

вое действие электрического тока. В одном из опытов он впервые наблюдал электрическую дугу. Вот как он сам описывал этот опыт:

«Если на стеклянную плитку или на скамеечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светящихся явлений посредством Гальвани — Вольтовской жидкости, и если потом металлическими изолированными направителями (directores), сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скоро или медленно загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может»¹⁾.

Изучая химическое, тепловое и другие действия тока, Петров сделал некоторые выводы, относящиеся к законам постоянного тока. Так, например, он считал, что проводники обладают различной проводимостью и что свойства проводника определяют вместе с особенностями самой батареи действие тока в цепи. При этом он подчеркивал, что чем больше сечение проводника, тем сильнее действие «Гальвани — Вольтовской жидкости».

Исследования Петрова не были известны за границей. Частично это объясняется тем, что все свои работы Петров печатал только на русском языке. Другой причиной послужило недоброжелательное отношение со стороны реакционных академиков во главе с президентом академии С. С. Уваровым. Поэтому, в частности, приоритет открытия электрической дуги был полностью приписан Дэви, опубликовавшему свои опыты с электрической дугой в 1812 г.

§ 40. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Исследовать магнитное действие электрического тока начинают после открытия датским ученым Хансом Кристианом Эрстедом (1777—1851) действия электрического тока на магнитную стрелку. Уже задолго до открытия Эрстеда были известны факты, указывающие на существование связи между электричеством и магнетизмом. Еще в XVII в. были известны случаи перемагничивания стрелки компаса во время ударов молнии. В XVIII в. после установления электрической природы молнии были сделаны попытки намагнитить железо, пропуская через него разряд лейденской банки, а позже — ток от гальванической батареи. Однако эти попытки не привели к каким-либо определенным результатам. Впервые доказал связь между электрическими и магнитными явлениями Эрстед в 1819 г. Полученный результат оказался неожиданным для всех, в том числе и для него самого. Неожиданным был сам характер связи, а не факт ее существования. Эрстед гораздо раньше был глубоко уверен в наличии связи между электрическими и магнитными явлениями и надеялся изучить ее характер. Уже в 1807 г. он предпо-

¹⁾ Петров В. В., Гроттгус Т. и др. Избранные труды по электричеству, с. 82.



Ханс Кристиан Эрстед

лагал исследовать действие электричества на магнитную стрелку¹⁾, но не смог выполнить свое намерение. Уверенность в наличии связи между электрическими и магнитными явлениями была связана у Эрстеда с его общими философскими взглядами на явления природы. Несмотря на разнообразие окружающих явлений, он полагал, что между ними имеются глубокие связи и единство. В одном из своих последних сочинений Эрстед писал: «глубоко проникающий взгляд открывает нам во всем ее многообразии замечательное единство»²⁾. Эрстед верил, что между электрическими, тепловыми, световыми, химическими, а также и магнитными явлениями должны существовать связи, раскрыть которые — задача науки. На возникновение у Эрстеда этих идей оказали определенное влияние натурфилософские взгляды Шеллинга, в которых также утверждалось единство электрических, магнитных и химических «сил». Можно также упомянуть малоизвестного венгерского ученого Винтерла, утверждавшего, что все силы природы возникают из единого источника. Его работы были известны Эрстеду, а сам Винтерл знал последнего и даже посвятил ему одно из своих сочинений³⁾. Вот как сам Эрстед описал историю своего открытия:

«Так как я уже давно рассматривал силы, проявляющиеся в электрических явлениях всеобщими природными силами, то я должен был отсюда вывести и магнитные действия. Я высказал поэтому гипотезу, что электрические силы, когда они находятся в сильно связанном состоянии, должны оказывать на магнит некоторое действие.

Я не мог тогда проделать опыт для проверки, так как совершал путешествие и внимание мое было занято целиком разработкой химической системы⁴⁾.

Открытие Эрстеда, сделанное им в 1819 г. и опубликованное в 1820 г., заключалось в следующем. Эрстед обнаружил, что если возле магнитной стрелки поместить прямолинейный проводник, направление которого совпадает с направлением магнитного меридиана, и пропустить через него электрический ток, то магнитная стрелка отклоняется. Величину момента силы, действующего на магнитную стрелку под влиянием электрического тока, Эрстед не

¹⁾ См.: Jones B. The Life and Letters of Faraday. Vol. II. London, 1870, p. 395.

