7

Дальнейшее развитие теории Лоренца

Описанный в гл. 6 подход был многообещающим, однако сам по себе он еще не приводил к полной оценке всех факторов, которые связаны с рассматриваемой проблемой. Хотя во времена Лоренца были невозможны непосредственные измерения скорости света с требуемой степенью точности, этот подход все же должен был, очевидно, предсказать, что дали бы такие измерения, если бы они стали возможными (какими они являются теперь). Казалось, что скорость движения Земли v относительно эфира можно было измерить с помощью прецизионного опыта Физо, учитывая члены порядка v^2/c^2 в формуле (3.2).

Чтобы решить эту проблему, Лоренц должен был рассмотреть не только сокращение длины линейки при ее движении в эфире, но и возможный соответствующий эффект для часов (так как для измерения скорости света таким способом нужны *не только* линейка, *но и* часы). Эта проблема довольно-таки сложна, и мы лишь кратко обрисуем ее основные черты.

В качестве типичных часов возьмем гармонический осциллятор, движение которого описывается уравнением

$$m\ddot{x} = -kx,$$

где m — масса осциллятора, а k — коэффициент жесткости. Период осциллятора равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (7.1)$$

Посмотрим сначала, что происходит с массой движущегося электрона. Когда мы ускоряем электрон, вокруг него создается магнитное поле, постепенно возрастающее с увеличением скорости. Как хорошо известно, всякое изменение магнитного поля вызывает появление электрического поля. Согласно закону Ленца, это электрическое поле оказывается таким, что оно *противодействует* электродвижущей силе, вызвавшей первоначальный рост магнитного поля. Иными словами, электромагнитным явлениям свойствен род инерции — электромагнитное поле противится попыткам его изменить, например катушка обладает свойством индуктивности. В случае электрона такая инерция проявляется как сопротивление ускорению. Подробный расчет, который выходит за пределы этой работы, показывает, что на электрон, имеющий ускорение **a**, действует «возвращающая сила»

$$\mathbf{F}_l = -\lambda \mathbf{a}, \qquad (7.2)$$

где λ — постоянная, зависящая от размеров электрона и распределения заряда электрона. (Для медленно движущегося заряда q, равномерно распределенного на сфере радиуса r_0, $\lambda \approx q^2/r_0$.) Уравнение движения такого электрона имеет вид

$$m_m \mathbf{a} = -\lambda \mathbf{a} + \mathbf{F}. \qquad (7.3)$$

Здесь m_m — обычная «механическая» масса, а $\mathbf{F}$ — приложенная сила (не включающая «возвращающей силы» реакции на изменение поля самого электрона). Это уравнение можно переписать в форме

$$(m_m + \lambda)\mathbf{a} = \mathbf{F}, \quad \text{или} \quad m\mathbf{a} = \mathbf{F}, \qquad (7.4)$$

где

$$m = m_m + \lambda.$$

Заметим, что в полученном уравнении движения фигурирует *эффективная масса* m, которую можно также назвать *наблюдаемой массой*. Определяя силу, необходимую для того, чтобы ускорить частицу, мы измеряем именно эту массу. Величина λ носит название «электромагнитной массы», которую необходимо, очевидно, добавить к m_m для получения эффективной массы.

Подобная эффективная масса известна и в гидродинамике, где, как мы видели, летящая пуля увлекает прилегающий слой газа (или жидкости) и, следовательно, больше сопротивляется ускорению, чем такая же пуля, движущаяся в пустоте. Можно сказать, что электромагнитное поле, окружающее электрон, вносит аналогичным образом вклад в его инерцию.

Проведенное рассмотрение говорит о тесной связи между уравнениями механики и электродинамики. Важность этой связи стала бы еще более значительной, если бы мы могли найти способ отделить m_m от λ. Согласно Лоренцу, в принципе должно быть возможным такое отделение. Так, с одной стороны, дальнейшие вычисления, основанные на теории Лоренца, показали, что электромагнитная масса λ является функцией скорости частицы относительно эфира:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \tag{7.5}$$

