

§ 5. Постулаты Эйнштейна, их кажущаяся противоречивость. Относительность одновременности, времени и длины

В июньском номере журнала “Zeitschrift fur Physik” за 1905 г. была опубликована работа А. Эйнштейна. “К электродинамике движущихся тел”, в которой был изложен новый подход к проблеме пространства, времени и движения. Впоследствии (по предложению немецкого ученого Г. Минковского) теория Эйнштейна получила название “Специальная теория относительности”, что подчеркивало, что она верна лишь для специальных, инерциальных систем отсчета. (В 1916 г. А. Эйнштейн создал так называемую “Общую теорию относительности”, в которой рассматриваются неинерциальные СО и которая является современной теорией тяготения.) Однако, включение в название теории слова “относительность” вызвало большую полемику при философском осмыслении ее содержания. Сейчас общепринято считать СТО материалистической теорией, современным физическим учением о свойствах пространства, времени и движения в ИСО.

С чего же начал Эйнштейн анализ кризисной ситуации, возникшей в физике в связи с проблемой эфира? Он не стал “спасать” эфир. После многолетних раздумий Эйнштейн пришел к выводу, что никакими опытами (не только механическими, но и другими, в том числе и оптическими) нельзя обнаружить абсолютное движение и покой, не существует особой, преимущественной системы отсчета и поэтому нет никакой надобности искать гипотетический эфир. Но отвергая светоносную среду — эфир, Эйнштейн утверждает тем самым материальность самого электромагнитного поля. Для распространения электромагнитных волн не нужна никакая промежуточная среда. Электромагнитное поле подобно веществу реально существует в пространстве и времени. С 1905 года в науке рассматриваются два вида материи: вещество и поле. Почти через 30 лет (в 1932 г.) была открыта обратимая реакция взаимопревращения частиц вещества (электрона и позитрона) в кванты электромагнитного поля. Тем самым было установлено диалектическое единство этих двух видов материи, возможность их взаимопревращения.

В своих рассуждениях Эйнштейн применил аксиоматический метод построения теории, основу которого составляют постулаты и определенные правила, на основании которых получается большое число выводов.

В теории Эйнштейна два постулата.

Первый постулат непосредственно связан с невозможностью экспериментально обнаружить абсолютное движение и покой. Учитывая результаты оптических (электромагнитных) опытов (в том числе и рассмотренных выше), Эйнштейн формулирует 1-й постулат так: невозможно, наблюдая любое физическое явление (а не только механическое) внутри инерциальной системы отсчета, установить, движется эта система отсчета или покоится. Тем самым окончательно отрицалась возможность обнаружить абсолютное движение и покой с помощью наблюдения любого физического явления. Этот постулат можно сформулировать и так: *во всех инерциальных системах отсчета при одинаковых условиях все физические процессы протекают одинаково*. Иными словами, *все законы природы проявляют себя одинаково во всех инерциальных системах отсчета и нет возможности выделить одну из них*.

Чтобы построить внутренне непротиворечивую теорию, Эйнштейн **вводит еще один постулат**: *свет (электромагнитные волны) в пустоте всегда распространяются с предельной скоростью, не зависящей ни от состояния излучающего тела, ни от движения приемника волн*. Иными словами, *скорость света одна и та же в вакууме во всех ИСО*. Нет ни одного опыта, который бы поставил под сомнение и этот постулат (выше мы упоминали о двух таких опытах: наблюдение движения двойных звезд, а также определение скоростей краевых лучей при наблюдении полного солнечного затмения, подтверждающие независимость скорости света от скорости источника света).

Оба постулата Эйнштейна являются важными, их нумерация условна и нельзя сказать, что какой-нибудь из них обладает преимуществом. Отказываясь от одного из них, мы не сможем построить специальную теорию относительности.

Второй постулат СТО утверждает принцип близкодействия,

поскольку ограничивает максимальную скорость сигнала, переносящего действие (информацию). Напомним, что классические законы механики предполагают мгновенность передачи действия, классическая механика основана на принципе дальнего действия.

Вникая в содержание постулатов, можно обнаружить, что они как будто противоречат друг другу. Покажем, что эта противоречивость постулатов кажущаяся.

Действительно, рассмотрим физический процесс в 2-х ИСО L и L' , первую из них условно назовем “неподвижной”, другую — “движущейся”. В момент времени $t=t'=0$ начала координат этих СО совпадали. В этот момент времени в месте нахождения начал координат т.т. O и O' производится световая вспышка. Через некоторое время $\Delta t = \Delta t' = t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1$ системы отсчета разойдутся своими началами координат и наблюдатели в этих СО зафиксируют фронты световой волны, каждый из которых удалится от соответствующего начала координат на расстояния $R = c\Delta t = c\Delta t'$. (рис.9).

При рассмотрении процесса распространения фронта световой волны мы воспользовались обоими постулатами. На основании 1-го постулата мы считали, что в обеих СО фронт волны будет в виде сферы с центром в начале координат (рис.9). Определяя расстояние, на которое удалится фронт световой волны, мы использовали 2-й постулат. Опираясь на постулаты

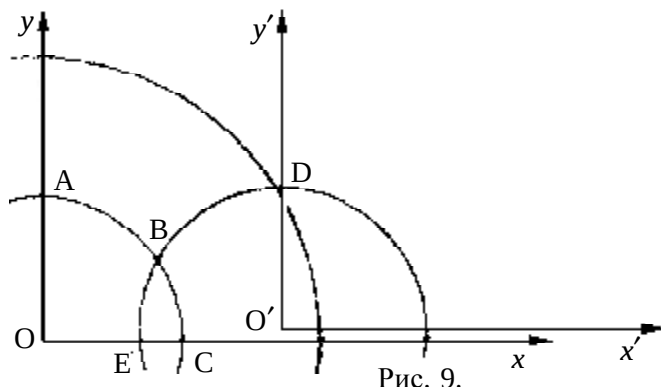


Рис. 9.

СТО, мы получили результат, абсурдный с точки зрения классической физики, с точки зрения “здорового смысла”: одна и та же световая вспышка через один и тот же промежуток времени (в классической физике длительности одного и того же процесса во всех ИСО одинаковы) будет занимать два пространственно разделенных фронта с двумя центрами.