²⁾ Oersted H. Ch. Der Geist und der Natur B. 2, München, 1851, S. 435.

³⁾ Winterl I. Darstellung der vier Bestandtheil der anorganischen Natur. Vena, 1804.

⁴⁾ Oersted H. Ch. J. Chem. Phys., B. 32, 1821, s. 200—201.

определил. Он только отметил, что угол, на который отклоняется стрелка под действием тока, зависит от расстояния между ней и током, а также, говоря современным языком, от силы тока (во времена Эрстеда еще не было твердо установлено понятие силы тока).

Теоретические соображения Эрстеда по поводу сделанного им открытия не отличались достаточной ясностью. Он говорил, что в окружающих точках пространства возникает «электрический конфликт», который имеет вокруг проводника вихревой характер. Статью, в которой впервые сообщалось об этом открытии, Эрстед называет «Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку».

Открытие Эрстеда вызвало большой интерес и послужило толчком к новым исследованиям. В том же 1820 г. были получены новые результаты. Так, Араго показал, что проводник с током действует на железные предметы, которые при этом намагничиваются. Французские физики Био и Савар установили закон действия прямолинейного проводника с током на магнитную стрелку. Поместив магнитную стрелку около прямолинейного проводника с током и наблюдая изменение периода колебаний этой стрелки в зависимости от расстояния до проводника, они установили, что сила, действующая на магнитный полюс со стороны прямолинейного проводника с током, направлена перпендикулярно проводнику и прямой, соединяющей проводник с полюсом, а ее величина обратно пропорциональна этому расстоянию. Этот результат был проанализирован, и после введения понятия элемента тока был установлен закон, известный под названием закона Био — Савара.

Также в 1820 г. был получен новый важный результат в области электромагнетизма французом Андре Мари Ампером (1775—1836). К этому времени Ампер был уже известным ученым, имел ряд трудов по математике, физике и химии. Кроме того, Ампера привлекали биология и геология. Он живо интересовался философией и в конце жизни написал большой труд «Исследование по философским наукам», посвященный вопросу классификации наук. Мирозрение Ампера формировалось в значительной степени под влиянием французских просветителей и материалистов. Его взгляды на физические явления отличались от взглядов большинства его современников. Он был противником концепции «невесомых». «Разве надо, — говорил Ампер, — для каждой новой группы явлений придумывать специальный флюид?» Ампер очень быстро принял



Андре Мари Ампер

волновую теорию света, которая, по словам Араго, наряду с теорией самого Ампера, объясняющей магнитные явления электрическими, «стала его любимой теорией»¹⁾. Ампер был противником теории теплорода и считал, что сущность теплоты заключается в движении атомов и молекул. Он даже написал работу, посвященную волновой теории света и теории теплоты. В начале сентября 1820 г. Араго сообщил французским академикам об открытии Эрстеда и вскоре продемонстрировал его опыты на заседании Парижской Академии наук. Ампер чрезвычайно заинтересовался этим открытием. Прежде всего оно натолкнуло его на мысль о возможности сведения магнитных явлений к электрическим и исключению представления о специальной магнитной жидкости. Вскоре Ампер уже докладывал о своих новых гипотезах и говорил об опытах, которые должны их подтвердить. В кратком резюме своего первого доклада Ампер писал:

«Я свел явления, наблюдаемые г. Эрстедом, к двум общим фактам, я показал, что ток, существующий в вольтовом столбе, действует на магнитную стрелку так же, как и ток соединительной проволоки. Я описал опыты, при помощи которых я установил притяжение или отталкивание всей магнитной стрелки под действием соединяющей проволоки. Я описал приборы, которые предполагал соорудить и, между прочим, гальванические винты и спирали. Я указал, что последние будут производить во всех случаях те же действия, что и магниты. Затем я коснулся некоторых подробностей относительно своего воззрения на магниты, согласно которому они обязаны своим свойствам единственно электрическим токам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных их оси. Я коснулся также некоторых подробностей относительно подобных же токов, предполагаемых мною в земном шаре. Таким образом, все магнитные явления я свел к чисто электрическим действиям»²⁾.

