

### § 39. Поле одиночного движущегося заряда. Взаимодействие движущихся зарядов

Как уже указывалось в § 36, реальный элемент тока имеет длину и ширину и представляет собой совокупность одиночных зарядов  $q$ , движущихся параллельно друг другу со скоростью  $v \parallel dl$  (см. рис. 3.52). Магнитное поле  $dH$ , создаваемое элементом тока в точке  $M$ , представляет собой геометрическую сумму полей, создаваемых каждым из движущихся зарядов в отдельности.

На расстояниях  $r$ , больших по сравнению с размерами элемента тока, можно считать, что радиус-вектор  $r$  практически одинаков для всех зарядов и каждый одиночный движущийся заряд создает в точке  $M$  практически одинаковое магнитное поле  $h$ . Тогда

$$dH = Nh, \quad (39.1)$$

где (см. (36.1))  $N = nS dl$  — полное число зарядов,

движущихся в элементе длиной  $dl$  и площадью поперечного сечения  $S$ . С другой стороны (см. (36.2)),

$$Idl = Nqv. \quad (39.2)$$

По закону Био—Савара—Лапласа напряженность магнитного поля элемента тока в гауссовой системе равна

$$dH = \frac{[Idl \times r]}{cr^3} = N \frac{[qv \times r]}{cr^3}. \quad (39.3)$$

Из (39.1) и (39.3) находим напряженность магнитного поля, созданного одиночным зарядом:

$$h = q \frac{[v \times r]}{cr^3}; \quad (39.4)$$

величина  $h$  равна

$$h = \frac{q}{c} \frac{v \sin(\hat{v}, \hat{r})}{r^2}, \quad (39.5)$$

т. е. напряженность магнитного поля, созданного одиночным движущимся зарядом, обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$ .

<sup>\*</sup>) В системе единиц СИ эта формула примет вид

$$h = q \frac{[v \times r]}{4\pi r^3}.$$

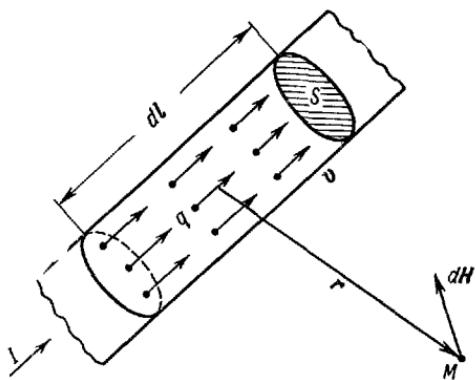


Рис. 3.52.

от заряда до точки наблюдения  $M$  и прямо пропорциональна величине заряда  $q$ , скорости его движения  $v$  и синусу угла между направлением движения заряда  $v$  и радиус-вектором  $r$ . Направление вектора  $H$  перпендикулярно плоскости, проходящей через векторы  $v$  и  $r$ , и ориентировано по правилу правого винта вокруг направления  $v$ . Линии магнитного поля представляют собой окружности, центры которых расположены на прямой, вдоль которой движется заряд, как это показано на рис. 3.53.

Неподвижный заряд  $e$  связан с окружающим его электрическим полем, напряженность которого равна

$$\mathbf{E}_e = \frac{er}{r^2}. \quad (39.6)$$

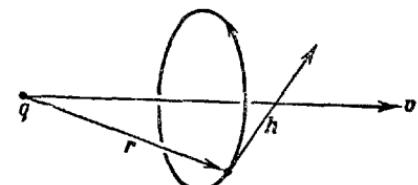


Рис. 3.53.

Если этот заряд движется со скоростью  $v$ , то с ним оказывается связанным еще магнитное поле, которое в соответствии с только что полученным результатом обладает напряженностью

$$\mathbf{H}_e = \frac{e}{c} \frac{[v \times r]}{r^2}. \quad (39.7)$$

Точно такое же поле обнаружат приборы, двигаясь мимо неподвижного заряда со скоростью  $v$ : абсолютная скорость есть бессмысленное понятие — важна лишь относительная скорость  $v$ , в данном случае заряда и прибора — индикатора поля.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. С зарядами связаны поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Эти поля действуют на другие электрические заряды, движущиеся в окружающем пространстве, с силой  $f$ , определяющейся из (37.3). В общем случае двух произвольно движущихся зарядов взаимодействие, осуществляющее через поля (39.6) и (39.7), очень сложно, и мы его рассматривать не будем. Ограничимся простейшим частным случаем, позволяющим тем не менее сделать весьма важные заключения о взаимосвязи электрических и магнитных полей.

Рассмотрим два одинаковых заряда  $e$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга и движущихся со скоростью  $v$  по направлению, перпендикулярному к соединяющей их линии (рис. 3.54). Между этими зарядами будут действовать электрические и магнитные силы. Первые будут силами отталкивания, равными по величине

$$f_e = \frac{e^2}{r^2}. \quad (39.8)$$

Легко видеть, что, как в случае параллельных токов, магнитные силы будут силами притяжения. Величину этих сил легко найти. Магнитное поле, в котором движется, например, второй заряд,

создается первым зарядом, находящимся от него на расстоянии  $r$ , причем  $\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$ . Отсюда

$$H_e = \frac{e}{c} \frac{\mathbf{v}}{r^2}. \quad (39.9)$$

Подставляя это значение в выражение (36.8), находим (учитывая, что  $H_e \perp v$ ):

$$f_{\text{магн}} = \frac{e}{c} v H_e = \frac{e^2}{c^2} \frac{v^2}{r^2} = \frac{e^2}{r^2} \frac{v^2}{c^2}. \quad (39.10)$$

Заметим, что выделенный нами в окончательном выражении  $f_{\text{магн}}$  множитель слева равен  $f_e$  (39.8). Следовательно,

$$f_{\text{магн}} = \frac{v^2}{c^2} f_e. \quad (39.11)$$

Таким образом, в то время как силы электрического отталкивания между зарядами, будучи независимыми от  $v$ , остаются постоян-

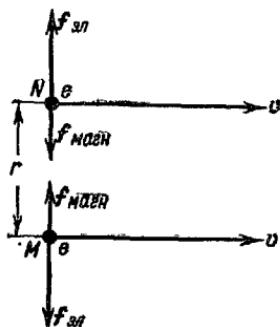


Рис. 3.54.

