3.4. Сила Лоренца и закон Ампера.

3.4.1.Сила Лоренца.

В результате многочисленных экспериментов по исследованию магнитных явлений физиками были получены основные (фундаментальные) законы. Эти законы, записанные в виде математических формул, являются обобщением опытных фактов. Исторически первыми проводились опыты с прямыми токами (законы Ампера, Био и Савара) и устанавливались основные законы их взаимодействия. Однако нам удобнее ввести те же законы для элементарных движущихся зарядов и затем их связать с законами взаимодействия токов.

Итак, рассмотрим первый опытный факт: на движущийся электрический заряд в магнитном поле (см рис. 4.1) действует сила – *сила Лоренца*, которая определяется следующим векторным произведением:

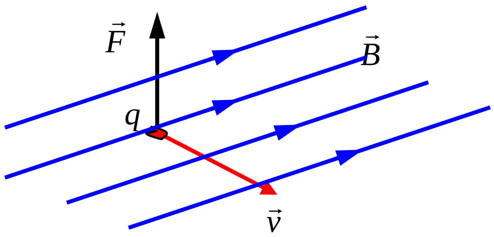

Рис. 4.1.

$$\vec{F}_q = \frac{q}{c}\left[\vec{v},\vec{B}\right] \qquad (3.4.1)$$

где q – заряд, $\vec{v}$ – скорость заряда, $\vec{B}$ – индукция магнитного поля. Здесь c – некоторая константа (физический смысл ее рассмотрим позже), которая определяется выбранной системой единиц. Индукция магнитного поля $\vec{B}$ – векторная силовая характеристика магнитного поля, определяющая величину и направление действия силы на движущийся заряд по формуле (3.4.1).

В системе единиц *CGSE* (Гаусса), в чем мы убедимся далее, константа c – скорость света. В системе *СИ* константа c = 1, т.е. сила Лоренца в системе *СИ* записывается:

$$\vec{F}_q = q\left[\vec{v},\vec{B}\right]. \qquad (3.4.1a)$$

Таким образом, это соотношение может служить определением единиц магнитной индукции $\vec{B}$, поскольку остальные единицы, входящие в (3.4.1а), уже определены. В системе *СИ* имеем: $[F]=1Н$, $[q]=1Кл$, $[v]=1м/с$, тогда единица магнитной индукции определяется как $[B]=1Тл$ (Тесла). Подробнее о единицах обсудим в следующем параграфе.

Если движение заряда происходит одновременно в магнитном и электрическом полях, то сила Лоренца равна сумме сил:

$$\vec{F}_q = q\left(\vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{v},\vec{B}\right]\right) \qquad (3.4.2)$$

Однако при этом заметим, что разделение силы на электрическую и магнитную зависит от выбора системы отсчета.

3.4.2. Движение заряда в постоянном однородном магнитном поле.

По второму закону Ньютона уравнение, описывающее движения заряда q в магнитном поле индукции $\vec{B}$, имеет вид:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_q = \frac{q}{c}\left[\vec{v},\vec{B}\right]. \qquad (3.4.3)$$

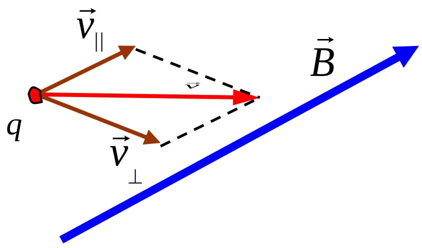

Рис. 4.2.

где m – масса заряда, $\vec{v}$ – его скорость. Рассмотрим отдельно составляющие (проекции) скорости вдоль направления магнитного поля $v_{||}$ и перпендикулярно к нему $v_{\perp}$: $\vec{v} = \vec{v}_{||} + \vec{v}_{\perp}$ (см рис. 4.2). Легко видеть, что в направлении, параллельном магнитному полю, проекция силы, действующей со стороны поля на движущийся заряд, равна нулю, что вытекает из свойств векторного произведения:

$$m\frac{d\vec{v}_{||}}{dt} = \frac{q}{c}\left[\vec{v}_{||},\vec{B}\right] = 0 \qquad (3.4.4)$$

Поэтому составляющая скорости, параллельная вектору индукции магнитного поля, не меняется $v_B = v_{||} = const$. Для составляющей скорости, перпендикулярной к направлению магнитного поля $\vec{B}$, имеем уравнение:

$$m\frac{d\vec{v}_\perp}{dt}=\frac{q}{c}\left[\vec{v}_\perp,\vec{B}\right]=m\vec{a} \qquad (3.4.5)$$

Ускорение заряда равно

$$\vec{a}=\frac{q}{mc}\left[\vec{v}_\perp,\vec{B}\right]$$

и направлено перпендикулярно скорости частицы (и индукции магнитного поля). Как известно из механики ускорение, перпендикулярное скорости (центростремительное ускорение), не изменяет ее величину, а меняет только направление скорости. В этом случае частица движется в магнитном поле с постоянной по модулю скоростью $v_\perp = const$, и, следовательно, траекторией движения заряда в плоскости перпендикулярной к полю является *окружность* (рис. 4.3). При этом центростремительное ускорение определяется как $a=\frac{v_\perp^2}{R}$. Подставляя это ускорение в уравнение (3.4.5) и рассматривая его по модулю, находим радиус описываемой окружности:

