

## МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВЕ

### 10.1. Как различные вещества реагируют на магнитное поле?

Представим себе некоторые опыты с очень сильным магнитным полем. Предположим, что мы сделали соленоид с внутренним диаметром 10 см и длиной 40 см (рис. 10.1). Его внешний диаметр равен 40 см и большая часть пространства заполнена медной обмоткой.

Такая катушка обеспечит постоянное поле в 30 000 гс в центре, если к ней подвести 400 квт электрической мощности и снабжать водой около 120 л в минуту для отвода тепла. Мы приводим эти конкретные данные, чтобы показать, что хотя наш прибор и не представляет собой ничего необыкновенного, он является все же довольно почтенным лабораторным магнитом. Величина поля в центре магнита приблизительно в  $10^5$  раз больше магнитного поля Земли и, вероятно, в 5 или 10 раз сильнее поля вблизи любого магнитного железного стержня

или подковообразного магнита, с которыми вы, вероятно, уже имели дело. Вблизи центра соленоида поле довольно однородно и уменьшается приблизительно вдвое на оси вблизи концов катушки. Это поле несколько менее однородно, чем поле соленоида на рис. 6.18, так как наша катушка эквивалентна ряду соленоидов с отношением длины к диаметру, изменяющимся от  $4/1$  до  $1/1$ . Действительно, если применить формулу (6.44), которая была выведена для поля на оси соленоида с однослойной обмоткой, то нетрудно

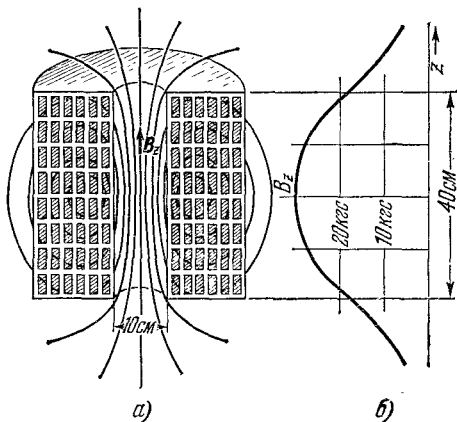


Рис. 10.1. а) Конструкция катушки, создающей сильное магнитное поле. Показано поперечное сечение обмотки, по которой течет охлаждающая вода. б) Кривая величины поля  $B_z$  на оси катушки.

точно вычислить осевое поле. Кривая величины поля по оси при центральном поле в 30 гс показана на рис. 10.1. Величина поля в конце катушки равна 18 000 гс, и в этой области поле меняется с градиентом, примерно равным 1700 гс/см.

Поместим в это поле различные вещества и посмотрим, действует ли на них сила. Обычно мы обнаруживаем такую силу. Она исчезает при выключении тока в катушке. Наибольшая сила возникает не в том случае, когда наш образец расположен в центре катушки, где магнитное поле  $B_z$  сильнее всего. Сила оказывается наибольшей, если образец расположен около конца катушки, где велик градиент  $dB_z/dz$ . Попробуем опускать каждый образец внутрь верхнего конца катушки. На рис. 10.2 показан один из таких образцов, заключенный в трубке, подвешенной на пружине, которую можно откалибровать, чтобы измерять добавочную силу, названную магнитным полем.

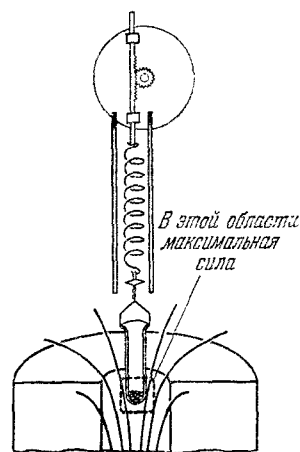


Рис. 10.2. Приспособление для измерения силы, действующей на вещество в магнитном поле.

Конечно, в начале мы должны провести контрольный эксперимент с одной трубкой и подвесом для определения величины магнитной силы, действующей на них без образца.

