

Обычная форма уравнений Максвелла относится к какой-то инерциальной системе отсчета. Само собой разумеется (и это всегда предполагалось, даже и до теории относительности), что существует по крайней мере одна система отсчета, которая является инерциальной в смысле механики и в которой в то же время справедливы уравнения Максвелла. К этой инерциальной системе относится и закон распространения фронта электромагнитной волны в форме

$$\frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 - \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 \right] = 0. \quad (5.01)$$

Систему отсчета, в которой закон распространения фронта электромагнитной волны имеет вид (5.01), можно назвать инерциальной в электромагнитном смысле. Просто инерциальной системой мы будем называть систему отсчета, инерциальную как в механическом, так и в электромагнитном смысле.

Таким образом, инерциальная система отсчета, по принятому здесь определению, характеризуется следующими двумя свойствами:

1. В инерциальной системе тело при отсутствии сил движется прямолинейно и равномерно (инерциальность в обычном механическом смысле).

2. В инерциальной системе уравнение распространения фронта электромагнитной волны имеет вид (5.01) (инерциальность в отношении поля).

Мы говорили здесь о законе распространения фронта *электромагнитной* волны и, тем самым, как бы отдавали предпочтение электромагнитному полю перед другими полями. Это предпочтение, однако, только кажущееся. На самом деле, предельная скорость распространения полей любой природы должна быть одной и той же, в силу чего уравнение (5.01) имеет универсальный характер. Этот вопрос будет подробнее освещен в следующем параграфе.

§ 6. Основные положения теории относительности

Основной постулат теории относительности (называемый также принципом относительности) утверждает независимость явлений от неускоренного движения замкнутой системы, внутри которой они происходят.

Попытаемся уточнить содержание этого постулата *).

Пусть имеется замкнутая система материальных тел, внутри которой происходят различного рода процессы (механические, электромагнитные и любые другие). Будем описывать состояние этой системы тел (включая входящие в нее поля электромагнитной и другой природы) по отношению к той или иной системе отсчета (к тому или иному „базису“ в смысле § 2). Рассмотрим два базиса **). Пусть

*) См. Л. И. Мандельштам [6].

***) Чтобы не путать „систему тел“ с „системой отсчета“, мы будем здесь вместо „системы отсчета“ говорить „базис“.

первый представляет инерциальную систему отсчета, а второй движется относительно первого прямолинейно и равномерно. Фиксируем начальное состояние системы по отношению к первому базису (под словом „начальное“ мы разумеем здесь „относящееся к началу времени по часам данного базиса“). Вообразим себе теперь второй экземпляр нашей системы тел, начальное состояние которого по отношению ко второму базису в точности такое же, как начальное состояние первого экземпляра системы по отношению к первому базису. (Слово „начальное“ понимается каждый раз в соответствующем смысле.) Тогда можно поставить вопрос о сравнении дальнейшего хода процессов в первом экземпляре системы по отношению к первому базису с ходом процессов во втором экземпляре системы по отношению ко второму базису.

Принцип относительности утверждает, что в обоих случаях процессы будут идти совершенно одинаковым образом (поскольку они вообще детерминированы). Если процесс в первом экземпляре системы описывается посредством некоторых функций от координат и времени первого базиса, то процесс во второй системе будет описываться посредством *тех же самых функций* от координат и времени второго базиса.

Менее точно, но более наглядно, можно сказать, что *равномерное и прямолинейное движение материальной системы как целого не влияет на ход процессов, происходящих внутри системы.*

Многие законы природы, управляющие ходом различных физических процессов, формулируются при помощи дифференциальных уравнений, вид которых не зависит от начального состояния системы; начальные условия присоединяются к ним дополнительно. Таковы, например, уравнения движения механики, уравнения электромагнитного поля и связанное с ними уравнение распространения фронта электромагнитной волны. Из принципа относительности вытекает, что математическая форма таких законов должна быть одинакова как в исходной инерциальной системе отсчета, так и в любой другой, движущейся относительно нее равномерно и прямолинейно. Припоминая наше определение инерциальной системы отсчета (инерциальность в механическом смысле и в отношении поля), можно вывести отсюда следующее важное заключение. *Если дана инерциальная система отсчета, то всякая другая система отсчета, которая движется относительно нее прямолинейно и равномерно, сама является инерциальной.* Это положение послужит основой для вывода формул, связывающих координаты и время в двух неускоренно движущихся системах отсчета.

Принцип относительности подтверждается всей совокупностью наших знаний о природе. В области механики он был известен уже давно (принцип относительности Галилея). Заслугою Эйнштейна является распространение его на все явления (в первую очередь на электромагнитные) и вывод из него следствий, относящихся к природе и взаимной связи пространства и времени.