В конце 1820 — начале 1821 г. им было сделано более десяти докладов. В них Ампер сообщал как о своих экспериментальных исследованиях, так и о теоретических соображениях. Ампер показал на опыте взаимодействие двух прямолинейных проводников с током, взаимодействие двух замкнутых токов и т. д. Он также демонстрировал взаимодействие соленоида и магнита; эквивалентное поведение соленоида и магнитной стрелки в поле земного магнетизма и ряд других опытов.

Теоретические выводы Ампера являлись развитием идей, высказанных им в первом сообщении: теперь они были подтверждены опытным путем исследованиями. Свойства магнита он объяснял наличием в нем токов, а взаимодействие магнитов — взаимодействием этих токов. Сначала Ампер считал эти токи макроскопическими, несколько позже он пришел к гипотезе молекулярных токов. Соответствующую точку зрения Ампер развивает и по вопросу о земном магнетизме, гадая, что внутри Земли протекают токи, которые обуславливают ее магнитное поле.

Теоретические соображения Ампера встретили со стороны некоторых физиков возражения. Не все сразу могли отказаться от существования «магнитного флюида». Кроме того, взгляды Ампера,

¹⁾ Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т. II. СПб., 1860, с. 304.

²⁾ Ампер А. М. Электродинамика. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 410—411.

казалось, не укладывались в общее представление о физических явлениях, в частности, они предполагали наличие сил, зависящих не только от расстояния, но и от движения (от силы тока). Наконец, они могли казаться видоизменением картезианских идей. И действительно, Ампер высказывался в картезианском духе о силах, действующих между электрическими токами. Он писал, что «стремился объяснить ее (силу — Б. С.) реакцией жидкости, разлитой в пространстве, колебание которой вызывает световое явление»¹⁾.

Однако такие рассуждения не характерны для Ампера, и его главный труд называется «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

Особенно активным противником теории Ампера был Био, который предложил другое объяснение взаимодействия электрических токов. Он полагал, что когда по проводнику протекает электрический ток, то под его действием хаотично расположенные магнитные диполи, которые имеются в проводнике, определенным образом ориентируются. В результате этого проводник приобретает магнитные свойства и возникают силы, действующие между проводниками, по которым течет электрический ток.

Против этой теории Ампер возражал, основываясь на открытии Фарадеем так называемого электромагнитного вращения. Фарадей с помощью специального прибора (рис. 51) установил факт непрерывного вращения магнита вокруг тока и тока вокруг магнита (1821). Ампер писал:

«Как только было опубликовано открытие первого непрерывного вращательного движения, сделанное Фарадеем, я сразу же увидел, что оно целиком опровергает эту гипотезу, и вот в каких выражениях я изложил мою мысль... Движение, продолжающееся постоянно в одном направлении, несмотря на трение, несмотря на сопротивление среды, и притом движение, вызываемое взаимодействием двух тел, остающихся все время в одном состоянии, — беспримерный факт среди всего, что мы знаем о свойствах неорганической материи. Он доказывает, что действие, исходящее из гальванических проводников, не может быть вызвано особым распределением некоторых жидкостей, находящихся в этих про-

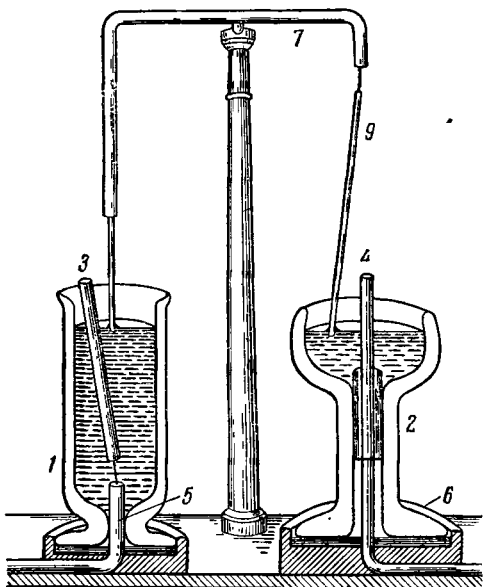


Рис. 51

¹⁾ Ампер А. М. Электродинамика, с. 124.

