

которой при движении физических объектов, в том числе и измерительных линеек, относительно абсолютной системы происходит сжатие этих объектов в направлении движения; это сжатие происходит таким образом, что различия в скорости света не могут быть обнаружены никакими лабораторными приборами.

Французский математик Жюль Анри Пуанкаре (1854—1912) высказал мысль о том, что невозможность экспериментального выделения абсолютной системы отсчета указывает просто на то, что такой системы не существует и что представление Ньютона о равноправии всех инерциальных систем оказалось правильно. В 1905 г. Эйнштейн на основе идей Лоренца и Пуанкаре по-новому подошел к вопросу о выборе системы отсчета и в конечном счете сумел объяснить, почему эксперимент не может обнаружить абсолютное движение Земли, не вступая при этом в противоречие с электромагнитной теорией Максвелла. Объяснение Эйнштейна требовало видоизменения традиционных взглядов на пространство и время. Такое изменение позволяло сохранить и равноправие всех инерциальных систем отсчета и справедливость теории Максвелла.

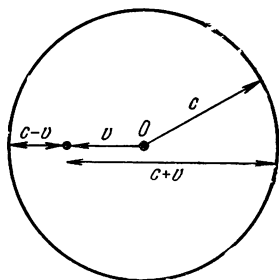


Рис. 10. Кажущаяся скорость света согласно гипотезе неподвижного эфира.

#### 1. Специальная теория относительности

Уже со времен Ньютона считалось, что все системы отсчета представляют собой набор жестких стержней или каких-то других предметов, позволяющих устанавливать положение тел в пространстве. Конечно, в каждой системе отсчета такие тела выбирались по-своему. Вместе с тем принималось, что у всех наблюдателей «естественно» одно и то же универсальное время. Это предположение казалось интуитивно настолько очевидным, что его обычно специально не оговаривали, а считали само собой разумеющимся. В повседневной практике на Земле это предположение подтверждается всем нашим опытом. Кому придет в голову сомневаться в том, что секундомер футбольного судьи,

бегающего по полю, покажет не то же самое время, что и секундомер, сидящего на трибуне тренера, если оба они честные люди и их секундомеры в порядке.

И все же Эйнштейну удалось показать, что сравнение показаний часов, если принимать во внимание их относительное движение, не требует особого внимания лишь в том случае, когда относительные скорости часов значительно меньше, чем скорость распространения света в пустоте ( $c = 300\,000$  км/сек). Поскольку не существует никаких сигналов, передающих информацию со скоростью большей, чем скорость света, возникают новые проблемы, когда нужно сравнить часы, движущиеся относительно друг друга, скажем, со скоростью  $100\,000$  км/сек. Эти проблемы встают прежде всего потому, что для сравнения темпа двух часов необходимо заметить по крайней мере по два отсчета у обоих; иначе нельзя убедиться в том, что они идут одинаковым образом. Допустим теперь, что мы рассматриваем двое часов, движущихся относительно друг друга. Пусть в тот момент, когда они проходят рядом, их показания одинаковы. Второе показание часов мы возьмем тогда, когда они разойдутся на достаточно большое расстояние. Как можно добиться того, чтобы этот второй отсчет был произведен на обоих часах *одновременно*? Это можно сделать, оговорив, например, что отсчет будет производиться третьим наблюдателем, который должен находиться точно посередине между двумя рассматриваемыми часами в тот момент, когда снимается второе показание часов. Однако тщательное рассмотрение этого вопроса, которое мы здесь не будем воспроизводить, показывает, что этот метод отнюдь не безукоризнен. Короче говоря, этот метод приводит к различным результатам, если поменять ролями часы\*).

Первым результатом анализа Эйнштейна явилось установление *относительности одновременности*: два события, происходящие на достаточном удалении друг от друга, могут оказаться для одного наблюдателя одновременными, а для наблюдателя, движущегося относительно него, происходящими в разные моменты времени. Поэтому предположение о едином, универсальном времени не может быть оп-

---

\*). См. А. Эйнштейн, О специальной и общей теории относительности, общедоступное изложение (Собрание сочинений, т. 1, «Наука», 1965).

