, то во рту чувствуется едкий привкус. Следуя своей идее, он изготовил столб, составленный из пластинок цинка, серебра и прокладок сукна, смоченного в соляном растворе, расположив их в правильном порядке: цинк, серебро, сукно, цинк, серебро, сукно, и т. д. Прикасаясь проволочкой к цинковой и к серебряной пластинам на концах столба, он смог повторить опыты Гальвани с гораздо большим эффектом. Этот прибор показан на рис. 2. Столб, сделанный Вольта и подаренный им Фарадею, до сих пор хранится в Королевском институте. Позднее Вольта изменил конструкцию, заменив прокладки из влажного сукна стеклянными банками, содержащими соляной раствор или слабый раствор кислоты; серебряная и цинковая пластинки остались попрежнему, но теперь они были погружены в сосуды с раствором. Это был

«чашечный прибор» Вольта, очевидный предшественник нашей электрической батареи (рис. 3). Вместо серебра можно взять медь.

Опыты Вольта вызвали большой интерес. Наполеон, услышав о них, пригласил Вольта в 1801 г. в Париж. О своих опытах Вольта сообщил в 1800 г. в письме сэру Джозефу Бэнксу, президенту Лондонского королевского общества, опубликовавшему это письмо в Трудах Коро-

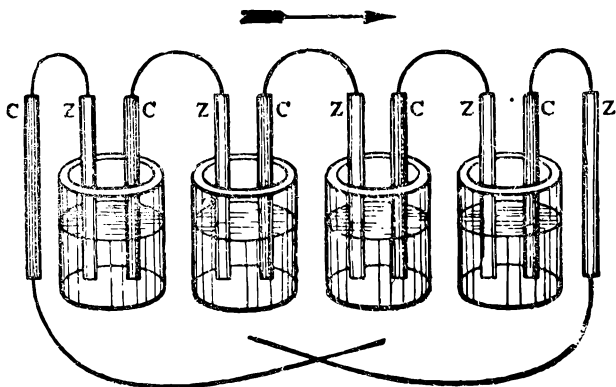


Рис. 3. Устройство вольтовой батареи, называемой иногда Вольтовым «чашечным прибором» («Crown of cups»). Рисунок взят из «Электричества» Ноад (Noad's Electricity) (1843).

левского общества. Когда содержание письма стало известным другим лондонским учёным или философам, как их тогда называли, они стали ревностно конструировать вольтовы столбы и батареи и ставить новые опыты. В частности, Никольсон и сэр Антони Карлейль показали, что когда концы двух проводов <sup>1)</sup> погружены в воду со слабым раствором кислоты, не соприкасаясь, то на одной из проволочек появляются пузырьки водорода, а на другой — кислород. Никольсон был издателем научного журнала и опубликовал в нём отчёт об этих опытах (Nicholson's Journal, июль, 1800 г.).

Надо напомнить, что в это время и ещё двадцать лет спустя не было такой вещи, как гальванометр. Описанные только что мною эффекты были единственными признаками того, что называли «электрическим током». Рас-

<sup>1)</sup> Каждый из которых соединён с одним полюсом вольтова столба. (Прим. перев.)

сказывают, что в Королевском институте лягушки для экспериментальных целей хранились в подвальной комнате, которая и много лет спустя называлась лягушатником. Когда возникла необходимость перестроить часть здания института, место лягушатника и память о нём были сохранены тем, что в пол была вделана маленькая бронзовая лягушка.

Учения об электромагнетизме ещё не было, но эти опыты проложили ему путь. Прежде чем заняться историей электромагнетизма, отвлечёмся на момент в сторону, чтобы познакомиться с другим достопримечательным опытом того времени. Сэр Гемфри Дэви был тогда директором Королевского института. В 1807 г. он повторил в сущности опыт Никольсона и Карлейля, но вместо воды он взял

Поташ был заложен в пробирку, в которую была впаяна платиновая проволочка, и смочен в пробирке так, что он стал проводником, т. е. он содержал достаточно воды, хотя



и был твёрдым; пробирка была опрокинута над ртутью. Если платина была отрицательной, то не образовывалось газа, а ртуть оказывалась окисленной.

Рис. 4. Несколько строк с копией подлинного наброска из дневника сэра Гемфри Дэви: часть записи его знаменитого опыта по выделению калия из поташа путём электролиза 19 окт. 1807.

влажный поташ. Он наполнил поташем маленький стеклянный сосуд, сквозь дно которого в поташ была введена проволока. Поташ был смочен водой, и сосуд опрокинут над ртутью (рис. 4). Когда через ртуть, поташ и проволоку был пропущен ток от батареи, то на проволоке наблюдалось яркое свечение. Дэви правильно объяснил, что это свечение вызвано соединением калия, который ток выделил из поташа, с кислородом воды. Молекулы поташа оказались разложенными. Это на самом деле был «превосходный опыт», как Гордо назвал его Дэви в своём дневнике. Надо напомнить, что идея о соединениях атомов, высказанная Джоном Дальтоном, была в то время предметом ожесточённой дискуссии, и выделение металлического калия из поташа явилось событием исключительной важности. Этот опыт, в числе других подобного рода, положил начало электрохимии, которая, следовательно, старше, чем учение об электромагнетизме.

### III

Опыт, который привёл к установлению первого из четырёх принципов электромагнетизма, был сделан в 1819 г. Профессор Копенгагенского университета Эрстед читал лекцию об открытиях Гальвани и Вольта. На демонстрационном столе перед ним стояла батарея, подобная описанной Вольта. У него была также магнитная стрелка на острие.

Что он с ней делал во время основной части лекции, мы не знаем. Один из его коллег рассказывает нам, что в конце он решил попробовать, не случится ли что-нибудь, если поместить провод с током вблизи магнитной стрелки и параллельно ей. К удивлению его и всей аудитории стрелка, как все мы теперь знаем, отклонилась. Она

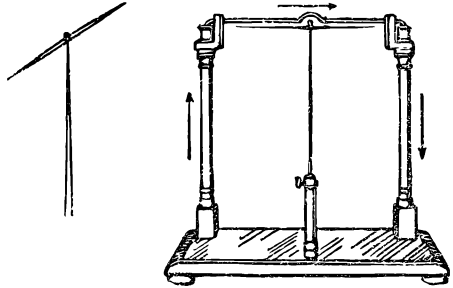


Рис. 5. Рисунок из «Электричества» Ноад (Noad's Electricity), иллюстрирующий опыт Эрстеда. Тщательная отделка прибора показывает, какое внимание в то время придавалось новому, удивительному явлению.

отклонилась от положения, параллельного проводу, и установилась более или менее поперечно ему. Это была первая демонстрация действия тока на магнит.

Может показаться очень странным, что это действие не было открыто задолго до 1819 г. Уже два десятка лет как были изобретены батареи и как они употреблялись в таких опытах, как, например, опыты Никольсона и Дэви. Провода, обтекаемые электрическим током, так же как и магниты, были хорошо знакомы многим исследователям. Почему же столь очевидная связь между ними так долго оставалась неизвестной?

