Глава XX

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

§ 20.1. Магнитные моменты электронов и атомов

1. В предыдущих главах было рассмотрено действие магнитных полей на проводники с током и движущиеся электрические заряды. При этом магнитное поле считалось заданным, а процессы, происходящие в веществе под действием магнитного поля, не рассматривались. Влияние свойств среды на магнитное взаимодействие проводников с током или движущихся зарядов учитывалось введением в формулы относительной магнитной проницаемости μ среды [см., например, формулу (15.19′)].

Для выяснения причины различия магнитных свойств сред и их влияния на индукцию магнитного поля необходимо изучить процессы, происходящие в веществе под действием внешнего магнитного поля, т. е. необходимо исследовать действие магнитного поля на атомы и молекулы вещества. Подобно тому, как диэлектрик, помещенный во внешнее электрическое поле, поляризуется и в нем возникает внутреннее электрическое поле, так и в любом веществе, помещенном во внешнее магнитное поле, возникает особое состояние намагниченности и создается внутреннее магнитное поле.

2. Рассмотрим прежде всего изолированный атом, не подверженный действию внешнего магнитного поля. Согласно представлениям классической физики, электроны в атомах движутся по некоторым замкнутым орбитам. Такое движение каждого электрона эквивалентно замкнутому контуру тока — своеобразной «ниточке» тока. Поэтому любой атом или молекулу, с точки зрения их магнитных свойств, можно рассматривать как некоторую совокупность электронных микротоков. В этом и состоит, как указывалось в § 14.1, гипотеза Ампера о природе магнетизма.

3. Магнитный момент $\mathbf{p}_m$ электрического тока, вызванного движением электрона по орбите, называется **орбитальным магнитным моментом электрона.** Предположим для простоты, что электрон в атоме движется со скоростью $\mathbf{v}$ по круговой орбите радиуса r (рис. 20.1). Направления движения электрона и тока I указаны на рисунке стрелками. Согласно определению магнитного момента тока (15.30), орбитальный магнитный момент электрона численно равен

$$p_m = IS = I\pi r^2,$$

где S — площадь орбиты электрона. Вектор $\mathbf{p}_m$ направлен в ту же сторону, что и магнитное поле в центре кругового тока I. Обозначим через ν число оборотов электрона в секунду. Тогда

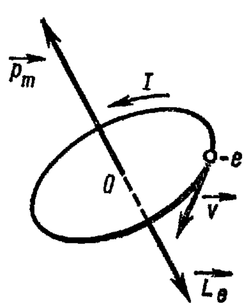

Рис. 20.1

$$I = e\nu = ev/2\pi r,$$

$$p_m = evr/2. \tag{20.1}$$

4. С другой стороны, каждый электрон массы m, равномерно вращающийся по орбите, обладает моментом импульса $\mathbf{L}_e$, численно равным

$$L_e = mvr. \tag{20.2}$$

Направление вектора $\mathbf{L}_e$ можно определить из более общей векторной записи выражения (20.2):

$$\mathbf{L}_e = m[\mathbf{r}\,\mathbf{v}]. \tag{20.2$'$}$$

Из формул (20.1) и (20.2) следует, что

$$\frac{p_m}{L_e} = \frac{e}{2m}. \tag{20.3}$$

Отношение числового значения орбитального магнитного момента электрона к числовому значению его орбитального момента импульса не зависит ни от скорости электрона на орбите, ни от радиуса орбиты. Из рис. 20.1 видно, что векторы $\mathbf{p}_m$ и $\mathbf{L}_e$ направлены во взаимно противоположные стороны. Поэтому

$$\mathbf{p}_m = -(e/2m)\,\mathbf{L}_e = -g\mathbf{L}_e, \tag{20.3$'$}$$

где $g = e/2m$ — **гиромагнитное отношение.**

Орбитальный магнитный момент электрона пропорционален его орбитальному моменту импульса, причем оба момента противоположны по направлению, так как заряд электрона отрицателен.