Чтобы устранить обнаруженную противоречивость между постулатами, определим понятие “фронт световой волны”. Под фронтом световой волны понимается совокупность точек пространства, в которые световая волна приходит одновременно. Но что значит одновременно? Эйнштейн обнаружил, что строгого определения одновременности в классической физике не дано, это понятие определялось интуитивно и, как и время, имело абсолютный характер: считалось (в классической физике), что то, что одновременно происходит в одной ИСО, будет происходить одновременно в любой другой ИСО.

Согласуется ли такое понимание одновременности с постулатами Эйнштейна? Ведь очевидно, что 2-й постулат отвергает классическую теорему сложения скоростей, которая следует из формул преобразования координат и времени Галилея, а последние утверждают абсолютность промежутков времени, одновременности. Принимая за основу своих рассуждений постулаты Эйнштейна, мы должны пересмотреть основные пространственно-временные представления классической физики, в том числе и абсолютность одновременности. Для этого рассмотрим еще один мысленный (не противоречащий законам природы, но не обязательно осуществимый технически) эксперимент.

Рассмотрим те же ИСО L и L' . Пусть в СО L' находится вагон (его часто в литературе называют “вагоном Эйнштейна”), который вместе с СО L' относительно СО L слева направо вдоль оси Ox со скоростью $\frac{c}{v}$ (в СО L' вагон неподвижен). Посредине вагона загорается лампочка. Опишем процесс прихода световых сигналов к торцам вагона с точки зрения наблюдателей, находящихся в СО L и L' , учитывая при этом постулаты Эйнштейна. Наблюдатель, находящийся в вагоне (в СО L')

обнаружит, что свет дойдет до передней и задней стенок одновременно, так как скорость света по всем направлениям в вагоне одинакова и одинаково расстояние от лампочки до торцов вагона (это можно сделать с помощью приборов, объективно, независимо от наблюдателя). Иначе воспримет этот процесс наблюдатель в СО L . Хотя и для него свет распространяется от источника с одной и той же скоростью по всем направлениям, но именно из-за этого свет достигнет задней стенки раньше, чем передней. Это объясняется тем, что с точки зрения наблюдателя, находящегося в СО L , задняя стенка вагона “набегает” на световую волну, а передняя стенка “убегает” от нее. Таким образом, мы получаем принципиально новый результат, парадоксальный с точки зрения классических представлений, но непосредственно следующий из постулатов Эйнштейна: события, одновременные в одной ИСО, могут оказаться не одновременными в другой ИСО, одновременность перестала быть абсолютным понятием. Но понятие “одновременность” непосредственно связано с понятием “время”, с длительностью процесса. Отсюда следует, что длительность процесса в различных ИСО не одинакова. На основании этих новых результатов мы можем разрешить обнаруженную выше “противоречивость” постулатов Эйнштейна.

Исходя из принятого выше определения фронта световой волны, мы можем сказать, что для наблюдателя, находящегося в ИСО L , в данный момент будет только один фронт волны с точками A,B,C, а совокупность точек D,B,E он не может называть для себя световым фронтом, так как с его точки зрения в них световая волна окажется в разные моменты времени. Подобные рассуждения может провести и наблюдатель в ИСО L' : для него фронтом волны в данный момент времени будет совокупность точек D,B,E, точки же A,B,C для этого наблюдателя не образуют фронт волны. Итак, для каждого наблюдателя в данный момент времени есть только один фронт и один центр этого фронта. Парадоксальная ситуация устранена.

Разрешив кажущуюся противоречивость постулатов Эйнштейна, мы получили один из принципиальных выводов СТО —

относительность промежутков времени в различных ИСО и связанную с ней относительность одновременности.

Полученный только что результат позволяет нам уточнить правило определения длины движущегося тела. Если тело неподвижно в данной ИСО, то процесс измерения его длины не представляет труда: нужно взять масштабную линейку и узнать, сколько раз она укладывается в длине тела. Но так нельзя поступать, если тело движется относительно наблюдателя. Поэтому общим правилом измерения длины тела будет следующее: под длиной тела будем понимать расстояние между отметками положений концов тела, сделанных одновременно в данной ИСО. Однако, одновременность относительна, поэтому наблюдатель, находящийся в другой ИСО, которая движется относительно первой, будет считать, что замер координат концов тела производился в разные моменты времени. Поэтому расстояние между метками для второго наблюдателя не определяет длину тела.

В теории Эйнштейна, в СТО, утверждается относительность длины движущегося тела. Вместе с тем, ни относительность временных промежутков, ни относительность длины не отрицают объективности, реальности времени и длины. В любой ИСО у процесса есть длительность, у тела — длина. Естественно, покоящееся тело в любой ИСО имеет одну и ту же длину, длительность процесса в любой ИСО, в которой он протекает в одной и той же точке, его абсолютная характеристика.

В связи с установлением зависимости длительности процессов от их состояния (движутся они или покоятся в данной ИСО), зависимости длины тела (в том числе и масштабной линейки) от того, движется оно или покоится в данной ИСО, необходимо уточнить процесс синхронизации часов и метризации пространства по сравнению с тем, как мы это делали в классической физике. Теперь мы не можем применить способ выверки хода часов, собрав их предварительно в одно место, а затем, после синхронизации, развести по своим рабочим местам. Теперь часы

необходимо сначала разместить по своим рабочим местам, а затем, используя сигнал с конечной скоростью распространения, произвести синхронизацию, учитывая время запаздывания сигнала, посланного из “центра”, где располагаются “главные” часы. В каждой ИСО этот процесс необходимо произвести независимо. Точно так же в силу относительности длины масштабного стержня, метризация пространства должна производиться в каждой ИСО самостоятельно.

§ 6. Формулы преобразования координат и времени в СТО (формулы Лоренца).

Кинематические следствия из формул Лоренца

Мы установили, что постулаты Эйнштейна противоречат классическим представлениям о пространстве, времени и движении. Во-первых, отрицается существование абсолютного пространства и времени, абсолютного движения. Отказываясь от эфира как носителя электромагнитных колебаний, Эйнштейн признает материальность электромагнитного поля. Во-вторых, обнаруживается относительность одновременности, промежутков времени и длины, которые в классической физике считались абсолютными величинами. В-третьих, признание предельности скорости распространения электромагнитных колебаний в вакууме, требует отказа от классической теоремы сложения скоростей, которая не ограничивала величину скорости перемещения материального объекта.

