шем. Как бы то ни было, не может быть приемлемой теория, не учитывающая принцип относительности, — принцип, который не опровергается ни одним экспериментальным фактом.

§ 5. О двух произвольных гипотезах, неявно содержащихся в привычных понятиях времени и пространства

Мы видели, что, допуская существование эфира, мы экспериментальным путем пришли к необходимости рассматривать эту среду как неподвижную. Затем мы видели, что обоснованная таким образом теория позволяет предсказать основные экспериментальные факты. Тем не менее она имеет один пробел: она не признает принципа относительности, что находится в противоречии с экспериментальными данными. Таким образом, возникает вопрос: нельзя ли согласовать основные положения теории Лоренца с принципом относительности? Первым шагом к этому является отказ от гипотезы эфира. В самом деле, с одной стороны, мы должны были признать неподвижность эфира; с другой стороны, принцип относительности требует, чтобы законы явлений природы, отнесенные к системе отсчета S', находящейся в равномерном движении, были идентичны законам тех же явлений, отнесенных к системе отсчета S, неподвижной по отношению к эфиру. Поэтому нет оснований допускать, как этого требуют теория и эксперимент, существование эфира, неподвижного по отношению к системе S, не делая такого допущения по отношению к системе S'. Эти две системы отсчета не могут отличаться одна от другой; признавая это, нелепо отводить особую роль одной из систем, считая ее неподвижной по отношению к эфиру. Отсюда следует, что нельзя создать удовлетворительную теорию, не отказавшись от существования некоей среды, заполняющей все пространство. Таков первый шаг.

Чтобы сделать второй шаг, необходимо примирить принцип относительности с основным следствием теории Лоренца, так как отказаться от этого следствия — означало бы отказаться от основ этой теории. Вот это следствие.

Скорость $\mathfrak{s}$ *светового луча в пустоте постоянна, причем она не зависит от движения излучающего тела.*

В § 6 это следствие мы возведем в принцип. Для краткости будем называть его в дальнейшем *принципом постоянства скорости света.*

В теории Лоренца этот принцип справедлив только для одной системы в особом состоянии движения: в самом деле, необходимо, чтобы система находилась в покое относительно эфира. Если мы хотим сохранить принцип относительности, мы обязаны допустить справедливость принципа постоянства скорости света для любой системы, движущейся без ускорения. На первый взгляд это кажется невозможным. Действительно, рассмотрим луч света, распространяющийся по отношению к системе отсчета S со скоростью c, и предположим, что мы хотели бы определить скорость его распространения по отношению к системе отсчета S', находящейся в состоянии равномерного прямолинейного движения относительно первой. Применяя правило сложения скоростей (правило параллелограмма скоростей), мы получим в общем случае скорость, отличную от c; иначе говоря, принцип постоянства скорости света, справедливый по отношению к S, неприменим в системе S'.

Чтобы теория, основанная на этих двух принципах, не приводила к противоречивым выводам, необходимо отказаться от привычного правила сложения скоростей, или, что лучше, заменить его другим. Как бы это правило ни казалось на первый взгляд хорошо обоснованным, тем не менее в нем скрыто не меньше двух произвольных гипотез, которые, как мы это увидим, управляют всей кинематикой. Эти гипотезы и заставляли считать, что с помощью законов преобразований (1) можно показать несовместимость теории Лоренца с принципом относительности.

Первая из гипотез касается физического понятия измерения времени. Чтобы измерить время, мы пользуемся часами. Что такое часы? Под часами мы подразумеваем любое устройство, которое характеризует явление, периодически проходящее через одни и те же фазы, причем, в силу достаточной наглядности этого процесса, мы вынуждены признать, что все происходящее во время данного периода идентично всему, что происходит во время любого периода[1]. Если часами является механизм, имеющий стрелки, то, отмечая положение стрелок, мы тем самым отсчитываем число прошедших периодов. По определению, измерить отрезок времени — значит отсчитать количество периодов, показываемых часами от начала до конца какого-либо события.

Это определение абсолютно ясно, пока часы находятся настолько

[1]Мы высказываем постулат, что два идентичных явления имеют одинаковую длительность. Таким образом, определенные идеальные часы играют в измерении времени ту же роль, что и идеальный масштаб при измерении длины.

близко от места, где происходит событие, что можно одновременно наблюдать и часы, и событие. Если же предположить, что событие происходит на некотором расстоянии от местонахождения часов, немедленное сопоставление отдельных фаз явления и различных положений часовых стрелок становится невозможным. Из этого следует, что определение не полно: оно нуждается в дополнении. До настоящего времени это дополнение производилось бессознательно.

