или находится в равномерном прямолинейном движении относительно неподвижных звезд. Только смотря в окно и имея, таким образом, возможность сравнить свое движение с движением звезд, наблюдатель может сказать, что он находится относительно них в равномерном движении. Даже тогда он не мог бы решить, *что* движется: он сам или звезды. Принцип относительности Галилея был одним из первых основных принципов физики. Он являлся основным для данной Ньютоном картины Вселенной. Этот принцип выдержал многократную экспериментальную проверку и служит сейчас одним из краеугольных камней для специальной теории относительности. Это настолько замечательная своей простотой гипотеза, что ее следовало бы серьезно рассматривать, даже если бы она не была так очевидна. Как мы увидим в гл. 11, принцип относительности Галилея полностью согласуется со специальной теорией относительности.

Как мы можем применить этот принцип? Утверждение, что абсолютная скорость не имеет смысла в физике, частично ограничивает форму и содержание всех физических законов, как известных, так и еще не открытых. Если этот принцип справедлив, то законы физики должны одинаково формулироваться для двух наблюдателей, движущихся с различными скоростями, но без относительного ускорения? Предположим, что оба они наблюдают какое-то отдельное явление, например столкновение двух частиц. Из-за различия скоростей наблюдателей каждый из них дает описание наблюдаемого явления, отличающееся от описания, данного другим наблюдателем. На основании законов физики мы можем предсказать, как взаимодействуют эти частицы, каковы будут наблюдения одного наблюдателя и, наконец, как то же взаимодействие частиц представляется второму наблюдателю.

Таким образом, формулировка законов физики для второго наблюдателя может быть выведена из их формулировки для первого наблюдателя посредством двух различных способов рассуждения. Первый из них — это гипотеза, что обе формулировки одинаковы. Другой способ — мы можем сформулировать эти законы для второго наблюдателя, предсказав, каковы должны быть результаты его наблюдений над явлениями, которые были описаны с помощью законов физики, сформулированных для первого наблюдателя. Для всех известных нам физических законов оба способа дают одинаковые результаты. Мы начнем наш анализ с того, что установим некоторые эмпирические особенности характера описания одного и того же физического явления двумя наблюдателями, один из которых движется относительно другого с постоянной скоростью.

3.5. Преобразование Галилея

Если мы проанализируем, как два наблюдателя измеряют данные интервалы длины и времени, то мы сможем сравнить результаты измерений других физических величин, произведенных этими наблюдателями. Обозначим через S какую-либо инерциальную декартову систему координат, а через S'— другую инерциальную декартову систему координат, движущуюся со скоростью $\mathbf{V}$ относительно первой. Пусть оси x', y', z' системы S' направлены параллельно осям x, y, z системы S (рис. 3.11). Выберем эти оси так, чтобы вектор $\mathbf{V}$ был направлен параллельно оси x. Мы хотим сравнить измерения времени и расстояний, сделанные наблюдателем, неподвижным относительно системы S', с такими же измерениями, выполненными наблюдателем, покоящимся относительно системы S. Только опытным путем можно окончательно решить, каков будет результат сравнения.

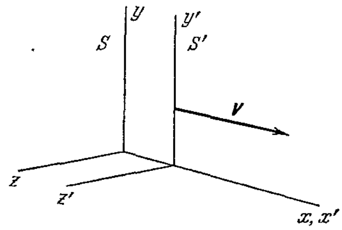

Рис. 3.11. Пусть S — инерциальная система отсчета, а система S' движется относительно системы S с постоянной скоростью $\mathbf{V}$. Тогда система S' тоже должна быть инерциальной.

Если каждый из двух наблюдателей располагает большим числом часов с совершенно одинаковым ходом, то они могут произвести следующий опыт. Пусть сначала наблюдатель в системе S распределит свои часы вдоль оси x и установит их все на одно и то же время. Это вовсе не так уж просто осуществить, но мы отложим анализ того, как следует точно выполнить эти измерения, до тех пор, пока в гл. 11 не будет рассмотрен аналогичный опыт с точки зрения

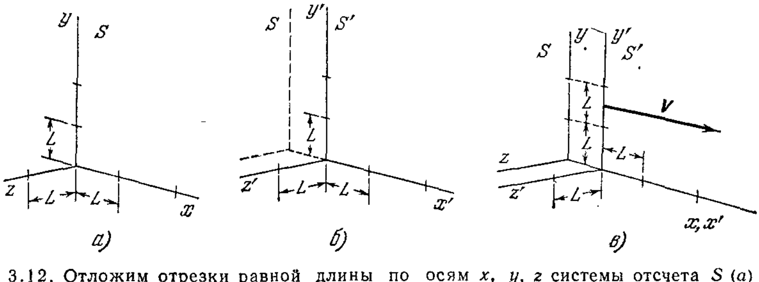

Рис. 3.12. Отложим отрезки равной длины по осям x, y, z системы отсчета S (a) и по осям x', y', z' системы отсчета S' ($б$). Тогда, согласно преобразованию Галилея, наблюдателю в системе S длины отрезков в системе S' представляются неизменными, хотя система S' движется ($в$).