Повидимому, были две причины. Во-первых, знания того времени не наводили на мысль о каком-либо действии подобного рода, а скорее наоборот. В те дни, когда уже были известны электростатические машины и так много изучались действия электрических зарядов, трудно было не заметить, что заряженное тело не оказывает никакого влияния на магнит и что кусок стали заряжается одинаково, независимо от того, был он намагничен



или нет. Действительно, между находящимся в покое магнетизмом и находящимся в покое электричеством нет связи. Чтобы получить магнитодвижущую силу, нужно привести электричество в движение: вот это в сущности и открыл Эрстед.

Во-вторых, характер этого действия должен был показаться совершенно неожиданным. Физики уже освоились с идеей о действии на расстоянии, как, например, в случае, когда солнце притягивает землю или магнит притягивает или отталкивает другой магнит, или электриче-

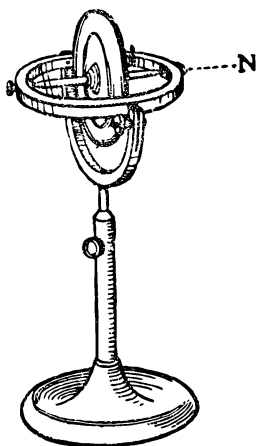


Рис. 6. Гирскоп. Колесо, находящееся в центре, приведено в быстрое вращение. Оправа сконструирована так, что ось колеса может принимать любое направление. Если в *N* прилагается сила в направлении, горизонтальном и одновременно перпендикулярном к оси, то точка *N* поддается не по направлению приложенной силы, а поднимается или опускается вертикально, т. е. под прямым углом к приложенной силе.

ский заряд притягивает или отталкивает другой заряд. Но во всех этих случаях силы, притягивающие или отталкивающие, действуют вдоль линии, соединяющей два источника сил. Здесь же было нечто совершенно новое: ток отклонял магнитный полюс не по линии, соединяющей этот полюс с какой-либо точкой провода, но *в сторону*. Для нас теперь это действие так привычно, что трудно представить себе, каким удивительным и неправдоподобным казалось оно, когда было открыто впервые. Это можно сравнить с тем впечатлением, которое получается при наблюдении, особенно в первый раз, так называемого гироскопического эффекта. Тяжелое колесо приведено во вращение вокруг горизонтальной оси, и всё вместе — колесо, ось и опоры, смонтировано на шарнирах на подставке, так что всё целиком может вращаться вокруг вертикальной оси. Если теперь приложить силу к концу оси вращения, то ось стремится отклониться, но не по

направлению, в котором действует сила, а под прямым углом к нему. Для того, кто пробует это в первый раз, эффект кажется совершенно поразительным. Конечно, его можно объяснить на основании принципов динамики. Если бы кто-нибудь в те времена захотел испытать, действует ли ток на магнит, он искал бы притяжения или отталкивания между проводом и магнитом как целыми. В действительности, как мы вскоре увидим, существует сравнительно малый побочный эффект такого рода, но его легко не заметить.

Открытие Эрстеда дало толчок многим исследованиям. Во Франции Ампер значительно продвинулся вперёд, показав, что провод с током обладает всеми свойствами магнита. Он может притягивать или отталкивать другой провод с током. Когда кто-то возразил, что это действие тока на ток можно сразу без дальнейших опытов вывести из эксперимента Эрстеда, Ампер, как говорят, вынул из кармана два ключа. Каждый из них мог отклонять магнитную стрелку, но они не оказывали никакого действия друг на друга. Ампер исследовал всю область взаимодействия двух токов. В признание фундаментального значения трудов Ампера его именем названа единица силы тока.

Французский физик Араго показал, что ток может не только отклонять магнит, но и намагничивать кусок железа. В Англии сэр Гемфри Дэви указал, что это объясняет поведение железных опилок, рассыпанных на листе бумаги, сквозь который (перпендикулярно к нему) проходит провод с током. Опилки располагаются вокруг провода по грубо очерченным кругам. Как говорил Дэви, опилки под действием тока становятся маленькими магнитами и выстраиваются друг за другом, голова к хвосту. Это расположение показано на рис. 8, представляющем собой копию с рисунка, сделанного Майклом Фарадеем, который был тогда ассистентом Дэви.

Фарадей сам глубоко заинтересовался странным соотношением между электрическим током и магнитом; его записная книжка содержит подробное описание всех проведённых им опытов. Он располагал провод с током вертикально и помещал близ него маленькую магнитную стрелку. Она не была насажена на остриё, как обычно монтируется магнитная стрелка, потому что такой способ крепления не давал бы возможности любого движения магнита как целого. Стрелка была подвешена на длинной

нити. Фарадей помещал стрелку во все возможные положения по отношению к проводу и наблюдал получающиеся эффекты. Некоторые из них оказывались лишь повторением в различной форме основного опыта Эрстеда.

Фарадей обнаружил, что при помещении центра стрелки вблизи провода, восточнее или западнее его, стрелка

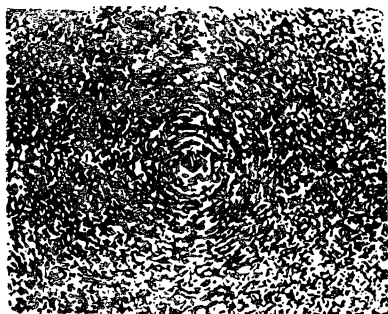
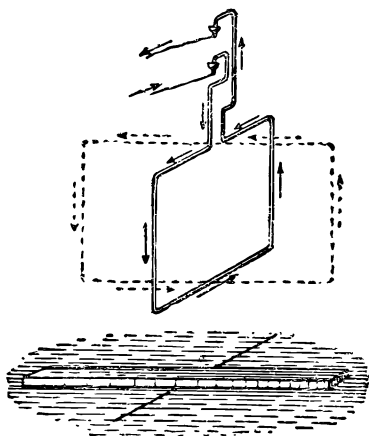


Рис. 7. Опыт Ампера, обратный опыту Эрстеда. Воспроизводится из «Сил природы» Гвиллемина (Guillemin's Forces of Nature). Магнит лежит на столе. Рамка с током устанавливается под прямым углом к магниту.

Рис. 8. Расположение железных опилок вокруг провода с током. С рисунка на последних страницах дневника Фарадея (том VI, табл. II). Ясно видно, что опилки располагаются вокруг провода по грубо очерченным кругам.

как целое притягивается или отталкивается. При перемене направления тока на обратное соответственно обращаются наблюдаемые эффекты. В конце концов он увидел, что единственное возможное объяснение состоит, как нам теперь хорошо известно, в том, что ток действует на магнитный полюс в направлении, перпендикулярном как к самому току, так и к кратчайшему расстоянию между током и полюсом. Сила взаимодействия уменьшается при увеличении расстояния. Отсюда следовало, что можно заставить один полюс непрерывно вращаться вокруг тока, если ему не надо тащить за собой другой полюс, потому что несомненно действие на оба полюса равно и противоположно. Фарадей достиг этого методом, показанным на рис. 9, *a*, *b*, *c*. Ток на рис. 9, *a* идёт по опущенному в ртуть вертикальному проводу. Провод не доходит до нижнего погружённого в ртуть и свободно

привязанного ко дну сосуда конца магнита. Магнит всплывает вертикально, причём верхний конец его находится вне ртути и оказывается под влиянием тока. Вращение,