Чтобы узнать время в каждой точке пространства, мы можем представить себе пространство заполненным огромным количеством часов, причем все часы должны быть совершенно одинаковыми. Рассмотрим точки A, B, C, ..., в каждой из которых находятся часы, и которые отнесены с помощью независящих от времени координат к системе отсчета, не находящейся в ускоренном движении. В этом случае можно определить время всюду, где мы позаботились поместить часы. Если часов взято достаточно много, так чтобы на каждые из них приходился по возможности меньший участок пространства, то мы сможем определить время в любом месте пространства с какой угодно точностью. Однако, действуя подобным образом, мы не получаем такого определения времени, которое открывало бы для физика достаточно широкие возможности. Действительно, мы не сказали, каково должно быть положение стрелок в данный момент в разных точках пространства. Мы забыли синхронизировать наши часы и поэтому ясно, что промежутки времени, проходящие в течение какого-либо события, имеющего определенную длительность, будут различны в зависимости от того, в каких точках пространства происходит событие. Так, например, будет обстоять дело при изучении движения материальной точки, траектория которой проходит через точки A, B, C, ... При прохождении материальной точки через A, фиксируем на находящихся в этой точке часах момент времени t_A. Таким же образом зафиксируем моменты t_B и t_C прохождения материальной точки через B и C. Поскольку к тому же координаты точек A, B, C, ... можно определить непосредственно с помощью градуированного масштаба, можно, например, сопоставляя координаты x_A, y_A, z_A, ... точек A, B, C, ... и моменты времени $t_A, t_B, t_C, \ldots$, получить координаты x, y, z движущейся материальной точки как функции переменной t, которую мы будем называть временем. Ясно, что форма этой функции зависит в основном от того, каким образом были установлены эти часы, когда их поместили в соответствующие места.

Для того, чтобы получить полное физическое определение времени, необходимо сделать еще один шаг. Надо сказать, каким образом все часы были выверены в начале эксперимента. Поступим следующим образом: во-первых, найдем способ передавать сигналы, например, из A в B или из B в A. Этот способ должен быть таким, чтобы мы были абсолютно уверены, что явления передачи сигналов из A в B нисколько не отличаются от явлений передачи сигналов из B в A. В этом случае очевидно, что существует только одна возможность поставить часы в точке B по часам в A так, чтобы сигнал, идущий из A в B, проходил бы этот путь за то же время, измеренное с помощью этих же часов, что и сигнал, идущий из B в A.

Если ввести обозначения:

t_A — показание часов в точке A в момент, когда сигнал AB выходит из A,

t_B — показание часов в точке A в момент, когда сигнал AB приходит в B,

$t_{B'}$ — показание часов в точке B в момент, когда сигнал BA выходит из B,

$t_{A'}$ — показание часов в точке B в момент, когда сигнал BA приходит в A,

то можно поставить часы, находящиеся в B, по часам в A таким образом, что

$$t_B - t_A = t_{A'} - t_{B'}.$$

В качестве сигналов можно использовать, например, звуковые волны, которые распространяются между A и B, проходя через среду, неподвижную[1] по отношению к этим точкам.

С неменьшим успехом можно пользоваться световыми лучами, распространяющимися в пустоте или в однородной среде, неподвижной по отношению к A и B. Оба этих способа передачи сигналов одинаково приемлемы. Если же, пользуясь и тем и другим способом, мы получим различные результаты, это будет объясняться тем, что, по крайней мере, в одном из способов условие эквивалентности путей AB и BA не соблюдается.

Тем не менее, среди всех возможных способов передачи сигналов мы отдаем предпочтение тем из них, где используются световые лучи,

[1]Среда должна быть неподвижной или, по крайней мере, скорость среды не должна иметь компоненты в направлении AB, чтобы пути AB и BA были эквивалентны.

распространяющиеся в пустоте. Дело в том, что синхронизация часов требует эквивалентности пути туда и пути обратно; в этом же случае мы будем иметь эту эквивалентность по определению, так как, в силу принципа постоянства скорости света, в пустоте свет распространяется всегда со скоростью c.

Итак, мы должны синхронизовать наши часы таким образом, чтобы время, необходимое световому сигналу для прохождения пути из A в B, равнялось времени, за которое он проходит обратный путь из B в A.

Теперь мы располагаем вполне определенным методом проверки одних часов относительно других. Как только часы выверены, мы говорим, что они идут в фазе. Далее, если мы будем последовательно выверять часы B по часам A, часы C по часам B, ... , мы получим ряд часов, идущих в фазе с предшествующими. Более того, в силу принципа постоянства скорости света две пары любых часов этой совокупности, не находящихся рядом, должны быть в фазе.

Совокупность показаний всех этих часов, идущих в фазе друг с другом, и составит то, что мы называем физическим временем.

Предполагаемое событие, сосредоточенное в одной точке и обладающее минимальной длительностью, называется *элементарным событием.* Показание часов, расположенных в максимальной близости от происходящего события, снятое в момент, когда это событие происходит, называется координатой времени элементарного события. Таким образом, элементарное действие определено четырьмя координатами: координатой времени и тремя координатами, определяющими положение в пространстве точки, где по предположению происходит событие.