Но все основные положения классической физики о пространстве, времени и движении математически кратко выражены в формулах преобразования координат и времени Галилея. Поэтому возникает задача получения новых формул преобразования координат и времени, которые бы удовлетворяли постулатам Эйнштейна и из которых непосредственно следовали бы полученные выше важные результаты об относительности временных промежутков, одновременности и длины.

Эти формулы должны удовлетворять очевидным требованиям: 1) формулы должны быть линейными, чтобы одной точке одной ИСО соответствовала одна точка другой ИСО. Это следует из однородности и изотропности пространства и однородности времени; 2) в границах справедливости классических представлений новые формулы должны переходить в формулы Галилея. Последнее условие вытекает из важнейшего принципа современной физики — **принципа соответствия**. Этот принцип утверждает, что всякая более общая физическая теория должна содержать в себе как предельный случай предшествующую теорию. Из принципа соответствия следует возможность установления границ применимости предшествующей теории. Ниже на формулах СТО мы покажем проявление принципа соответствия. Следует подчеркнуть, что этот принцип показывает, что во всякой относительной истине содержится нечто не переходящее, абсолютное. При построении новых теорий, ученые руководствуются принципом соответствия.

Как и во всех случаях, рассмотренных ранее, будем иметь ввиду частный случай движения одной ИСО L' относительно другой ИСО L . С учетом указанных выше требований, новые формулы преобразования координат и времени можно записать так:

$$\begin{aligned}x' &= a(x - vt), \\y' &= by = y, \\z' &= bz = z, \quad b = 1, \\t' &= gt - dx.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Легко показать (и это предоставляется сделать читателю самостоятельно), что из этих формул следует и относительность длины, и относительность времени. Если же положить $a = 1, g = 1, d = 0$, то формулы (6.1) тотчас же переходят в формулы Галилея. Тем самым мы проверили требование принципа соответствия. Таким образом, нам необходимо найти явный вид коэффициентов α, γ, δ (о значении коэффициента b см. Прил. 1).

Для этого рассмотрим процесс распространения света с точки зрения двух наблюдателей, находящихся в разных ИСО (этот процесс мы рассматривали в § 5, разрешая противоречивость

постулатов Эйнштейна). Фронт светового сигнала, испущенного из совпадавших в момент $t_0 = t'_0 = 0$ точек O и O' , через время $\Delta t = t - t_0 = t$ по часам ИСО L и t' по часам ИСО L' займет положение, уравнения которого для каждого наблюдателя с учетом постулатов СТО запишутся так:

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 + z^2 &= c^2 t^2, \\x'^2 + y'^2 + z'^2 &= c^2 t'^2.\end{aligned}\tag{6.2}$$

В этих равенствах учтено, что для обоих наблюдателей фронт-сфера (наблюдатели равноправны), скорость света в обеих ИСО одна (2-й постулат СТО), времена t и t' не равны друг другу (см. § 5).

Подставим формулы (6.1) во второе равенство (6.2):

$$a^2 x^2 - 2a^2 v x t + a^2 v^2 t^2 + y^2 + z^2 = c^2 g^2 t^2 - 2c^2 g d x t + c^2 d^2 x^2.$$

Сгруппируем члены с одинаковыми переменными:

$$(a^2 - c^2 d^2)x^2 + y^2 + z^2 = (c^2 g^2 - a^2 v^2)t^2 + 2x t(a^2 v - c^2 g d).$$

Чтобы это выражение совпало с формулой для фронта волны в ИСО L , необходимо выполнение условий:

$$\begin{aligned}a^2 - c^2 d^2 &= 1, \\c^2 g^2 - a^2 v^2 &= c^2, \\a^2 v - c^2 g d &= 0.\end{aligned}\tag{6.4}$$

Решая алгебраическую систему уравнений (6.4) методом исключения переменных, получаем, что (см. Прил. 3) :

$$\begin{aligned}a &= g = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \\d &= \frac{a \cdot v}{c^2}.\end{aligned}\tag{6.5}$$

Эти значения коэффициентов a, g, d подставляем в (6.1), и для формул преобразования координат и времени в СТО, совместимых с постулатами Эйнштейна, получаем соотношения, которые названы формулами Лоренца:

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \\
 t' &= \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

Решая эти формулы относительно не штрихованных координат и времени, получаем так называемые обращенные формулы Лоренца:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \\
 t &= \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

Изменение знака у членов, содержащих величину v в первой степени, связано с тем, что ИСО L движется относительно ИСО L' справа налево со скоростью ($-v$) (направление слева направо в обеих СО мы приняли за положительное (см. рис. 9)). У квадратных корней берем лишь знак $(+)$, чтобы в обеих ИСО L и L' ход времени был однонаправленным.

На основании принципа соответствия и используя формулы (6.6) или (6.7), установим границы применимости положений классической физики. Как видно из формул (6.6) или (6.7), они переходят в формулы Галилея, если выполняется условие

$$\frac{v}{c} \ll 1. \tag{*}$$

Это условие означает, что рассматриваются скорости движения тел, во много раз меньшие скорости света. Так что можно сказать, что классическая физика является физикой малых

скоростей (по сравнению со скоростью света). Но, во-первых, это не означает, что СТО — это физика движений со скоростями, близкими к скорости света; во-вторых, при малых скоростях СТО также справедлива. Например, есть формула (о ней мы будем говорить ниже), которая получается только в СТО $E_0 = mc^2$, где E_0 — энергия покоящегося тела, m — его масса. Ничего подобного классическая физика не утверждала. Поэтому о классической физике (с рассматриваемой точки зрения) можно говорить как о физике, которой можно (но не всегда, хотя и часто в повседневной жизни) пользоваться, если движения тел происходят со скоростями, много меньшими скорости света (в вакууме).

