

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.

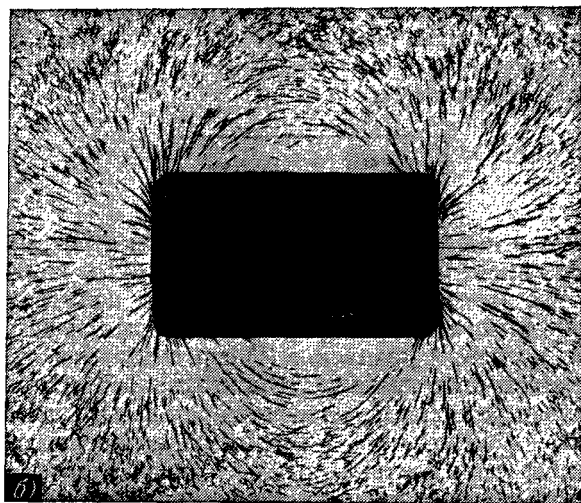
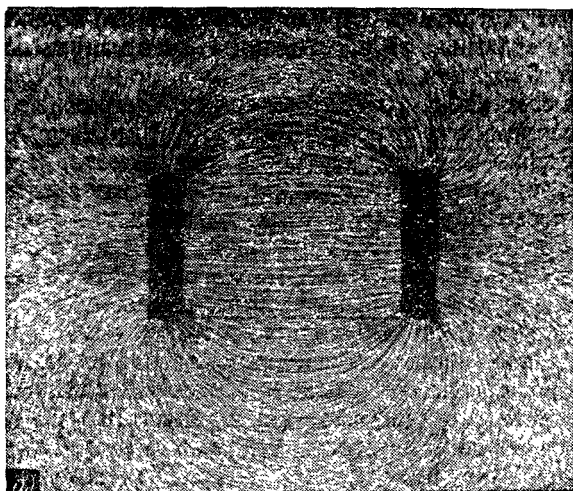


Рис. 10.3. а) Два диска с зарядами противоположных знаков (электроды, поперечные сечения которых показаны в виде черных брусков) создают такое же электрическое поле, как поляризованный стержень. Таким образом, если вообразить, что стержень занимает область внутри штриховых линий, то его внешнее поле будет подобным изображенному. Электрическое поле в данном случае сделано видимым при помощи большого количества кусочков черной фибры, взвешенных в масле и располагающихся вдоль направления поля. Этот элегантный способ демонстрации силовых линий электрического поля (Н. М. Waage, *Am. J. Phys.* 32, 388 (1964)) предложен Гарольдом М. Вааге (Физическая лаборатория Пальмера, Принстонский университет), который любезно предоставил нам эту фотографию. б) Магнитное поле вокруг намагниченного цилиндра, видимое благодаря ориентации мелких кусочков никелевой проволоки, погруженных в глицерин. (Эта попытка улучшения традиционной демонстрации с «железными опилками» при помощи техники Вааге была не особенно успешной — кусочки никелевой проволоки стремились соединиться в длинные полоски, притягивающиеся к магниту.)

Полученные теоретически поля двух этих систем показаны далее на рис. 10.22.

положительных магнитных заряда (или северные полюсы) с величиной, равной единице, на расстоянии 1 см отталкивали бы друг друга с силой 1 дин и т. д.

Однако на самом деле все обстоит не так. Природа по некоторой причине не использовала такую возможность. Мир вокруг нас оказывается совершенно несимметричным в том смысле, что *никаких магнитных зарядов вообще не существует*. Никому еще не удалось обнаружить избытка изолированных магнитных зарядов одного вида, например изолированного северного полюса. Если бы такой объект существовал, то его можно было бы обнаружить многими путями. Он создавал бы магнитное поле, направленное радиально от него и уменьшающееся на больших расстояниях как  $1/r^2$ . Что еще более поразительно — такой объект, помещенный в однородное магнитное поле, испытывал бы действие некоторой силы. В противоположность образцам в нашем соленоиде, максимальная сила действовала бы на такой объект в центре катушки, а не в конце. И в противоположность силе, действующей на электрически заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, сила, действующая на этот неподвижный северный полюс, была бы направлена не перпендикулярно к полю, а параллельно.

