

Глава XVIII

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

§ 18.1. Сила Лоренца

1. Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные электрические заряды, движущиеся в поле. В этом можно убедиться на опытах с электронными пучками (рис. 18.1). Внутри стеклянной катодной трубки M с диафрагмой D , имеющей небольшое круглое отверстие O , создается узкий пучок электронов. На конце трубки установлен экран C , покрытый слоем сернистого цинка, способного светиться под действием падающих на него электронов. Поэтому в месте падения электронного пучка получается его «изображение» в виде светящегося пятна. Если внешнего магнитного поля нет,

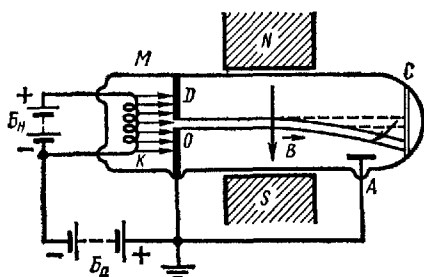


Рис. 18.1

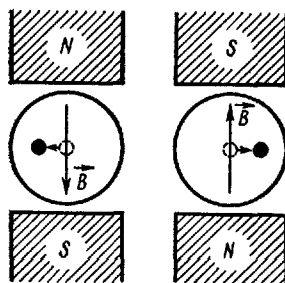


Рис. 18.2

то электроны в пучке за диафрагмой D движутся прямолинейно вдоль оси отверстия O (пунктир на рис. 18.1). Если же трубку поместить в сильное магнитное поле, то траектория электронов искривляется в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа. В соответствии с этим смещается и светящееся пятно на экране. На рис. 18.2 изображены новые положения пятна (черные круги) при различных направлениях вектора индукции \mathbf{B} внешнего магнитного поля. Скорость электронов направлена из-за чертежа. Опыт показывает, что во внешнем магнитном поле электроны отклоняются в направлении перпендикулярном векторам индукции \mathbf{B} и скорости \mathbf{v} движения электронов. Таким образом, на электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила, направленная в ту же сторону, что и векторное произведение $[\mathbf{Bv}]$.

2. Наблюдения под движением в магнитном поле положительных и отрицательных ионов показали, что на них тоже действуют силы, перпендикулярные векторам \mathbf{B} и \mathbf{v} (скорость частицы). Было установлено, что для положительно заряженных частиц сила совпадает по направлению с вектором $[\mathbf{vB}]$, а для отрицательно заряженных частиц — с вектором $[\mathbf{Bv}]$.

3. Найдем выражение для силы, действующей на заряд, движущийся в магнитном поле. По закону Ампера (14.5), на элемент dl проводника с током I , находящийся в магнитном поле, действует сила

$$dF = I[dl \mathbf{B}] = [I dl \mathbf{B}].$$

Если ток I в проводнике обусловлен движением частиц, заряд которых равен q , то по формуле (15.45')

$$I dl = qv dn, \quad (18.1)$$

где dn — число частиц в объеме проводника длиной dl , v — скорость их упорядоченного движения. Поэтому

$$dF = qdn[v \mathbf{B}] \quad (18.2)$$

Поделив обе части равенства (18.2) на число частиц dn , найдем силу F_n , действующую на каждую заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле:

$$F_n = \frac{dF}{dn} = q[v \mathbf{B}]. \quad (18.3)$$

Выражение (18.3) впервые было получено Г. А. Лоренцем. По этому сила F_n называется силой Лоренца

4. В формуле (18.3) q — алгебраическая величина движущегося заряда, т. е. $q > 0$ для положительных зарядов и $q < 0$ для отрицательных. Поэтому направление силы Лоренца, определяемое формулой (18.3), согласуется с указанными выше результатами экспериментов. На рис. 18.3 показаны взаимные расположения векторов F_n , v и \mathbf{B} для положительного и отрицательного зарядов.

Сила Лоренца численно равна

$$F_n = |q|vB \sin \alpha, \quad (18.4)$$

где α — угол между векторами v и \mathbf{B}

5. Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости заряженной частицы, сообщая ей нормальное ускорение. Следовательно, сила Лоренца не совершает работы. Она изменяет только направление скорости движения частицы в магнитном поле. Абсолютное значение скорости заряда и его кинетическая энергия при движении в магнитном поле не изменяются.

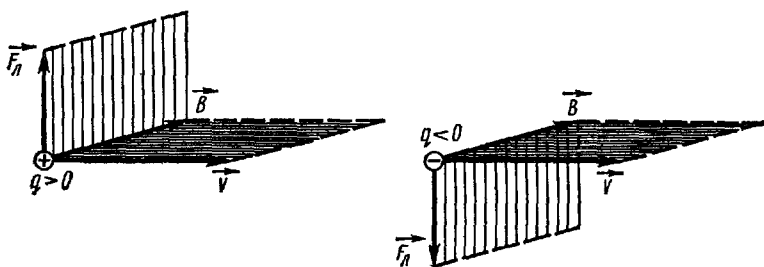


Рис. 18.3

6. В общем случае на движущийся заряд помимо магнитного поля с индукцией \mathbf{B} может еще действовать и электрическое поле с напряженностью \mathbf{E} . Тогда результирующая сила \mathbf{F} , приложенная к заряду, равна геометрической сумме силы $\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$, действующей на заряд со стороны электрического поля, и силы Лоренца:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}\mathbf{B}]. \quad (18.5)$$

Соотношение (18.5) называется **формулой Лоренца**.