Теория относительности может быть построена на основе двух постулатов: принципа относительности и принципа независимости скорости света от скорости источника. Второй из этих принципов учтен нами с самого начала, так как мы положили в основу нашего построения теории закон распространения фронта электромагнитной волны. Независимость скорости света от скорости источника непосредственно вытекает из этого закона.

Здесь уместно дать обобщенное толкование закону распространения фронта волны и формулировать следующее общее положение.

Существует предельная скорость распространения всякого рода действий. Эта скорость численно равна скорости света в свободном пространстве.

Значение этого принципа связано с тем, что в определении понятий, относящихся к пространству и времени, фундаментальную роль играет передача сигналов с предельной скоростью. На существовании таких сигналов основано самое понятие определенной системы отсчета, которая служит для описания явлений в пространстве и времени. В § 2 мы рассматривали способы определения положения тел в пространстве, основанные на применении световых и вообще электромагнитных сигналов. В принципе возможна, однако, передача сигналов не только при помощи электромагнитных волн, но и при помощи волн другой природы. Можно, например, представить себе передачу сигналов при помощи предельно быстрых частиц и соответствующих им в смысле квантовой механики волн материи. Мыслимо также (хотя практически и неосуществимо) использование гравитационных волн, существование которых вытекает из теории тяготения Эйнштейна (см. § 90). Не исключено открытие каких-либо новых полей, способных передавать сигналы. Поэтому возникает вопрос: является ли понятие о системе отсчета, основанное на использовании одних только световых сигналов, достаточно общим? Ведь если бы существовали сигналы, идущие с большей скоростью, или даже мгновенные сигналы, то понятие о системе отсчета, основанное на законах распространения света, не отражало бы в должной мере свойств пространства и времени, а являлось бы, самое большее, одним из возможных.

Формулированный выше принцип, утверждающий существование общего предела для скорости передачи каких бы то ни было действий и сигналов, придает скорости света универсальное значение, не связанное с частными свойствами агента, передающего сигналы, а отражающее некоторое объективное свойство пространства и времени.

Этот принцип находится в логической связи с принципом относительности. В самом деле, если бы не существовало единой предельной скорости, а различные агенты (например, свет и тяготение) распространялись бы в пустоте с различными скоростями, то принцип относительности был бы нарушен по крайней мере по отношению к одному из этих агентов.

Математически принцип существования общей предельной скорости может быть уточнен следующим образом.

Уравнение распространения фронта волны любой природы, идущей с предельной скоростью и способной передавать сигнал, совпадает с уравнением распространения фронта световой волны в свободном пространстве.

Таким образом, уравнение

$$\frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 - (\text{grad } \omega)^2 = 0 \quad (6.01)$$

приобретает общий характер; оно является более общим, чем уравнения Максвелла, из которых оно нами выведено. На основании только что сформулированного принципа существования общей предельной скорости можно утверждать следующее. Дифференциальные уравнения для любого поля, способного передавать сигнал, должны быть таковы, чтобы соответствующие уравнения характеристик совпадали с уравнением характеристик для световой волны*).

Как мы увидим в главах V—VII, наличие гравитационного поля несколько изменяет вид уравнения характеристик, и оно будет несколько отличаться от (6.01). Но и тогда одно и то же уравнение характеристик дает закон распространения фронта волн любой природы, идущих с предельной скоростью, в том числе световых и гравитационных.

Уравнение (6.01) положено нами (наряду с прямолинейностью и равномерностью движения тела в отсутствии сил) в основу определения инерциальной системы отсчета.

Формулированный выше принцип, утверждающий универсальность этого уравнения, показывает, что такое определение инерциальной системы отсчета действительно целесообразно.

§ 7. Преобразование Галилея и необходимость его обобщения

Пусть одно и то же явление описывается в двух системах отсчета, из которых одна является инерциальной, а другая движется относительно нее равномерно и прямолинейно (согласно принципу относительности она сама будет инерциальной). Возникает вопрос о пересчете от описания явления в одной системе отсчета к описанию того же явления в другой системе. В качестве грубой иллюстрации можно представить себе две радиолокационные установки: одну — расположенную на земле, а другую — на самолете; вопрос состоит тогда в пересчете от показаний одной установки к показаниям другой.

Для такого пересчета нужно прежде всего знать связь между координатами и временем x, y, z, t в одной системе отсчета и координатами и временем x', y', z', t' в другой системе. Старая физика

*) Близкая к нашей формулировка основных положений теории относительности, как теории „абсолютных“ свойств пространства и времени, имеется в работах А. Д. Александрова [2], [3].