С другой стороны, в классической физике скорости процессов не имеют предела (что следует из теоремы сложения скоростей), следовательно, скорость света, стоящая в знаменателе соотношения (*), в принципе, может быть бесконечно большой. Тем самым мы пришли к утверждению основного положения теории дальнего действия. Таким образом, условие (*) позволяет сказать, что классическая физика — это физика, основанная на принципе дальнего действия. Как известно, этот принцип приводит к утверждению о всеобщей, абсолютной причинно-следственной связи всех событий в мире, а отсюда один “шаг” до утверждения о существовании божественной силы. Так физическое содержание науки переплетается с мировоззренческим. Признание 2-го постулата СТО — это утверждение принципа близкого действия: действие передается от точки к точке пространства с конечной скоростью. Отсюда тотчас же следует, что не могут все события в мире иметь между собой причинно-следственную связь. Далее мы будем говорить об этом очень подробно, так как СТО внесла в понимание этого вопроса принципиально новое по сравнению с классической физикой.

Относительность временных промежутков

Выше мы качественно, исходя из постулатов СТО, установили относительность промежутков времени и длины. Используя формулы Лоренца (которые основаны на постулатах

Эйнштейна), получим количественные соотношения между промежутками времени и длинами, измеренными в разных ИСО.

В тех же инерциальных системах отсчета как и раньше, которые движутся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, рассмотрим некоторый физический процесс. Пусть в ИСО L' процесс протекает в одном месте, т. е. $x'_2 = x'_1$, и длится промежуток времени $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. Назовем эту длительность процесса собственной длительностью и обозначим через Δt_0 . Очевидно, что собственная длительность процесса является абсолютной, инвариантной величиной, подобно собственной длине тела l_0 . Воспользуемся четвертой из обращенных формул Лоренца (6.7) и определим длительность того же процесса с точки зрения наблюдателя, находящегося в ИСО L . Составим разность двух выражений:

$$t_i = \frac{t'_i + \frac{vx'_i}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где $i=1,2$.

Учитывая, что $x'_2 = x'_1$, получаем:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6.9)$$

Из этой формулы следует, что наибольшую длительность процесс имеет в той ИСО, относительно которой он перемещается. При переходе к классическим представлениям, получаем известный нам результат: $\Delta t = \Delta t'$.

Имеется прямое экспериментальное подтверждение относительности длительности процессов, движущихся относительно наблюдателя (приборов). В 1935 году во вторичных космических лучах, рождающихся при столкновении первичных космических частиц, приходящих к нам со всех сторон Вселенной, с

молекулами воздуха на высоте порядка 6 км были обнаружены новые элементарные частицы, получившие название m (мю) - мезонов. В лабораторных условиях удалось определить время их собственной жизни, оно оказалось порядка 10^{-6} с. “Прожив” столь малый промежуток времени, мю - мезоны распадаются, появляются другие частицы. Продукты распада мю - мезонов, родившихся на высоте 6 км, обнаруживаются у Земли. Но возникала проблема: как за время жизни в 10^{-6} с, даже двигаясь со скоростью света $c=3 \cdot 10^8$ м/с, мю-мезоны могут преодолеть расстояние в 6 км. Элементарный расчет давал лишь 300 м! (То, что распад происходил у поверхности Земли, было обнаружено экспериментально). Разрешить парадокс смогла лишь СТО, исходя из относительности временных промежутков. Действительно, промежуток времени $\Delta t = 10^{-6}$ с — это время жизни мю-мезона в ИСО, в которой он неподвижен, то есть это собственная длительность жизни мезона. Назовем эту ИСО СО “Мезон”. В ИСО “Земля” время жизни мезона будет в тысячи раз больше, все определяется скоростью его движения. И нет ничего удивительного, что за большее время жизни в ИСО “Земля” мезон пролетает расстояние в несколько километров от места своего рождения до поверхности Земли. Читателю предоставляется возможность решить эту задачу в ИСО “Мезон” и убедиться, что любое явление само по себе инвариантно, т. е. должно наблюдаться во всех ИСО (но не обязательно одинаково!). В этом (втором) варианте задачи все же придется объяснить, как за время в 10^{-6} с мезон “встретится” с Землей? На этот вопрос мы сможем дать ответ, познакомившись с относительностью длины движущегося тела.

Относительность длины движущегося тела.

В движущейся ИСО L' вдоль оси $O'x'$ неподвижно располагается одномерный стержень. Замеряя координаты концов стержня в этой ИСО x''_1 и x''_2 определим его длину $l' = x''_2 - x''_1$. В любой другой ИСО, в которой этот стержень будет покоиться, его длина будет такой же. Назовем такую длину тела в покое, которая будет его абсолютной характеристикой, собственной

длиной тела и обозначим ее так: l_0 . Обратим внимание на то, что в наших рассуждениях появилась еще одна абсолютная, инвариантная величина. Значит, не все в теории относительности относительно! (К этому вопросу мы также будем возвращаться не раз.)

Руководствуясь правилом определения длины движущегося тела, замерим одновременно координаты начала и конца стержня, находясь не в ИСО L' , а в ИСО L , получаем x_1 и x_2 . Воспользуемся первой формулой в (6.6), которая связывает не штрихованные и штрихованные координаты концов стержня. Составляя разность соответствующих выражений,

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_2 - x_1 + vt_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где учтено, что $t_2 = t_1$.

Вводя для длины движущегося тела обозначение $l = x_2 - x_1$, получаем еще одну знаменитую формулу СТО:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (6.8)$$

Из этой формулы следует: 1) длина движущегося тела является относительной величиной, численное значение ее в разных ИСО разное. Иногда говорят о “сокращении” длины движущегося тела. Это неверно, так как никакого сокращения длины тела не происходит, эффект относительности длины является следствием постулатов Эйнштейна, а не динамических процессов внутри тела; 2) длина тела в ИСО, относительно которой тело движется, меньше его собственной длины. Но обе длины реальны, объективны и могут быть зафиксированы приборами; 3) если положить $v = c$, то длина движущегося тела окажется равной нулю. Однако (это будет показано ниже) ни одно тело (кроме квантов электромагнитного поля) не может двигаться со скоростью света, а поэтому ни в одной ИСО длина вещественного тела не может равняться нулю. Протяженность

тела — его объективная, и в этом смысле, абсолютная характеристика, а численное значение этой характеристики зависит от условий измерения этой величины.

