11

Анализ понятий пространства и времени на языке систем отсчета

Мы увидели в предыдущей главе, что как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения прежние представления о пространстве и времени завели нас в тупик в отношении фундаментальных вопросов, связанных с сущностью понятий, лежащих в основе как физики, так и большей части нашей повседневной технической и индустриальной деятельности. Возникла новая по своему характеру проблема. Дело в том, что теорию Лоренца нельзя было обвинить в несогласии с опытом. Напротив, эта теория подтверждалась всей совокупностью экспериментальных данных, полученных во времена Лоренца, да и данными всех последующих экспериментов. Трудность состояла в том, что входящие в теорию Лоренца *фундаментальные понятия,* т. е. «истинное» время и «истинные» пространственные координаты, измеряемые приборами, покоящимися относительно эфира, оказались *совершенно неопределенными.* Мы обнаружили, что из самой теории Лоренца следует невозможность приведения показаний лабораторной аппаратуры к «истинным» пространственным и временно́й координатам. Но если эти свойства «эфирной» системы отсчета выпадают из результатов наблюдений, то *ничего не изменится, если мы станем считать, что такой системы вообще не существует.*

Конечно, если бы оказалось, что какие-то свойства эфира подлаются наблюдению, то эфир следовало бы снова признать физической реальностью. Но так как невозможно наблюдать *ни одного* из его свойств, то можно сказать, что вся его роль сводится к тому, чтобы быть носителем тех понятий абсолютных пространства и времени, на которых основывается ньютоновская механика. Более того, попытки соотнести эти последние понятия с наблюдаемой реальностью привели, как мы видели, к такой путанице, что стало вообще не ясно, какой смысл вкладывать в понятия пространства и времени вообще и для чего служат эти фундаментальные понятия.

Представляется очевидным, что необходимо найти новый подход ко всей проблеме, который исходил бы не из гипотезы эфира, не поддающейся проверке, а, насколько это возможно, из твердо установленных фактов и из тех гипотез, которые могут быть экспериментально проверены, по крайней мере *в принципе*. Чтобы расчистить путь для такого подхода, приступим к предварительному анализу некоторых основных фактов, на базе которых мы пользуемся пространственными и временно́й координатами.

Первое обстоятельство, затрагивающее поставленный вопрос, состоит в том, что пространственные и временна́я координаты описывают *взаимосвязи* предметов и событий с некоторым типом измерительных приборов, сделанных самими экспериментаторами. Например, чтобы измерить длину какого-то предмета, требуется достаточно жесткая линейка, и мы должны (приближенно) найти, на сколько делений этой линейки отстоят друг от друга начало и конец предмета. В ином случае можно наблюдать этот предмет в телескоп и измерять тот угол, под которым виден предмет, считая, что свет распространяется по прямой. Проведя наблюдения из ряда точек, расстояния между которыми известны, можно затем вычислить длину предмета, пользуясь геометрией Евклида. Что касается измерения времени, то нам, конечно, понадобятся какие-нибудь часы, которые могут содержать маятник или гармонический осциллятор. Кроме того, в качестве часов можно использовать какой-нибудь естественный процесс, например период вращения Земли вокруг оси или время полураспада какого-либо радиоактивного элемента.

Безусловно, недостаточно говорить лишь о результатах какого-то отдельного измерения. Наши измерения приобретают реальную значимость только благодаря тому, что, наблюдая пространственные и временные отрезки разными способами при помощи различных методов и инструментов, мы получаем согласующиеся результаты. Например, измеряя один и тот же предмет разными линейками, получаем одно и то же значение его длины с точностью до тех погрешностей или ошибок, которые свойственны данной линейке. Мы найдем практически то же значение длины этого предмета и в том случае, когда обратимся к методу триангуляции, используя свойства световых лучей, или к другим методам. Этот вывод может показаться очевидным или даже тривиальным, но он тем не менее представляет собой *факт* исключительной важности, и не только для науки, но и для всего нашего существования. Например, возможность производить машины со взаимозаменяемыми частями в конечном счете связана с тем, что при измерении величины одной части мы получаем значение, совпадающее со значением, найденным при измерении другой части, которая, например, должна входить в первую. Было бы нетрудно *вообразить* мир, не содержащий квазитвердых предметов, конечно, тогда такого рода измерения почти не имели бы смысла. В том же мире, где мы реально живем, достаточно широко распространены эти квазитвердые предметы, поэтому такие измерения приобретают большую важность.

