

8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ДВИЖУЩИМИСЯ ЧАСТИЦАМИ. СИЛА ЛОРЕНЦА

В настоящее время считается, что аналитическое выражение для силы Лоренца не выведено из уравнений Максвелла или специальной теории относительности. Обычно выражение для этой силы получают из уравнения Лагранжа для динамики частицы, в котором функция Лагранжа подбирается в таком виде, чтобы это соответствовало эксперименту [36]. Поэтому можно полагать, что нахождение этой силы в общем случае не является очень простым.

Имея предварительный набор уравнений, которые были рассмотрены нами, можно попытаться оценить характер взаимодействия между частицами, движущимися с произвольными скоростями. При этом можно поступить двумя способами: вначале найти вид поля рассеянных волн от первой частицы с учетом ее движения и затем найти силу воздействия этих волн на вторую частицу, либо наоборот.

Вопрос о том, как воздействует движущаяся частица на неподвижную, был решен при нахождении запаздывающего потенциала (40). На движущуюся частицу этот запаздывающий потенциал, очевидно, будет воздействовать несколько иначе, что и требуется определить.

Таким образом, картина рассеянных эфирных волн, которая была сферически симметричной в статике, деформируется дважды: вначале за счет движения в эфире первой частицы, и затем - за счет движения второй частицы.

В общем случае электромагнитное взаимодействие между движущимися частицами является очень сложным. Для оценки характера этой силы рассмотрим простейший случай, а именно, пример из магнитостатики, т.е. взаимодействие одного движущегося произвольным образом электрона с электрическим током или облаком медленно движущихся электронов (рис.8). Для упрощения расчетов скорости частиц будем считать малыми и поэтому некоторыми эффектами запаздывания полей можно пренебречь.

Сила, действующая на отдельный неподвижный электрон со стороны движущихся частиц, определяется напряженностью электрического поля E согласно полученному нами соотношению (80)

$$E = - \nabla \varphi - \partial A / \partial t, \quad (84)$$

где скалярный потенциал φ и векторный потенциал A создаются электронами, движущимися в проводнике.

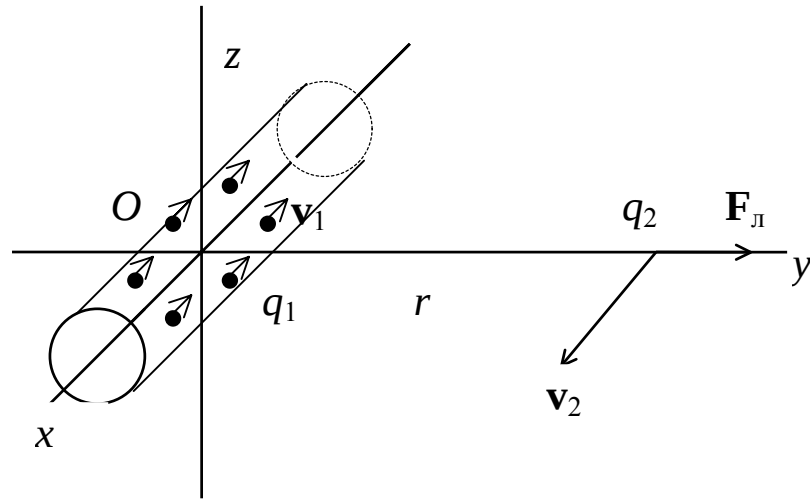


Рис.8. Взаимодействие движущейся частицы q_2 с электрическим током

Теперь необходимо установить, как изменится напряженность $\mathbf{E}$ в том случае, если отдельный электрон будет двигаться с произвольной скоростью $\mathbf{v}_2$. Начнем со второго слагаемого, а именно, напишем полную производную по времени от вектора $\mathbf{A}$ с учетом движения электрона

$$d\mathbf{A}/dt = \partial\mathbf{A}/\partial t + \mathbf{v}_2 \nabla \mathbf{A}. \quad (85)$$

Если в той области, где движется электрон, отсутствуют посторонние заряды и токи, т.е. $\rho = 0$ и $\mathbf{j} = 0$, тогда из соотношения (74), которое было выведено нами из уравнения непрерывности (71), получаем

$$\nabla \mathbf{A} = \text{div } \mathbf{A} = 0. \quad (86)$$

В результате для движущегося электрона из (85) имеем

$$d\mathbf{A}/dt = \partial\mathbf{A}/\partial t. \quad (87)$$

Таким образом, движение электрона со скоростью $\mathbf{v}_2$ не приведет к изменению второго слагаемого в формуле (84). Несколько сложнее получается с первым слагаемым. Движущийся электрон будет воспринимать потенциальное поле φ не так, как это было в статике. Чтобы это определить, нужно перейти в подвижную систему координат, связанную с электроном.

