

Г Л А В А I

КИНЕМАТИКА

* *

§ 1. Пространство и время

1. Как уже было сказано во введении, в механике *движением* называют изменение положения тела в пространстве с течением времени. Под положением здесь понимается *относительное положение*, т. е. положение тела относительно других тел. Понятие абсолютного положения, т. е. положения тела в каком-то «абсолютном пространстве» безотносительно к другим телам, лишено содержания.

Тело или система тел, относительно которых определяется положение остальных тел, называется *пространственной системой отсчета*.

Утверждение, что два различных не одновременных события произошли в одном и том же месте пространства, лишено содержания, пока не указана система отсчета, в которой события рассматриваются. Пассажир в движущемся железнодорожном вагоне взял из своего чемодана какую-то вещь и спустя некоторое время положил ее обратно. Можно сказать, что он взял и положил эту вещь в одном и том же месте, если за систему отсчета принять движущийся вагон. Но те же два события будут происходить в различных местах, если их рассматривать в системе отсчета, связанной с полотном железной дороги. Например, одно событие внутри вагона могло произойти в Москве, а другое — в Ленинграде.

2. В качестве пространственной системы отсчета можно взять произвольное твердое тело и связать с ним *координатные оси*, например, декартовой прямоугольной системы координат, реализованные в виде трех взаимно перпендикулярных твердых стержней. Положение каждой точки в избранной пространственной системе отсчета можно задавать тремя числами: *координатами точки* x , y , z , представляющими собой расстояния от этой точки до координатных плоскостей YZ , ZX , XY соответственно (рис. 1). Три координаты x , y , z можно объединить в один *направленный отрезок* или *радиус-вектор* r , проведенный из начала координат в рассматриваемую точку. Координаты x , y , z являются его проекциями на координатные оси, а потому

$$r = xi + yj + zk, \quad (1.1)$$

где i, j, k — координатные орты, т. е. единичные векторы, направленные вдоль координатных осей X, Y, Z .

Существуют два вида координатных систем: *правая* и *левая*. Их различают с помощью *правила буравчика*. Будем ввинчивать буравчик с правой нарезкой, вращая его ручку в плоскости XU кратчайшим путем от положительного конца оси X к положительному концу оси Y . В правой системе координат поступательное перемещение буравчика будет происходить в положительном, в левой — в отрицательном направлении оси Z . На рис. 1 представлена правая система, а на рис. 2 — левая. Правая система никакими вращениями не может быть совмещена с левой. Обе системы отличаются друг от друга примерно так же, как правая рука отличается

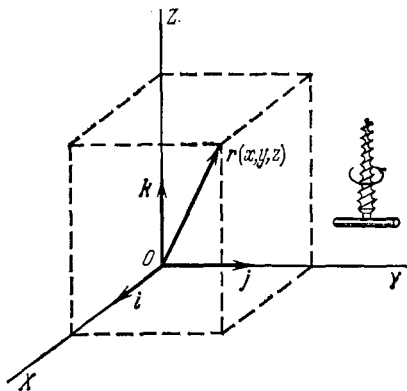


Рис. 1.

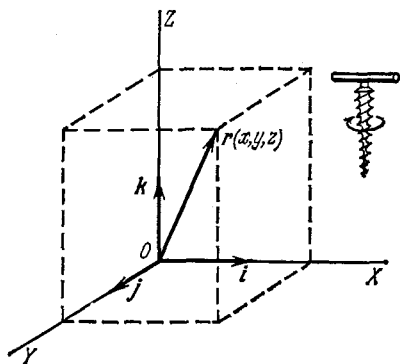


Рис. 2.

от левой. Но правая система переходит в левую, если изменить на противоположное положительное направление одной из координатных осей. То же самое произойдет, если изменить на противоположные положительные направления всех трех осей. Последняя операция называется *инверсией координатных осей* или *отражением в начале координат*. Например, изображением правой системы в плоском зеркале будет левая система, и наоборот. В физике применяется исключительно правая система.