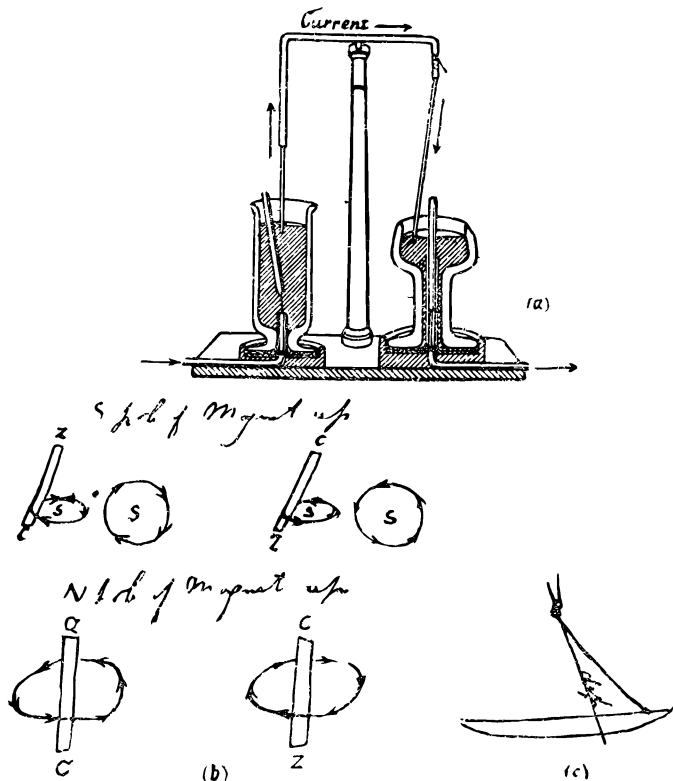


Рис. 9. *a*) Схема прибора для демонстрации вращения магнитного полюса вокруг тока и тока вокруг полюса. *b*) Один из эскизов в дневнике Фарадея (том I, стр. 51), показывающий направления вращений магнитного полюса вокруг тока, и обратно. *c*) Вращение тока в магнитном поле земли. Провод с током свободно подвешен за верхний конец; нижний его конец погружён в ртуть и поддерживается куском пробки, которая не даёт ему погрузиться слишком далеко. Провод вращается вокруг направления магнитного склонения (том I, стр. 63).

Надписи на рисунке. Сверху: Ток. На эскизе вверху: S — полюс магнита сверху. На эскизе внизу: N — полюс магнита сверху.

предположенное Фарадеем, начинается как только включается ток: под влиянием центробежной силы магнит отклоняется от вертикали, благодаря чему вращение становится более очевидным.

Обратное действие легко осуществить так, как это изображено на рис. 9,а справа. Здесь провод, по которому идёт ток, вращается вокруг магнита.

Возникают любопытные вопросы. Стремится ли магнит на рис. 9,а справа вращаться вокруг своей собственной вертикальной оси? Прекратилось ли бы движение, если провод и магнит были соединены так, что они вынуждены были бы вращаться одновременно и с одной и той же скоростью? Другими словами: что является причиной вращения провода — материал магнита или какое-то изменение в пространстве вблизи магнита, вызванное присутствием последнего. Стремится ли провод на рис. 9,а, слева, вращаться вокруг своей собственной оси? Вращает ли его магнит или, другими словами, что является причиной вращения его магнитом — материал провода или ток внутри провода и создаваемые им изменения в окружающем пространстве?

Все эти вопросы приходилось решать экспериментально. Нам сейчас известны ответы, и вопросы нас уже не смущают. Но Фарадею потребовалось долгое время, чтобы выбрать правильный путь. Мы знаем теперь, что основную роль играют электрические и магнитные действия и что материальные тела, являющиеся носителями электрической и магнитной индукции, движутся лишь в том случае, если их движения дают возможность электрической и магнитной индукциям взаимодействовать друг с другом.

#### IV

В 1831 г. Фарадеем был проведён замечательный опыт, явившийся основой третьего из четырёх законов электромагнетизма. В период с 1819 по 1831 г. Фарадей неоднократно пытался выявить определённый параллелизм между током и магнетизмом, существование которого казалось ему вероятным. Вопрос формулируется очень просто. Известно, что кусок железа, помещённый возле магнита, намагничивается. Пойдёт ли ток по проводу, если поместить провод рядом с другим проводом, по которому ток уже идёт? Дважды предпринимал Фарадей такие опыты: в своём дневнике он описывает результаты. Они оказались несомненно отрицательными. И всё же Фарадей мог бы уже тогда открыть тот эффект, который он нашёл позже. Его два провода были расположены рядом, не соприкасаясь. Один из них был присое-

динён к батарее, другой — к гальванометру. Когда Фарадей включал батарею, то в проводе, соединённом с гальванометром, действительно появлялась мгновенная электродвижущая сила, и если бы контакты в этой цепи были замкнуты, то гальванометр давал бы мгновенный отброс. Фарадей не заметил ничего подобного; возможно, что эффект не был замечен, потому что он был слишком слаб, или Фарадей не посмотрел в надлежащий момент, или же, быть может он присоединил гальванометр лишь после того, как замкнул другой провод и ток в нём уже достиг своего полного значения, что происходит за очень короткий промежуток времени. Как бы то ни было, в то время Фарадею не удалось открыть аналогии, которую он искал.

29 августа 1831 г. он добился успеха, применив схему, которая даёт эффект, несравненно бóльший, чем могли бы дать два параллельных провода. Он взял кольцо из мягкого железа и обмотал его медной проволокой; подлинное кольцо показано на рис. 10,а. Свой опыт в этот день Фарадей начал с того, что соединил обмотки так, как описано в цитируемой ниже выдержке из его дневника. На кольце получились две независимые обмотки, одна присоединённая к батарее, другая — к гальванометру. Если сначала замкнуть цепь гальванометра, то в момент включения батареи в другую обмотку, в цепи гальванометра возникнет мгновенный ток. Могло бы случиться, что при первой попытке Фарадей пропустил бы этот эффект, но он заметил его и записал результат в своём дневнике.

Это — один из величайших опытов по электромагнетизму, и это событие так важно, что его запись стоит воспроизвести полностью. Вот она:

29 Авг. 1831

1. Опыты по получению Электричества из Магнетизма и т. д. и т. д.

2. Взял железное кольцо (мягкое железо) с внешним диаметром в 6 дюймов из круглого железа толщиной  $7/8$  дюйма. На одну половину его намотал много витков медной проволоки, причём витки были изолированы друг от друга хлопчатобумажной нитью и прокладкой из хлопчатобумажной ткани. Было намотано 3 куса проволоки, каждый около 24 футов длиной, и их можно было соединять в одну обмотку или использовать каждый отдельно. В опыте со сложной батареей каждый был изолирован

от другого. Назовём эту сторону кольца *A*. Вокруг другой стороны, отделённой, однако, некоторым промежутком, намотал два куска проволоки с общей длиной около 60 футов, причём направление витков такое же, как в первой обмотке; эту сторону назовём *B*.