5. Полученные результаты справедливы для любого из электронов, находящихся в атоме. **Вектором орбитального магнитного момента атома $\mathbf{P}_m$** называется векторная сумма орбитальных магнитных моментов всех его электронов:

$$\mathbf{P}_m = \sum_{i=1}^{Z} \mathbf{p}_{mi}, \tag{20.4}$$

где Z — число электронов в атоме, равное порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева.

Аналогично этому, **вектором орбитального момента импульса атома** называется векторная сумма орбитальных моментов импульса всех электронов атома:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^{Z} \mathbf{L}_{ei}. \tag{20.4$'$}$$

Используя формулы (20.3$'$), (20.4) и (20.4$'$), получим, что для атомных моментов $\mathbf{P}_m$ и $\mathbf{L}$ справедливо соотношение

$$\mathbf{P}_m = -(e/2m)\,\mathbf{L} = -g\mathbf{L}. \tag{20.3$''$}$$

6. В этом томе мы не будем учитывать влияние, которое оказывают на магнитные свойства вещества магнитные моменты атомных ядер. Дело в том, что магнитные моменты ядерных частиц (нейтронов и про-

тонов) приблизительно в две тысячи раз меньше магнитных моментов электронов. Поэтому в первом приближении магнитными моментами атомных ядер можно пренебречь по сравнению с магнитными моментами электронных оболочек атомов.

§ 20.2. Атом в магнитном поле

1. Рассмотрим влияние магнитного поля на движение электронов в атомах вещества. В большинстве случаев ввиду малости атомов можно считать, что в пределах каждого из них магнитное поле однородно. Предположим для простоты, что электрон в атоме движется с угловой скоростью ω_0 по круговой орбите, плоскость которой перпендикулярна вектору индукции **B** магнитного поля (рис. 20.2). Когда магнитное поле отсутствует, на электрон действует электрическая сила $\mathbf{F}_e$ притяжения его ядром, играющая роль центростремительной силы:

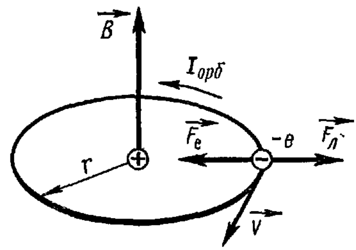

Рис. 20.2

$$m\omega_0^2 r = F_e .$$

В магнитном поле на электрон помимо силы $\mathbf{F}_e$ действует еще сила Лоренца $\mathbf{F}_л$, которая в случае, представленном на рис. 20.2, направлена в сторону, противоположную $\mathbf{F}_e$. Поэтому центростремительная сила численно равна разности $F_e - F_л$. Изменение силы, действующей на электрон, приводит к изменению угловой скорости его вращения по орбите.

2. Изменение угловой скорости вращения электрона происходит в процессе нарастания того магнитного поля, в которое вносится атом. Процесс «включения» магнитного поля, действующего на атом, происходит в течение некоторого промежутка времени. При этом возникает индукционное вихревое электрическое поле, направленное по касательной к орбите электрона. Э. д. с. индукции, наводимая в круговом контуре-орбите, по формуле (19.2) будет

$$\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}(BS) = -\frac{d}{dt}(\pi r^2 B) = -\pi r^2 \frac{dB}{dt}. \quad (20.5)$$

Индуктированное электрическое поле действует на электрон с силой **F**, численно равной

$$F = eE = e\frac{\mathscr{E}_i}{2\pi r} \quad (20.6)$$

и направленной по касательной к орбите электрона в сторону, противоположную скорости его движения (на рис. 20.2 сила **F** не показана). Подставив в (20.6) выражение для $\mathscr{E}_i$ из (20.5), получим

$$F = -\frac{er}{2}\frac{dB}{dt}. \quad (20.7)$$