3. Координаты x, y, z , которыми определяется положение точки в избранной системе отсчета, являются какими-то числами. *Количественное определение* этих координат, равно как и *количественное определение всякой физической величины, сводится в конце концов к указанию принципиального способа их измерения*. При этом имеются в виду именно *принципиальные, а не практические* способы измерения. Эти измерения должны лишь разъяснить смысл, точнее, принципиальный способ получения x, y, z , равно как и всяких чисел, с помощью которых количественно характеризуются все физические величины. Поэтому мы можем предполагать, что такие

способы измерения являются *идеальными*, а самые измерения выполняются абсолютно точно. Координаты x , y , z являются длинами, а потому их нахождение сводится к измерению длин, т. е. к определению тех чисел, с помощью которых характеризуются длины. Когда мы говорим об измерении длин, то имеем в виду следующую измерительную операцию. Некоторый твердый стержень условно принимается за эталон, а его длина — за единицу длины. При измерении длины тела в каком-либо направлении определяется число, показывающее, сколько раз в этом направлении в теле укладывается выбранный эталон. Это число и называется длиной тела в рассматриваемом направлении. Если оно не целое, то предварительно длину эталона следует разделить на более мелкие части: десятые, сотые и пр. Используя их наряду с самим эталоном, можно представить длину всякого тела в виде десятичной дроби или целого числа с десятичной дробью.

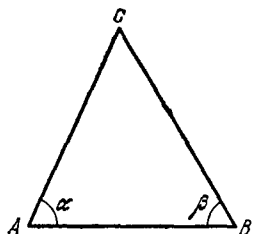


Рис. 3.

4. Измерение длины непосредственным прикладыванием эталона или его частей называется *прямым измерением*. Прямые измерения не всегда возможны. Так, они невозможны при измерении расстояний до удаленных тел, например планет, звезд и других небесных объектов. Они невозможны и при измерении очень малых длин, например таких, с которыми имеет дело физика атома, атомного ядра или элементарных частиц.

Во всех этих случаях применяют *косвенные методы*. Правильность таких методов должна контролироваться прямыми методами (разумеется, в тех случаях, когда последние применимы). За пределами же применимости прямых методов остаются одни только косвенные методы. Здесь прямые измерительные операции, с помощью которых первоначально было введено количественное понятие длины, становятся чисто умозрительными, а косвенные методы фактически играют роль основных принципиальных измерительных операций, которыми раскрывается смысл самих длин, или, точнее, тех чисел, которыми длины характеризуются.

Примером косвенного метода может служить *триангуляция*, применяемая для измерения расстояний до удаленных предметов. Прямым методом измеряют длину «базы» AB (рис. 3), с концов которой делают «засечки» удаленного объекта C , т. е. измеряют углы α и β между базой AB и прямыми AC и BC . По этим данным искомое расстояние до объекта C может быть найдено геометрическим построением или вычислено по формулам геометрии. Если база AB настолько велика, что ее длина не может быть найдена прямым измерением, то можно выбрать более короткую базу и затем найти длину базы AB описанным косвенным методом. Прин-

ципиально это ничего не меняет. Более существенно уяснить теоретическую основу метода. В методе предполагается, что сторонами треугольника ABC являются *прямые линии, подчиняющиеся аксиомам геометрии Евклида*. Но какими материальными объектами реализуются эти стороны? Такими объектами являются световые лучи, приходящие от объекта C к точкам A и B . Следовательно, в основе рассматриваемого способа лежит гипотеза, что световые лучи прямолинейны, т. е. подчиняются тем же аксиомам геометрии Евклида, что и геометрические прямые линии. Но эта гипотеза не очевидна. Доказать или опровергнуть ее можно только опытным путем. При этом имеются в виду световые лучи в вакууме, а не лучи в атмосфере, где они действительно искривляются из-за изменения показателя преломления от точки к точке. Такое искривление лучей может быть учтено и действительно учитывается, когда точность измерений этого требует.

