

нения магнитного поля Земли («магнитные бури»), которые совпадают с извержениями Солнцем потоков ионизированных газов (солнечных протуберанцев¹⁾).

Для изучения магнитного поля Земли составляют «магнитные карты», на которых соединяют линиями местности, имеющие одинаковые значения величин, характеризующих магнитное поле. Линии, указывающие места, где горизонтальные или же вертикальные составляющие поля имеют одинаковые значения, называют *изодинамами*²⁾, линии равных склонений—*изогонами*³⁾, линии равных наклонов — *изоклинами*⁴⁾.

В 1838 г. Гаусс впервые подверг математическому анализу своеобразное распределение магнитных изолиний. В конце прошлого века накопленные измерения были систематизированы, уточнены и расширены крупнейшим русским магнитологом Эрнестом Егоровичем Лейстом. В 1902—1904 гг. Николай Алексеевич Умов решил задачу, начатую Гауссом, и создал метод математической интерпретации всех главных особенностей магнитного поля Земли.

На некотором удалении от Земли магнитное поле Земли приближенно можно рассматривать как поле магнитного диполя с магнитным моментом $8,1 \cdot 10^{25}$ эрг/ге (при этом указанный диполь следует считать расположенным в нескольких сотнях километров от центра Земли к югу).

Происхождение магнитного поля Земли до настоящего времени не выяснено. Было предложено много гипотез, но все они оказались неудовлетворительными.

§ 60. Магнитное поле тока

Неподвижный электрический заряд и неподвижный магнитный полюс не взаимодействуют друг с другом. Между ними нет ни силы притяжения, ни силы отталкивания, и эти силы не возникают между ними ни при каких обстоятельствах, если они остаются неподвижными друг относительно друга. Однако достаточно привести электрический заряд или магнитный полюс в движение, как тотчас между ними появится сила взаимодействия, стремящаяся в р а щ а т ь их друг относительно друга. Сила эта возрастает при увеличении скорости их относительного движения и, помимо того, зависит от угла, образуемого направлениями их движения.

При движении зарядов и при перемещении связанного с зарядами электрического поля возникает магнитное поле. Вокруг движущегося электрического заряда появляются замкнутые линии магнитных сил; линии эти в виде концентрических окружностей охватывают траекторию заряда. Когда по проводнику проходит ток, вокруг проводника образуются замкнутые линии магнитной индукции, концентрическими кольцами охватывающие проводник: магнитные силы во всех точках плоскости, перпендикулярной к оси прямого тока, направлены по касательной к окружности, проведенной из точки пересечения оси тока с плоскостью, и лежат в этой плоскости. Силы, действующие в магнитном поле тока, убывают с увеличением расстояния от оси тока.

1) От лат. protuberare — в з д у в а т ь с я.

2) От греч. isos — р а в н ы й и dynamis — с и л а.

3) От греч. gōnia — у г о л.

4) От греч. klino — н а к л о н я ю,

Направление магнитного поля связано с направлением тока **правилом буравчика**:

Если поступательное движение винта означает направление тока в проводе, то направление вращения ручки буравчика будет соответствовать направлению линий магнитного поля (рис. 225).

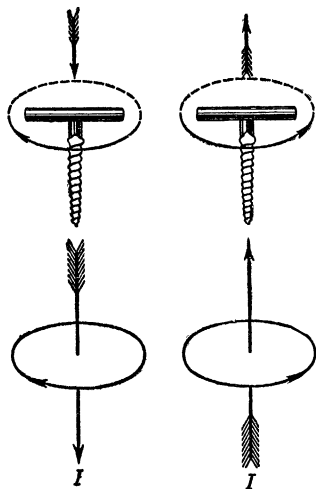


Рис. 225. При поступательном движении буравчика в направлении тока вращательное движение рукоятки буравчика указывает направление силовых линий магнитного поля тока.

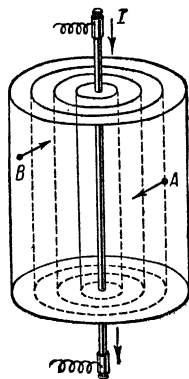


Рис. 226. Вид магнитного поля прямолинейного тока в пространстве.

Правилом буравчика можно пользоваться также для определения направления тока по направлению его магнитных силовых линий.

Если ввинчивать буравчик по направлению магнитной линии, то направление поворота ручки укажет направление тока в контуре, охватывающем эту силовую линию.