Из области пространства, в которой располагался бы изолированный магнитный полюс, вытекал бы конечный поток  $\mathbf{B}$ . На основании несомненного отсутствия таких объектов следует вывод, что вместо  $\operatorname{div} \mathbf{B} = 4\pi j$  мы имеем

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad \text{всюду.} \quad (1)$$

Действительно ли всюду? Может быть, все-таки существуют нераздельно объединенные в пары северный и южный полюсы, расположенные так близко друг к другу, что исследовать пространство между членами пары физически невозможно? У нас нет основания так думать, и уравнение (1) справедливо везде, где само поле  $\mathbf{B}$  имеет какое-либо значение. Высказывались предположения, что пары магнитных полюсов, подобно парам элементарных частиц, могут возникать и разлетаться в ядерных взаимодействиях, происходящих при больших энергиях. Поиски таких частиц, названных магнитными монополями, производились в последнее время, но без успеха \*). Вопрос о том, могут ли они существовать, остается откры-

---

\*) В отношении поиска магнитных зарядов смотрите статью Кеннета Форда «Магнитные монополи» (Sci. American 209, 30, декабрь, 1963). «Асимметрия», выраженная в отсутствии магнитных зарядов, отличается от хорошо известной электрической асимметрии отрицательных и положительных частиц. Электроны являются устойчивыми отрицательными частицами; положительный заряд обнаружен в форме протона, значительно более тяжелой частицы. Но известно, что это различие не универсально, так как существуют античастицы. Это показывает возможность существования вещества, состоящего из положительных электронов и отрицательных протонов; «антивещество» должно быть двойником вещества,

тым. Если бы кто-нибудь когда-либо открыл монополь, он имел бы право триумфально прибавить к уравнению (1) следующие слова: «...за исключением области, где расположен этот северный (или южный) магнитный монополь, обнаруженный на моей фотографической пластинке (или на снимке в пузырьковой камере, или по записи счетчика и т. д.)». Но даже это открытие не повлияет на главный вывод: обычное вещество «сделано» из электрических зарядов, а не из магнитных.

Мы приходим к выводу, что единственными источниками магнитного поля являются электрические токи. Это возвращает нас к гипотезе Ампера, к его идее, что магнетизм можно объяснить множеством крошечных колец электрического тока, распределенных по всему веществу.

### 10.3. Поле петли с током

Замкнутая проводящая петля расположена в плоскости  $xu$  и охватывает начало координат (рис. 10.4, *a*). По петле течет постоянный ток  $I$ , измеренный в ед. СГСЭ<sub>q</sub>/сек. Нас интересует магнитное поле, создаваемое этим током, но не вблизи петли, а в далеких точках, например в точке  $P_1$ , показанной на рисунке. Предположим, что  $r_1$  (расстояние до  $P_1$ ) гораздо больше любого размера петли. Для упрощения чертежа мы поместили точку  $P_1$  в плоскости  $yz$ ; дальше будет видно, что это ограничение не имеет значения. Для решения задачи удобно использовать векторный потенциал. Вначале вычислим векторный потенциал  $\mathbf{A}$  в точке  $P_1$ , т. е.  $\mathbf{A}(0, y_1, z_1)$ . После этого нам станет ясно, каким будет векторный потенциал в любой другой точке  $(x, y, z)$  далеко от петли. Затем, вычислив  $\text{rot } \mathbf{A}$ , мы получим величину магнитного поля  $\mathbf{B}$ .

Для тока, текущего по проводнику, мы имели согласно уравнению (6.35)

$$\mathbf{A}(0, y_1, z_1) = \frac{I}{c} \int_{\text{по всей петле}} \frac{d\mathbf{l}_2}{r_{12}}. \quad (2)$$

Тогда нас интересовал только вклад от небольшого участка контура; теперь мы должны провести интегрирование по всей петле. Рассмотрим изменение знаменателя  $r_{12}$  по мере обхода петли. Если точка  $P_1$  расположена далеко, то в первом порядке малости изменение  $r_{12}$  зависит только от координаты  $y_2$  сегмента  $d\mathbf{l}_2$ , а не от  $x_2$ . Это понятно из рис. 10.4, *б*. Следовательно, пренебрегая величинами, пропорциональными  $(x_2/r_{12})^2$ , мы можем считать равными

---

которое существует в нашей части Вселенной. В лаборатории мы наблюдаем составные части мира из антивещества, а составных частей «магнитного двойника» мы не наблюдали. Имеется серьезное сомнение в том, что они вообще существуют, и доказано, что если бы они существовали, то должны были бы обладать свойствами совершенно отличными от свойств электрически заряженных частиц.