водниках в состоянии покоя, которому обязаны своим происхождением обыкновенные электрические притяжения и отталкивания. Это действие можно приписать только жидкостям, которые движутся в проводнике, быстро переносясь от одного конца к другому»¹⁾.

Действительно, ни при каком постоянном расположении силовых центров (каковыми являются магнитные диполи Био) нельзя добиться их непрерывного движения так, чтобы они все время возвращались в первоначальное положение. Иначе опровергался бы принцип невозможности вечного двигателя.

Открыв взаимодействие токов, эквивалентность магнита и соленоида и т. д., а также выдвинув ряд гипотез, Ампер поставил перед собой задачу установить количественные законы этого взаимодействия. Для ее решения естественно было поступить аналогично тому, как поступали в теории тяготения или электростатике, а именно представить взаимодействие конечных проводников с током как результат суммарного взаимодействия бесконечно малых элементов проводников, по которым течет электрический ток, и таким образом свести указанную задачу к нахождению дифференциального закона, определяющего силу взаимодействия между элементами проводников с током или между элементами токов.

Однако эта задача является более трудной, нежели соответствующая задача в теории тяготения или электростатике, так как понятия материальной точки или точечного заряда имеют непосредственный физический смысл и с ними можно было проводить опыт, тогда как элемент электрического тока такого смысла не имел и реализовать его в то время было невозможно. Ампер поступает следующим образом. На основании известных опытных данных он выдвигает гипотезу о том, что сила взаимодействия между элементами проводников с током такова:

$$dF = \frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^n} \Phi(\varepsilon, \theta_1, \theta_2),$$

где i_1 и i_2 — сила токов, ds_1 и ds_2 — элементы проводников, r — расстояние между элементами, n — некоторое (пока неизвестное) число, $\Phi(\varepsilon, \theta_1, \theta_2)$ — еще не известная функция углов, определяющих взаимное расположение элементов проводников (рис. 52).

Предположения эти имеют разный характер. Так, предположение о зависимости dF от силы тока следует непосредственно из экспериментов. Предположение, что сила dF должна быть пропорциональна ds_1 и ds_2 , а также некоторой, пока не известной функции углов, также можно рассматривать как следствие, полученное из опытов, хотя и не непосредственно. Предположение о зависимости dF от расстояния между элементами

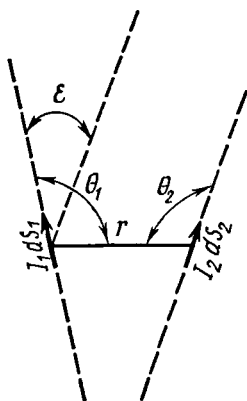


Рис. 52

¹⁾ Ампер А. М. Электродинамика, с. 127—128.

токов основано, безусловно, уже только на предполагаемой аналогии с силами тяготения или силами взаимодействия между электрическими зарядами.

Определить n и выражение функции углов Φ ($\epsilon, \theta_1, \theta_2$) можно, измерив силы взаимодействия между проводниками с током, различно расположенными друг относительно друга, разной величины и формы. Однако во времена Ампера это сделать было очень трудно, так как рассматриваемые токи были невелики. Ампер вышел из положения, исследовав случаи равновесия проводников с токами различно расположенных и разной формы. В результате он определил n и Φ ($\epsilon, \theta_1, \theta_2$) и получил окончательный результат для закона взаимодействия элементов токов:

$$dF = \frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2} \left(\cos \epsilon - \frac{3}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_2 \right).$$

В векторной форме и соответствующих единицах этот закон имеет вид

$$dF_{12} = i_1 i_2 r_{12} \left[\frac{3}{r^5} (ds_1 r_{12}) (ds_2 dr_{12}) - \frac{2}{r^3} (ds_1 ds_2) \right],$$

где dF_{12} — сила, действующая на второй элемент тока.