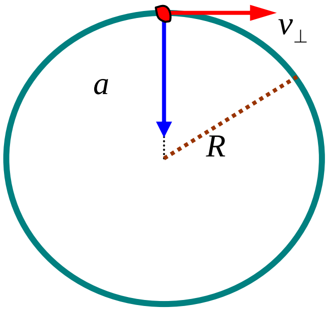

Рис. 4.3.

$$\frac{qv_\perp B}{c}=\frac{mv_\perp^2}{R}$$

$$R=\frac{mcv_\perp}{qB}. \qquad (3.4.6)$$

Учитывая (3.4.6), получаем частоту вращения (угловую скорость) заряда вокруг силовой линии индукции магнитного поля – так называемую, *циклотронную частоту* вращения:

$$\omega=\frac{v_\perp}{R}=\frac{qB}{mc} \qquad (3.4.7)$$

Если скорость частицы направлена под произвольным углом к магнитному полю (вектору $\vec{B}$), то траектория частицы представляет собой винтовую линию (рис. 4.4).

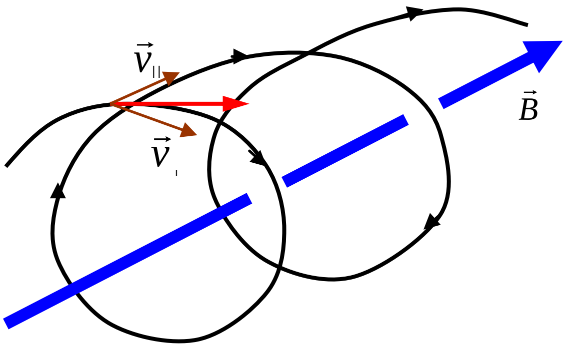

Рис. 4.4.

Итак, в итоге получаем: 1) равномерное движение вдоль направления магнитного поля и 2) движение в плоскости перпендикулярной к магнитному полю с ускорением перпендикулярным к скорости, т.е. движение по окружности с постоянной скоростью.

3.4.3. Взаимодействие токов. Закон Ампера.

Обычно эксперименты проводились с постоянными токами, поскольку с ними проще оперировать, чем с отдельными зарядами. Рассмотрим взаимодействие токов. Каждый носитель тока в проводнике испытывает действие магнитной силы. В результате магнитное поле действует с определенной силой на сам проводник с током в целом.

Пусть имеем провод с током, помещенный в магнитное поле. На каждый заряд q (носитель) действует сила Лоренца (3.4.1)

$$\vec{F}_q=\frac{q}{c}\left[(\vec{v}+\vec{u}),\vec{B}\right], \qquad (3.4.8)$$

где $\vec{v}$ – скорость хаотического движения, $\vec{u}$ – скорость дрейфа носителей. Если S – сечение проводника, n – концентрация носителей, то на элемент тока длиной dl будет действовать сила

$$d\vec{F}=\left\langle \vec{F}_q \right\rangle nSdl, \qquad (3.4.9)$$

где $\left\langle \vec{F}_q \right\rangle$ – средняя сила, действующая на заряд; $dV=Sdl$ – элементарный объем проводника. Т.к. средняя скорость теплового движения равна нулю $\langle \vec{v} \rangle = 0$, а средняя скорость дрейфа – $\langle \vec{u} \rangle = \vec{u}$, то получаем:

$$\left\langle \vec{F}_q \right\rangle = \frac{q}{c}\left[\left(\langle\vec{v}\rangle + \langle\vec{u}\rangle\right), \vec{B}\right] = \frac{q}{c}\left[\langle\vec{u}\rangle, \vec{B}\right] = \frac{q}{c}\left[\vec{u}, \vec{B}\right], \tag{3.4.10}$$

Тогда сила, действующая на элемент объема проводника dV , равна:

$$d\vec{F} = \frac{q}{c} n\left[\vec{u}, \vec{B}\right] Sdl = \frac{1}{c}\left[\vec{j}, \vec{B}\right] dV\ , \tag{3.4.11}$$

Здесь ввели плотность тока $\vec{j} = nq\vec{u}$. Итак, получаем силу, действующую на *объемный элемент тока*:

$$d\vec{F} = \frac{1}{c}\left[\vec{j}, \vec{B}\right] dV \tag{3.4.12}$$

Можно написать силу, действующую на тонкий провод с током в магнитном поле. Для этого объемный элемент тока выразим через *линейный элемент тока*:

$$\vec{j} dV = \vec{j} Sdl = Id\vec{l}\ . \tag{3.4.13}$$

Тогда сила, действующая на провод длиной $d\vec{l}$, определяется:

$$d\vec{F} = \frac{I}{c}\left[d\vec{l}, \vec{B}\right] \tag{3.4.14}$$

Сила, действующая на провод конечной длины, записывается через интеграл:

$$\vec{F} = \int \frac{I}{c}\left[d\vec{l}, \vec{B}\right] \tag{3.4.15}$$

В общем случае необходимо учитывать векторный характер подынтегрального выражения при получении результирующей силы.

Если имеем участок прямого провода с током длины l, находящийся в постоянном магнитном поле, тогда величина силы, действующей на этот участок, получается из интегрирования (3.4.15) и равна:

$$F = \frac{I}{c} Bl \sin\vartheta \tag{3.4.16}$$

где угол ϑ – угол между направлением силовых линий индукции магнитного поля и прямым участком провода.

Эти соотношения (3.4.12) - (3.4.16) и определяет закон взаимодействия токов – *закон Ампера* (1820г.).