Наряду с правилом буравчика часто пользуются также следующим правилом: *если смотреть по направлению тока, то магнитные линии будут направлены в сторону движения стрелки часов.*

Вид магнитного поля в пространстве для случая **прямолинейного тока** может быть представлен как ряд коаксиальных цилиндрических поверхностей, имеющих своей осью ось тока (рис. 226). Магнитные силы в поле прямого тока в любой его точке (например, в точках *A* и *B*; рис. 226) всегда направлены по касательным к цилиндрической поверхности, проходящей через эту точку, и перпендикулярны к образующей, на которой лежит данная точка.

На рис. 227 представлена картина магнитного поля **кругового тока**. Строение поля в этом случае пояснено также на рис. 228. Детальное исследование поля кругового тока показывает, что поле

это аналогично полю «магнитного листка». Под *магнитным листком* понимают элементарно тонкий магнит, например тончайший слой, вырезанный из стержневого магнита перпендикулярно к его оси. Магнитный листок также можно представить себе как плотную совокупность элементарно малых магнитов, ориентированных одинаково так, что на одну поверхность листка выходят все северные полюсы, на другую — все южные полюсы этих малых магнитиков. Поле магнитного листка как совокупности магнитных диполей характеризуется, так же как и поле диполя, *магнитным моментом*, причем в случае плоского листка магнитный момент его равен произведению суммы величин магнитных полюсов, распределенных по одной из поверхностей листка, на толщину листка.

Когда ток обтекает обмотку цилиндрической катушки с тесно

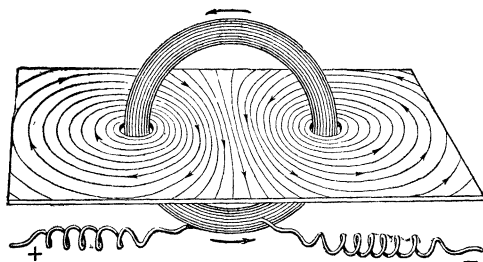


Рис. 227. Магнитное поле кругового тока.

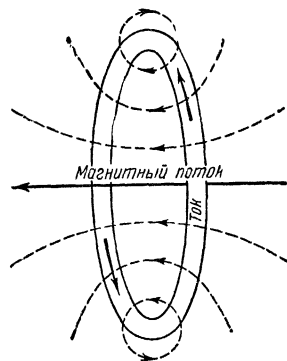


Рис. 228. Вид магнитного поля кругового тока в пространстве.

расположенными витками (*соленоид*¹⁾), то результирующее магнитное поле такой совокупности круговых токов оказывается подобным полю стержневого магнита; это соответствие понятно, так как магнит можно рассматривать как наложенные один на другой магнитные листки, а поле каждого такого листка аналогично полю отдельного витка соленоида. Поле соленоида становится еще более сходным с полем магнита, когда внутрь соленоида введен железный *сердечник* (рис. 229). Железо намагничивается полем тока, и поток магнитной индукции в соленоиде сильно возрастает. Получаемые таким образом *электромагниты* имеют широчайшее применение в технике, и в особенности в приборостроении.

Исследование взаимосвязи электрического тока и магнитного поля, образуемого током, показывает, что магнитное поле является не каким-то второстепенным, побочным проявлением тока, но представляет собой одну из важнейших, основных с т о р о н того явления,

¹⁾ От греч. solen — т р у б к а и eidos — в и д.

которое мы называем током. Другая сторона того же явления — это движение зарядов и движение электрического поля, связанного с зарядами.

В связи со сказанным следует отметить существенное отличие движений, изучаемых в электродинамике, от движений, изучаемых механикой. Движения, изучаемые механикой, суть перемещения, т. е. изменения места, в котором находится рассматриваемое тело или точка, со временем. Механическое перемещение согласно диалектическому пониманию движения является неотъемлемой принадлежностью всякого изменения, происходящего в природе. Что бы ни изменялось в окружающей нас природе, мы всегда вправе утверждать, что вместе с этим изменением происходит то или иное перемещение. Это перемещение может быть, и очень часто в физических явлениях бывает, недоступно нашему непосредственному наблюдению. Таковы, например, перемещения атомов и молекул, которыми сопровождается молекулярно-тепловая форма движения, или же перемещения, которые происходят при химическом соединении между атомами реагирующих веществ и внутри них.

Из того, что перемещение сопровождает все изменения, происходящие в природе, не следует, однако, что всякое изменение в природе, т. е. движение, понимаемое в широком смысле, может быть сведено к одним только перемещениям, сопутствующим данному процессу. Подобное стремление характерно для механистического понимания природы, но, как показывает вся история физики, оно не приводит к положительным результатам.