специальной теории относительности. Однако если мы будем приближенно считать скорость света бесконечно большой *), то надо только посмотреть на все часы, чтобы удостовериться, что все их начальные показания одинаковы. Теперь мы можем сравнивать показания часов в системе S' с показаниями часов 1, 2, 3, ... в системе S,

*) В противном случае можно простым способом усовершенствовать эту операцию отсчета, введя поправку на время, необходимое для того, чтобы изображение удаленного предмета достигло наших глаз. Часы, удаленные на l *см*, будут казаться наблюдателю отстающими от часов, расположенных непосредственно рядом с ним, на l/c *сек*, где $c=3\cdot10^{10}$ *см/сек* — скорость света.

когда часы в S' проходят мимо каждых часов в системе S. Если такой опыт придется производить с реальными макроскопическими часами, то по чисто техническим причинам мы должны ограничить скорость движения V системы S' величиной порядка 10^6 *см/сек*, т. е. порядка скорости типичного искусственного спутника. При таком условии $V/c \ll 1$, и опыт подтверждает, что если часы в системе S' установлены одинаково с часами 1, то их показания будут одинаковы и с показаниями часов 2, 3, 4, ... С той точностью, с которой мы можем измерять *) в таких условиях, можно установить, что

$$t' = t. \tag{9}$$

Это означает, что результаты отсчетов времени, выполненных в системе S', равны результатам отсчетов времени в системе S. Здесь t означает время события в системе S, а t' — время события в системе S'.

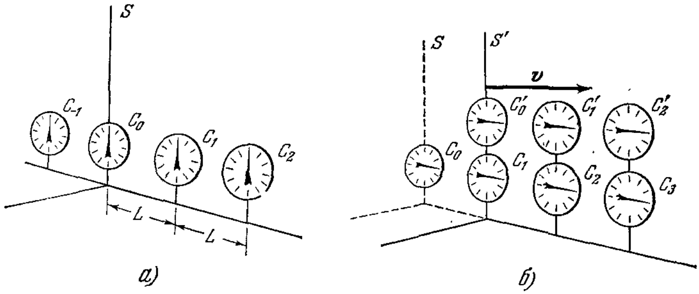

Рис. 3.13. *а*) Расставим вдоль оси x через интервалы длиной L синхронизированные часы C_0, C_1 и т. д., неподвижные относительно системы отсчета S. *б*) Если такие же часы C'_0, C'_1 и т. д. мы расставим также неподвижно относительно системы отсчета S', то, согласно преобразованию Галилея, наблюдателю в системе S эти часы представляются синхронизированными между собой и с часами C_0, C_1 и т. д.

Как мы увидим в гл. 11, это утверждение не является ни самоочевидным, ни точно выполняющимся для всех скоростей V. Мы можем также определить относительные размеры неподвижной и движущейся метровой линейки. Мы хотим знать, какой кажущийся размер для наблюдателя в системе S имеет метровая линейка, покоящаяся в системе S'. Простой способ определить это заключается также в использовании часов для регистрации положения обоих концов движущейся метровой линейки, производимой одновременно, т. е. при одном и том же показании часов, находящихся в систе-

*) Согласно теории относительности, при скорости $V = 10^6$ *см/сек* величины t' и t должны отличаться только на одну двухмиллиардную часть, меньше чем на 1 *сек* за 50 лет. Хотя в настоящее время можно изготовить часы с таким стабильным ходом, пока еще нет возможности запустить спутник с часами, движущийся со скоростью порядка 10^6 *см/сек*, на столь продолжительное время, которое необходимо для этого измерения. Равенство $t' = t$ для $V \ll c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек* представляет собой простую экстраполяцию опытных данных и до настоящего времени не проверялось точными измерениями.

ме S у переднего и заднего концов этой линейки. Экспериментально мы находим *), что

$$L' = L \tag{10}$$

при условии, когда $V \ll c$.