При измерении времени мы сталкиваемся с очень похожей ситуацией. Чтобы такое измерение имело привычный для нас смысл, необходимо, чтобы разные приборы и методы могли давать совпадающие результаты, если их применять к одной и той же совокупности событий. Пусть, например, у двух людей есть хорошие часы, и эти люди договорились о встрече. Если они будут следить за временем по своим часам, они *на самом деле* смогут встретиться, т. е. прийти на условленное место так, чтобы не заставить друг друга ждать. Подобным же образом, зная, на который час назначено отправление поезда, и следя за временем по своим часам, вы, вообще говоря, на самом деле попадете на этот поезд. В другом случае, учитывая объективные возможности, можно запланировать количество работы, которое необходимо сделать до захода солнца, и, распланировав по часам отдельные операции, действительно закончить все до наступления темноты. Едва ли стоит подчеркивать важность всеобщего измерения времени для упорядочения и организации нашей жизни как в общественном плане, так и в смысле ее связи с явлениями природы.

Регулярность и порядок, существующие в свойствах пространства, можно отразить в понятии *системы отсчета*. По существу — это упорядоченная координатная сетка, выбранная таким образом, чтобы сделать возможным выражение результатов разных измерений на одном общем языке и облегчить таким образом установление взаимосвязей между этими измерениями. Можно, например, представить себе систему параллельных равноотстоящих друг от друга линий с интервалом, скажем, в 1 *см*. Три такие системы линий как раз требуются для описания трехмерного пространства. Обычно их берут перпендикулярными друг другу, хотя иногда применяются и неортогональные системы линий. Тогда положение точки P определяется заданием трех *координат* x, y, z, по существу указывающих число единичных шагов, которые следует проделать по каждой из трех систем линий, чтобы достигнуть этой точки, исходя из некоторого начала O (само начало выбирается произвольно по некоторому соглашению). Если бы нам потребовалось более точное определение положения точки P, то в принципе мы всегда могли бы разбить нашу сетку на новые достаточно мелкие интервалы.

Стоит подчеркнуть, что в пространстве действительно не существует этих координат, что они являются не более чем воображаемым построением, абстракцией, которую мы вводим из соображений удобства. Тем не менее они обладают определенным объективным содержанием, так как любое число независимых наблюдателей, пользующихся разными методами измерений, найдут одни и те же значения этих координат. Возможность такого согласия — *факт* исключительной важности, выдержавший бесчисленное множество проверок многими поколениями людей. (Заметим, что в том мире, где не было бы квазитвердых предметов, проводимые нами измерения не находились бы в столь постоянном согласии друг с другом.)

Существует, конечно, некоторый произвол в выборе системы координат: например, один наблюдатель может взять ортогональную, а другой — неортогональную системы. Если даже они оба выберут ортогональные системы, то может оказаться, что *различны начала* или *ориентации* осей этих систем. Важно, однако, что разные системы координат связаны друг с другом соответствующими преобразованиями, что позволяет найти координаты любой точки в одной системе координат, если известны координаты *той же точки* в другой системе. Например, пусть координаты точки P в системе A равны x_0, y_0, z_0. В системе B, координатные оси которой параллельны осям системы A, а начало сдвинуто на вектор с компонентами a, b, c, координаты *той же точки* P будут равны

$$\begin{aligned} x &= x_0 - a, \\ y &= y_0 - b, \\ z &= z_0 - c. \end{aligned} \tag{11.1}$$