Процесс электрического тока сопряжен с перемещением носителей электричества, каковыми могут являться электроны, ионы или более крупные электрически заряженные частицы. Тем не менее явление электрического тока не может быть сведено к одним только перемещениям зарядов.

Заряды перемещаются вместе с электрическим полем, которое неразрывно связано с ними. А движение электрического поля складывается из таких скрытых движений материи, образующей поле, которые проявляются в качестве магнитного поля. Поэтому

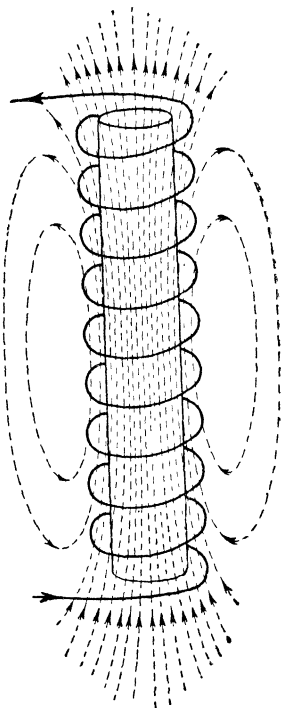


Рис. 229. Поле электромагнита. Положения полюсов электромагнита определяются «правилом правой руки»: если четыре пальца указывают направление тока в витках, то большой палец укажет положение северного полюса.

электрический ток всегда, неизбежно, по самой своей сущности сопряжен с магнитным полем, окружающим проводник в виде замкнутых магнитных силовых линий.

Напряженность этого магнитного поля в любой его точке пропорциональна величине тока, а самого его возникновения *неизбежно сопутствует всякому электрическому току*, будь это ток в металлическом проводнике или в электролите или же ток, вызванный движением заряженных частиц в вакууме. Таким образом, магнитное поле действительно является важнейшим проявлением того, что мы называем электрическим током.

Магнитное поле не может быть получено отдельно и независимо от тока. Магнитные поля намагниченных тел также связаны с токами, но только с токами внутриатомными, вызываемыми движением электронов в атомах и вращением электронов вокруг своей оси. Таким образом, магнитное поле стального магнита является *результатирующим эффектом огромного числа микроскопических внутриатомных токов*.

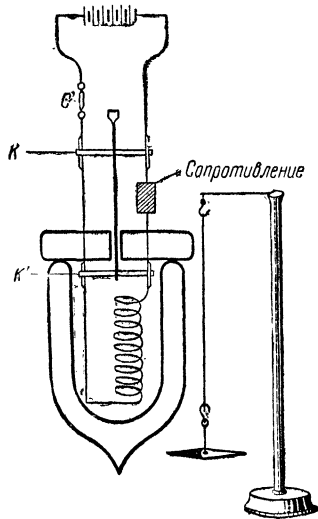
Итак, явление электрического тока заключает в себе два неотделимых друг от друга факта: 1) перемещение зарядов, 2) существование сопутствующего току магнитного поля.

Картина механического движения носителей заряда — электронов, ионов в различных проводниках (в металлах, электролитах, газоразрядной плазме и т. п.) весьма различна и с количественной и с качественной стороны; тем не менее это несколько не отражается на основном проявлении электрического тока — на магнитном поле тока.

Магнитное поле ни в какой мере не зависит от физических свойств проводника и всецело определяется величиной тока.

Неразрывная связь явлений тока и магнитного поля с особой на-

Рис. 230. Опыт с соленоидом в условиях сверхпроводимости.



глядностью обнаруживается в опытах со сверхпроводниками. Погрузим соленоид, питаемый током от батареи элементов, в криостат с жидким гелием (рис. 230). Если повернуть вращаемый вокруг вертикальной оси контакт KK' в положение, показанное на рис. 230, то сопротивление внешней цепи батареи уменьшится (параллельное включение), предохранитель S перегорит и соленоид окажется замкнутым через цепь, состоящую из одних сверхпроводников. Так как сопротивление цепи в этих условиях равно нулю, то ток не будет вызывать никакого нагревания проводников. Магнитное поле соле-

ноида будет оставаться неизменным. Но магнитное поле является необходимым и достаточным условием существования тока в проводе. Поэтому ток будет продолжаться длительное время. Чтобы обнаружить существование тока в только что описанном опыте, мы имеем только одно средство — наблюдать действие его магнитного поля. Для этого вблизи криостата достаточно поместить чувствительный магнитометр (магнитную стрелку). Отклонение магнитометра будет длиться все время, пока в соленоиде существует ток.