3. Зарядил батарею, состоявшую из 10 пар пластин по 4 квадратных дюйма. Соединил обмотки на стороне *B* в одну обмотку, концы её замкнул медной проволокой,

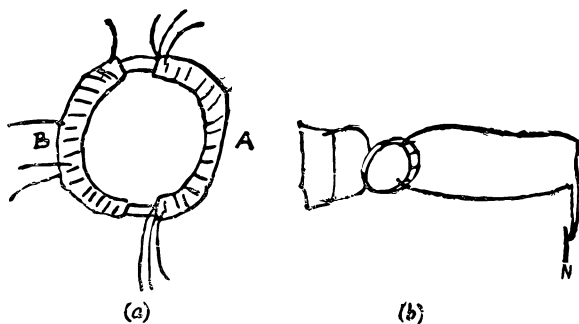


Рис. 10. Рисунки из дневника (том I, стр. 367), изображающие: *a*) кольцо, использованное 29 авг. 1831 г., и *b*) влияние магнита на спираль, через которую проходит ток со стороны *B* кольца, в то время как сторона *A* попеременно присоединяется к батарее и отключается от неё. Батарея находится слева; далее следует кольцо, а еле намеченная спираль находится рядом с магнитной стрелкой, обозначенной *N*.

проходящей на некотором расстоянии как раз над магнитной стрелкой (в 3 футах от железного кольца). Затем соединил концы одной из обмоток на стороне *A* с батареей: немедленно — заметное влияние на стрелку. Она колебалась, а в конце концов вернулась в начальное положение. При размыкании соединения между стороной *A* и батареей — снова отклонение стрелки.

4. Соединил все витки на стороне *A* в одну обмотку и пропустил по ней ток от батареи. Действие на стрелку сильнее, чем раньше.

5. Влияние, оказываемое на стрелку, составляет в этом случае только очень малую долю того, которое может оказать провод, непосредственно соединённый с батареей.

6. Заменял простой провод на стороне *B* проводом с плоской спиралью и поместил эту спираль в плоскости магнитного меридиана к западу от северного полюса магнитной стрелки так, чтобы наилучшим образом показать

влияние на неё пропускаемого тока. Спираль и стрелка находились примерно в трёх футах от железного кольца, а кольцо на расстоянии почти фута от батареи.

7. Когда всё было готово, в момент, когда батарея соединялась с обоими концами провода на стороне *A*, спираль сильно притягивала стрелку; после нескольких колебаний стрелка возвращалась в своё исходное, нормальное положение и успокаивалась, а затем при *размыкании* соединения с батареей стрелка сильно *отталкивалась* и после нескольких колебаний успокаивалась в таком же положении, как раньше.

Из опытов проведённых за предшествовавшие десять лет как им самим, так и другими исследователями, Фарадей уже знал, что ток в цепи батареи намагничивает железное кольцо. Теперь же он узнал, что за то время пока магнетизм создавался растущим током, в цепи, которую он называл *B*, появлялся мгновенный ток; чтобы его вызвать, должна была существовать мгновенная электродвижущая сила. Но когда ток и магнетизм достигали своей полной величины, электродвижущей силы больше уже не было. Простое присутствие магнита ничего не даёт: электродвижущая сила возбуждалась только пока кольцо намагничивалось. Опыт показал, что когда ток батареи выключался или менял направление, так что магнетизм исчезал из обмотки, связанной с гальванометром, мгновенный ток проходил в обратном направлении. Неожиданностью было то, что первичный ток и обусловленный им магнетизм должны были изменяться, чтобы вызвать любой электродвижущий эффект. Постоянные магниты или магнетизм не оказывают электрического влияния, так же как постоянное электричество не оказывает магнитного влияния. Только движущиеся магниты и изменяющийся магнетизм создают электродвижущую силу, и только движущееся электричество вызывает магнитодвижущую силу. Фарадей теперь понял причину неудачи предыдущих опытов.

Так был установлен третий основной принцип, после чего развитие электромагнетизма пошло быстрыми шагами. Правда, второй и четвёртый принципы оставались ещё не совсем разработанными; их роль была ещё недостаточно понята. Что касается четвёртого принципа, то Ом в 1827 г. опубликовал ряд очень важных опытов, которыми он показал, что можно представить простыми выражениями сопротивление, оказываемое прохождению



электричества проволоками различных длин, диаметров и материалов. Он показал, что имеется нечто, доступное измерению, что можно было бы соответственно назвать сопротивлением, как мы говорим теперь. И имя Ома справедливо было выбрано для названия той единицы, которой измеряется величина сопротивления. Такая формулировка четвёртого принципа была совершенно достаточна для того времени, а понимание второго принципа

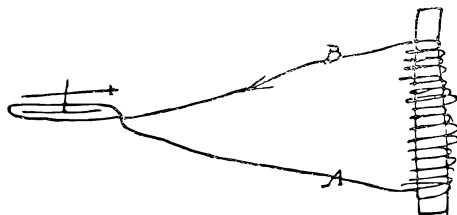


Рис. 11. Когда стержень из мягкого железа переворачивается, то магнетизм, обусловленный влиянием земли, меняет знак. Индуцированный ток действует на магнитную стрелку (том I, стр. 396).

было хотя и несовершенно, но также достаточно для возможности продолжать опыты по электромагнетизму.

Многие из этих опытов по электромагнетизму были сделаны Фарадеем. Все они увековечены в его дневнике и в его печатных сообщениях.

Кроме Фарадея, труд которого естественно входит в нашу историю и на самом деле играет в ней ведущую роль, по этому пути шли и другие экспериментаторы. В Соединённых Штатах Джозеф Генри одновременно с Фарадеем открыл третий принцип, а несколько ранее Ампер произвёл эксперимент, из описания которого видно, что он наблюдал действие этого принципа. Это было в Женеве в 1822 г.

Рис. 11 иллюстрирует один опыт, теперь хорошо известный. Железный стержень вставлен в проволочную катушку, присоединённую к гальванометру. Стержень находится почти в вертикальном положении; следовательно, он намагничивается земным магнетизмом. Стрелка гальванометра находится в покое: тока нет, ибо одно лишь присутствие магнетизма в обмотке не оказывает влияния. Но когда стержень с обмоткой переворачиваются, то появляется мгновенный ток. Магнетизм в стержне изменил знак, а это есть один из видов магнитного изменения. Следовательно, в соответствии с третьим принципом, в обмотке возбуждается электродвижущая сила.

Другой знаменитый опыт можно рассматривать как один из первых замыслов динамо. В основе его лежит та идея, что движение металла возле магнита должно давать

такой же эффект, как перемещение магнита около металла: в любом случае в металле должна возникать электродвижущая сила. Поэтому Фарадей заставил латунный диск вращаться между полюсами магнита. Магнит на рис. 12, взятом из дневника, это «большой магнит Королевского общества». Коллекторы в виде латунных пружин могли быть подведены к любой точке на ободке диска или

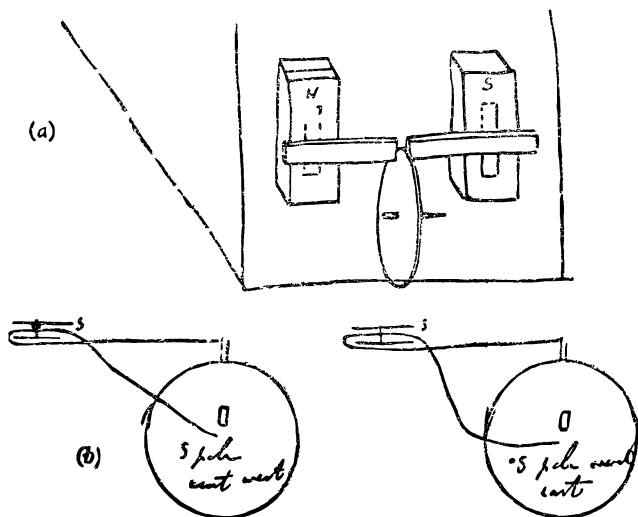


Рис. 12. а) Рисунок Фарадея, показывающий расположение диска, вращающегося между полюсами магнита. б) Рисунок, показывающий некоторые экспериментальные результаты (том I, стр. 385). Один из проводов, идущих от гальванометра, соединён скользящим контактом с краем диска, другой — с его осью.

