

Г Л А В А III  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

\* \*

§ 49. Силы, действующие в магнитном поле  
на движущиеся заряды и токи

1. Магнитные явления были ранее всего обнаружены и изучены на естественных и искусственных магнитах. Да и теперь первоначальное знакомство с этими явлениями лучше всего начинать с магнита. Однако понимание процессов, происходящих в магните, требует предварительного изучения более простых и фундаментальных явлений. Вот почему при изложении современного учения о магнетизме мы не можем следовать историческому пути. Мы изберем

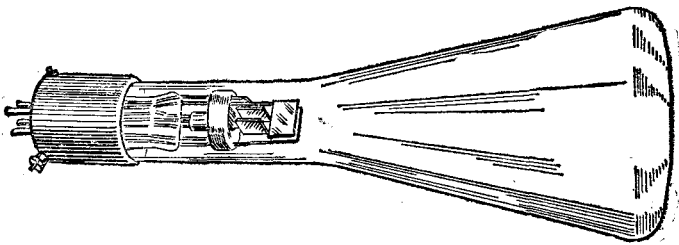


Рис. 130.

ддуктивный метод, положив в основу изложения два экспериментальных факта, которые были установлены в 19 веке: 1) *магнитное поле действует на движущиеся заряды*; 2) *движущиеся заряды создают магнитное поле*. Как и в электростатике, сначала изучим магнитное поле в вакууме, а затем перейдем к изучению магнитного поля в веществе.

2. Начнем с простейшего демонстрационного опыта. В осциллографической трубке получим прямолинейный сфокусированный пучок электронов, движущихся в вакууме слева направо. Попадая на флуоресцирующий экран, пучок оставляет след в виде светящегося пятнышка. Поднесем снизу к пучку северный полюс прямолинейного магнита (рис. 130). Пучок сместится в бок по направлению от читателя. Если магнит поднести южным полюсом, смещение произойдет в противоположную сторону, т. е. к читателю. Если магнит

поднести сбоку, то смещение будет происходить вверх или вниз в зависимости от того, каким полюсом и с какой стороны поднесен магнит. Этот и аналогичные опыты показывают, что на движущийся электрон действует сила, перпендикулярная к скорости электрона и к направлению оси магнита, т. е. к прямой, идущей от одного полюса магнита к другому. Эта сила пропорциональна скорости электрона. Аналогично ведут себя всякие частицы, движущиеся в магнитном поле.

Закон, определяющий силу  $F_m$ , действующую на движущийся точечный заряд  $q$  в магнитном поле, получен обобщением опытных фактов. Он выражается формулой

$$F_m = \frac{q}{c} [\mathbf{v}B], \quad (49.1)$$

где вектор  $B$  не зависит от величины заряда  $q$  и его движения. Он характеризует только магнитное поле, в котором движется заряд  $q$ . Вектор  $B$  называется *напряженностью магнитного поля*. Сила  $F_m$  перпендикулярна как к скорости частицы  $\mathbf{v}$ , так и к вектору напряженности магнитного поля  $B$ , а ее величина пропорциональна синусу угла между этими векторами. Когда векторы  $B$  и  $\mathbf{v}$  коллинеарны, сила  $F_m$  обращается в нуль. Формула (49.1) справедлива не только для постоянных, но и для переменных магнитных полей, и притом при любых значениях скорости  $\mathbf{v}$ .

Постоянную  $c$  можно выбрать произвольно. Выбором численного значения и размерности этой постоянной определяется *система единиц*. Целесообразно величине  $c$  приписать размерность скорости, так как тогда размерности электрического и магнитного полей будут одинаковы. Именно так поступают в *гауссовой системе единиц*. Численное значение  $c$  мы временно оставим неопределенным.

Отметим особо, что *на покоящийся заряд магнитное поле не действует*. В этом существенное отличие магнитного поля от поля электрического. Индикатором электрического поля служит *покоящийся заряд*, индикатором магнитного поля — *движущийся заряд*.