В опытах, произведенных Камерлинг-Оннесом в Лейдене, ток в сверхпроводниках наблюдался в продолжение десятков часов, при этом не было замечено ощутимого уменьшения напряженности магнитного поля.

Величина тока, которую часто неудачно называют «силой тока», в действительности является, как пояснено в § 25, обобщенной скоростью. Под обобщенной скоростью вообще понимают быстроту изменения какой-либо величины, хотя бы, например, быстроту прироста числа жителей города. Величиной тока измеряется быстрота переноса количества электричества. Вместе с тем величина тока полностью определяет магнитное поле тока, и в этом отношении в величине тока как бы синтезируется вся весьма сложная картина действительных перемещений и механических скоростей электрически заряженных частиц.

Однозначная зависимость между величиной тока и напряженностью магнитного поля (на каком-либо заданном расстоянии от проводника при неизменной его форме) позволяет установить особую, электромагнитную, меру тока.

Вспомним, что абсолютной электростатической единицей тока называют величину такого тока, в котором в 1 сек. через поперечное сечение проводника проходит 1 абсолютная электростатическая единица количества электричества.

Эта единица тока очень мала. Поэтому на практике пользуются другой единицей — ампером, равным $3 \cdot 10^9$ электростатическим единицам тока.

В теоретических расчетах наряду с электростатическими единицами количества электричества и тока применяют еще так называемые электромагнитные единицы этих величин.

Электромагнитной единицей тока называют величину такого тока, который, проходя по длинному прямолинейному проводнику, действует на магнитный полюс величиной в 1 магнитную единицу, помещенный на расстоянии одного сантиметра от проводника, с силой 2 дин¹⁾. И соответственно электромагнитной единицей количества электричества называется такое количество электричества, которое проходит в 1 сек. через поперечное сечение

¹⁾ В этом определении указана сила в 2 дин (а не в 1 дину) потому, что в противном случае в приводимый ниже закон Био и Савара (§ 61) пришлось бы ввести коэффициент пропорциональности, отличный от единицы.

длинного прямолинейного проводника, когда ток таков, что действует на магнитный полюс в 1 магнитную единицу, помещенный на расстоянии 1 см от проводника, с силой 2 дин.

В отличие от абсолютных электростатических единиц, обозначаемых символом CGSE, абсолютные электромагнитные единицы обозначают символом CGSM.

Опытом обнаружено, что электромагнитные единицы количества электричества и тока в $3 \cdot 10^{10}$ раз больше электростатических единиц. Отсюда заключаем, что ток в 1 CGSM равен 10 амперам. Число $3 \cdot 10^{10}$ часто называют веберовым числом по имени ученого, который первый измерил отношение электромагнитных единиц к электростатическим.

Веберово число совпадает с численным значением скорости света в пустоте, измеренной в сантиметрах в секунду. Это совпадение не случайно; оно имеет место потому, что свет представляет собой электромагнитное явление.

§ 61. Закон Био и Савара

В основе всех расчетов магнитных действий тока и многих других расчетов, связанных с теорией электромагнитного поля, лежит закон, открытый в 1820 г. французскими учеными Био и Саваром, сделавшими измерения, и Лапласом, который обобщил результаты измерений. Эти ученые показали, что во

всех случаях силу магнитного поля тока можно вычислить, геометрически суммируя (по правилу многоугольника) силы, вызываемые отдельными малыми участками тока.

Био, Савар и Лаплас установили, что если тонкий проводник, по которому течет ток, представлять себе разбитым на отдельные малые участки (рис. 231), то силу dF , с которой взаимодействует каждый участок тока с магнитным полюсом, надо считать, во-первых, пропорциональной длине участка dl , во-вторых, силу эту надо считать прямо пропорциональной произведению величины полюса (m) на величину тока (I) в проводнике и обратно пропор-

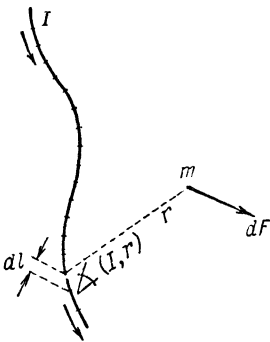


Рис. 231. К закону Био и Савара. Действие элемента тока на магнитный полюс.

циональной квадрату расстояния (r) от данного участка проводника до полюса.

В этой (еще неполной) формулировке закон Био и Савара напоминает собой законы Кулона для электрических зарядов и магнитных полюсов. Дело осложняется, однако, тем, что величина dF зависит еще от угла между направлением элемента тока и направ-