равдано: невозможно указать определенную процедуру, позволяющую любому наблюдателю установить такое универсальное время независимо от того движения, в котором он участвует. Скорее следует допустить, что каждый наблюдатель должен построить свою собственную систему отсчета; такая система отсчета должна состоять не только из геодезических реек, с помощью которых можно определять положение точек в пространстве, но также из часов, расположенных в различных точках, движущихся вместе с наблюдателем и синхронизированных с часами наблюдателя. Если другой наблюдатель, движущийся относительно первого, будет смотреть на часы, принадлежащие первой системе отсчета, он обнаружит, что эти часы идут не синхронно (хотя все они идут одинаково). Для второго наблюдателя часы первой системы, расположенные впереди по направлению движения, будут казаться отстающими, а часы, остающиеся позади него, — идущими быстрее.

Следующий шаг, сделанный Эйнштейном, состоял в том, что он установил новые взаимоотношения результатов измерений расстояний и времени в двух различных инерциальных системах отсчета. Опираясь на данные опыта, Эйнштейн потребовал, чтобы скорость света в пустоте оказалась одной и той же при определении ее любым наблюдателем, даже в том случае, если оба наблюдателя определяют скорость света, наблюдая распространение одного и того же светового импульса. Если считать время универсальным, горизонтальная линия  $x$  изображает все точки  $x$  в один и тот же момент времени  $t = 0$  для всех наблюдателей (рис. 11, а). Вертикальная линия  $t$  изображает все моменты времени  $t$  для одной точки  $x = 0$  для одного из наблюдателей; наклонная линия  $t'$  — для второго наблюдателя. Если второй наблюдатель видит скорость распространения световых сигналов (с. с.) одинаковой в обоих направлениях (ось  $t'$ , рис. 11, б), его линия равных времен  $t'$  (отмеченная значком  $x'$ ) должна быть наклонной относительно линии  $x$ .

Описанная система взаимоотношений между временем и координатами двух систем называется *преобразованием Лоренца*. Эйнштейну удалось показать, что если принять преобразования Лоренца, уравнения Максвелла сохраняют свой вид во всех инерциальных системах отсчета.

Тем самым Эйнштейн разрешил парадокс, допускающий множество равноправных инерциальных систем в ньюто-

новской механике и лишь единственную систему, подразумевающую абсолютный покой, в теории Максвелла. Специальная теория относительности вернулась к представлению о равноправных инерциальных системах; в этом смысле она реставрировала принцип относительности, восходящий к Ньютону и семнадцатому веку.

Но как только единое время было принесено в жертву преобразованиям Лоренца, пришлось оставить также идею

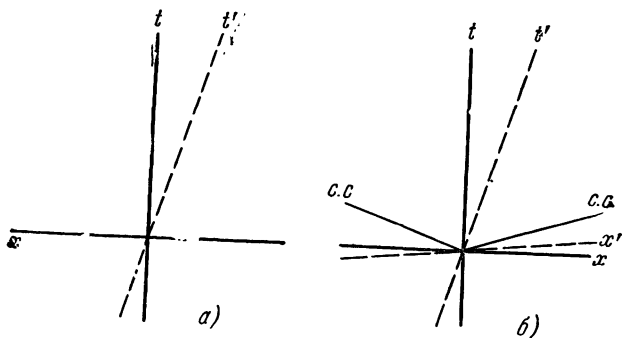


Рис. 11. Преобразование Лоренца.