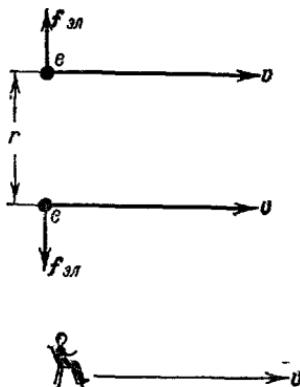


Рис. 3.55.

ными (поскольку  $r = \text{const}$ ), силы магнитного притяжения возрастают с увеличением  $v$ , стремясь к значению  $f_e$  при практически недостижимой скорости  $v$ , равной скорости света.

Суммарная сила отталкивания зарядов  $f$  равна

$$f = f_e - f_{\text{магн}} = \frac{e^2}{r^2} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (39.12)$$

Полученный результат кажется парадоксальным. Суммарная сила взаимодействия (39.12) оказалась зависящей от  $v$ , в то время как  $v$  есть скорость по отношению к произвольно выбранной системе отсчета. Рассматривая те же заряды, но в системе отсчета, движущейся со скоростью  $v$  (как это изображено на рис. 3.55), мы нашли бы их неподвижными, и полная сила отталкивания была бы равна  $f_e = e^2/r^2$ .

Наконец, можем ли мы считать магнитное поле объективно существующим, если оно согласно (39.7) определяется скоростью  $v$ , зависящей от системы отсчета? Как показано на рис. 3. 55, наблюдатель, движущийся вместе с зарядами, не обнаружит никакого магнитного взаимодействия: по отношению к нему заряды покоятся.

Конечно, взаимодействие электрических зарядов есть явление объективное, не зависящее от существования и характера движения наблюдателя. Приведенный выше «парадокс» возник потому, что мы до сих пор рассматривали электрическое и магнитное поля как независимые и допустили некоторые неточности при вычислении сил  $f_e$  и  $f_{магн}$ . В частности, неподвижный наблюдатель должен учитывать, что при движении электрических зарядов изменяются и их электрические поля, и эти изменения происходят не сразу во всех точках пространства, а распространяются с конечной, хотя и очень большой скоростью  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ . Не останавливаясь на всех деталях получающейся весьма сложной картины, следует лишь указать, что на второй заряд, находящийся в данный момент в точке  $M$ , действует электрическое поле, порожденное первым зарядом не в тот же самый момент времени, а несколько раньше, когда он еще находился в какой-то предыдущей точке своей траектории. Следовательно, неподвижный наблюдатель по сравнению с движущимся обнаружит не только появление магнитного поля и силы  $f_{магн}$ , но и изменение электрического поля и силы  $f_e$ .

Формально «парадокс» возник потому, что мы рассматривали электрическое и магнитное поля как векторные.

Для векторов характерен определенный закон преобразования при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. По этому закону преобразуется, например, такой «настоящий вектор», как вектор скорости, и т. д.

*Вектора электрического и магнитного полей преобразуются по другому закону*, и следовательно, строго говоря, *эти поля не векторные*. В действительности все составляющие электрического и магнитного полей (всего шесть составляющих) образуют величину, называемую тензором второго ранга, компоненты которого преобразуются по иным законам, чем компоненты векторов.

Из законов преобразования тензоров непосредственно видно, как при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой наличие электрических составляющих поля приводит к появлению магнитных, и наоборот (например, в собственной системе отсчета, по отношению к которой электрический заряд неподвижен, есть лишь электрические составляющие поля; если перейти теперь к системе отсчета, по отношению к которой заряд и связанное с ним поле движутся, то в новой системе будут и магнитные составляющие поля).

В рамках нашего учебника мы не можем пользоваться тензорами, а следовательно, и строго указать границы корректности принятых представлений. Сказанное адресовано главным образом тем читателям, которые в дальнейшем захотели бы расширить свои представления о природе электромагнитного поля.

Вместе с тем уже здесь мы хотим подчеркнуть неразрывное единство электрического и магнитного полей.

Объективно существует единое электромагнитное поле.

Разбиение этого поля на электрическое и магнитное является условным и зависит от скорости движения зарядов в выбранной системе отсчета. В следующих главах мы установим еще более тесную взаимосвязь электрического и магнитного полей, чем это было сделано в настоящей главе.

При сравнительно медленных движениях заряженных тел, пока  $v \ll c$ , можно не учитывать этой связи и пользоваться выведенными ранее соотношениями для электрических и магнитных полей. Как видно из формулы (39.12), для рассмотренного выше примера относительная неточность порядка  $v^2/c^2$  очень мала для обычных скоростей  $v$ , малых по сравнению со скоростью света  $c$ .

Для движений со скоростями, приближающимися к скорости света, пришлось пересмотреть не только представления о взаимной независимости электрических и магнитных полей, но и отказаться от еще более привычных представлений о взаимной независимости пространства и времени и независимости их свойств от материи, движущейся в пространстве—времени. Этот пересмотр был произведен А. Эйнштейном, создавшим новую теорию пространства—времени—теорию относительности, в которой наиболее последовательно введено единое электромагнитное поле.