Не представляет труда рассмотреть связь длин того же стержня, если он неподвижен в ИСО L и движется относительно ИСО L' . Количественная связь между этими длинами будет найдена с помощью первой из обращенных формул Лоренца (6.7), с учетом того, что $t'_2 = t'_1$, так как теперь в один и тот же момент времени нужно определять координаты, находясь в ИСО L' . Вводя соответствующие обозначения, мы получим

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где l_0 — длина стержня в ИСО L , где он покоится, l — длина стержня в ИСО L' , относительно которой стержень движется. Эта формула в точности совпадает с формулой (6.8), в чем проявился принцип относительности СТО, равноправия ИСО. Читатель легко проверит выполнимость принципа соответствия.

Теорема сложения скоростей в СТО.

Теорема сложения скоростей находит большое практическое приложение. Поэтому данная задача имеет не только теоретический интерес.

Пусть в момент времени $t_0 = t'_0 = 0$ начала координат точки O и O' ИСО L и L' совпадали, там же находилось наблюдаемое тело. Через некоторое время t (по часам ИСО L) и t' (по часам ИСО L') тело оказалось в точке с координатой x (в ИСО L) и соответственно x' (в ИСО L'). Все эти величины связаны формулами Лоренца (6.6) или (6.7). Если первые три равенства в (6.6) разделим на четвертое, то получим следующие выражения:

$$\frac{x'}{t'} = \frac{\frac{x}{t} - v}{1 - \frac{v}{c^2} \cdot \frac{x}{t}}; \quad \frac{y'}{t'} = \frac{\frac{y}{t} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c^2} \cdot \frac{x}{t}}; \quad \frac{z'}{t'} = \frac{\frac{z}{t} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c^2} \cdot \frac{x}{t}}.$$

По определению скорости величины $\frac{x}{t}, \frac{x'}{t'}$ и т. д. определяют проекции средней скорости тела на соответствующие оси координат. Вводя обычные обозначения, запишем релятивистскую теорему сложения скоростей в виде следующих трех равенств:

$$u'_{x'} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}, \quad u'_{y'} = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}, \quad u'_{z'} = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}. \quad (6.10)$$

Уже один вид этих формул говорит о том, что мы получили совершенно новую, отличную от классической, теорему сложения скоростей. Все проекции скорости в ИСО L' зависят от проекции u_x ИСО L . Кроме того, в классической физике мы получили, что $u'_{y'} = u_y$; $u'_{z'} = u_z$. В СТО же все три проекции скорости преобразуются при переходе от одной ИСО к другой. Принцип соответствия выполняется тотчас же, как только мы пренебрежем членами

$$\frac{v^2}{c^2} \ll 1, \quad \frac{v}{c} \ll 1 : u'_{x'} = u_x - v, \quad u'_{y'} = u_y, \quad u'_{z'} = u_z.$$

Естественно ожидать, что формулы ТСС СТО не противоречат утверждению, что скорость света является предельной скоростью и не зависит от скорости движения источника, с которым можно связать подвижную ИСО. Действительно, рассмотрим гипотетический опыт, когда ИСО L' движется со скоростью света $v = c$ и в ней посылается световой сигнал с той же скоростью $u'_{x'} = c$ (ниже мы обсудим вопрос: можно ли с фотоном — квантом света связать ИСО и покажем, что это нельзя сделать принципиально). Разрешив первую формулу ТСС СТО относительно не штрихованной скорости u_x , получаем:

$$u_x = \frac{u'_{x'} + v}{1 + \frac{u'_{x'} v}{c^2}} = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{c} = c.$$

Опираясь на формулы ТСС СТО и обходясь без эфира, объясним и явление аберрации, и результаты опытов Физо и Майкельсона.

Явление аберрации.

В ИСО “Звезда”, Землю мы считаем движущейся относительно звезд, построим треугольник скоростей (рис. 10),

где $u'_{x'}$ – скорость движения Земли в мировом пространстве, $u'_{y'} = -c$ – скорость света, идущего от звезды.

Составим отношение проекций скоростей, что определит тангенс угла наклона оси зрительной трубы:

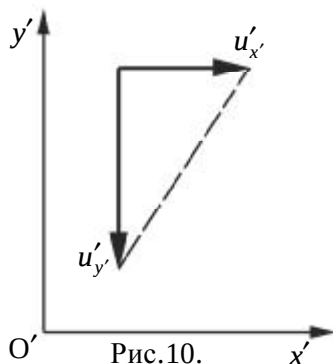


Рис.10.

$$tg = \frac{u'_{x'}}{u'_{y'}} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} \cdot \frac{1 - \frac{u_x v}{c^2}}{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{u_x - v}{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

В ИСО L-“Земля” проекция скорости света на направление оси Ox u_x принимается равной нулю, так мы рассматриваем распространение света только в направлении оси Oy , в на-

правлении к Земле. Отбрасывая малый член $\frac{v^2}{c^2}$, получаем в классическом приближении

$$tg \alpha \approx \frac{v}{c}.$$

Именно такой же результат получался в классической физике в предположении абсолютно неподвижного в мировом пространстве эфира. Мы же с самого начала построения СТО отказались от гипотетического эфира и пришли к классическому результату, исходя из ТСС.

Опыт Физо.

Воспользуемся первой формулой ТСС СТО, так как свет в опытной установке распространяется вдоль трубы, направление которой можно принять за ось Ox :

$$u'_{x'} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}.$$

Так как второй член в знаменателе мал (v — скорость воды!), то можно применить приближенную формулу деления:

$$\frac{1}{1-a} \approx 1+a, \text{ где } a = \frac{u_x v}{c^2}.$$

Тогда

$$u'_{x'} \approx (u_x - v) \left(1 + \frac{u_x v}{c^2} \right) = u_x - v + \frac{u_x^2 v}{c^2} - \frac{u_x v^2}{c^2}.$$

Сгруппируем второй и третий члены и пренебрежем последним (четвертым):

$$u'_{x'} = u_x - v \left(1 - \frac{u_x^2}{c^2} \right)$$

Учитывая, что $u_x = \frac{c}{n}$ — скорость света в стоячей воде, где n — показатель преломления воды, получаем:

$$u'_{x'} = \frac{c}{n} - v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{c}{n} - kv, \text{ где } k = 1 - \frac{1}{n^2},$$

что и требовалось показать.