Надписи на рисунке. Слева: S полюс отклоняется на запад. Справа: S полюс отклоняется на восток

на его поверхности, или на оси. Коллекторы присоединялись к проводам, ведущим к гальванометру. Ток возникал и, как и ожидалось, можно было измерять его величину для разных скоростей вращения или для различных положений коллекторов, а также для обоих направлений вращения. Идеи Фарадея были окончательно сформированы и нашли своё подтверждение в длинном ряде наблюдений. Результаты хорошо известны нам теперь.

Полезно описать ещё один опыт. Он напоминает нам о том, что в те дни не знали, что электричество от электростатической машины таково же, как электричество воль-

това столба и батареи. Первое обладало способностью создавать искры. Может ли последнее делать то же самое? Одна из форм эксперимента показана на рис. 13. Магнит можно резко вдвинуть в катушку; наилучшим для создания электродвижущей силы является момент, когда передний полюс магнита проходит через катушку; величина этой электродвижущей силы зависит от силы магнита и от скорости его движения. В момент, когда скорость

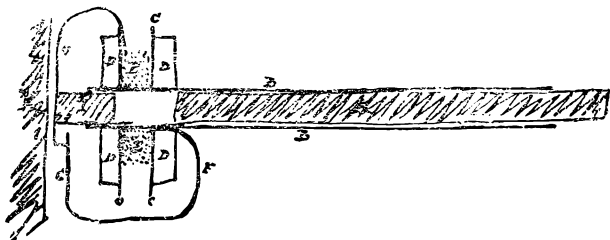


Рис. 13. Схема прибора для получения электрической искры при прерывании тока (том II, стр. 297). Магнит *A* быстро вдвигается в катушку справа налево. Когда его передний конец проходит через катушку, изображённую пунктиром, он вызывает в ней ток, который внезапно прерывается, когда *A* наталкивается на кусок дерева *J*. Размыкание происходит в точке контакта между *G* и *H*. В этой точке появляется искра.

наибольшая, магнит наталкивается на препятствие, и этот удар разрывает слабый контакт в цепи катушки. Тогда сквозь разрыв между концами проводов проскакивает искра, вызванная действием тока, продолжающего некоторое время свой путь. Следовательно, обе формы электричества обладают способностью производить искры. Это помогло установить факт их идентичности.

## V

Теперь мы подходим к очень интересной главе нашей повести. Первый и третий принципы были уже установлены прочно; второй и четвёртый были для того времени достаточно намечены. В попытке нарисовать самому себе картину тех действий, которые он исследовал, Фарадей счёл полезным воспользоваться представлением, основанным на поведении железных опилок, рассыпанных около магнита или около провода с током. Расположения опилок были уже хорошо известны, но Фарадей теперь начал тщательно изучать их. До сих пор сохраняется большое

количество подлинных моделей, сделанных им собственноручно. Для него линии опилок, простирающиеся от  $N$  к  $S$  полюсу, были указателями чего-то существующего в пространстве между полюсами. Опилки были, можно сказать, лишь соломинками, которые показывают, в каком направлении дует ветер. Нечто, что можно было определить линиями и о чём даже можно было говорить как о линиях, существовало там независимо от того, были там опилки или нет. Это нечто, конечно, не обяза-



Рис. 14. Рисунки, показывающие, как Фарадей представлял себе направление магнитной индукции между двумя магнитами с помощью линий из опилок. Следует обратить внимание на то, что индукция предполагается продолжающейся сквозь магнит, так что линии образуют замкнутые кривые (том VI, стр. 5).

тельно существовало только вдоль резко очерченных линий, так же как широта или долгота не ограничиваются линиями, проведёнными на карте. Фарадей предположил, что состояние в пространстве между магнитами определяется этими линиями и что это состояние является носителем магнитного действия.

Вследствие параллелизма между электричеством и магнетизмом, который к тому времени был уже ясен, представление о линиях сил должно было оказаться применимым как в случае магнетизма, так и в случае электричества. Теперь мы свободно пользуемся этим представлением в обоих случаях.

Но как передаётся действие вдоль этих линий? Это не может быть простым толчком или натяжением. Мы знаем, что действия распространяются волнами в пространстве, которое кажется нам пустым (свет), или заполнено материальными телами (звук). Направлением в этих случаях служит обычно прямая линия: лучи света или звука — прямые линии, если среда, через которую они проходят, однородна. Можно ли каким-нибудь образом рассматривать линии сил (хотя они и искривлены) как лучи, вдоль которых распространяются колебания?

Неизвестно, развивались ли представления Фарадея таким путём или нет, но достоверно, что уже очень скоро — в тридцатых годах, у него зародилась идея о «лучевых колебаниях», т. е. о волнах, распространяющихся вдоль этих линий. Это было за много лет до того, как в 1846 г. по любопытному поводу он выразил эту идею публично. Одного хорошо известного изобретателя попросили прочесть еженедельную публичную лекцию в Королевском институте. Лекция должна была состояться вечером, и изобретатель провёл утро и время после полудня в установке и проверке своих демонстраций. Фарадей помогал ему. Когда публика собралась, лектора не оказалось: нервы его не выдержали. Фарадею пришлось заменить его, и он выполнил это успешно, поскольку он участвовал в дневных приготовлениях и понимал, что намеревался сказать лектор. Но он не мог сказать по данной теме так много, как сказал бы лектор, и поэтому, когда он кончил, у него ещё оставалось время. Тогда он рассказал об этих «лучевых колебаниях». Он долго вынашивал эту идею, но случай заставил его говорить, и он во всяком случае мог почувствовать, что его идея теперь достаточно ясна. После того как она была изложена на лекции, ничего уже не мешало опубликовать её в более полном виде. Поэтому в 1846 г. он послал в *Philosophical Magazine* статью под названием «Мысли о лучевых колебаниях». Это та статья, которую изучал несколькими годами позже Клерк Максвелл в Кембридже. Он раскрыл то, что было в ней заложено, и облёк мысли Фарадея в математическую форму. Когда это было сделано, полученные математические уравнения сразу показали, что должны существовать электромагнитные импульсы или волны, которые, как и предполагал Фарадей, распространяются в пространстве, а скорость их равна скорости света, т. е. 186 000 миль в секунду <sup>1)</sup>. Отсюда неизбежен вывод, что и сам свет есть один из видов электромагнитных волн. Свет, таким образом, не представляет собой совершенно обособленного явления. Это просто область электромагнитных волн, для обнаружения которой приспособлен глаз, и к тому же область — очень узкая. Волны могут быть всевозможных длин. В наши дни мы знаем рентгеновы лучи, волны которых гораздо короче, чем волны света, и радиоволны, которые гораздо длиннее. Конечно, в то

---

<sup>1)</sup> 300 000 км/сек. (Прим. перев.)