Как можно убедиться в применимости или неприменимости геометрии Евклида к реальному миру в указанном выше смысле? Прямой метод состоит в том, что надо подвергнуть экспериментальной проверке следствия, выводимые из аксиом геометрии Евклида. Одним из таких следствий является, например, теорема, утверждающая, что сумма внутренних углов треугольника равняется 180° . Великий математик Гаусс (1777—1855) измерял в 1821—23 гг. со всей возможной тщательностью внутренние углы треугольника, образованного тремя удаленными горными вершинами. Длины сторон треугольника были порядка 100 км. Он нашел, что в пределах ошибок измерений не наблюдалось нарушений указанной теоремы. Этот метод не годится в масштабах Солнечной системы и больших, так как все измерения производятся с Земли, и мы не можем непосредственно измерить все три внутренних угла треугольника, вершинами которого помимо Земли являются, например, какие-либо две планеты или звезды. Здесь мы судим о применимости геометрии Евклида на основании косвенных данных — по согласованности различных результатов, полученных с использованием такой геометрии. Так, можно предвычислить движение планет Солнечной системы на много лет вперед и проверить полученные предсказания. Если бы они не оправдались, то одной из причин могла бы быть неприменимость геометрии Евклида к областям пространства порядка размеров Солнечной системы. Наоборот, согласие с опытом (что на самом деле имеет место) указывает на то, что сомневаться в применимости геометрии Евклида в областях такого размера нет оснований. Не вдаваясь в этот вопрос, ограничимся замечанием, что, по-видимому, нет существенных нарушений геометрии Евклида в областях порядка размеров нашей *Галактики* ($\sim 10^{20}$ м) и даже *Метагалактики*, т. е. части Вселенной, доступной исследованию с помощью современных наиболее мощных телескопов ($\sim 10^{26}$ м). Точно так же нет оснований

ожидать существенных нарушений геометрии Евклида и в субатомных областях размером, скажем, порядка 10^{-15} м.

Световые лучи при определении положения удаленных тел выполняют и другую важную функцию. Они служат теми материальными объектами, с помощью которых конструируется сама система отсчета. Действительно, твердые стержни не могут быть неограниченно длинными, а потому они не пригодны в качестве координатных осей во всем пространстве. Эту роль берут на себя световые лучи, являющиеся продолжениями в нужных направлениях координатных осей, первоначально реализованных твердыми стержнями.

5. В связи с изложенным целесообразно сделать одно замечание о связи физики с математикой. Математика играет исключительно важную роль в физике. Без нее современная физика немыслима. Однако необходимо правильно представлять себе истинную роль математики в физике, и к этому вопросу мы еще будем неоднократно возвращаться. Чистая математика имеет дело с абстрактными объектами и понятиями, подчиняющимися определенной системе аксиом. Единственное требование, предъявляемое в чистой математике к ее понятиям и аксиомам, сводится к их *логической непротиворечивости*. Все свои результаты чистая математика получает из этих аксиом путем логических рассуждений, основанных на правилах формальной логики. Содержание этих результатов, очевидно, не может выйти за пределы логических связей между различными объектами и понятиями чистой математики. В этом смысле чистая математика является *логически замкнутой дисциплиной*. Такая замкнутость и логическая согласованность придают чистой математике эстетическую привлекательность и доставляют чувство глубокого удовлетворения всякому уму, воспитанному в духе математической строгости.

Надо, однако, заметить, что строго замкнутая сама в себе математика оторвана от реальной действительности и не может быть использована в других науках и практической деятельности человека. Чтобы математика стала мощным средством при описании и изучении явлений природы, каким она в действительности является, необходимо установить связи между абстрактными математическими объектами и понятиями — с одной стороны — и реальными объектами и явлениями природы — с другой. Математические понятия и объекты должны появляться не как чисто логические категории, а как *абстракции каких-то реальных объектов или процессов природы*. Так, точка является абстракцией физического тела достаточно малых размеров, прямая линия — абстракцией достаточно тонкого твердого стержня или светового пучка в однородной среде. Вопрос о справедливости математики сводится к справедливости ее аксиом. Справедливость же самих аксиом может быть установлена опытным и только опытным путем.