Опыт Майкельсона.

Результат этого опыта объясняется непосредственно, если принять 2-й постулат Эйнштейна. Из опыта следовало, что если существует эфир, то он должен полностью увлекаться движущейся средой. Только в этом случае наблюдаемая интерференционная

картина не будет изменяться при повороте установки, в полностью увлекаемом эфире скорость света действительно будет одной и той же по всем направлениям. Но второй постулат СТО как раз и утверждает постоянство скорости света по всем направлениям, и предельность ее в вакууме, не используя гипотетическую среду — эфир. Таким образом, опыт Майкельсона в СТО объясняется естественным образом, если исходить из постулатов Эйнштейна.

Еще раз о предельности скорости света в вакууме.

Покажем, что если принять постулаты Эйнштейна и следующие из них формулы Лоренца, то предельность скорости света в вакууме требуется законом причинности, утверждающим, что событие-причина всегда предшествует событию-следствию. Доказательство проведем “от противного”. Допустим, что существует сигнал, распространяющийся со скоростью $V > c$. Тогда за время t этот сигнал удалится от места возникновения на расстояние $x = V \cdot t$. Подставим эту величину в четвертую формулу Лоренца:

$$t' = \frac{t - \frac{v x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\left(1 - \frac{vV}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot t$$

Всегда можно указать скорость v (в пределах от 0 до c), чтобы выполнялось неравенство ($V > c$!):

$$\frac{vV}{c^2} > 1.$$

Тогда положительному течению времени в ИСО L будет соответствовать отрицательное направление хода времени в ИСО L' , в ИСО L' причина поменяется со следствием в своей очередности, что противоречит закону причинности. До сих пор не было обнаружено ни одного случая отклонения от закона причинности, поэтому его называют абсолютным законом природы. Таким образом, сделанное допущение о существовании

сигнала, превышающего скорость света в вакууме, невозможно. Вместе с тем, следует заметить, что в любой прозрачной среде с показателем преломления $n > 1$ скорость света будет равна c/n , что меньше скорости света в вакууме. В такой среде, например, элементарные частицы могут двигаться со скоростями, большими, чем c/n и это не противоречит предельности скорости света в вакууме.

§7. Задачи по кинематике СТО

Нет лучшего способа проверить знание теории, чем решение задач. Все рассматриваемые ниже задачи сопровождаются кратким текстом решения. Но желательно, чтобы читатель сначала наметил свое решение, а затем сопоставил его с приводимым текстом.

Задача № 1.

У писателя С. Я. Маршака есть такое стихотворение, разобранное в котором можно только на основе СТО.

*Честь друзьям, вперед смотрящим,
Звездолетчикам бесстрашным,
Что зовем мы настоящим —
Вы считаете вчерашним.*

*Обратив же в час свободный
Взор к Земле, к друзьям, вас ждущим,
Наше здешнее “сегодня”
Вы считаете грядущим!*

Прокомментируйте стихотворение, исходя из относительности временных промежутков.

Решение.

В первом четверостишье поэт рассматривает полет звездолетчиков (сейчас мы их называем космонавтами), находясь в ИСО “Земля”. Моменту времени на Земле t_0 на корабле, который движется относительно Земли, будет соответствовать момент времени

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

что больше t_0 . Поэтому у космонавтов, с точки зрения землян, пройдет больше времени и то, что для нас (землян) “настоящее”, например, момент окончания составления первого четверостишья, для них — “вчерашнее”.

Во втором четверостишье собственным временем считается время, отсчитываемое по корабельным часам t_0 . С точки зрения космонавтов на Земле этому моменту t_0 будет соответствовать момент времени

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

что больше t_0 .

Это и означает, что наше (земное) “сейчас”, с точки зрения космонавтов, наступит позже.

Примечание. При решении задач на относительность временных промежутков нужно всегда помнить, что часы в каждой ИСО идут совершенно одинаково (системы отсчета совершенно равноправны!), **но с точки зрения наблюдателя**, мимо которого перемещается другая ИСО, в последней “пройдет” больший промежуток времени. Именно так надо понимать относительность временных промежутков.

Задача № 2.

Через помещение, ширина которого l_0 , пролетает стрела, влетев в окно и вылетев через дверь, расположенную напротив окна. Собственная длина стрелы также l_0 . Прокомментировать процесс полета стрелы с т. з. двух наблюдателей, один из которых находится в ИСО “Комната”, другой — в ИСО “Стрела”, т.е. летит вместе со стрелой.

Решение

Для наблюдателя, находящегося в ИСО “Комната”, размеры летящей стрелы меньше ширины комнаты

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Поэтому он зафиксирует одновременное нахождение концов стрелы в помещении. С т. з. наблюдателя, находящегося в ИСО “Стрела”, ширина комнаты меньше размеров стрелы и ее концы не могут одновременно находиться в помещении. “Парадокс” стрелы разрешается на основании относительности одновременности: то, что одновременно в одной ИСО (одновременное нахождение концов стрелы в помещении), не одновременно для другого наблюдателя, находящегося в движущейся ИСО. Сам факт пролета стрелы через помещение будут наблюдать во всех ИСО (в ИСО “Стрела” комната “пролетает” мимо стрелы, но это равноценно с т.з. принципа относительности). Эта задача позволяет нам еще раз утвердить объективность, инвариантность любого физического события или процесса.

Задача № 3.

В § 6 была рассмотрена задача о жизни мю-мезона. На основании относительности временных промежутков было объяснено (в ИСО “Земля”), как за малое собственное время жизни мезон может преодолеть расстояние в десятки километров. Читателю предоставлялась возможность самостоятельно объяснить этот процесс с т. з. наблюдателя, связанного с мезоном. Предлагаемое ниже решение может служить проверкой правильности данного читателем решения.