Если бы наши две системы координат имели общее начало, но система B была бы повернута относительно системы A на угол θ вокруг оси z, то координаты одной и той же точки P в этих двух системах были бы связаны уравнениями

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta, \\ y &= y_0 \cos\theta - x_0 \sin\theta, \\ z &= z_0. \end{aligned} \tag{11.2}$$

В обоих случаях легко проверить, что расстояние между любыми двумя точками P и Q является *инвариантной величиной*, т. е. одинаково зависит от своих аргументов в любой системе координат, получаемой при таких преобразованиях (сдвиге и повороте). Мы просто упоминаем об этом факте, а не приводим доказательства, которые по существу основываются на теореме Пифагора.

Пусть x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 — соответственно координаты точек P и Q в системе B, а x'_1, y'_1, z'_1 и x'_2, y'_2, z'_2 — координаты этих точек в системе A; тогда

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 =$$
$$= (x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2 + (z'_1 - z'_2)^2 = \text{const} = \text{Инвариант}. \tag{11.3}$$

Можно, конечно, найти и преобразования, связывающие ортогональные и неортогональные системы координат, но в неортогональных системах уравнение (11.3) уже не приводит к инвариантной величине. Существуют, однако, более общие инвариантные конструкции, применимые как к ортогональным, так и к неортогональным системам. Они играют важную роль в *общей* теории относительности Эйнштейна. В специальной же теории относительности, которая является предметом нашего изучения, достаточно ограничиться рассмотрением одних только ортогональных систем координат, так что в дальнейшем мы уже не будем обращаться к неортогональным системам пространственных координат.

Существует также *система отсчета времени.* Однако пока мы говорим о механике Ньютона, эта система остается много проще пространственной системы. Пользуясь часами, конечно, можно разделить время на равные отрезки, которые в принципе могут быть сделаны столь малыми, сколь это требуется в каждой конкретной задаче. Число этих отрезков между данным событием и произвольно выбранным началом равно (в должным образом подобранной шкале) временно́й координате этого события. Однако полагают, что для времени существует фактически лишь одна система «координат» (если отвлечься от возможности изменять масштаб измерения времени или переносить начало его отсчета в любой момент по своему выбору). Отсюда следует, что, задав какое-либо событие с временно́й координатой t, измеренной верными часами, мы будем иметь также потенциально существующее бесконечное множество событий, сосуществующих во времени с этим первым. В результате, если наблюдатель правильно организует свой процесс измерения времени, он непременно найдет, что все эти события строго одновременны — ни одно не опережает первое событие и ни одно не отстает от него. Если это так, то имеет смысл приписать всем этим событиям одно и то же значение временно́й координаты t и сказать, что все они *одновременны*.

Конечно, указанное предположение было проверено бесчисленным множеством наблюдений как в обыденной жизни, так и в научном эксперименте. Поэтому люди, находящиеся в разных местах, могут говорить об одновременности совершаемых ими дел, хотя каждый измеряет время по своим часам. В случае, когда люди находятся в разных местах, но в пределах прямой видимости, они могут наблюдать, как каждый из них выполняет запланированные действия. Кроме того, они могут воспользоваться радио- или другими сигналами, чтобы передавать друг другу информацию. Например, два человека, находящиеся на противоположных концах земного диаметра, могут условиться заказать телефонный разговор на определенное время (например, по Гринвичу), и действительно, когда один из них подойдет к телефону, на другом конце провода его будет ждать другой.

Этот жизненный и научный опыт, конечно, зависит от того обстоятельства, что скорость света и радиоволн настолько велика, что в обычных масштабах времени и пространства можно пренебречь тем временем, за которое сигнал доходит из одного места в другое. Это все равно, что принять скорость света равной бесконечности. Если же учесть, что скорость света конечна, то возникают новые проблемы, и мы обратимся к ним в дальнейшем. Ограничиваясь пока понятиями дорелятивистской физики, поставим перед собой цель выяснить подоплеку тех идей, которые в ней заложены; это позволит яснее понять те представления о пространстве и времени, которые сложились к концу девятнадцатого столетия.