Благодаря нашему физическому определению времени, мы можем придать вполне определенный смысл понятиям одновременности или неодновременности двух событий, происходящих в удаленных друг от друга местах. Таким же образом введение координат x, y, z точки придает вполне определенный смысл понятию положения. Так, например, сказать, что абсцисса точки P, расположенной на оси абсцисс, есть x, значит сказать, что если, следуя правилу, откладывать от начала координат единичный стержень x раз, то мы непременно должны попасть в точку P. Подобным же образом поступают, чтобы установить положение точки, если все три координаты отличны от нуля: только операции будут несколько сложнее. Как бы то ни было, указание отдельных координат связывается со вполне определенным экспериментом, относящимся к измерению положения твердых тел[1].

Необходимо сделать следующее важное замечание: для определения физического времени по отношению к данной системе координат мы воспользовались группой часов, находящихся в состоянии покоя относительно этой системы. Согласно этому определению, показание времени или констатация одновременности двух событий будут иметь смысл только в том случае, если известно движение этой группы часов или системы координат.

Пусть даны две системы координат S и S', движущиеся равномерно и прямолинейно одна относительно другой. Предположим, что с каждой из этих двух систем связана группа часов, причем все часы, принадлежащие к одной и той же системе, идут в фазе. В этих условиях показания группы часов, связанной с S, определяют физическое время по отношению к системе отсчета S; подобным же образом показания группы часов, связанной с системой отсчета S', определяют физическое время по отношению к S'. Любое элементарное событие будет иметь координату времени t по отношению к системе отсчета S и координату времени t' по отношению к S'. ***Итак, мы не имеем права априори предположить, что можно выверить часы двух групп таким образом, что обе координаты времени элементарного события были бы одинаковы, иными словами,*** чтобы t было равно t'. Предположить это значило бы ввести произвольную гипотезу. Вплоть до настоящего времени эта гипотеза вводилась в кинематике.

Вторая произвольная гипотеза, введенная в кинематику, относится к конфигурации движущегося тела. Рассмотрим стержень AB, движущийся в направлении своей оси со скоростью V относительно системы отсчета S, не находящейся в ускоренном движении. Что следует понимать под «длиной стержня»? Вначале были попытки считать, что это понятие не требует специального определения. Ошибочность этой попытки будет ясно видна, если рассмотреть следующие два метода определения длины стержня.

[1]Мы не утверждаем, что координаты времени и пространства обязательно должны быть определены таким образом, что их определения могли бы служить основой для экспериментальных методов измерения этих координат, как это описано выше. Тем не менее, всякий раз, когда величины t, x, y, z вводятся в качестве чисто математических переменных в физические уравнения, последние будут правильны только в том случае, если эти переменные могут быть из них исключены.

1. Движение наблюдателя, обладающего масштабом, ускоряется до тех пор, пока его скорость не будет равна V, т. е. до тех пор, пока он будет неподвижен по отношению к стержню. После этого наблюдатель измеряет длину AB, последовательно прикладывая свой масштаб к стержню.

2. С помощью группы синхронизованных часов, неподвижных по отношению к системе отсчета S, определяют точки P_1 и P_2 системы S, где в момент t находятся оба конца стержня. После этого определяют длину прямой, соединяющей точки P_1 и P_2, последовательно прикладывая масштаб к линии P_1P_2, которая предполагается материальной.

Очевидно, что полученные в том и в другом случае результаты можно с некоторым основанием рассматривать как «длину стержня». Однако, априори отнюдь не ясно, что эти две операции непременно должны приводить к одному и тому же численному значению длины стержня. Все, что можно вывести из принципа относительности, и это легко доказывается, — это то, что эти два метода приводят к одному и тому же численному значению, если стержень AB неподвижен относительно системы отсчета S. Тем не менее, абсолютно невозможно утверждать, что второй метод дает выражение для длины, не зависящее от скорости V стержня.

В более общем виде это можно сформулировать следующим образом: при определении конфигурации тела, движущегося равномерно и прямолинейно по отношению к системе S, обычными геометрическими методами, т. е. с помощью масштаба или других твердых тел, движущихся точно таким же образом, результаты измерений не будут зависеть от скорости V равномерного и прямолинейного движения. Такого рода измерения дают нам то, что мы называем *геометрической конфигурацией тела.* Если же, напротив, в системе S отмечают положение различных точек тела в данный момент и геометрическими измерениями с помощью масштаба, неподвижного по отношению к системе S, определяют конфигурацию, образованную этими точками, то в результате получают то, что мы называем *кинематической конфигурацией* тела относительно системы S.

Итак, вторая неосознанная гипотеза в кинематике может быть выражена так: конфигурация кинематическая и конфигурация геометрическая идентичны.