

## ГЛАВА X

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

#### § 57. Исторические сведения. Закон Кулона для магнитных полюсов

Магнитное поле проявляется тогда, когда имеется электрическое поле и когда при этом *электрическое поле перемещается*. Например, магнитным полем всегда окружен проводник, по которому идет ток. Оно создается также током в электролитах, электрическими разрядами в газах, катодными и анодными лучами. Оно проявляется при движении наэлектризованных тел, при движении электронов в атомах, при вибрациях атомных ядер в молекулах, при изменении ориентации элементарных диполей в диэлектриках и т. д.

Магнитное поле порождается движением электрического поля. Если электрическое поле перемещается, то в той области, где перемещается электрическое поле, всегда возникает магнитное поле. Магнитное поле возникает также всегда, когда *изменяется напряженность* электрического поля.

*Магнитное поле — это та же форма материи, которая представляет собой основу электрического поля, но в состоянии и ных скрытых движений, возникающих вследствие перемещения электрического поля и проявляющихся в пространстве (даже в совершенном вакууме) в виде особого рода сил, которые легко распознаются по своему действию на магниты, но, в сущности, являются силами, действующими только на движущиеся электрические заряды; действие тех же сил на намагниченные тела и возникновение этих сил при намагничивании объясняются наличием в этих телах быстро движущихся внутримолекулярных электрических зарядов.*

Хотя, таким образом, природа магнитного поля более сложна, чем природа электрического поля, но исторически магнитные силы были открыты и стали использоваться раньше, чем электрические.

Магнитные силы были открыты раньше электрических потому, что в природе имеются вещества — «естественные магниты», которые позволяют легко обнаружить магнитное поле Земли. Еще в глубокой древности была найдена руда, обладающая магнитными

свойствами, — *магнетит* (иначе «магнитный железняк»). Эта руда в основном состоит из закись-окиси железа  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . В СССР богатейшие залежи магнитных руд имеются на Урале (Магнитогорск), в Курской области, в Днепропетровской области (Кривой Рог) и т. д.

Свойства магнетита — притяжение друг к другу кусков этой руды, притяжение ими железа, стали и сохранение в стальных предметах, соприкасавшихся с магнетитом, магнитных свойств (намагничивание стали) — не могли остаться незамеченными. Было наблюде-но также, что стерженек магнетита или намагниченной стали, подвешенный по оси, проходящей через его центр тяжести, всегда устанавливается по направлению, почти совпадающему с меридианом. В эпоху развития мореплавания применение такой стрелки — *магнитного компаса* — сделалось общепринятым. Магнитная стрелка применялась для ориентации еще в древнем Китае 3000 лет назад (там изготовлялись для знатных лиц прогулочные тележки, оснащенные магнитным указателем, который постоянно, какие бы повороты ни делала дорога, указывал на юг).

Точные законы взаимодействия магнитов были установлены в 1785 г. Кулоном почти одновременно с открытием закона взаимодействия электрических зарядов. Существование магнитного поля тока впервые было обнаружено в 1820 г. датским физиком Эрстедом. Тогда же французским физиком Ампером была разгадана природа магнетизма как проявления движения электрических зарядов. В конце того же 1820 г. Био и Савар открыли закон, точно определяющий магнитное поле тока. В 1883 г. Фарадей и русский ученый Ленц установили законы взаимопревращения электрической и магнитной энергии. Догадка Ампера об электрическом происхождении магнитных свойств веществ в полной мере была доказана экспериментами и развита в строгую теорию только в XX в.