Правда, опыт с математическими объектами нельзя осуществить в чистом виде, поскольку эти объекты являются идеализациями и не встречаются в природе. Всякий опыт выполняется с реальными телами. Математическую строгость, которой, и не без оснований, так гордятся математики, надо понимать в смысле логической согласованности ее выводов, но не в смысле обоснования математических аксиом.

Одной математической строгости недостаточно для физики, как и для всякой другой опытной науки, имеющей дело с реальными объектами и явлениями природы. *Всякое теоретическое исследование, даже выполненное математически строго, никогда не может считаться и физически строгим.* Во-первых, такие исследования всегда основываются на определенных законах, справедливость которых в конце концов доказывается опытным путем, а опыты и физические измерения неизбежно сопровождаются ошибками, т. е. выполняются с определенной точностью. Вне пределов этой точности физический закон может оказаться не верным. Во-вторых, всякий реальный физический объект характеризуется бесконечным разнообразием свойств. Учесть все эти свойства невозможно не только потому, что большинство из них нам просто неизвестно, но и потому, что это практически не осуществимо. *При построении теории физика заменяет реальные объекты их идеализированными моделями, приблизительно правильно передающими не все свойства реальных объектов, а только те из них, которые существенны в рассматриваемом круге вопросов. Какие свойства реальных объектов существенны, а какие не играют заметной роли — на этот вопрос в конце концов может ответить только опыт, которому принадлежит решающее слово в вопросе о правильности всякой физической теории и пределах ее применимости.* Если физический закон применен вне области, где он справедлив, а идеализированная модель правильно передает не все свойства реальных объектов, существенные для рассматриваемого круга явлений, то возникающие вследствие этого пороки теории, понятно, не могут быть исправлены никакой строгостью математических рассуждений и расчетов.

Последнее замечание имеет и практическую ценность. Конечно, после того как идеализированная модель построена, не будет ошибкой производить все дальнейшие расчеты математически абсолютно точно, хотя бы при этом и использовались физические законы, верные только приближенно. Однако сплошь и рядом такие расчеты очень громоздки и даже практически не осуществимы из-за их сложности. Между тем точность уже обесценена ошибками физических законов и несовершенствами идеализированной модели, положенной в основу расчета. Можно и нужно перейти к приближенным расчетам. Такие расчеты столь же хороши, что и «точные», если их ошибки не превосходят ошибок, обусловленных

неточностью применяемых физических законов и несовершенствами идеализированных моделей.

Многие понятия и открытия, которыми по справедливости так гордится математика, не имеют никакого смысла, когда речь заходит о применении этих понятий к реальным объектам. Сюда относится, например, понятие иррационального числа. Лишено содержания утверждение, что физическая величина имеет иррациональное значение. Такое утверждение не может быть проверено. Одних только рациональных чисел достаточно, чтобы представить результаты измерений, выполненных со сколь угодно высокой степенью точности. Кроме того, понятие физической величины может утратить смысл, если к ее измерению предъявить требование неоправданно высокой точности. Так, например, совсем не ясно, о чем идет речь, если поставить задачу об измерении длины твердого стержня с точностью до размеров электрона или даже атома. Принципиально неограниченная точность измерения длин имеет смысл для абстрактных прямолинейных отрезков геометрии, а не для реальных тел, имеющих атомистическую структуру.

6. Перейдем к вопросу об измерении *времени*. Как и всякая физическая величина, время количественно характеризуется некоторыми числами. Задача прежде всего состоит в том, чтобы выяснить, с помощью каких принципиальных измерительных операций эти числа могут быть получены. Тем самым устанавливается и точный смысл самих этих чисел.