Решение

В ИСО “Мезон” сама частица неподвижна и ее собственное время жизни порядка 10^{-6} с. Даже двигаясь со скоростью света, элементарная частица смогла бы пролететь всего лишь 300 метров! И все же встреча мезона с Землей должна состояться и в

ИСО “Мезон” — событие инвариантно! Обратим внимание на то, что в ИСО “Мезон” движущейся является Земля, она “падает” на мезон. Поэтому для наблюдателя, находящегося в ИСО “Мезон”, Земле нужно пролететь не десятки километров, а согласно формуле

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

т.е. во столько же раз меньше, во сколько собственное время жизни мезона в ИСО “Мезон” меньше его времени жизни в ИСО “Земля”. В результате за меньшее время (за собственное время жизни мезона) Земля “может преодолеть” меньшее расстояние, разделяющее ее и мезон в ИСО “Мезон”.

Задача №4.

Показать, что объемная плотность зарядов больше в той ИСО, относительно которой заряды движутся.

Решение

Еще в XIX в. М. Фарадеем было доказано, что алгебраическая сумма зарядов замкнутой системы есть величина постоянная (закон сохранения электрического заряда). Но в задаче речь идет об объемной плотности электрических зарядов, которая, как мы покажем ниже, является в СТО относительной величиной. Действительно, по определению средняя объемная плотность зарядов равна

$$r = \frac{\Delta q}{\Delta V},$$

где Δq заряд, находящийся в объеме ΔV . Но объем тела есть величина относительная, и он меньше в той ИСО, относительно которой тело движется. Если ΔV_0 — объем покоящегося тела, то

$$\Delta V = S \cdot l = S \cdot l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = V_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

тогда

$$r = \frac{\Delta q}{\Delta V_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > r_0,$$

что и требовалось доказать.

Задача № 5.

В ИСО L из пунктов A и B , расстояние между которыми l_0 , одновременно стартуют два космических корабля навстречу друг другу со скоростями, соответственно равными u и $2u$. Определить, сколько времени пройдет до их встречи с точки зрения земного наблюдателя.

Запишем задачу кратко (предыдущие задачи по сути были качественными).

Найти	$\Delta t_{01}, \Delta t_{02}$	Решение
Дано	l_0 $v_1 = u$ $v_2 = 2u$	

Следуя условию задачи, которое дано в ИСО “Земля”, выберем ее за ИСО L . Сделаем чертеж в этой ИСО:



Общая формула, связывающая собственное время движения кораблей (которое нам надо определить) с земным временем, запишется так

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

где v — скорость движения каждого корабля относительно Земли, она разная у кораблей.

По условию задачи в ИСО “Земля” корабли должны до встречи пролететь общее расстояние l_0 , которое можно разделить на два участка: $l_1 = u \cdot \Delta t$ и $l_2 = 2u \cdot \Delta t$, где учтено, что время движения обоих кораблей до встречи одинаково.

Далее, учтем, что $l = l_1 + l_2$.

Из этих равенств определяем время движения кораблей в ИСО “Земля”: $\Delta t = \frac{l_0}{3u}$. Используя общую формулу для относительности временных промежутков, рассчитываем Δt_{01} и Δt_{02} :

$$\Delta t_{01} = \frac{l_0}{3u} \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}; \quad \Delta t_{02} = \frac{l_0}{3u} \sqrt{1 - \frac{4u^2}{c^2}}.$$

Обратим внимание на то, что Δt_{01} и Δt_{02} - столько времени пройдет до встречи кораблей с точки зрения земного наблюдателя. На кораблях же ход часов такой же, как и на земле: собственное время движения кораблей есть величина инвариантная и равна (в нашем случае) $\Delta t_0 = \frac{l_0}{3u}$.

Задача № 6.

Рассмотрим задачу, получившую в литературе название “парадокс близнецов”. Суть ее в следующем. Один из близнецов находится на Земле, второй совершает путешествие на космическом корабле. Утверждается, что когда второй близнец возвратится на Землю, он обнаружит новое поколение людей, так как по земным часам пройдет больше времени, чем по его “собственным часам”.

Все это действительно когда-нибудь произойдет, но предсказывает это не специальная, а общая теория относительности, построенная А. Эйнштейном в 1916 году. Дело в том, что СТО рассматривает только ИСО, а из 2-х рассматриваемых в задаче систем отсчета “Земля” и “Корабль”, одна (“Корабль”) заведомо не инерциальная: чтобы возвратиться

на Землю, космонавту придется двигаться с ускорением (чтобы изменить направление движения), а поэтому рассуждения СТО на этом участке движения об относительности временных промежутков непригодны. Именно в общей теории относительности рассматриваются не инерциальные СО и показывается абсолютное замедление хода времени в них. Все попытки на основе СТО объяснить парадокс близнецов содержат принципиальную неточность: разворот корабля считается мгновенным, а это неверно.

Для дальнейшего закрепления материала по кинематике СТО отсылаем читателя к специальным задачкам по СТО (см. список литературы, а также прил. 5).

§ 8. Интервал, его инвариантность. Два вида интервала. Световой конус

Как и в любой другой физической теории, в СТО помимо относительных величин, численное значение которых связано с выбором СО, имеется определенное количество абсолютных характеристик. По сравнению с классической физикой, СТО изменила соотношение числа и вида абсолютных и относительных величин. Так, длина из ранга абсолютных величин перешла в ранг относительных. Однако длина тела в покое есть его абсолютная характеристика. Абсолютной величиной является и собственная длительность события, абсолютной величиной является и скорость света в вакууме. Поэтому неверно утверждение, что будто бы СТО “все сделала относительным”. Наоборот, СТО обнаружила более глубокие свойства окружающего нас мира, его объективность, его познаваемость.

Среди новых, отсутствовавших в классической физике, абсолютных величин СТО вводит так называемый интервал. Особенностью этой величины является то, что она **связывает пространственные и временные характеристики двух событий**. Интервал вводится следующим образом, его квадрат определяется так:

$$S^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2, \quad (8.1)$$

где индекс 1 относится к первому событию, индекс 2 — ко второму.