Такой опыт покажет нам, что сила, действующая на определенное вещество, например на алюминий, пропорциональна массе образца и не зависит от его формы, если только образец не слишком велик. (Эксперименты с маленькими образцами в этой катушке показывают, что сила остается практически постоянной на протяжении нескольких сантиметров у конца катушки; если объем образцов не больше  $1 \div 2 \text{ см}^3$ , то они не выходят за пределы

этой области.) Мы можем дать количественную оценку наших результатов для данного вещества, указав величину силы в динах на грамм образца при  $B_z = 18\,000 \text{ гс}$  и  $dB_z/dz = 1700 \text{ гс/см}$ .

Обратим внимание на довольно странные качественные результаты (табл. 10.1): для большого числа обычных чистых веществ наблюдаемая сила легко поддается измерению, но оказывается до смешного слабой, несмотря на сильное магнитное поле. Ее величина имеет порядок 10—20 дин на 1 г и не превосходит нескольких процентов от веса образца. Для некоторых образцов эта сила направлена вверх, для других — вниз. Направление силы никак не связано с направлением магнитного поля, что можно проверить, меняя направление тока в катушке. Оказывается, что некоторые вещества всегда движутся в направлении увеличивающегося поля, другие — в направлении уменьшающегося поля независимо от направления самого поля.

Мы замечаем, что некоторые вещества втягиваются в катушку с большей силой. Например, кристаллы хлористой меди втягиваются

Сила, действующая на образец, весом в 1 г в магнитном поле

 $(B_z = 18\,000 \text{ гс}, dB_z/dz = 1700 \text{ гс/см})$ 

Вещество	Формула	Сила <sup>*</sup> ), дин
<b>Диамагнетики</b>		
Вода	H <sub>2</sub> O	-22
Медь	Cu	-2,6
Свинец	Pb	-37
Хлористый натрий	NaCl	-15
Кварц	SiO <sub>2</sub>	-16
Сера	S	-16
Алмаз	C	-16
Графит	C	-110
Жидкий азот	N <sub>2</sub>	-10 (78° K)
<b>Парамагнетики</b>		
Натрий	Na	+20
Алюминий	Al	+17
Хлористая медь	CuCl <sub>2</sub>	+280
Сернокислый никель	NiSO <sub>4</sub>	+830
Жидкий кислород	O <sub>2</sub>	+7500 (90° K)
<b>Ферромагнетики</b>		
Железо	Fe	+400 000
Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	+120 000

<sup>\*</sup>) Направление силы: вниз+, вверх—. Все измерения сделаны при температуре 20°С, за исключением отмеченных в скобках.

в соленоид с силой в 280 дин на 1 г образца. Жидкий кислород ведет себя в этом эксперименте весьма эффектно — он втягивается в катушку с силой, превышающей его вес примерно в восемь раз. Действительно, если бы мы поднесли незакупоренную колбу с жидким кислородом к нижнему концу нашей катушки, то жидкость поднялась бы в колбе и выплеснулась из нее. (Где бы она могла остановиться, как вы думаете?) Жидкий азот, напротив, почти не реагирует на поле магнита: 1 г жидкого азота выталкивается из катушки с небольшой силой в 10 дин. В таблице приведены некоторые результаты, полученные в таких опытах.

Помещенные в таблице вещества были выбраны с таким расчетом, чтобы как можно лучше продемонстрировать широкий диапазон магнитного поведения обычных материалов.

Некоторые вещества, из которых наиболее известно металлическое железо, оказываются гораздо более «магнитными», чем другие. В таблице указана величина силы, которая действует на кусочек железа весом в 1 г, помещенный в ту же точку поля, что и другие образцы. Эта сила равна примерно 16 кг! (Мы не были столь наивны,

чтобы поместить в нашу пробную трубку, подвешенную на слабой пружине, железные образцы весом в несколько граммов; для введения в поле магнита таких образцов необходим совсем другой подвес.)

Заметьте, что сила, действующая на грамм железа, примерно в  $10^5$  раз больше силы, действующей на грамм меди, в то время как остальные свойства этих элементов не отличаются столь радикально. Легко понять, что надежные магнитные измерения для такого вещества, как медь, довольно затруднительны: достаточно загрязнить медь несколькими миллионными долями железа, чтобы полностью исказить результат.