Часто именно эту результирующую силу \mathbf{F} называют силой Лоренца. Однако в дальнейшем мы будем понимать под силой Лоренца только магнитную составляющую силы \mathbf{F} , выражаемую формулой (18.3).

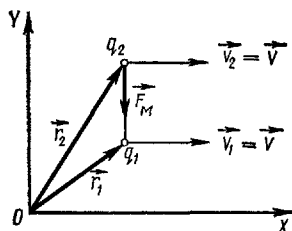


Рис 18.4

7. Найдем силу магнитного взаимодействия между двумя заряженными частицами q_1 и q_2 , движущимися в вакууме. Пусть $q_1 > 0$ и $q_2 > 0$, а скорости частиц одинаковы и направлены параллельно оси OX (рис. 18.4); $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}$, причём $v \ll c$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. По формуле (18.3) сила \mathbf{F}_M , действующая на движущийся заряд q_2 со стороны магнитного поля движущегося заряда q_1 , равна

$$\mathbf{F}_M = q_2 [\mathbf{v}_2 \mathbf{B}_1]. \quad (18.6)$$

Вектор \mathbf{B}_1 найдем по формуле (15.47), полагая в ней для вакуума $\mu = 1$:

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1}{r^2} [\mathbf{v}_1 \mathbf{r}_{12}], \quad (18.7)$$

где $\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ — радиус-вектор, соединяющий заряды q_1 и q_2 , а $r = |\mathbf{r}_{12}|$ — расстояние между зарядами. На рис. 18.4 векторы \mathbf{v}_1 и \mathbf{r}_{12} взаимно перпендикулярны, а \mathbf{B}_1 направлен из-за чертежа перпендикулярно его плоскости. Поэтому сила \mathbf{F}_M численно равна

$$F_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} v^2. \quad (18.8)$$

Сила электростатического отталкивания между взаимно неподвижными зарядами q_1 и q_2 , находящимися в вакууме ($\epsilon = 1$) на том же расстоянии r , по закону Кулона (1.8) численно равна

$$F_{\text{эл}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (18.9)$$

Из (18.8) и (18.9) следует, что

$$\frac{F_M}{F_{\text{эл}}} = \mu_0 \epsilon_0 v^2. \quad (18.10)$$

В Международной системе единиц (СИ), которой мы пользуемся,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{с} / (\text{А} \cdot \text{м}) \quad \text{и} \quad \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ А} \cdot \text{с} / (\text{В} \cdot \text{м}).$$

Поэтому $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{1}{\text{с}^2}$ и (18.10) можно переписать в виде

$$\frac{F_M}{F_{\text{Эл}}} = \frac{v^2}{c^2}. \quad (18.10')$$

Итак, мы показали, что при малых скоростях ($v \ll c$) магнитное взаимодействие между движущимися зарядами во много раз слабее их электрического взаимодействия.

8. На первый взгляд кажется, что этот вывод противоречит рассмотренному выше магнитному взаимодействию параллельных проводников с током. Однако это неверно. Проводники с током в целом электрически нейтральны, так что результирующая сила электрического взаимодействия между ними равна нулю. Поэтому силы, действующие на них, имеют электромагнитную природу. Хотя сила магнитного взаимодействия между каждой парой электронов мала, число этих пар столь велико, что результирующая сила взаимодействия параллельных проводников с током может быть значительной.

§ 18.2. Явление Холла

1. В 1880 г. американский физик Э. Холл проделал следующий опыт. Постоянный ток I пропусклся через пластинку M (рис. 18.5), изготовленную из золота,

и измерялась разность потенциалов $\Delta\varphi$ между противоположными точками A и C на верхней и нижней гранях. Эти точки лежат в одном и том же поперечном сечении проводника M . Поэтому, как и следовало ожидать, оказалось, что $\Delta\varphi = 0$. Когда

пластина с током была помещена в однородное магнитное поле, перпендикулярное ее боковым граням, то потенциалы точек A и C стали различными. Это явление получило название **явления Холла**. Было установлено, что разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точками A и C пропорциональна силе тока I , индукции магнитного поля B и обратно пропорциональна ширине b пластинки, т. е.

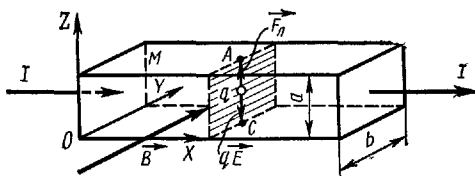


Рис. 18.5

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = R \frac{IB}{b}, \quad (18.11)$$

где R — константа Холла.

2. Дальнейшие исследования показали, что явление Холла наблюдается во всех проводниках и полупроводниках независимо от их материала. Изменение направления тока или магнитного поля на противоположное вызывает изменение знака разности потенциалов $\Delta\varphi$. Числовое значение константы Холла R зависит от материала пластинки M , причем этот коэффициент для одних веществ положителен, а для других — отрицателен.

3. Явление Холла можно объяснить следующим образом. Пусть ток I в пластинке M обусловлен упорядоченным движением частиц — носителей зарядов q . Если их концентрация равна n_0 , а средняя ско-