В прежнее время физики полагали, что существуют «магнитные заряды», или «магнитные массы», которые так же связаны с магнитным полем, как электрические заряды связаны с электрическим полем. Эта аналогия, казалось, подтверждалась сходством законов взаимодействия между электрическими зарядами и между магнитными полюсами. К тому же оба закона Кулона в известной мере сходны с ньютоновым законом всемирного тяготения. Однако издавна известен факт, что в отличие от положительных и отрицательных зарядов, которые существуют независимо друг от друга, положительные и отрицательные «магнитные массы» («северный и южный магнетизм») ни при каких условиях не могут быть разъединены. Переломленный магнит остается магнитом, на сколько бы частей он ни был разломан. Поэтому предположение о существовании магнитных масс было маловероятным, и догадка Ампера о том, что магнитные свойства вызываются молекулярными токами, была встречена сочувственно. Но в те же годы бы-

ли разработаны математические методы, сводившие решение всех задач «магнитостатики» к решению аналогичных задач электростатики, и физикам казалось, что для развития и, в особенности, для простейшего изложения этих методов удобно применять терминологию, возникшую из гипотезы о «магнитных массах». Строго говоря, в этой терминологии не было необходимости, так как для использования упомянутых математических приемов достаточно было руководствоваться вполне обоснованным понятием о *магнитных полюсах* как о тех местах, где наблюдается наибольшая интенсивность (концентрация) магнитного поля.

В силу привычки понятие о магнитных полюсах подменялось метафизическим представлением о магнитных массах — источниках магнитного поля. Этот подход к трактовке магнетизма длительное время господствовал во всех учебных руководствах, а отчасти и в научной литературе. Когда обнаружилось, что действительными «источниками» магнитного поля и магнитных свойств веществ являются молекулярные токи, а не какие-то фиктивные, не существующие в действительности магнитные массы, то, сохраняя старый строй изложения, стали делать соответствующие оговорки.

Не удивительно, что в последнее время это вызвало стремление перестроить учение о магнетизме на совершенно иных началах. Как всегда бывает в подобных случаях, отдельные авторы впали в другую крайность: радикально устраняя из учения о магнетизме метафизическое измышление о магнитных массах, решили попутно изгнать из физики и представление о магнитных полюсах. Предложено несколько остроумных, однако искусственных, малубедительных способов трактовки магнетизма без использования основанного на наблюдениях и экспериментах понятия о магнитных полюсах.

Такую трактовку магнитных явлений нельзя признать удачной. Магнитные полюсы — это не выдумка, а реальность. Не случайно все историческое развитие экспериментального исследования магнетизма опиралось на представление о магнитных полюсах.

Несомненно, что для любой физической теории можно придумать много способов ее изложения. Но полезен только тот строй изложения, который, во-первых, с возможной полнотой отражает действительный путь развития физики и, во-вторых, с наибольшей ясностью опирается на понятия, раскрытые в простейших наблюдениях и экспериментах. Например, можно построить механику, не пользуясь понятием силы (как это сделал Герц). Недавно было предложено изложение ньютоновой динамики без использования ньютонова понимания инерции. Можно изложить термодинамику, не применяя понятия энтропии. Имеются даже попытки изложить учение о тепловых явлениях, не пользуясь понятием тепла, и т. д. Такие приемы изложения отдельных разделов физики вследствие отрыва от действительного развития физики обычно быстро

обнаруживают свою бесплодность, а в учебниках приносят больше вреда, чем пользы.

По указанным соображениям в данном курсе отброшено только измышление о фиктивных магнитных массах, но полностью сохранено понятие о магнитных полюсах.

Представление о магнитных полюсах с наибольшей полнотой и отчетливостью связывает теорию с экспериментальными фактами. Это объясняется тем, что в представлении о магнитных полюсах отражены объективные, реальные особенности магнитного поля. Имеем ли мы дело с природными магнитами, с искусственно намагниченными телами, с электромагнитами, с большими или сколь угодно малыми магнитами, — изучение их поля показывает, что всегда имеются места, где поле наиболее сконцентрировано, где интенсивность его максимальна, и таких мест всегда имеется непременно *два*. Они во многом сходны, но некоторые их свойства по знаку противоположны. В этих местах, где поле наиболее сконцентрировано, и в близлежащих областях локализуется значительная часть энергии магнитного поля.

Магнитные полюсы — не «точки», а более или менее протяженные области, но нередко их можно приближенно рассматривать как «точки». Здесь положение приблизительно такое же, как и в механике, которая в определенных случаях рассматривает реальные тела как материальные точки (т. I, § 2).