Формула (49.1) указывает принципиальный способ измерения магнитного поля  $B$  по силе, действующей на движущийся заряд. Для этого с помощью неподвижного заряда надо сначала убедиться, что электрического поля нет. Затем надо найти такое направление скорости  $\mathbf{v}$ , при котором сила  $F_m$  обращается в нуль. Это будет тогда, когда скорость  $\mathbf{v}$  параллельна или антипараллельна вектору  $F_m$ . Тем самым с точностью до знака определится направление магнитного поля  $B$ . Наконец, надо измерить силу  $F_m$ , когда заряд движется перпендикулярно к  $B$  с какой-то скоростью  $\mathbf{v}_\perp$ . Очевидно,

$$F_m = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_\perp B].$$

Умножая это соотношение векторно на  $\mathbf{v}_\perp$  и принимая во внимание

что  $(\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}) = 0$ , получим

$$\mathbf{B} = \frac{c}{qv_\perp^2} [\mathbf{F}_m \mathbf{v}_\perp]. \quad (49.2)$$

Этой формулой вектор  $\mathbf{B}$  определяется однозначно и по величине, и по направлению. Что величина  $\mathbf{B}$  есть вектор (точнее, псевдовектор) — это непосредственно следует из формулы (49.2), представляющей эту величину в виде векторного произведения полярных векторов  $\mathbf{F}_m$  и  $\mathbf{v}_\perp$ .

3. В электрическом поле  $\mathbf{E}$  на заряд  $q$  действует сила  $\mathbf{E}_e = q\mathbf{E}$ . Если электрическое и магнитное поля действуют независимо, а такое предположение согласуется с опытными фактами, то при совместном действии электрического и магнитного полей возникает сила  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m$ , т. е.

$$\mathbf{F} = q \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}] \right). \quad (49.3)$$

Она называется *силой Лоренца*.

В нерелятивистском приближении сила  $\mathbf{F}$ , как и всякая другая сила, не зависит от выбора (инерциальной) системы отсчета. Между тем второе слагаемое в формуле (49.3) меняется при переходе от одной системы отсчета к другой. Поэтому должно меняться и первое слагаемое  $q\mathbf{E}$ . Таким образом, как мы уже подчеркивали (см. § 2, пункт 5), разделение полной силы  $\mathbf{F}$  на электрическую и магнитную зависит от выбора системы отсчета. Без указания системы отсчета такое разделение теряет смысл.

4. Опыты по действию магнитного поля на движущиеся заряды проще производить не с отдельными зарядами, а с электрическими токами, когда в движение вовлекается сразу очень много заряженных частиц. Допустим, например, что ток создается движением одинаковых частиц с зарядом  $e$  и концентрацией  $n$ . Тогда  $\mathbf{j} = ne\mathbf{v}$ . Число частиц в объеме  $dV$  будет  $dN = n dV$ , а сила, действующая в магнитном поле на элемент объема тела  $dV$ ,

$$d\mathbf{F} = \frac{e}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}] dN = \frac{ne}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}] dV,$$

или

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{c} [\mathbf{j}\mathbf{B}] dV. \quad (49.4)$$

Конечно, это выражение справедливо и в более общем случае, когда носителями тока являются разные заряды.

Рассмотрим частный случай, когда ток  $\mathcal{I}$  течет вдоль бесконечно тонкого провода с площадью поперечного сечения  $S$ . Возьмем бесконечно короткий участок провода длины  $dl$  и вычислим действующую на него силу  $d\mathbf{F}$ . Если  $dV = S dl$  — объем этого участка, то

$$\mathbf{j} dV = jS dl, \text{ или}$$

$$\mathbf{j} dV = \mathcal{I} dl, \quad (49.5)$$

причем направление вектора  $dl$  совпадает с направлением тока. Вектор  $\mathbf{j} dV$  называется *объемным*, а  $\mathcal{I} dl$  — *линейным элементом тока*. Из соотношений (49.4) и (49.5) получаем

$$d\mathbf{F} = \frac{\mathcal{I}}{c} [d\mathbf{l}B]. \quad (49.6)$$

Формула (49.6), определяющая силу, действующую в магнитном поле на линейный элемент тока, была установлена Ампером и носит название *закона Ампера*. Сила, действующая на провод конечной длины, найдется из (49.6) интегрированием по всей длине провода:

$$\mathbf{F} = \int \frac{\mathcal{I}}{c} [d\mathbf{l}B]. \quad (49.7)$$

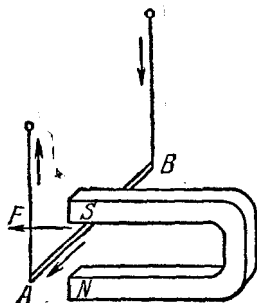


Рис. 131.