Под временем в количественном смысле этого слова мы будем понимать показания каких-то часов. Точнее, надо говорить не о самом времени, а о *промежутке времени* между двумя событиями или моментами времени. Он характеризуется *разностью* показаний часов в рассматриваемые моменты времени. Когда говорят просто о времени, не указывая оба момента, являющиеся границами рассматриваемого промежутка времени, то предполагают, что один из этих моментов фиксирован и условно принят за начальный. От него и ведется отсчет времени. Часы здесь понимаются в более широком смысле слова, чем в обыденной жизни. *Под часами понимают любое тело или систему тел, в которых совершается периодический процесс, служащий для измерения времени.* Примерами таких процессов могут служить колебание маятника с постоянной амплитудой, вращение Земли вокруг собственной оси относительно Солнца или звезд, колебания атома в кристаллической решетке, колебания электромагнитного поля, представляемого достаточно узкой спектральной линией, и пр. Так, если между двумя событиями Земля при вращении относительно звезд сделала один оборот, то говорят, что промежуток времени между этими двумя событиями составляет *звездные сутки*. Если при этом она совершила 10 оборотов, то соответствующий промежуток времени будет 10 звездных суток, и т. д. Если в течение звездных суток маятник совершил

приблизительно 86 164 колебания, то говорят, что период одного колебания составляет одну *секунду*, и т. д. От звездных суток следует отличать *солнечные сутки*. Так называется промежуток времени, в течение которого Земля делает один оборот при вращении вокруг собственной оси относительно Солнца. Ввиду того, что Земля движется вокруг Солнца не по круговой, а по эллиптической орбите, это ее движение не совсем равномерно (см. § 55). Это значит, что солнечные сутки изо дня в день несколько изменяются в течение года. Поэтому при измерении времени пользуются так называемыми *средними солнечными сутками*. Они составляют 24 часа = $24 \cdot 60 = 1440$ минут = $1440 \cdot 60 = 86\,400$ секунд.

К часам предъявляют требования, чтобы они шли *«равномерно»*. Но что значит, что часы идут равномерно? Говорят, это означает, что периодический процесс, служащий для отсчета времени, должен повторяться через строго одинаковые промежутки времени. Однако это не есть ответ на вопрос, так как убедиться в одинаковости следующих друг за другом промежутков времени можно только в том случае, когда мы уже располагаем равномерно идущими часами. Выйти из этого логического круга можно только путем определения, так как никакого априорного представления о равномерном течении времени не существует. Надо условиться считать какие-то часы *по определению* равномерно идущими. Такие часы должны рассматриваться как *эталонные* или основные часы, по которым должны градуироваться все остальные.

В принципе любые часы могут быть приняты за эталонные. Однако так поступать не целесообразно. Эталонные часы должны быть достаточно «хорошими» и прежде всего обладать *высокой воспроизводимостью*. Это означает, что если изготовить с возможной тщательностью много «одинаковых» эталонных часов, то они с большой точностью должны идти одинаково, независимо от того, изготовлены ли они одновременно, или между моментами их изготовления прошло длительное время. Например, песочные часы дают несравненно худшую воспроизводимую, чем маятниковые часы.

Не так давно за основные или эталонные часы принимались *«астрономические часы»*. Долгое время основными часами служила Земля, вращающаяся вокруг собственной оси относительно звезд, а основной единицей времени — *сутки*. Недавно вместо осевого вращения Земли стали пользоваться ее орбитальным движением вокруг Солнца, принимая за основную единицу времени *тропический год*, т. е. промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через *точку весеннего равноденствия*. При измерении времени таким путем достигалась лучшая воспроизводимая. Но еще лучшая воспроизводимая была достигнута после изобретения *кварцевых, молекулярных и атомных часов*.

Все эти часы представляют довольно сложные радиотехнические устройства. Здесь нет необходимости останавливаться на принципах действия и деталях устройства таких часов. Достаточно заметить, что роль маятника или балансира, регулирующих ход часов, выполняют в кварцевых часах колебания кристаллической решетки кварца, в молекулярных часах — колебания атомов в молекулах, в атомных часах — колебания электромагнитного поля в узких спектральных линиях атомов некоторых изотопов химических элементов, находящихся в точно определенных и строго контролируемых внешних условиях. Особой стабильностью обладают последние из отмеченных колебаний. Поэтому период именно таких колебаний в настоящее время и принимается в качестве основной единицы времени, с помощью которой воспроизводится секунда. Конкретно, *секунда* — это промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний электромагнитного излучения, соответствующего переходу между двумя определенными сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 в отсутствие внешних полей.