Первое представление о структуре магнитного поля дают общеизвестные картины, получаемые при помощи железных опилок, насыпанных на лист картона, который подносят к магниту и слегка встряхивают. В этом простейшем опыте факт размещения намагнитившихся опилок по силовым линиям поля обнаруживает существование скрытых движений в материи, образующей магнитное поле. Более полную картину поля мы получаем, помещая в него крохотные магнитные стрелки: факт определенной ориентации магнитных стрелок с ясностью показывает полярность линий поля, т. е. вскрывает, что в линиях поля нужно различать положительное и отрицательное направления.

Тот конец магнитной стрелки, который в магнитном поле Земли обращается к северу, называют *северным*, или *положительным*, полюсом, а противоположный — *южным*, или *отрицательным*. Общеизвестно, что одноименные магнитные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются. Стало быть, у северного географического полюса Земли расположен ее южный магнитный полюс (рис. 218). Линии внешнего поля магнита считаются направленными от северного (положительного) полюса к его южному (отрицательному) полюсу, а внутри магнита они замыкаются.

Детальное изучение поля прямолинейного магнита показывает, что наибольшая концентрация линий поля имеет место не на концах магнита, а на некотором расстоянии от концов. Так, у тонких

намагниченных стальных проволок (таких, с какими проводил свои классические опыты Кулон) длиной 68 см полюсы расположены на расстоянии около 2 см от концов.

Опытами Кулона было доказано, что магнитные полюсы характеризуются *величиной полюса* (величиной магнетизма), которая проявляется аналогично величине электрического заряда в силе взаимодействия полюсов. *Единицу величины магнитного полюса* устанавливают по динамическому эффекту взаимодействия равных полюсов с силой в 1 единицу на расстоянии единицы длины. Вместо слов «единица величины магнитного полюса» сокращенно говорят «единица магнетизма» (это нередко приводит к совершенно непозволительному смешению понятий «полюс» и «магнитная масса»; представление о реальной динамической величине полюса произвольно подменяется какой-то фантастической субстанцией магнетизма).

В «абсолютной» магнитной системе единиц (по Гауссу) за единицу величины магнитного полюса принимают величину такого магнитного полюса, который действует на равный ему полюс, расположенный в вакууме на расстоянии 1 см, с силой в 1 дину, причем влияние других полюсов устраняется их удаленностью (а на практике учитывается расчетом). Если для магнитного полюса величиной в 1 абсолютную магнитную единицу сила его взаимодействия с некоторым другим полюсом на расстоянии 1 см равна не 1 дине, а  $m$  дин, то это означает, что второй полюс имеет величину  $m$  абсолютных магнитных единиц.

Можно составить наглядное представление о величине абсолютной единицы магнитного полюса, если учесть, что для вязальной спицы толщиной в 1 мм, намагниченной до насыщения, величина каждого магнитного полюса равна приблизительно 12 единицам.

При исследовании длинных тонких магнитов Кулон (1785 г.) установил, что магнитные полюсы притягиваются (разноименные) или отталкиваются (одноименные) согласно тому же закону, как и электрические заряды, а именно: *два магнитных полюса взаимодействуют с силой, пропорциональной произведению их величин  $m_1$  и  $m_2$  и обратно пропорциональной квадрату расстояния  $r$  между полюсами:*

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ дин}$$

(здесь  $r$  выражено в сантиметрах).

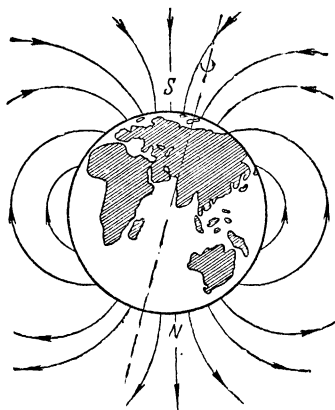


Рис. 218 Направление силовых линий магнитного поля Земли.