5. Силы, действующие на токи в магнитных полях, называются *амперовыми силами*. Опишем некоторые демонстрационные опыты, в которых проявляются эти силы. Возьмем подковообразный магнит (рис. 131) и подвесим на проводах между его полюсами металлический стержень  $AB$ . При пропускании постоянного тока стержень отклоняется вбок, выталкиваясь из пространства между полюсами магнита

или втягиваясь в него в зависимости от направления тока и магнитного поля. При изменении направления тока или магнитного поля направление отклонения меняется на противоположное.

**Колесо Барлоу** (1776—1862). Этот демонстрационный прибор представляет собой медный диск, который может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 132). Нижний край диска погружен в чашечку со ртутью. К оси диска и к чашечке подходят подводящие провода. Диск помещается между полюсами магнита перпендикулярно к магнитному полю. При включении постоянного напряжения по диску течет радиальный ток. Амперовы силы, действующие на диск, приводят его во вращение. При изменении направления тока направление вращения меняется на противоположное.

В другом варианте такого же опыта берется сосуд, состоящий из двух коротких коаксиальных металлических цилиндров, между которыми наливается электролит (рис. 133, вид сверху). Подводящие провода соединяют цилиндры с источником постоянного тока. Прибор помещается над полюсом сильного магнита (электромагнита), магнитное поле которого приблизительно вертикально, т. е. перпендикулярно к плоскости рисунка. При включении источника

токи в электролите текут радиально. Амперовы силы, действующие на них, приводят электролит во вращение. При изменении направления токов меняется на противоположное и вращение электролита.

Горизонтальная проволочная спираль может заменить магнитную стрелку. Она должна свободно вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр тяжести. При пропускании тока спираль устанавливается вдоль магнитного меридиана.

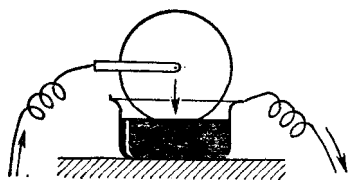


Рис. 132.

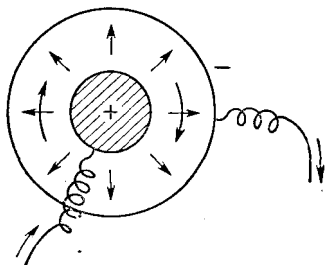


Рис. 133.

Возьмем тонкий длинный прямой магнит и установим его вертикально. (Магнитом может служить длинный железный стержень, нижний конец которого вставлен в проволочную катушку, по которой проходит ток, намагничивающий стержень). Повесим около такого магнита гибкую плетеную металлическую ленту. При пропускании по ней тока лента обвивается вокруг магнита. Если изменить направление тока, то направление обвивания меняется на противоположное.

Описанные опыты доказывают, что магниты действуют на электрические токи. Токи также действуют на магниты. Примером может служить классический опыт Эрстеда (1777—1851).

Эрстед поместил над магнитной стрелкой прямолинейный провод (рис. 134), параллельный стрелке. Стрелка могла свободно вращаться вокруг вертикальной оси. При пропускании по проводу электрического тока стрелка отклонялась в сторону и устанавливалась перпендикулярно к проводу. При изменении направления тока стрелка поворачивалась на  $180^\circ$ . То же самое происходило, когда провод переносился вниз и располагался под стрелкой. Опыт Эрстеда был произведен в 1820 г. На нем впервые была установлена связь между электрическими и магнитными явлениями.

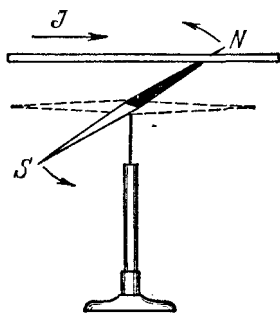


Рис. 134.