о том, что часы в разных системах отсчета идут одинаково, а масштабы имеют одинаковую длину. И если слова «*принцип относительности*» сначала выражали относительное равноправие всех инерциальных систем отсчета, позже физики и философы стали говорить об «относительности времени» и «относительности длины». Если рассматривать две инерциальные системы отсчета, движущиеся относительно друг друга, каждый из наблюдателей, связанных с этими системами отсчета, обнаружит, что темп часов системы другого наблюдателя замедлен по сравнению с ходом его часов, а что касается длины масштабов, используемых его коллегой, то выясняется, что они сокращаются, если расположены в направлении движения, но остаются неизменными, если направлены перпендикулярно к нему (подробный расчет приведен в Дополнении 3).

То, что на самом деле сделано специальной теорией относительности, состоит в том, что вместо «абсолютных длин» и «абсолютного времени» появилась иная «абсолютная величина», которую принято называть *инвариантным* (или *собственным*) *пространственно-временным интерва-*

*лом.* Для двух заданных событий, происходящих на некотором удалении друг от друга, пространственное расстояние между ними не является абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчета) величиной даже в ньютоновской схеме, если между наступлением этих событий есть некоторый интервал времени. Действительно, если два события происходят не одновременно, наблюдатель, движущийся вместе с некоторой системой отсчета в одном направлении и оказавшийся в той точке, где наступило первое событие, может за промежуток времени, разделяющий два эти события, оказаться в том месте, где наступает второе событие; для этого наблюдателя оба события будут происходить в одном и том же месте пространства, хотя для наблюдателя, движущегося в противоположном направлении, они могут казаться происшедшими на значительном удалении друг от друга.

Специальная теория относительности, в основе которой лежит универсальность скорости света в пустоте, устанавливает определенную связь между характеристиками двух событий  $A$  и  $B$  — связь, не зависящую от выбора конкретной системы отсчета, приборами которой определяется интервал времени между событиями  $t$  и пространственное расстояние между событиями  $L$ . Допустим, что событие  $A$  состоит в том, что производится вспышка света, а событие  $B$  — в том, что световая волна доходит до некоторой точки пространства. В этом случае величины  $t$  и  $L$  связаны друг с другом соотношением

$$L = ct.$$

Такая связь характеристик двух событий называется *светоподобной*. Если в другой системе отсчета измеренный промежуток времени между событиями окажется равным  $t'$ , а расстояние между ними  $L'$ , то в силу того, что наблюдатели в любой инерциальной системе отсчета должны обнаружить скорость света в пустоте, равную  $c$ , должно быть справедливо соотношение

$$L' = ct'.$$

Таким образом, если два события в одной системе отсчета находятся между собой в светоподобном соотношении, они будут находиться в таком же соотношении и в любой другой системе отсчета.

Конечно, промежуток времени между двумя событиями может быть столь большим, что условие светоподобности не выполняется, так что \*)

$$L < ct.$$

В этом случае световой сигнал, посланный из точки, где произошло первое событие, в тот момент, когда оно наступило, придет в точку, где должно наступить второе событие, до того, как второе событие наступит. И снова эта взаимосвязь событий не может зависеть от того, какой наблюдатель и какими приборами производит нужные измерения. Поэтому любой наблюдатель обнаружит, что его измерения удовлетворяют соотношению

$$L' < ct'.$$

Такая взаимосвязь событий называется *времениподобной*, потому что в этом случае всегда можно найти такую инерциальную систему отсчета, что в этой системе отсчета оба события произойдут в одном и том же месте, но в разные моменты времени.

Можно рассмотреть в некотором смысле обратный случай, когда пространственное расстояние между событиями настолько велико, а промежуток времени между событиями настолько мал, что световой сигнал, посланный из точки, где наступило первое событие, в тот момент, когда оно произошло, придет в точку, где произошло второе событие, только после того, как это событие уже наступило. Тогда

$$L > ct;$$

но это же самое соотношение будет справедливо и для любого другого наблюдателя:

$$L' > ct'.$$

Такая взаимосвязь событий называется *пространственноподобной*.