С помощью кварцевых, молекулярных и атомных часов было показано, что Земля вокруг своей оси вращается «неравномерно».

7. С единицей длины дело обстоит так же, как с единицей времени. Идеально твердых тел не существует. Первоначальный эталон метра, реализованный в виде стержня из сплава платины и иридия, недостаточно надежен. Он подвержен внешним влияниям, его внутреннее молекулярное строение может измениться. Наконец, он может быть утерян или испорчен. Предпочтительнее в качестве основной единицы взять какую-либо естественную, точно воспроизводимую длину. За таковую принимается длина световой волны определенной узкой спектральной линии, получаемой при определенных, строго контролируемых внешних условиях. С помощью такой естественной длины и воспроизводится практическая единица длины — метр. По определению *метр* — это длина 1 650 763,73 световых волн в вакууме оранжевой линии атома криптона-86, точнее, линии, соответствующей переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ указанного атома.

Возможно, что современные эталоны времени и длины перестанут удовлетворять более жестким требованиям, которые будут предъявляться в будущем к точности измерений и воспроизводимости результатов. В таком случае старые эталоны будут заменены новыми, более стабильными. Принципиально это ничего не меняет.

8. Для описания движения, а также любых физических явлений, протекающих во времени, пространственных систем отсчета недостаточно. Надо превратить их в *пространственно-временные* системы отсчета. Принципиально это означает, что в системе отсчета

должны быть достаточно часто расставлены неподвижные часы, обладающие одинаковой скоростью хода. Тогда каждое событие можно характеризовать местом, где оно произошло, и временем, когда оно произошло, т. е. показаниями часов, помещенных в этом месте. Однако таким путем будет определено только *местное время*, т. е. время в каждой точке пространства. Показания часов, находящихся в различных точках пространства, еще никак не связаны между собой. Для описания физических процессов такая связь, в принципе, не обязательна. Можно было бы довольствоваться местным временем в каждой точке пространства, введя столько различных времен, сколько существует различных точек. Однако такое описание было бы крайне запутанным и абсолютно не обозримым. Чтобы описание было простым и обозримым, необходимо пользоваться временем, *единым для всей пространственно-временной системы* отсчета. Для этой цели надо *«синхронизовать»* часы, расставленные в различных местах пространства, т. е. установить их так, чтобы они показывали «одинаковое» время.

На первый взгляд в вопросе о синхронизации пространственно разделенных часов нет никаких трудностей. Поместим, например, двое одинаковых часов сначала в точку A , поставим их стрелки одинаково, а затем одни из часов перенесем в точку B . Тогда часы в A и часы в B будут синхронизованы между собой. Однако такой способ синхронизации только тогда имел бы смысл, когда показания часов в точке B не зависели от способа переноса их из точки A в точку B . Есть теоретические и опытные основания утверждать, что это не так. Поэтому способ синхронизации путем переноса часов не годится.

Остается *синхронизация часов с помощью сигналов*. Можно, например, поступить следующим образом. В произвольный момент времени t_A по часам A послать какой-то сигнал к часам B . В момент прихода сигнала часы B поставить так, чтобы они показывали время $t_B = t_A + \tau_{AB}$, где τ_{AB} — время, затрачиваемое сигналом на прохождение расстояния от A к B . Тогда часы A и B будут синхронизованы между собой. Однако для осуществления такой синхронизации надо знать время τ_{AB} . Но это время можно измерить только после того, как часы A и B уже синхронизованы. Получился заколдованный круг. Эйнштейн указал, что выйти из этого круга можно *только путем определения* понятия одновременности. Дорелятивистская физика считала, что одновременность событий абсолютна и является чем-то само собой понятным. Эйнштейн указал, что это заблуждение. Смысл одновременности событий не требует разъяснения только тогда, когда эти события происходят в одном и том же месте пространства. Если же события происходят в различных местах пространства, то надо условиться, какие события называть одновременными. Очевидно, вопрос об одновременности пространственно разделенных событий эквива-

лентен вопросу о синхронизации пространственно разделенных часов.

