
РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕМАТИКА

В предыдущем изложении основных законов электродинамики умышленно обходились вопросы, связанные с выбором системы отсчета координат и времени, к которой эти законы относились. Не затрагивалась и проблема перехода от одной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой. Приступая к анализу этих вопросов, следует признать, что опираться при этом можно лишь на достижения механики, под влиянием которых и формировались представления человечества о пространстве и времени. Развитие механики убеждает в полном равноправии всех инерциальных систем отсчета, что нашло свое отражение в известном принципе относительности Галилея. Согласно этому принципу, уравнения механики Ньютона имеют один и тот же вид во всех инерциальных системах отсчета, или, как говорят, являются ковариантными* относительно преобразований Галилея, осуществляющих переход от одной инерциальной системы отсчета к другой.

В связи с этим было бы естественно ожидать, что и в электродинамике равноправие инерциальных систем отсчета не будет нарушено, т. е. уравнения Максвелла—Лоренца имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Однако положение оказалось не столь простым, как это представлялось на первый взгляд, и расширение принципа относительности на электродинамику потребовало пересмотра установившихся представлений о пространстве и времени**. Чтобы понять суть возникших противоречий, рассмотрим более подробно принцип относительности Галилея в классической механике.

§ 62. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ И ГИПОТЕЗА ЭФИРА

Принцип относительности Галилея опирается на два основных допущения:

1) время является абсолютным, т. е. единым для всех инерциальных систем отсчета;

* О понятиях ковариантности и инвариантности см. приложение, а также в кн.: Бергман П. Г. Введение в теорию относительности. М., 1947. Гл. 2.

** Отметим, что под принципом относительности здесь понимается общее утверждение о равноправии при описании законов природы всех инерциальных систем отсчета вне зависимости от используемых преобразований пространственно-временных координат.

2) скорости складываются как эвклидовы векторы.

Из этих допущений и вытекают известные преобразования Галилея, связывающие между собой две инерциальные системы отсчета. Пусть, например, система отсчета Σ' движется относительно системы отсчета Σ со скоростью \mathbf{v} . Считая оси координат в обеих системах параллельными и совпадающими в момент времени $t=0$ (рис. 62.1), имеем

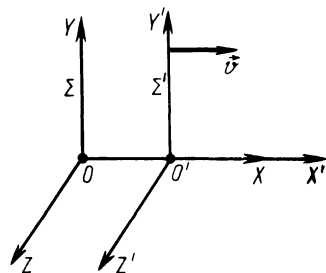


Рис. 62.1

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{v}t, \quad t' = t,$$

или, направляя ось X вдоль \mathbf{v} ,

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (62.1)$$

Нетрудно убедиться, что преобразования Галилея (62.1) являются прямым следствием соотношения $t' = t$, выражающего абсолютный характер времени, и закона сложения скоростей:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z, \quad (62.2)$$

или в векторной форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}' + \mathbf{v},$$

где $\mathbf{u} = d\mathbf{r}/dt$ и $\mathbf{u}' = d\mathbf{r}'/dt'$ — скорости материальной точки в системах Σ и Σ' соответственно.

Рассмотрим уравнения механики Ньютона для замкнутой системы материальных точек с массами m_i , между которыми действуют силы \mathbf{F}_{ik} ($i \neq k$), зависящие от относительных расстояний:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{k \neq i} \mathbf{F}_{ik}(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i). \quad (62.3)$$

Замечая, что ускорения точек, а также относительные расстояния являются инвариантами преобразований Галилея

$$d^2 \mathbf{r}_i / dt^2 = d^2 \mathbf{r}'_i / dt'^2, \quad \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k = \mathbf{r}'_i - \mathbf{r}'_k, \quad (62.4)$$

убеждаемся, что уравнения (62.3) инвариантны относительно этих преобразований. Однако в случае действия произвольных сил уравнения Ньютона только ковариантны по отношению к преобразованиям Галилея и неинвариантны силы следует при этом рассматривать как внешние, т. е. механическую систему нельзя считать замкнутой.

Задача 62.1. Из требования ковариантности силы Лоренца относительно преобразований Галилея вывести закон преобразования электромагнитных полей \mathbf{E} и \mathbf{B} .

Что касается уравнений электродинамики Максвелла — Лоренца, то они оказались нековариантными относительно

преобразований Галилея, а все попытки получить желанную ковариантность, как-то изменив форму уравнений, не принесли успеха, ибо приводили к противоречию с опытом*.

Задача 62.2. Убедиться в нековариантности относительно преобразований Галилея волнового уравнения и уравнений электродинамики Максвелла — Лоренца.