Инвариантный пространственно-временной интервал, устанавливающий взаимосвязь между событиями, может быть светоподобным, времениподобным и пространствен-

---

\*) Знаки  $<$  и  $>$  относятся соответственно к случаям «меньше чем» и «больше чем»; вершина угла всегда направлена в сторону меньшей величины.

поподобным. Чтобы понять смысл введения интервала между событиями, полезно обратиться к формулам преобразования Лоренца (Дополнение 3). Обозначим промежуток времени между событиями по-прежнему через  $t$ ; пространственное расстояние между событиями можно разбить на две части, первая часть — расстояние, отсчитанное по линии относительного движения двух рассматриваемых систем (наблюдателей). Это расстояние мы будем обозначать буквой  $x$ , другая часть — это пространственное расстояние между событиями, отсчитанное в направлении, перпендикулярном направлению относительного движения (это расстояние обозначается через  $r$ ). Полное пространственное расстояние между событиями  $L$  определяется через величины  $x$  и  $r$  по теореме Пифагора:

$$L^2 = x^2 + r^2;$$

совершенно аналогичное соотношение имеет место и для величин  $L'$ ,  $x'$  и  $r'$ , измеренных другим наблюдателем. Используя введенные величины, можно записать для двух событий, находящихся в светоподобной взаимосвязи:

$$c^2 t^2 - x^2 - r^2 = 0.$$

Если взаимосвязь между событиями времениподобная, левая часть положительна, а если пространственноподобная — отрицательна.

Оказывается, что приведенная выше алгебраическая сумма квадратов нескольких величин сохраняет свое значение в любой системе отсчета, т. е. имеет одинаковое значение для штрихованных и нештрихованных координат. Штрихованные и нештрихованные координаты связаны друг с другом формулами преобразования Лоренца (Дополнение 3)

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad r' = r.$$

Используя эти соотношения, убеждаемся непосредственной подстановкой, что для обоих наблюдателей

справедливо равенство

$$c^2t^2 - x^2 - r^2 = c^2t'^2 - x'^2 - r'^2,$$

или, иначе,

$$c^2t^2 - L^2 = c^2t'^2 - L'^2.$$

Отсюда для случая времениподобных взаимоотношений между событиями можно ввести *интервал собственного времени* между событиями  $T$ ; по определению

$$T^2 = t^2 - \frac{L^2}{c^2} = t'^2 - \frac{L'^2}{c^2}.$$

Интервал собственного времени  $T$  обращается в нуль, когда мы переходим от времениподобных взаимоотношений между событиями к светоподобным. Если взаимосвязь между событиями пространственноподобная,  $T$  уже не является действительной величиной ( $T^2$  отрицательно), и тогда следует рассматривать *инвариантный пространственный интервал*  $S$ , определяемый выражением

$$S^2 = L^2 - c^2t^2 = L'^2 - c^2t'^2.$$

Величина  $S$  будет действительной, если взаимосвязь между событиями пространственноподобная, и стремится к нулю, когда эта взаимосвязь приближается к светоподобной.

Введение интервала собственного времени представляет особый интерес в приложении к движущемуся телу. Движущееся тело с течением времени меняет свое положение в пространстве, так что каждому моменту времени  $t$  соответствуют свои значения пространственных координат тела, как это и показано на рис. 12 (где изображены только две геометрические координаты  $x$  и  $y$ ; световой конус, соответствующий различным направлениям распространения светового сигнала, изображен в нижней части чертежа). Движение частицы можно представлять себе как последовательность «событий», каждое из которых происходит в определенной точке пространства и в определенный момент времени  $t_1, t_2, \dots$ , отмечаемый некоторым наблюдателем.

Но все эти события находятся во времениподобном отношении друг к другу; наклон траектории частицы на рис. 12 относительно оси  $t$  должен быть менее крутым, чем наклон любого светового сигнала, расположенного на световом конусе. Если бы два таких события были связаны



между собой пространственноподобным интервалом, нашлся бы наблюдатель, для которого эти события оказались бы одновременными; этот наблюдатель обнаружил бы одну и ту же частицу в двух различных точках одновременно. Но такой результат невозможен; случись такое, мы были бы вправе усомниться в том, что два наблюдения относятся к одной и той же частице.