Решение всякого вопроса, сводящегося к определению, содержит некоторый произвол. Это полностью относится и к вопросу об определении одновременности пространственно разделенных событий. Объективное содержание законов природы, разумеется, не может зависеть ни от каких произвольных определений. Определения могут влиять только на форму законов. Надо стремиться вводить такие определения, чтобы форма законов была наиболее проста и легко обозрима. Это требование почти однозначно вынуждает принять определение одновременности, предложенное Эйнштейном в теории относительности.

Эйнштейн пользуется для синхронизации часов световыми сигналами в вакууме. Время, затрачиваемое сигналом на пути от A к B и обратно, очевидно, равно $\tau = \tau_{AB} + \tau_{BA}$, где τ_{BA} — время, которое он затрачивает на прохождение от B к A . Для измерения времени τ достаточны только часы A , и никакой предварительной синхронизации не требуется. Но времена τ_{AB} и τ_{BA} можно измерить лишь после того, как часы A и B синхронизованы. Пока они еще не синхронизованы, можно потребовать, чтобы между τ_{AB} и τ_{BA} соблюдалось какое-то соотношение. Тогда из этого соотношения и соотношения $\tau = \tau_{AB} + \tau_{BA}$ найдутся времена τ_{AB} и τ_{BA} в отдельности. Тем самым часы A и B будут синхронизованы и установлено понятие одновременности пространственно разделенных событий. *Эйнштейн полагает по определению, что $\tau_{AB} = \tau_{BA}$, т. е. что свет в направлениях от A к B и от B к A распространяется с одной и той же скоростью.* Тогда $\tau_{AB} = \tau_{BA} = \tau/2$, и следовательно, $t_B = t_A + \tau/2$. Для бесконечно быстрых сигналов $\tau = 0$, а потому $t_A = t_B$. Одновременность, устанавливаемая с помощью таких сигналов, была бы абсолютной. Однако бесконечно быстрых сигналов не существует.

Синхронизация часов по Эйнштейну не требует предварительного измерения скорости света. Ее можно осуществить также следующим способом. Пусть C — точка, находящаяся на середине отрезка между точками A и B (неподвижными друг относительно друга). Произведем в C световую вспышку. *По определению* свет от нее достигнет точек A и B одновременно. Если в момент прихода света к часам A и B их показания сделать одинаковыми, то они будут синхронизованы между собой.

Всякое определение должно быть непротиворечивым. Если синхронизовать между собой часы A и B , то с третьими часами C можно поступить двояко: либо синхронизовать их с часами A , либо с часами B . Оба способа должны приводить к одному и тому же результату. Иначе получилось бы внутреннее противоречие. Прямой проверки такого рода непротиворечивости не производилось. Наша уверенность в непротиворечивости эйнштейновского опре-

деления одновременности основана на логической согласованности бесчисленного множества следствий, при выводе которых использовалось это определение.

9. *Одновременность пространственно разделенных событий в том смысле, какой придается ей определением Эйнштейна, относительна.* Это значит, что два события, одновременные в одной системе отсчета, могут оказаться не одновременными, если их рассматривать в другой системе отсчета, движущейся относительно первой. Поясним это следующим примером. Пусть система отсчета S связана с твердым стержнем AB , а система S' — с твердым стержнем $A'B'$, движущимся относительно AB (рис. 4). В момент, когда середины стержней C и C' совпадают между собой, производится световая вспышка в точке, где происходит это совпадение. Рассмотрим распространение света от этой вспышки сначала в системе отсчета S . Из определения одновременности следует, что сигнал достигнет одновременно концов стержня A и B . Значит, он достигнет раньше точки A' и позже точки B' , поскольку точка A' движется навстречу сигналу, а точка B' уходит от него. Итак, с точки зрения системы отсчета S световой сигнал приходит в точки

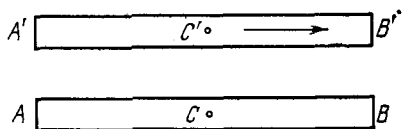


Рис. 4.