Среда оказывает влияние на взаимодействие магнитных полюсов. Это влияние характеризуется особой величиной, которую, по предложению В. Томсона, называют *магнитной проницаемостью* среды и обозначают через  $\mu$ . В однородной изотропной среде сила взаимодействия магнитных полюсов определяется обобщенным законом Кулона:

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}. \quad (1)$$

Вещества, имеющие  $\mu$  б о л ь ш е единицы, называют *парамагнитными*; следовательно, в парамагнитной среде магнитные взаимодействия слабее, чем в пустоте.

Вещества, для которых  $\mu$  м е н ь ш е единицы, называют *диамагнитными*; в диамагнитной среде полюсы магнита взаимодействуют сильнее, чем в пустоте.

Численное значение магнитной проницаемости  $\mu$ , подобно численному значению диэлектрической постоянной  $\epsilon$ , находится в зависимости от атомного строения вещества.

Для громадного большинства тел  $\mu$  мало отличается от единицы, всего на несколько миллионных или тысячных долей больше или меньше ее. Только три элемента — ж е л е з о, н и к е л ь и к о б а л ь т — резко выделяются из среды остальных. Для них  $\mu$  выражается сотнями и тысячами. Магнитные свойства этих элементов и в других отношениях отличаются от остальных. Группа этих трех веществ получила (по имени важнейшего ее представителя — железа) название *ферромагнитных* тел<sup>1)</sup>. Некоторые сплавы металлов, не заключающие ни одного из этих трех элементов, также оказываются ферромагнитными.

У ферромагнитных веществ  $\mu$  не есть величина постоянная, а зависит от величины магнитных сил.

Желая изучить не только направление линий магнитного поля, но и величину сил, действующих в поле, иногда пользуются длинным тонким «пробным» магнитом, величина полюсов которого предварительно измерена. Внося один конец такого магнита в изучаемую область поля и ориентируя «пробный» магнит так, чтобы другой его полюс находился в области, где поле не интенсивно, можно измерить силу, действующую на магнитный полюс, помещенный в изучаемой области.

Силу, действующую на северный магнитный полюс величиной в 1 магнитную единицу, называют *напряженностью магнитного поля* и обозначают через  $H$ .

Абсолютной единицей напряженности магнитного поля является напряженность такого поля, которое действует на магнитный полюс в 1 абсолютную магнитную единицу с силой в 1 дину. Эта единица

<sup>1)</sup> От лат. ferrum — ж е л е з о.

напряженности магнитного поля носит название *эрстед* (ее обозначают через  $\varepsilon$  или  $Oe$ ).

Если в каком-либо месте поля, где напряженность поля есть  $H$  эрстед, мы поместим магнитный полюс  $m$  абсолютных единиц, то сила, действующая на этот полюс, будет равна

$$F = mH \text{ дин.}$$

(Ясно, что при  $m$  отрицательном, т. е. для южного магнитного полюса, сила также будет иметь отрицательный знак; это означает, что в данном случае она направлена противоположно вектору напряженности поля.)

Нередко напряженность магнитного поля определяют, измеряя момент сил, ориентирующих крохотную магнитную стрелку по направлению линий поля, и затем вычисляя (по измеренному моменту) те силы, которые действуют на полюсы стрелки. Измерение момента сил, ориентирующих магнитную стрелку в поле, осуществляют, например, посредством спирально изогнутой пружинки: закручивая ее, отклоняют стрелку на тот или иной угол от ее положения равновесия в поле. В *эрстедометре* В. К. Аркадьева (рис. 219) роль магнитной стрелки

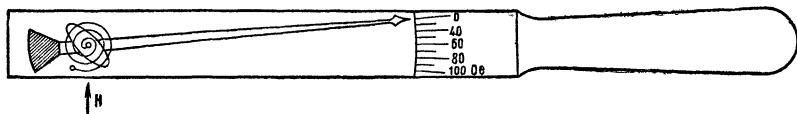


Рис. 219. Эрстедометр Аркадьева.