Раз все события, наступающие на траектории частицы, находятся во времениподобной связи друг с другом вдоль траектории, можно определить некоторую величину (параметр; мы назовем его собственным временем частицы), которая увеличивается с возрастанием времени таким образом, что для двух достаточно близких моментов времени возрастание собственного времени частицы равно интервалу собственного времени  $T$  между двумя событиями, состоящими в прохождении частицы через две точки.

Собственное время частицы растет медленнее, чем координатное время любого наблюдателя, относительно которого тело находится в движении; конечно, если наблюдатель движется вместе с телом, оба времени просто совпадают.

Часы, связанные с движущимся телом, будут отсчитывать собственное время, причем они будут отсчитывать собственное время даже в том случае, когда тело ускоряется. Это может служить основой для рассмотрения так называемого парадокса близнецов. Представим себе двух близнецов, один из которых все время движется без ускорения, тогда как другой меняет направление своего движения на обратное и, таким образом, по крайней мере один раз оказывается вовлеченным в ускоренное движение. И когда он в конце концов вновь встретится со своим братом-домоседом, он окажется моложе, чем его менее подвижный брат. Тот близнец, который участвовал в ускоренном движении, отсчитывает меньший промежуток собст-

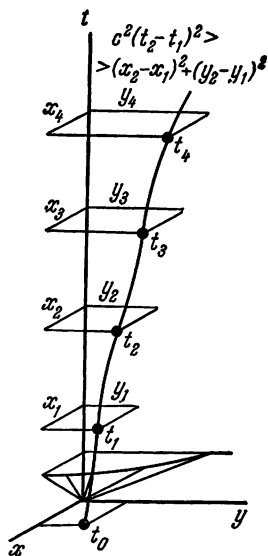


Рис. 12. Траектория частицы.

венного времени. Для доказательства будем рассуждать с точки зрения инерциальной системы отсчета, в которой близнец, не испытывающий ускорения, покоится. Его собственное время течет с той же скоростью, с какой течет и координатное время всей системы отсчета; собственное же время близнеца-путешественника течет несколько медленнее. Нельзя поменять местами этих двух близнецов, поскольку не существует такой инерциальной системы отсчета, в которой близнец-путешественник все время находился бы в покое.

### *5. Четырехмерный мир Минковского*

До появления специальной теории относительности пространство и время считались совершенно независимыми; пространство, как думали, имеет три измерения, а время — одно. Такой подход был вполне оправдан, поскольку предполагалось, что измерение времени не зависит от каких-либо пространственных характеристик. Подавляющее большинство сведений, почерпнутых экспериментаторами из их наблюдений, до последних десятилетий девятнадцатого века относилось к движениям со скоростями, столь малыми по сравнению со скоростью света, что скорость света с достаточной точностью можно было считать бесконечной. Наиболее заметным случаем, когда можно было обнаружить конечность скорости света, было наблюдение затмений спутников Юпитера. Именно эти наблюдения привели датского астронома Олафа Ремера (1644—1710) к выводу о том, что свет распространяется с конечной скоростью. Заметив, что периодическое наступление этих затмений происходило иногда раньше, а иногда позже, чем это соответствовало расчетам, причем наступление затмений задерживалось тогда, когда Юпитер и Земля находились по разные стороны Солнца, и происходило раньше, когда Юпитер и Земля были расположены по одну сторону от Солнца, — Ремер сделал вывод, что для того, чтобы свет прошел расстояние, равное диаметру земной орбиты, ему нужно около двадцати минут. Используя это время и лучшие данные по оценке расстояния от Земли до Солнца, Ремер сумел оценить величину скорости света. Она оказалась всего лишь на 20% меньше той цифры, которую принимают сегодня и которая получена путем многочисленных скрупулезных экспериментов.