В поведении железа и магнетита и других веществ, входящих в таблицу, можно заметить еще одну существенную особенность.

Предположим, что мы изменяем величину поля магнита для того, чтобы проверить, пропорциональна ли полю сила, действующая на образец. Например, можно уменьшить вдвое ток в соленоиде; при этом вдвое уменьшатся величина поля  $B_z$  и его градиент  $dB_z/dz$ . Мы обнаружим, что сила, действующая на любое вещество, расположенное в таблице до железа, уменьшится в четыре раза, в то время как сила, действующая на железный и магнетитовый образцы, упадет лишь вдвое или даже несколько больше.

Отсюда следует, что сила, по крайней мере в этих условиях, пропорциональна квадрату поля для всех веществ, приведенных в таблице, а для Fe и  $Fe_3O_4$  приблизительно пропорциональна самому полю.

По-видимому, мы имеем здесь дело с несколькими различными явлениями. Попытаемся провести некоторую классификацию этих явлений.

Во-первых, вещества которые слабо отталкиваются полем нашего магнита, как, например, вода, поваренная соль, кварц и т. д., называются *диамагнетиками*. Ими являются большинство неорганических соединений и практически все органические соединения. Действительно, диамагнетизм является свойством каждого атома и молекулы. Если вещество притягивается магнитом, это обозначает преобладание над диамагнетизмом другого, более сильного явления, обуславливающего притяжение.

Вещества, втягиваемые в область более сильного поля, называются *парамагнетиками*. В ряде случаев, например, для таких металлов, как Al, Na и многих других, парамагнитный эффект не сильнее, чем обычный диамагнитный. Для других веществ, например для  $NiSO_4$  и  $CuCl_2$  в вышеприведенном списке, парамагнитный эффект гораздо больше. В этих веществах он увеличивается при понижении температуры и становится весьма внушительным в области абсолютного нуля. Увеличение парамагнетизма с понижением температуры является частичной причиной возникновения большой силы в случае жидкого кислорода. Если все это вам кажется легко объяснимым, обратите внимание на то, что медь диамагнитна, а хлористая медь парамагнитна, что натрий принадлежит к парамагнетикам, в то время как хлористый натрий — диамагнетик.

Вещества, ведущие себя подобно железу и магнетиту, называются *ферромагнетиками*. Кроме обычных металлов этого класса — железа, кобальта и никеля, — известно большое количество ферромагнитных сплавов и кристаллических соединений. Действительно, число известных ферромагнитных веществ непрерывно растет.

В этой главе перед нами стоят две задачи. Первая заключается в изучении макроскопических явлений в намагниченном веществе, свойства которого можно описать небольшим числом параметров и экспериментально полученными соотношениями между ними. Это похоже на рассмотрение диэлектрических явлений, основанное на некотором экспериментальном соотношении между электрическим полем и макроскопической поляризацией. Иногда такую теорию называют феноменологической. Вторая задача состоит в попытке разобраться, хотя бы в общем виде, в атомном происхождении различных магнитных эффектов.

Магнитные эффекты в еще большей степени, чем диэлектрические, помогают понять основные особенности атомной структуры вещества.

Из рассмотрения таблицы следует один важный вывод. Явлениям диамагнетизма и парамагнетизма в молекулярном масштабе соответствует очень небольшое количество энергии. Возьмем крайний случай с жидким кислородом. Для того чтобы оттолкнуть 1 г жидкого кислорода от магнита, требуется работа порядка 7500 *дин*, умноженных на расстояние в несколько сантиметров (так как на расстоянии в несколько сантиметров величина поля существенно уменьшается). Мы получаем примерно 50 000 *эрг*. Для повышения температуры 1 г жидкого кислорода на один градус требуется примерно в 300 раз больше энергии (0,4 *кал*, или 1,6 *дж*), а для испарения жидкости, т. е. для отделения молекулы от других молекул, в 30 000 раз больше. Все, что происходит на молекулярном уровне в жидком кислороде в результате действия магнитного поля, требует очень небольшого количества энергии.