Нековариантность уравнений электродинамики по отношению к преобразованиям Галилея представлялась, однако, естественной с позиций «эфирных» теорий, вводивших гипотетический электромагнитный эфир и рассматривавших электромагнитное поле как особого рода натяжения в нем (по аналогии с натяжениями в упругой среде). Подобное представление об электромагнитном поле было еще у Максвелла. Фактически его придерживался и Лоренц, считавший электромагнитное поле особым состоянием электромагнитного эфира, покаящегося относительно некоторой выделенной системы отсчета.

Если принять существование электромагнитного эфира, то очевидно, что уравнения Максвелла — Лоренца могут быть справедливыми лишь в единственной системе отсчета, связанной с эфиром. Во всякой другой системе отсчета эфир будет двигаться, а это должно сказаться на уравнениях поля. Иначе говоря, в любой «эфирной» теории предполагается существование «эфирного ветра», а это означает, что в уравнениях поля должна содержаться в качестве параметра скорость рассматриваемой системы отсчета относительно эфира. Таким образом, представление об эфире оказывается несовместимым с принципом относительности Галилея, в чем наглядно убеждает следующий мысленный эксперимент.

Рассмотрим электромагнитную волну, порождаемую точечным источником света в момент времени $t=0$, и выясним, как будет выглядеть ее распространение в двух инерциальных системах отсчета, движущихся друг относительно друга со скоростью v . Пусть, скажем, система Σ связана с неподвижным эфиром, а система Σ' движется вдоль оси X со скоростью v , так что в момент $t=0$ их начала отсчета совпадают с положением источника. Тогда в момент $t=T>0$ свет достигает точек, расположенных на расстоянии $R=cT$ от начала координат $\mathbf{r}=0$. Поэтому в системе Σ уравнение фронта волны имеет вид

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 T^2 = 0. \quad (62.5)$$

* Об одном из таких обобщений уравнений Максвелла, предложенном в 1890 г. Г. Герцем, см.: Франкфурт У. И. Специальная и общая теория относительности. Исторические очерки. М., 1968. С. 6. Очень обстоятельно история создания релятивистской электродинамики изложена в кн.: Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М., 1972.

Однако в системе Σ' к моменту $t=T$ положение источника сместится вдоль оси X на отрезок $-vT$ и уравнение той же волновой поверхности примет вид (рис. 62.2)

$$(x' + vT)^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 T^2 = 0. \quad (62.6)$$

Таким образом, в системах Σ и Σ' уравнение волнового фронта выглядит по-разному. Но, как хорошо известно из теории дифференциальных уравнений в частных производных, волновая поверхность является

характеристической и ее вид определяется только коэффициентами соответствующих уравнений. Поэтому уравнения электромагнитного поля, в результате решения которых и получаются соответствующие волновые фронты (62.5) и (62.6), также должны выглядеть по-разному, что говорит об их нековариантности*.

Итак, «эфирная» концепция электромагнитного поля отрицает принцип относительности Галилея и допускает возможность опытного обнаружения эфирного ветра. В конце прошлого века «эфирная» концепция считалась единственно возможной и для обнаружения эфирного ветра были поставлены многочисленные эксперименты, на важнейших из которых мы и остановимся.

§ 63. ПОПЫТКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭФИРНОГО ВЕТРА

Вопрос о возможности обнаружения движения относительно эфира стал обсуждаться еще в первой половине прошлого века**, т. е. до создания Максвеллом электромагнитной теории света. Возник этот вопрос в оптике, где к тому времени на смену корпускулярной теории света Ньютона пришли волновые представления Гюйгенса—Френеля, согласно которым свет рассматривался как возмущение в эфире, распространяющееся в нем наподобие волн в твердом теле. Из многочисленных экспериментов, касающихся проверки «эфирной» концепции, мы остановимся лишь на двух—опытах *А. И. Физо* и *А. Майкельсона*.

Опыт Физо был поставлен в 1851 г., т. е. до появления теории Максвелла, с целью обнаружить возможное увлечение светового эфира движущимся телом. Схема опыта следующая (рис. 63.1). Световой луч от источника S с помощью полупрозрачной посеребренной пластинки a расщепляется на два луча,

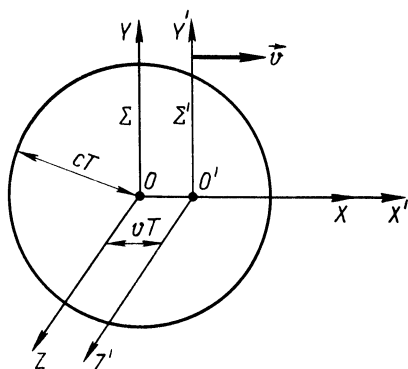


Рис. 62.2

* См. также задачу 62.2.

** См.: *Лоренц Г. А.* Теории и модели эфира. М.—Л., 1936.