Здесь λ_0 — электромагнитная масса электрона, покоящегося относительно эфира. С другой стороны, согласно ньютоновским представлениям, механическая масса должна быть константой, не зависящей от скорости. Поэтому эффективную массу можно записать в виде

$$m = m_m + \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \tag{7.6}$$

Исследуя изменения эффективной массы со скоростью, можно отделить механическую массу m_m от электромагнитной массы $\lambda_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Такое исследование действительно было проведено при помощи измерения отношения e/m в катодных лучах. Опыты показали, что эффективная масса действительно возрастает с ростом скорости в $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ раз. Отсюда можно заключить, что либо масса электрона *целиком* электромагнитного происхождения, либо (по неизвестным причинам) чисто механическая масса m_m *также* пропорциональна $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Если говорить лишь о законах механики, то обе эти гипотезы ведут к одинаковым следствиям, так что при настоящем обсуждении нет необходимости разбираться дальше в вопросе происхождения массы. Достаточно отметить, что *в действительности*

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \tag{7.7}$$

где m_0 — наблюдаемая масса частицы, покоящейся относительно эфира.

Так как в часах, движущихся в эфире, масса каждой частицы становится больше, то очевидно, что такие часы должны идти (колебаться) замедленно. Однако для вычисления периода этих часов необходимо было бы учесть не только изменение массы, но и изменение коэффициента упругости k. Для этого потребовалось бы довольно сложное исследование поведения межатомных сил при движении в эфире, что привело бы к слишком длинному обсуждению, дать которое здесь мы не можем.

В результате такого исследования был получен закон

$$k = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

откуда следует

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \tag{7.8}$$

где T_0 — период наших часов, когда они покоятся относительно эфира, а T — их период, когда они движутся в эфире. Итак, замедление хода движущихся относительно эфира часов пропорционально

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \tag{7.9}$$

Исследователь, движущийся вместе с лабораторией, состоит сам также из атомов. Значит, и его тело должно укоротиться во столько же раз, во сколько укоротятся его линейки, так что он не заметит какого-либо изменения. Подобным же образом все физико-химические процессы, протекающие в нем самом, замедлятся во столько же раз, во сколько замедлятся его часы. По-видимому, мыслительные процессы этого исследователя также замедлят свой ход, и он не почувствует изменения скорости хода своих часов. Поэтому он будет приписывать своим линейкам ту же длину l_0, которой они обладали, когда покоились относительно эфира, и тот же период T_0 — своим часам. Все это необходимо учитывать при истолковании его экспериментальных результатов.

Вернемся теперь к измерению скорости света по методу Физо. Так как свойства часов и линеек, находящихся в лаборатории, движущейся вместе с поверхностью Земли, изменились, то лучше описывать этот опыт, представив себе, что имеется система отсчета, покоящаяся относительно эфира. В этой системе скорость света равна c. Пусть световой луч проходит через зубчатое колесо в момент $t=0$ в системе отсчета, связанной с эфиром (см. фиг. 2). Предположим, что поверхность Земли, а с ней и лаборатория движутся в эфире со скоростью v. Пусть время, необходимое свету, чтобы пройти от A до зеркала B, от которого он отражается, равно t_1. Имея в виду движение лаборатории, получаем

$$l+vt_1=ct_1, \quad \text{или} \quad t_1=\frac{l}{c-v}. \tag{7.10}$$

Подобным же образом для времени, в течение которого луч проходит обратный путь, найдем

$$t_2=\frac{l}{c+v}$$

и

$$T=t_1+t_2=\frac{2l}{c}\,\frac{1}{1-(v/c)^2}. \tag{7.11}$$

Вспомним теперь, однако, что истинная длина линейки сократилась до

$$l=l_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

в то время как период часов достиг величины

$$T=\frac{T_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (7.11), получаем

$$\frac{T_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}=\frac{2l_0}{c}\,\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}},$$

или

$$T_0=\frac{2l_0}{c}. \tag{7.12}$$

Найденный результат не зависит от скорости лаборатории относительно эфира. Но если наблюдатель, находящийся в лаборатории, не знает, что происходит с его линейками и часами, и измеряет скорость света в предположении, что они неизменны, он, конечно, также найдет эту скорость равной $2l_0/T_0$. Мы доказали, таким образом, что ввиду лоренцева сокращения и замедления хода часов *все наблюдатели при измерении скорости света по методу Физо получат один и тот же результат*, если каждый из них считает, что его аппаратура работает правильно. Отсюда ясно, что *опыт Физо нельзя использовать для определения скорости движения Земли относительно эфира*, так как результат опыта не зависит от этой скорости.