Мы можем выразить равенства (9) и (10) в форме преобразования, связывающего координаты x', y', z' и время t', измеренные в системе S', с координатами x, y, z и временем t, измеренными в системе S. Система S' движется со скоростью $V\hat{\mathbf{x}}$ относительно системы отсчета S. Предположим, что при $t=0$ также и $t'=0$ и что в этот момент совпадают начала координат O и O'. Если мы выберем совершенно одинаковые масштабы длины, то получим следующие уравнения преобразования:

$$\boxed{t = t'; \quad x = x' + Vt'; \quad y = y'; \quad z = z'.} \tag{11}$$

Это преобразование называется *преобразованием Галилея* (рис. 3.14).

Непосредственным следствием уравнений (11) является закон сложения скоростей:

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{x}{t'} = \frac{x'}{t'} + V = v'_x + V, \tag{12}$$

или в векторной форме:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V}, \tag{13}$$

где $\mathbf{v}'$ — скорость, измеренная в системе S', а $\mathbf{v}$ — скорость, измеренная в системе S. Преобразование, обратное по отношению к (13):

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{V}.$$

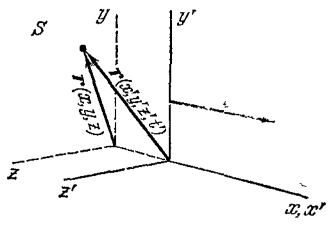

Рис 3.14. $\mathbf{r}(x', y', z', t') = \mathbf{r}'(x - Vt, y, z, t)$. Следовательно, мы можем выразить преобразование Галилея от S к S' и обратно такими формулами:

$x' = x - Vt$; $z' = z$;
$y' = y$; $t' = t$

Если сопоставить определение (11) преобразования Галилея между системами S и S' с основным постулатом о том, что законы физики, определенные в этих системах S и S', должны быть тождественны, то мы можем сделать следующий вывод:

> *Основные законы физики одинаково формулируются для любых двух систем отсчета, связанных преобразованием Галилея.*

Этот вывод носит несколько более частный характер, чем наше прежнее общее утверждение, что законы физики формулируются

*) Такой эксперимент не выполнялся с большой точностью, и уверенность в том, что $L'=L$ при $V \ll c$, основывается главным образом на качественных опытных данных, простоте гипотезы и том факте, что это предположение не приводит к каким-либо парадоксам или несоответствиям.

совершенно одинаково для всех систем отсчета, движущихся с постоянной скоростью одна относительно другой. Более частный характер этого вывода связан, например, с дополнительным допущением, что $t=t'$. В гл. 11 мы увидим, что это допущение надо будет видоизменить.

Основной принцип инвариантности физических законов справедлив всегда, но соответствующие ему точные уравнения преобразования координат и времени — это уравнения преобразования Лоренца, а не уравнения (11).

Сделанное здесь предположение об инвариантности законов физики относительно преобразования (11) означает, что они должны иметь в точности одинаковый вид, будучи записаны в штрихованных и в нештрихованных переменных, как, например, уравнения (16) — (18), приводимые ниже. Это требование налагает определенное ограничение на возможную форму физических законов.

Из соотношения $\mathbf{v}=\mathbf{v}'+\mathbf{V}$, где $\mathbf{V}$ — относительная скорость двух систем отсчета, следует, что

$$\Delta\mathbf{v}=\Delta\mathbf{v}', \tag{14}$$

т. е. изменение скорости одного и того же тела, наблюдаемое в системе S, равно изменению его скорости, наблюдаемому в системе S'. Как S, так и S'— инерциальные системы отсчета. Напомним, что мы предположили, что скорость $\mathbf{V}$ не меняется со временем. Так как $\Delta t=\Delta t'$, то отсюда следует, что ускорения, наблюдаемые в системах отсчета S и S', равны между собой:

$$\mathbf{a}\equiv\frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}=\frac{\Delta\mathbf{v}'}{\Delta t'}\equiv\mathbf{a}'. \tag{15}$$

Как преобразуется величина силы $\mathbf{F}$ при переходе от S к S'? Утверждение, что законы физики имеют одинаковый вид в штрихованных и нештрихованных переменных, означает, что

$$\mathbf{F}'=M\mathbf{a}' \tag{16}$$

и

$$\mathbf{F}=M\mathbf{a} \tag{17}$$

при условии, что масса M не зависит от скорости. Но мы показали, выводя формулу (15), что $\mathbf{a}'=\mathbf{a}$; следовательно,

$$\mathbf{F}=M\mathbf{a}'=\mathbf{F}', \tag{18}$$

т. е. в обеих системах отсчета сила имеет одинаковую величину: $\mathbf{F}=\mathbf{F}'$. Мы приходим к выводу, что если для определения силы используется соотношение $\mathbf{F}=M\mathbf{a}$, то во всех инерциальных системах отсчета наблюдатели получат одинаковые данные об абсолютной величине и направлении силы $\mathbf{F}$, независимо от относительных скоростей этих систем отсчета.