Известно, что даже сильные магнитные поля не имеют практически никакого влияния на химические и биохимические процессы. Вы можете поместить руку (без ручных часов!) в наш соленоид с полем в 30 *кгс* без каких-либо заметных последствий. Трудно сказать, к какому классу веществ относится ваша рука — к парамагнетикам или диамагнетикам, но сила, действующая на нее, будет составлять, в любом случае, не больше нескольких граммов. Целые поколения мышей выводились и выращивались в сильных магнитных полях, которые не оказывали на них заметного влияния. Другие биологические эксперименты также не обнаружили достойных внимания магнитных действий на биологические процессы \*). Это

---

\*) Нельзя считать, что слабые эффекты всегда проходят без последствий. Рассуждения, подобные только что приведенным, привели бы к выводу, что тяжесть не имеет энергетического значения в молекулярном масштабе, но тем не менее, деревья на склоне холма растут вертикально. Объяснение, по-видимому, заключается в суммарной силе, действующей на биологический объект, размеры

не удивительно. При взаимодействии с веществом роли магнитного и электрического полей совершенно различны. Поскольку атомы и молекулы состоят из медленно движущихся электрических зарядов, электрические силы при молекулярных процессах доминируют над магнитными.

## 10.2. Отсутствие магнитного «заряда»

Магнитное поле около намагниченного стержня, например стрелки компаса, очень похоже на электрическое поле электрически поляризованного стержня, который имеет избыток положительных зарядов на одном конце и избыток отрицательных зарядов на другом (рис. 10.3). Можно думать, что магнитное поле имеет свои источники, которые связаны с ним таким же образом, как электрический заряд связан с электрическим полем. Тогда «северный полюс» стрелки компаса был бы местом скопления магнитных «зарядов» одного вида, а на южном полюсе был бы избыток зарядов противоположного вида. Мы могли бы назвать «северный заряд» положительным, а «южный заряд» отрицательным и принять направление магнитного поля от положительных зарядов к отрицательным, как принято для электрического поля и электрических зарядов. Исторически соглашение о положительном направлении магнитного поля возникло именно таким образом \*). То, что мы называли магнитным зарядом, называлось обычно силой магнитного полюса.

Эта идея представляется достаточно логичной. Она становится еще более правдоподобной, если вспомнить, что фундаментальные уравнения электромагнитного поля совершенно симметричны по отношению к  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{V}$ . Почему в таком случае мы не должны ожидать симметрии в источниках поля? С магнитным зарядом как возможным источником статического магнитного поля  $\mathbf{V}$  мы имели бы  $\operatorname{div} \mathbf{V} = 4\pi\eta$ , где  $\eta$  представляет собой плотность магнитного заряда, по совершенной аналогии с плотностью электрического заряда  $\rho$ . Два

---

которого много больше размеров молекулы. Действительно, аналогичное явление («тропизм») было экспериментально продемонстрировано в случае семян, произрастающих в присутствии очень неоднородного магнитного поля. Мы не утверждаем, однако, что магнитные свойства молекул безразличны для биохимика. Напротив, промежуточные вещества в химических реакциях иногда обнаруживаются и даже опознаются по их магнитным свойствам. Но это совершенно другой вопрос по сравнению с влиянием внешнего поля на химический процесс. Между прочим, если вы поместите голову в сильное магнитное поле и покачаете ею, то вы почувствуете «вкус» электролитического тока во рту, что является доказательством присутствия индуцированной электродвижущей силы.

\*) Вспомните, что в гл. 6 мы установили положительное направление  $\mathbf{V}$ , ссылаясь на направление тока (направление движения положительных зарядов) и правило правой руки. Теперь «северный полюс» стрелки компаса означает «полюс, ищущий север». До сего времени нам неизвестно, почему полярность земного магнетизма должна быть именно такой, а не другой. Определение Франклином «положительного» электричества не имеет с этим ничего общего. Таким образом, тот факт, что направление поля определяется правилом правой руки, а не левой, является чистой случайностью.