выполняет крохотный железный эллипсоид, вращающийся на оси с пружинкой и скрепленный с легчайшей стрелкой-указателем (прибор устанавливают так, чтобы ось эллипсоида составляла угол в  $45^\circ$  с направлением поля). Аналогично устроен эрстедометр Дюпюи (в нем вместо железного эллипсоида применен кристалл углекислого железа).

Для определения напряженности поля по измерению момента сил, поворачивающих стрелку в магнитном поле, часто применяют другой способ: к магнитной стрелке, установившейся по направлению поля, приближают другой магнит, поле которого хорошо изучено. По углу поворота стрелки в новое положение равновесия, зная напряженность поля вспомогательного магнита, нетрудно вычислить напряженность основного поля. Этот способ применен во многих *магнитометрах*, служащих для точного измерения напряженности магнитного поля Земли.

Одним из способов определения напряженности однородного магнитного поля служит измерение периода качания магнитной стрелки в поле. Для намагниченного стержня или стрелки, у которых магнитные полюсы  $m$  находятся на расстоянии  $\lambda$  друг от друга, период качания в однородном магнитном поле с напряженностью  $H$  определяется формулой (§ 58)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{H \cdot m\lambda}},$$

где  $I$ —момент инерции стержня или стрелки относительно оси подвеса.

Для измерения напряженности сильных магнитных полей пользуются особыми свойствами висмутовой проволоки, сопротивление которой существенно

изменяется в зависимости от напряженности магнитного поля (в два раза при возрастании  $H$  от 0 до 20 000 эрстед). Висмутовую проволоку, согнутую в спираль, как показано на рис. 220, вносят в исследуемую область поля и при этом измеряют ее сопротивление.

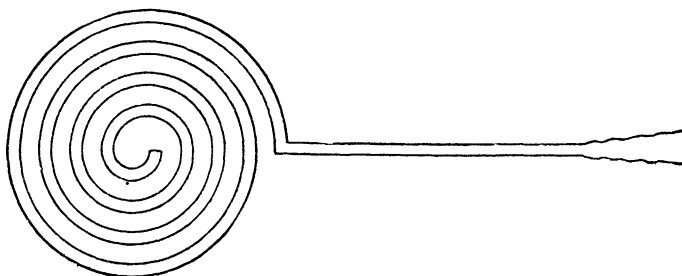


Рис. 220 Схема висмутовой спирали.

### § 58. Магнитные величины и соотношения, аналогичные электрическим

Из закона Кулона следует, что напряженность поля уединенного магнитного полюса  $m$  (например, полюса очень длинного тонкого магнита, другой полюс которого находится за пределами рассматриваемой области пространства) на расстоянии  $r$  от полюса равна

$$H = \frac{m}{\mu r^2}. \quad (2)$$

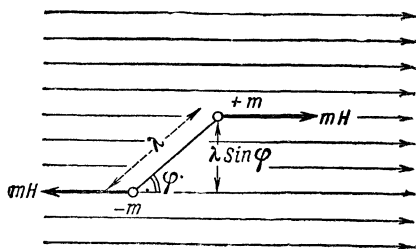


Рис. 221 Плечо сил, поворачивающих стрелку в однородном магнитном поле, равно  $\lambda \sin \varphi$ , и поэтому момент сил  $M = Hm \cdot \lambda \sin \varphi$ .

Эта формула аналогична формуле, определяющей напряженность электрического поля уединенного заряда. Поэтому при исследовании поля магнитов можно использовать некоторые понятия и математические приемы электростатики.

Так, например, тонкий намагниченный стержень можно рассматривать как *диполь*. Произведение полюса  $m$  магнитного диполя на расстояние  $\lambda$  называют *магнитным моментом*:

$$M_m = m\lambda. \quad (3)$$

Эту величину, как и электрический момент, считают вектором, направленным по оси диполя.

Когда магнитный диполь помещен в однородное магнитное поле (рис. 221), момент сил, поворачивающих диполь, равен

$$M = HM_m \sin \varphi, \quad (4)$$