Таким образом, закон, установленный Ампером, отличается от закона взаимодействия двух элементов токов, который в настоящее время называют законом Ампера и выражают формулой

$$dF_{12} = \frac{i_1 i_2}{r^3} [ds_2 [ds_1 r_{12}]].$$

Ошибка, допущенная Ампером, не повлияла на результаты расчетов, так как закон, естественно, применяли для простых случаев определения взаимодействия замкнутых проводников с постоянными токами. В этом случае обе формулы приводят к одному и тому же результату, так как они отличаются друг от друга на величину, которая при интегрировании по замкнутому контуру дает нуль.

В 1826 г. был издан основной труд Ампера «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта». В этой книге Ампер систематически изложил свои исследования по электродинамике и, в частности, привел вывод закона взаимодействия элементов токов. В заключение обзора работ Ампера следует отметить, что он использовал понятие и термин «сила тока», а также понятие «напряжение», хотя и не приводил ясной и четкой формулировки этих понятий. Амперу также принадлежит идея создания прибора для измерения силы тока (амперметра). Наконец, следует указать, что Ампер высказал идею электромагнитного телеграфа, которая затем была реализована на практике.

Важным достижением электродинамики первой половины XIX в. было установление законов цепи постоянного тока. Уже в начале XIX в. было высказано предположение, что сила тока (действие тока) в цепи зависит от свойств проводников. Так, Петров



Георг Ом

располагали проводник, включенный в цепь электрического тока. Когда по проводнику протекал электрический ток, магнитная стрелка отклонялась. Поворачивая головку крутильных весов, приводя стрелку в ее первоначальное положение, Ом измерял момент сил, действующих на маленькую стрелку. Как и Ампер, он считал, что величина этого момента пропорциональна силе тока.

Сначала Ом исследовал зависимость силы тока от длины проводника, включенного в цепь. В качестве источника тока он использовал термоэлемент, состоящий из висмута и меди (рис. 53). Висмутовый стержень bb' , имеющий форму буквы П, соединен с медными полосами. Ом нашел, что «сила магнитного действия» тока (си-

отмечал, что действие гальванического элемента тем больше, чем больше поперечное сечение проводников. Несколько позже зависимость химического действия тока от проводников установил Дэви, который показал, что это действие тем больше, чем короче проводники и чем больше их сечение.

В середине 20-х годов исследованием цепи постоянного электрического тока занялся немецкий физик Георг Ом (1787—1854). Прежде всего Ом экспериментально установил, что величина электрического тока зависит от длины проводников, их сечения и от числа гальванических элементов, включенных в цепь. Для измерения силы тока Ом использовал простейший гальванометр, представляющий собой крутильные весы, на нити которых была подвешена магнитная стрелка. Под стрелкой

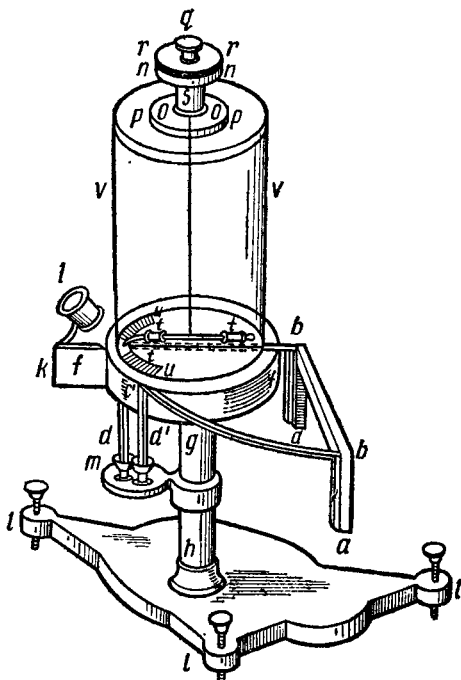


Рис. 53. Прибор Ома (рисунки Ома)

ла тока) исследуемого проводника определяется формулой

$$X = \frac{a}{(b + x)},$$

где x — длина проводника, a и b — постоянные, причем a зависит от возбуждающей силы термоэлемента (*erregende Kraft*), а b — от особенностей всего остального участка цепи, включая и термоэлемент.

Ом затем установил, что если в цепь включен не один, а m одинаковых источников тока, то «сила магнитного действия тока»

$$X = \frac{ma}{(mb + x)}.$$

Ом определил также, как зависит сила тока X в проводнике от его длины и поперечного сечения. Он нашел, что

$$X = k\omega \frac{a}{l}.$$

где k — коэффициент проводимости проводника (*Leitungsvermögen*), ω — поперечное сечение, а l — длина проводника, a — электрическое напряжение на его концах (*Electrische Spannung*).