A и B одновременно, а в точки A' и B' — не одновременно: в точку A' он приходит раньше, чем в B' . К другому заключению мы придем, если рассмотрим явление в системе отсчета S' . По определению одновременными будут приходы сигнала в точки A' и B' , а приходы в точки A и B — не одновременными: в точку B сигнал придет раньше, чем в точку A . Противоречия между обоими заключениями нет, поскольку «одновременность» понимается в них в разных смыслах. Этот пример и иллюстрирует относительность одновременности.

10. *Длина тела также относительна, т. е. зависит от того, в какой системе отсчета она измеряется.* Что такое длина движущегося стержня — такой вопрос дорелятивистская физика не ставила. Теория относительности показала, что надо строго различать *длину покоящегося стержня* l_0 , т. е. длину, измеренную в системе отсчета, в которой стержень покоится, и *длину движущегося стержня* l , т. е. длину, измеренную в системе отсчета, относительно которой он движется. Эти длины становятся равными только в предельном случае бесконечно медленных движений. Величина l_0 получается путем откладывания вдоль стержня единичного масштаба, покоящегося относительно этого стержня. Величина l сводится к измерению расстояния между неподвижными точками путем следующей измерительной операции. Надо отметить какими-либо неподвижными точками A и B положения концов движущегося

стержня в рассматриваемой системе отсчета в один и тот же момент времени. Расстоянием между этими неподвижными точками и будет, по определению, длина движущегося стержня l . Если взять другую систему отсчета, то, ввиду относительности одновременности, концы стержня пройдут в этой системе отсчета мимо точек A и B , вообще говоря, не одновременно. Роль A и B будут играть другие точки A' и B' , неподвижные в новой системе отсчета. Расстояние между этими точками l' , вообще говоря, не будет совпадать с l . Таким образом, как и промежутки времени, длины отрезков также относительны.

11. Дорелятивистская физика считала длины тел и промежутки времени абсолютными. С ее точки зрения можно было говорить об одновременности событий, не указывая, в какой системе отсчета эти события рассматриваются. Можно было говорить о длине тела, не указывая, покоится оно или движется в рассматриваемой системе отсчета. Основанием, правда, явно не формулировавшимся, для такой точки зрения было убеждение в существовании сколь угодно быстрых сигналов. Но при рассмотрении медленных движений скорость световых сигналов в вакууме может считаться практически бесконечно большой. В этом приближении исчезают все релятивистские эффекты. Мы приведем в дальнейшем некоторые результаты релятивистской механики ввиду их важности в ядерной физике и физике элементарных частиц. Однако систематическое изложение релятивистской механики будет дано после того, как мы познакомимся с учением об электрических и оптических явлениях. Там же будут подробно разобраны с количественной стороны и вопросы пространства и времени, которые здесь были только поставлены или затронуты качественно.

§ 2. Кинематическое описание движения. Материальная точка

1. *Кинематика* занимается описанием движения, отвлекаясь от его причин. Для описания движения можно выбирать различные системы отсчета. В различных системах отсчета движение одного и того же тела выглядит по-разному. В кинематике при выборе системы отсчета руководствуются лишь соображениями целесообразности, определяющимися конкретными условиями. Так, при рассмотрении движения тел на Земле естественно связать систему отсчета с Землей, что мы и будем делать. При рассмотрении движения самой Земли систему отсчета удобнее связывать с Солнцем и т. п. Никаких принципиальных преимуществ одной системы отсчета по сравнению с другой в кинематике указать нельзя. Все системы отсчета *кинематически эквивалентны*. Только в *динамике*, изучающей движение в связи с силами, действующими на движущиеся тела, выявляются принципиальные преимущества опреде-