время эти крайности ещё не были известны, и, упоминая их сейчас, я хочу лишь указать направление, в котором пошло развитие науки.

Нам остаётся более полно рассмотреть те идеи, которые легли в основу знаменитых математических уравнений Максвелла. Каждое из этих четырёх уравнений представляет один из тех основных принципов, которые я изложил выше. В основу первого лёг опыт Эрстеда, в основу третьего — опыт 1831 г. Второй и четвёртый были установлены более постепенно. Теперь мы познакомимся с ними немного подробнее.

## VI

Второй принцип утверждает, что магнитодвижущая сила стремится возбудить магнетизм или, говоря точнее, магнитную индукцию во всяком теле (или в пустом пространстве), в котором она действует. Идея о том, что в пространстве между двумя магнитами существует нечто или некое состояние, являющееся передатчиком их взаимных притяжений или отталкиваний, естественно, привела к следующей идее о влиянии на эти действия среды, заполняющей пространство. Железо явно стоит особняком. Форма и густота линий сил, о которых можно судить по расположению опилок, резко изменяются, если в пространство, через которое они проходят, поместить кусок железа. Другие вещества не влияют заметно на расположение линий. Ещё Эрстед обнаружил, что внесение стекла или дерева, или латуни, в пространство между проводом и магнитом не влияет на действие электрического тока на магнит. Следовало ли принять, что магнетизм действует только на одно или на два вещества, как, например, на железо, в меньшей степени на висмут, и, может быть, ещё на некоторые? Или магнетизм способен существовать без материального носителя? Если бы последнее было верно, то пустое пространство надо было бы рассматривать до некоторой степени как эталон, и можно было бы классифицировать вещества в отношении их способности реагировать на магнитодвижущую силу по сравнению с пустотой. У железа эта способность относительно велика; в других случаях она, несомненно, несколько отличается от способности пустоты. Оказалось, что существуют тела, которые менее чувствительны, чем пустое пространство. Тогда как железо, помещённое под сильное магнитное влияние, т. е. подвергаемое воздейст-

вию большой магнитодвижущей силы, втягивается в места, где магнитное влияние больше, некоторые тела выталкиваются как бы затем, чтобы избегнуть этого влияния.

Когда мы взвешиваем тела, мы измеряем силу притяжения их землёй. Но некоторые вещества, как, например, баллон, наполненный водородом, стремятся подняться от земли, как если бы они отталкивались. Мы не говорим, однако, в этом случае об отрицательном весе или об отрицательной силе притяжения. Мы ясно представляем себе, что все наши наблюдения относятся к телам, находящимся в воздухе, и что стремление баллона подняться означает не то, что у водорода отрицательный вес, но лишь то, что он притягивается к земле менее сильно, чем воздух. Подобным же образом такие вещества, как висмут, следует считать не магнитно отрицательными, но менее магнитными, чем пустое пространство, в котором магнитодвижущая сила может вызвать магнитную индукцию, бо́льшую чем в висмуте.

Фарадей продолжал исследовать большое количество веществ. Одним из первых был знаменитый опыт с куском очень тяжёлого стекла. Фарадей накопил образцы стёкол во время исследования, проводившегося по предложению правительства, которое было озабочено недостатком в Англии стекла для оптических приборов. Постановка эксперимента воспроизведена на рис. 15, который взят из дневника Фарадея. Кусок стекла всегда стремится выйти из мест, где наиболее сильно влияние магнита, и линии магнитной индукции, если пользоваться ими для описания этого влияния, проходят наиболее густо. О стекле говорят, что оно диамагнитно, — неудачное название, наводящее на мысль, что линии сил с исключительной лёгкостью проходят через это тело, меж тем как верным оказывается как раз противоположное. Иногда неправильно говорят, что диамагнитное тело стремится расположиться поперёк линий сил. Это происходит только в том случае, если оно тем самым сдвигается в целом от более сильных к более слабым полям. В однородном поле на самом деле наблюдается эффект ориентации такого тела вдоль линий, но его трудно обнаружить. Фарадей нашёл, что большинство веществ хотя и мало, но вполне определённым образом отличается от пустоты по своей способности реагировать на магнитодвижущую силу. Ему было интересно узнать, что жидкий кислород особенно чувствителен в этом отношении. Это демонстрирует известный

опыт сэра Джеймса Дьюара, получившего жидкий кислород в большом количестве. Забавно смотреть, как жидкий кислород прыгает, цепляясь за полюсы сильного электромагнита.

В результате многих опытов, сделанных Фарадеем, а также и другими, стала ясной связь между электродвижущей силой и магнитной индукцией. Ток не создаёт непосредственно магнетизма ни в железе или, более обще, в любых телах, ни в пустоте, но создаёт лишь определённую силу, эффект которой зависит от формы и объёма тел, в которых она действует. Этот момент исключительно важен. Он не был достаточно понят физиками во времена Фарадея и даже несколько позже. Клерк Максвелл придал ему ясную форму в своих уравнениях. Если бы Максвелл не сделал этого, он не смог бы построить электромагнитную теорию света.

Четвёртый основной принцип утверждает, что электродвижущая сила производит действие, зависящее от её величины и от природы пространства, в котором она действует. Опыты Ома показали, что электродвижущая сила, приложенная к проводнику, создаёт ток, величина которого обратно пропорциональна сопротивлению проводника. Но это не всё. Если бы это было единственным

действием электродвижущей силы, то параллелизм между электричеством и магнетизмом нарушился бы, хотя нет ничего магнитного, что соответствовало бы электрическому току. Кроме создания тока электродвижущая сила производит также действие, в точности аналогичное уже известным нам магнитным действиям. Вспомним рис. 1, где мы представляли себе, как замыкание тока в контуре, включающем батарею в первое звено цепочки, вызывает поток электричества. Этот поток, который быстро уста-

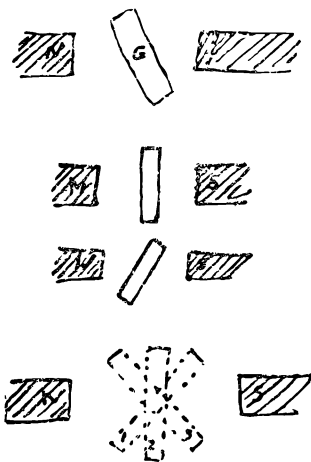


Рис. 15. Рисунки, показывающие влияние сильного магнитного поля на кусок тяжёлого стекла. Стекло отклоняется от полюсов. На нижнем рисунке стекло колеблется под влиянием периодического включения магнитных сил (том IV, стр. 313).



навливается, будет прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален сопротивлению контура. Допустим теперь, что в цепочке имеется разрыв, т. е. в какой-нибудь точке звено перерезано, и ток не может больше течь непрерывно. Но всё же, когда ключ замкнут, имеется мгновенный поток. Мы представляем себе накопление положительного электричества на одной стороне разрыва и отрицательного на другой или, если нам нравится думать иначе, избыток положительного электричества на одной стороне и недостаток его на другой. Среда внутри разрыва находится теперь в состоянии, которое аналогично магнитному состоянию в пространстве вблизи магнита. Можно, как и в случае магнетизма, обнаружить наличие этого состояния и исследовать его характер, но, конечно, мы уже не можем пользоваться железными опилками. Если электродвижущая сила достаточно велика, то её действие можно наглядно продемонстрировать с помощью маленьких кристалликов хотя бы, например, сернокислого хинина, погружённых в непроводящую жидкость.