Мы уже знаем, что скалярный потенциал φ входит как компонента четырехвектора, имеющего вид $(\varphi/c, \mathbf{A})$, и при переходе в подвижную систему координат преобразуется как временная компонента ct в преобразованиях Лоренца

$$ct' = \gamma(ct - \mathbf{v}_x x/c). \quad (88)$$

Для скалярного потенциала это будет выглядеть так:

$$\varphi'/c = \gamma(\varphi/c - \mathbf{v}_2 \mathbf{A}/c), \quad (89)$$

где использовано скалярное произведение $\mathbf{v}_2 \mathbf{A}$ с учетом того, что остальные компоненты скорости $\mathbf{v}_2$ не дадут вклада в последнее слагаемое. Учитывая, что для малых скоростей $\gamma = 1$, из (89) получаем для движущегося электрона

$$\varphi' = \varphi - \mathbf{v}_2 \mathbf{A}. \quad (90)$$

Согласно формуле (84) с учетом движения электрона и с использованием (90) имеем

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi' - \partial\mathbf{A}/\partial t = -\nabla\varphi - \partial\mathbf{A}/\partial t + \nabla(\mathbf{v}_2 \mathbf{A}). \quad (91)$$

Последнее слагаемое в (91) преобразуем по известной формуле векторного анализа

$$\text{grad } \mathbf{a} \mathbf{b} = (\mathbf{a} \nabla) \mathbf{b} + (\mathbf{b} \nabla) \mathbf{a} + [\mathbf{b} \text{ rot } \mathbf{a}] + [\mathbf{a} \text{ rot } \mathbf{b}], \quad (92)$$

где $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ - любые два вектора. Применяя эту формулу к скалярному произведению $\mathbf{v}_2 \mathbf{A}$, мы учитываем, что производные по координатам не действуют на компоненты скорости $\mathbf{v}_2$, и в итоге получается

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \partial\mathbf{A}/\partial t + [\mathbf{v}_2 \text{ rot } \mathbf{A}]. \quad (93)$$

Уравнение движения частицы в электромагнитном поле, на которую действует сила $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$, запишется в виде:

$$d/dt (m\mathbf{v}_2) = \mathbf{F} = q(-\nabla\varphi - \partial\mathbf{A}/\partial t) + q[\mathbf{v}_2 \text{ rot } \mathbf{A}]. \quad (94)$$

Мы видим, что сила $\mathbf{F}$ состоит из двух существенно различных частей. Первая часть (первый и второй члены в правой части) не зависит

от скорости частицы. Вторая часть (третий член) зависит от этой скорости: сила пропорциональна величине скорости и перпендикулярна к ней.

По характеру действия электромагнитной силы на движущуюся частицу ее условно разделили на электрическую часть (сила, которая может сообщать частице энергию) и магнитную часть (сила, которая не производит работы над отдельной движущейся частицей, поскольку она всегда перпендикулярна скорости частицы). Такое разделение сил и полей возникло исторически еще до создания электромагнитной теории, т.е. по внешним признакам проявления сил.

Для описания магнитного поля используется вектор

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (95)$$

а электрическое поле определяется по формуле (84).

Уравнение движения частицы в электромагнитном поле (94) можно теперь написать в виде

$$d\mathbf{p}/dt = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \mathbf{B}]. \quad (96)$$

Стоящее справа выражение носит название силы Лоренца. Первая ее часть - сила, с которой действует электрическое поле на заряд, - не зависит от скорости заряда и ориентирована по направлению поля $\mathbf{E}$. Вторая часть - сила, обусловленная действием магнитного поля на заряд, - пропорциональна скорости заряда и направлена перпендикулярно к этой скорости и к направлению магнитного поля $\mathbf{B}$. Отметим, что по своей природе $\mathbf{E}$ представляет собой полярный, а $\mathbf{B}$ - аксиальный векторы. Это сказывается на их поведении при различных преобразованиях координат. Например, при зеркальном отражении системы координат, когда вектор $\mathbf{E}$ направлен нормально к плоскости зеркала, он меняет свой знак на обратный. Вектор $\mathbf{B}$ при подобном преобразовании своего знака не меняет, т.е. он ведет себя как вектор угловой скорости вращения $\boldsymbol{\omega}$.

Если в электромагнитном поле $\mathbf{E} \neq 0$, а $\mathbf{B} = 0$, то говорят об электрическом поле; если же $\mathbf{E} = 0$, а $\mathbf{B} \neq 0$, то поле называется магнитным. Из уравнения (94) мы видим, что это разделение полей является чисто условным, поскольку векторный потенциал $\mathbf{A}$ входит в обе части полей, и электрическая часть поля может в любой момент перейти в магнитную часть и наоборот. Поэтому иногда говорят, что переменное во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а переменное во времени электрическое поле порождает магнитное поле, хотя это не совсем соответствует механизму формирования полей. На

самом деле поля всегда возникают одновременно и распространяются в виде сферических волн от движущихся зарядов.

В общем случае электромагнитное поле является наложением обоих полей, а иногда представляет собой довольно сложную комбинацию из электрической и магнитной частей единого поля.

Теперь мы также знаем и то, что в основе всех электромагнитных полей любого происхождения лежат рассеянные частицами случайные волны эфира, промодулированные по частоте, величине и поляризации. Характер этой модуляции целиком обусловлен формой движения частиц.