Ом исследовал распределение электрического потенциала «электроскопической силы» вдоль однородного проводника с током. Для этого он применял электромметр, который присоединял к различным точкам проводника, когда одна из точек проводника была заземлена. Наконец, Ом попытался теоретически осмыслить обнаруженные им закономерности. Он исходил из представления об электрическом токе как о течении электричества вдоль проводника. Он проводил аналогию между электрическим током и потоком теплоты. Он считал, что, подобно потоку теплоты, электричество течет по проводнику от одного слоя или элемента к другому, близлежащему. Поток теплоты определяется разностью температур в близлежащих слоях стержня, по которому течет эта теплота (т. е. градиентом температуры). Подобно этому, Ом полагает, что поток электричества должен определяться разностью электрической силы в близлежащих сечениях проводника. Он писал:

«Я полагаю, что величина передачи (электричества. — *B. C.*) между двумя близлежащими элементами при других равных обстоятельствах пропорциональна разности электрической силы в этих элементах, подобно тому, как в учении о теплоте принимается, что тепловая передача между двумя элементами тепла пропорциональна разности их температур»¹⁾.

Под электрической силой здесь Ом понимает не напряженность электрического поля, а величину, которую показывает электроскоп, присоединенный к какой-либо точке проводника, если одна из точек гальванической цепи заземлена, т. е. разность потенциалов. Эту величину Ом и называл также «электроскопической силой».

¹⁾ Ohm G. Gesammelte Adhandlungen. Leipzig, 1892, S. 63.

Как часто бывает, аналогия, распространяемая слишком далеко, приводит к ошибкам. Так, Ом из того, что температура пропорциональна количеству теплоты, ошибочно заключил, что и «электроскопическая сила» в проводнике пропорциональна количеству электричества в каждой его точке. Решая задачу о распространении потенциала вдоль цепи тока, Ом полагал, что тем самым находит количество электричества в соответствующих местах проводника.

Закон, открытый Омом и носящий его имя, далеко не сразу получил признание. Еще в 30-х годах по его поводу высказывали сомнения и отмечали ограниченность его применения. Однако в ряде работ различных физиков, применивших более совершенные методы измерения, выводы Ома были подтверждены и его закон получил всеобщее признание. При этом были также исправлены ошибочные представления Ома.

Кирхгоф в работах, относящихся к 1845—1848 гг., уточнил понятие «электроскопической силы». Он установил тождественность понятия этой величины и понятия потенциала в электростатике. Кирхгоф также установил общеизвестные правила для электрических цепей.

Спустя более чем 15 лет после открытия закона Ома был установлен закон, определяющий количество теплоты, выделяемой электрическим током в цепи; он был установлен экспериментально англичанином Джоулем (1843) и независимо от него петербургским академиком Э. Х. Ленцем (1844). В настоящее время его называют законом Джоуля — Ленца.

и т

§ 41. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Открытие явления электромагнитной индукции — важнейшее открытие в области электродинамики. Еще в 1824 г. Араго, пытаясь с помощью магнитной стрелки определить присутствие железа в красной меди, обнаружил, что немагнитные вещества тормозят колебательное движение подвешенной магнитной стрелки. Затем он установил, что при вращении медной пластинки возле подвижного магнита последний стремится вращаться в том же направлении, и, наоборот, если вращать магнит, то пластинка в свою очередь стремится следовать за ним.

Опыт Араго сумел объяснить только Фарадей, открывший явление электромагнитной индукции. Фарадею принадлежит много других открытий в области электричества и магнетизма. О его роли в развитии этого раздела физики будет сказано ниже, сейчас же рассмотрим лишь историю открытия явления электромагнитной индукции. Она напоминает историю открытия Эрстедом действия электрического тока на магнитную стрелку. Эрстед руководствовался идеей о связи между электричеством и магнетизмом, а Фарадей — идеей о взаимной превращаемости «сил природы». У Фарадея возникла мысль, что если электрический ток способен вызы-