На обычном языке такой разрыв называется электрическим конденсатором, — название опять-таки довольно неудачно выбранное, ибо там нет ничего, о чём можно было бы говорить, что оно конденсируется. Скорее следовало бы сравнить этот разрыв с резиновой перепонкой, натянутой поперёк трубки, в которую поступает под давлением вода. Трубка соответствует проводу, по которому идёт ток. Когда приложено давление, плёнка поддаётся, и вода течёт до тех пор, пока сила реакции натянутой резины не сравняется с приложенной силой. Ничего не конденсировалось. Конечно, если резинку удалить или разорвать, поток стал бы непрерывным.

Если эта картина верна, то природа и форма плёнки играют важную роль. Тонкая или широкая плёнка поддаётся лучше, чем толстая или имеющая малую поверхность. Резиновая плёнка поддаётся лучше, чем сделанная из более жёсткого материала. Совершенно так же заряд на электрическом конденсаторе зависит от размеров конденсатора и от природы диэлектрика, т. е. от среды, заполняющей разрыв, сквозь который проходят линии электрической индукции. Фарадей проделал множество соответствующих экспериментов, чтобы раскрыть законы этого явления. Объектом исследования в его опытах служило пространство между двумя концентрическими металлическими сферами испытываемыми веществами были

разные смолы и жидкости (рис. 16). Если к двум таким приборам одинакового размера, заполненным различными диэлектриками, приложить одинаковую электродвижущую силу и сравнить с помощью электрометра полученные ими заряды, то окажется, что эти заряды будут различны, если диэлектрики различно реагируют на электродвижущую силу.

Требуемая большая электродвижущая сила получалась от электростатической машины. Эти опыты дали относительные значения того, что Фарадей назвал диэлектрическими постоянными веществ. Ёмкость самого конденсатора, — употребляя привычное нам название, — зависит не только от вещества между проводниками, но также от формы и геометрических размеров прибора.

Последнее не было полностью исследовано Фарадеем. Как мы знаем, существуют значительные различия между диэлектрическими постоянными веществ; например, диэлектрическая постоянная разных сортов стекла обычно в семь-восемь раз больше, чем у пустоты; у эбонита — почти в три раза, у серы — примерно в четыре раза и т. д. Здесь нет таких поразительных различий, как в аналогичном случае магнитной «проницаемости», где железо в тысячи раз более проницаемо для магнитной индукции, чем воздух.

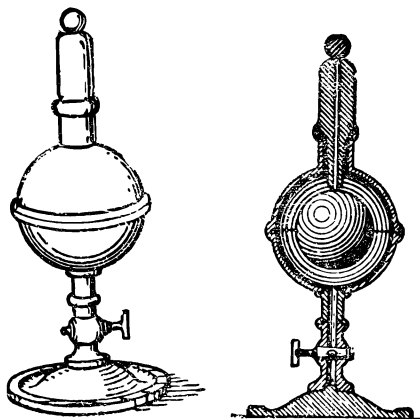


Рис. 16. Приборы, употреблявшиеся при подлинных определениях диэлектрической постоянной. Поперечный разрез показывает внутреннюю и внешнюю металлические оболочки, между которыми находится испытуемое вещество. На рисунке испытуемое вещество твёрдое; можно также испытывать газ или жидкость.

## VII

Когда Клерк Максвелл в 1865 г. создавал свои «уравнения электромагнитного поля», он воспользовался всем, что было известно к тому времени об электромагнитных явлениях. Кроме того, он был вдохновлён статьёй Фарадея

«Мысли о лучевых колебаниях». Как я уже говорил, он пришёл к выводу, что должны существовать «радиоволны» и что свет является одной из форм этих волн. Фарадей не мог пойти так далеко: во-первых, он не был искусным математиком, а кроме того, ещё не были в достаточной мере количественно исследованы явления, открытые в значительной степени им самим. Максвелл высказал это в своей статье в 1865 г. Несколько лет назад мне довелось просматривать одну книгу в библиотеке Королевского общества, и когда я открыл её, из неё выпал листок бумаги. Это была заметка, подписанная Клерком Максвеллом, и в ней значилось:

— Электромагнитная Теория Св. (света), предлож. им (Фарадеем) в «Мыслях о лучевых колебаниях» (Phil. Mag., 1846, Май) или «Эксп. Иссл.» (Experimental Researches, III, стр. 447) это по существу то же, что я начал развивать в этой статье («Динамич. Теория Электр. Поля» Phil. Trans. 1865), за исключением того, что в 1846 году не было данных для вычисления скорости распространения.

*Дж. К. М.*

Клерк Максвелл сказал уже не меньше в своих печатных статьях, но представило не малый интерес натолкнуться на это дополнительное свидетельство после того, как оно пролежало скрытым лет семьдесят.

Лишь после того, как Клерк Максвелл сформулировал четыре математических уравнения, выражающих четыре принципа, раскрытие которых было медленным и потребовало большой затраты труда и мысли, — радио, как мы теперь называем его, стало возможностью. Решение этих уравнений показало, что электромагнитные возмущения должны распространяться в пространстве с такой же скоростью, как и свет, — один из видов их. На их скорость влияет наличие вещества в пространстве, где они распространяются. Мы знаем, что свет распространяется, например, в стекле медленнее, чем в вакууме или в воздухе, и из-за этого, переходя из воздуха в стекло или обратно, свет преломляется. Радиоволны тоже могут преломляться по тем же причинам; они могут и отражаться, как отражается свет. То, что радиоволны обладают этими свойствами, является исключительно важным обстоятельством.

Математик, который имеет дело с уравнениями Максвелла, сразу видит, почему радиоволны ведут себя так же,

как свет. Но длинным может казаться путь от четырёх принципов электромагнетизма к утверждению, что радио есть только разновидность света, которую глаз не воспринимает, или, точнее, свет есть разновидность радио. Выражаясь образно, легко перебраться через реку, если перекинут математический мост. Но если моста нет, через реку всё же можно перебраться другими путями, которые могут оказаться не такими короткими и удобными. Попробуем же составить себе представление о природе волн, не прибегая к математике. Вернёмся к цепочке из чередующихся медных и железных колец, изображённой на рис. 1.

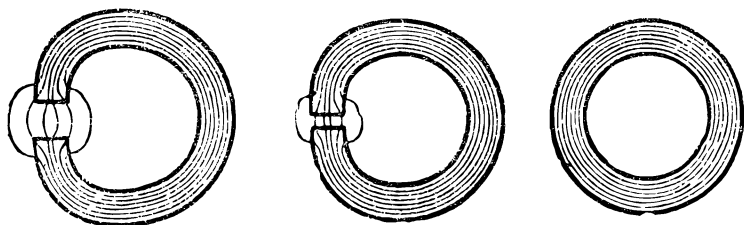


Рис. 17. Если сгибать магнит в кольцо, так что полюсы в конце концов соприкоснутся, то линии, изображающие магнитную индукцию, как показано, стягиваются всё более внутрь магнита. Когда одно из железных колец на рис. 1 намагничено, линии находятся внутри кольца и нигде не выходят.

Предположим, что с помощью батареи или ещё каким-нибудь образом, в первом медном кольце пропущен ток. Его магнитодвижущая сила возбудит магнетизм или магнитную индукцию в первом железном кольце. Это значит, что в кольце имеет место нечто подобное тому, что было в стержне постоянного магнита, если его согнуть в кольцо, причём северный и южный полюсы соединятся и больше не будут существовать раздельно. Линии индукции тогда идут по кольцу, как на рис. 17.

Проникновение магнетизма из первого железного кольца во второе медное, в момент, пока оно происходит, создаёт электродвижущую силу в меди, а она, в свою очередь, вызывает кратковременный ток. Ток создаёт магнитный эффект во втором железном кольце и т. д., вдоль цепочки. Это и есть импульс, который проходит по цепочке до её конца; и после того, как он миновал какое-нибудь звено, электрическое или магнитное состояние в этом звене перестаёт существовать. Если теперь мы остановим ток в первом звене или изменим его направле-

ние на обратное, то вдоль цепочки за первым импульсом последует второй; он будет противоположного характера, и мгновенный ток в медном звене будет идти в обратном направлении. Непрерывно переключая ток в первом звене, можно послать непрерывный ряд импульсов вдоль цепочки, а это и есть волновое движение, по-

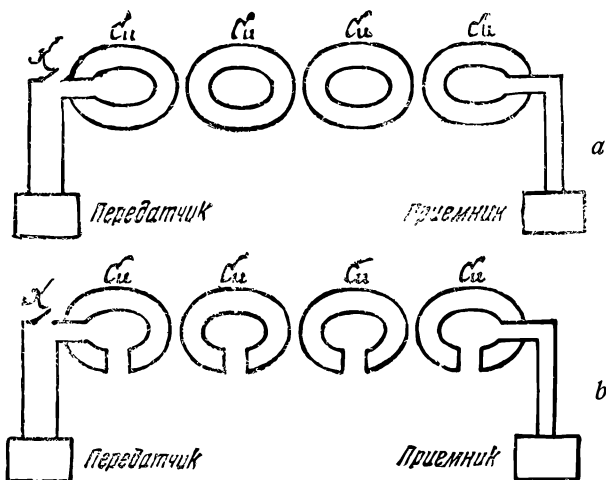


Рис. 18. а) Медные звенья цепочки с рис. 1; железные звенья изъяты. б) Разрывы в медных звеньях действуют как конденсаторы.

скольку такое движение представляет собой последовательность регулярно чередующихся импульсов.

Нам надо, однако, посмотреть теперь, как серии таких импульсов могут проходить через пространство без посредства медных или железных звеньев. Предположим, что мы убираем железные звенья и оставляем медные. Мы убрали железо, которое направляло во второе медное звено значительную долю линий магнитной индукции, вызванных током, проходящим в первом медном звене, но некоторые линии остались. Явление это было бы ясно видно, если бы вокруг кольца рассыпать железные опилки. Ещё проще: магнитная стрелка, помещённая в середине второго медного кольца, отклонится под влиянием тока в первом кольце. Так импульс бежит вдоль цепочки от одного медного звена к другому.

Мы можем теперь пойти ещё дальше: мы можем обойтись даже и без медных звеньев. Предположим, что в

одном из них есть разрыв. Если приложить к этому кольцу электродвижущую силу, например, путём изменения магнитной индукции в соседнем железе или в пустом пространстве, то в кольце пройдёт кратковременный ток. Как уже объяснялось, он зарядит воздушный конденсатор, образованный разрывом; ток не может идти постоянно. Но этот мгновенный ток есть всё, что нужно, т. е. наличие разрыва не препятствует прохождению импульса.

Как велик может быть разрыв? Чем он шире, тем меньше весь поток электричества, но как бы ни был широк разрыв, мгновенный ток всё же будет. Что же мешает вовсе уничтожить медные кольца? Почему не уничтожить совсем все медные кольца за исключением первого, которое нужно в каком-нибудь виде сохранить, чтобы отправлять импульсы? Первое медное кольцо — это, в обычной практике, — «антенна».

Представляется очень странным, что можно обойтись без медных и железных колец, в которых сконцентрированы движущееся электричество и меняющийся магнетизм<sup>1)</sup>. Дело в том, однако, что магнитная индукция и электрическая индукция могут существовать и в пространстве, в котором нет никакого вещества. Присутствие вещества влияет на величину и распределение обеих индукций, но индукции могут действовать и без вещества. Конечно, при распространении импульсов после устранения металлических звеньев, нельзя уже представлять себе колец определённой формы, окружённых индукциями: положения индукций в пространстве теперь уже ничем не связаны. Но в каждой точке, через которую проходит импульс, они имеют свою мгновенную величину, причём каждая из них меняет знак, т. е. направление в пространстве.

---

<sup>1)</sup> При той формулировке основных принципов, которую даёт автор, распространение импульса без медных колец представляется непонятным. Согласно первому принципу (стр. 7), только ток создаёт магнитодвижущую силу. Если убрать второе медное кольцо, то, так как возникающая в пустом пространстве электродвижущая сила не вызывает в нём тока, цепь магнитных и электрических превращений о рывается и импульс не будет распространяться. Осуществляющееся же в действительности распространение электромагнитного импульса в пустом пространстве связано с тем, что не только электрический ток, но и переменная электрическая индукция создают магнитодвижущую силу. Только при такой, принадлежащей Максвеллу, расширенной формулировке первого принципа становится понятна излагаемая автором схема (Прим. перев.)

При излучении вертикальной антенной электрического импульса, вокруг антенны действительно существуют горизонтальные кольца магнитной индукции, и обусловленная ими электродвижущая сила создаёт изменения электрической индукции вокруг антенны, которые можно рассматривать как мгновенные токи в пространстве. Они свободно сцепляются, как звенья цепочки, с магнитными кольцами, и т. д. Нет металлических колец, но есть кольца индукции в пространстве, расходящиеся непрерывно во все стороны. У них нет определённых границ, но, как у волн на воде, есть максимумы и минимумы, по перемещению которых можно наблюдать и измерять их движение.

Хотя Клерк Максвелл показал в 1865 г., что должны существовать радиоволны, никому, кажется, не удалось наблюдать их до Генриха Герца, практически осуществившего их в 1888 г. в своей лаборатории в Бонне. Расстояние между передатчиком и приёмником в этих ранних опытах составляло всего несколько ярдов<sup>1)</sup>; это неудивительно, потому что первые аппараты были крайне мало мощными. Особенно слабыми были средства приёма. О методе Герца можно сказать, что это была цепочка, в которой существовали только первое и последнее медные звенья, и он наблюдал искру в разрыве, сделанном в последнем звене. Этот метод, конечно, был крайне нечувствительным.

Изобретение когерера Бранли явилось существенным шагом вперёд. Но только «электронная лампа» позволила двинуться вперёд гигантскими шагами и привела к изумительному прогрессу последних двадцати пяти лет.

Здесь заканчивается наша история и уступает место новой, которая расскажет об открытии электрона и обо всех последствиях этого открытия.

В этом коротком рассказе моей целью было показать, как постепенно раскрывались основные принципы электромагнетизма. Они являются основой всех приложений электромагнетизма, включая и передачу по радио, и явно или неявно содержатся во всех проблемах, с которыми сталкивается практика.

---

<sup>1)</sup> Ярд = 0,914 м. (Прим. перев.)

Цена 70 коп.