Первые три слагаемые определяют пространственное расстояние между двумя событиями, четвертое слагаемое связано с промежутком времени наступления этих событий (умноженного на скорость света). Хотя длина и промежуток времени в СТО — относительные величины, но их комбинация в форме интервала является абсолютной величиной. Докажем инвариантность интервала. Упростим предварительно форму его записи, связав с одним из событий начало координат и счет времени будем вести от момента возникновения этого события, т. е. мы будем считать $x_1 = y_1 = z_1 = 0$, $t_1 = 0$. Тогда формула интервала (8.1) запишется так:

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2. \quad (8.2)$$

При этом мы опустили индекс 2, но будем помнить, что и в такой форме интервал по-прежнему связывает два события. Воспользуемся обращенными формулами Лоренца (6.7) и подставим их в формулу (8.2). После приведения к общему знаменателю 1-го и 4-го членов, раскрытия скобок и сокращения подобных членов, получаем:

$$\begin{aligned} S^2 &= \frac{(x' + vt')^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} + y'^2 + z'^2 - c^2 \frac{\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \\ &= x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2. \end{aligned} \quad (8.3)$$

Мы доказали, что интервал в любой ИСО имеет один и тот же аналитический вид, одно и то же числовое значение, т. е. является абсолютной, инвариантной величиной. На смену по отдельности относительным величинам — длине и промежуткам времени — в СТО вводится новая абсолютная величина — интервал.

Если ввести такие обозначения $x = x_1, y = x_2, z = x_3, t = x_4$, то интервал запишется через эти четыре координаты, которые определяют пространственно-временное положение одного из событий по отношению к другому, находящемуся в начале координат. Эта четверка чисел x_i , где $i = 1, 2, 3, 4$ характеризует точку в “четырёхмерном пространстве-времени”, будем называть эту точку — мировой точкой события. В введенном нами 4-мерном пространстве-времени все 4 координаты относительны (вспомним, что в классическом трехмерном пространстве пространственные координаты были относительны, а время было абсолютным), при переходе от одной ИСО к другой все они преобразуются по формулам Лоренца. Однако, полного равенства между пространственными координатами и четвертой временной координатой в СТО все же нет: в пространстве можно перемещаться в любом направлении, время же течет от прошлого к будущему, вернуться в прошлое СТО не разрешает. Абсолютность интервала имеет еще и то значение, что указывает нам на необходимость при рассмотрении любых событий определять не только их расположение в пространстве, но и моменты времени, когда эти события происходят (см. Прил. 4).

Интервал содержит в себе и еще одно, принципиально новое по сравнению с классической физикой, содержание. Для выяснения этого свойства интервала введем следующие обозначения:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2; \quad t = T. \quad (8.4)$$

Тогда интервал запишется так:

$$S^2 = R^2 - c^2 T^2. \quad (8.5)$$

Рассмотрим два события, для которых справедливо условие:

$$S^2 = (R^2 - c^2 T^2) > 0 \quad \text{или} \quad R > cT. \quad (8.6)$$

Это неравенство означает, что даже световой сигнал, который в СТО считается самым быстрым, предельным (в вакууме) не сможет преодолеть расстояние R , разделяющее два события (напомним: интервал связывает два события!) за время чередования этих событий T . Но это означает, что между данными

двумя событиями не может быть причинно-следственной связи, причем, ни в одной ИСО, так как интервал абсолютен и если квадрат его в одной ИСО больше нуля, то и в любой другой ИСО $S^2 > 0$. Такой интервал получил название пространственно - подобного интервала. В этом названии подчеркивается одно из свойств пары событий: их расположение в пространстве абсолютно. Если в одной ИСО 1-е событие ближе к началу координат, чем второе, то и в любой другой ИСО такое расположение в пространстве сохраняется (хотя само расстояние между событиями — величина относительная).

Рассмотрим теперь такую пару событий, для которой выполняется условие $R < cT$. Это означает, что световой сигнал может преодолеть расстояние R , разделяющее события, за время их чередования T . Но тогда между данной парой событий может (хотя и не обязательно) существовать причинно-следственная связь. Для такого интервала справедливо неравенство

$$S^2 = (R^2 - c^2 T^2) < 0. \quad (8.7)$$

и оно выполняется в любой ИСО в силу абсолютности интервала. Этот интервал называется временно-подобным, в названии подчеркивается существенное для данной пары событий: их абсолютная временная последовательность.

Так с помощью интервала все события в мире по отношению к данному событию можно разделить на два не переходящих друг в друга класса событий: 1) события, которые с данным событием могут иметь причинно-следственную связь; 2) события, которые с данным не имеют причинно-следственной связи. Подчеркнем, что все события рассматриваются по отношению к данному. Чтобы решить, как эти события соотносятся между собой, необходимо и для них составить выражение интервала и определить его знак, а далее рассуждать так, как это сделано выше.

Мог ли быть подобный критерий причинно-следственных связей в классической физике? Как уже было показано выше (§ 6), классическая физика основана на принципе дальнего действия, т.е. предполагается существование сигнала, распространяющегося на любое расстояние мгновенно. Отсюда следует, что между любой парой событий, по классическим представлениям, может

существовать всеобщая причинно-следственная связь. Говорят, что классическая физика основана на абсолютном детерминизме. Таким образом, признание предельности скорости света в вакууме, утверждение принципа близкодействия, позволяет физике правильнее, глубже выяснить взаимосвязь и взаимообусловленность событий в мире. В этом одна из заслуг специальной теории относительности.

Задачу о характере связи между парой событий позволяет графически решить пространственно-временная диаграмма, получившая название “световой конус”. Его образующие удовлетворяют условию $|R| = |cT|$, при выполнении которого $S^2 = 0$. Соответствующий интервал получил название светоподобного интервала, (рис. 11). На осях пространственно-

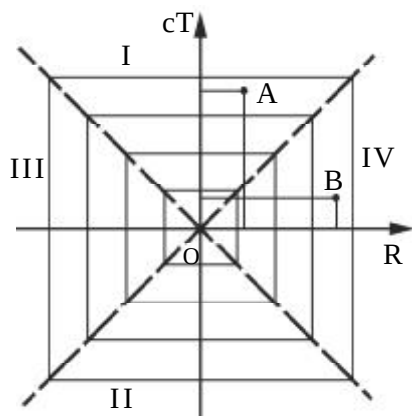


Рис. 11.

временной диаграммы откладываются однородные величины R и cT , поэтому биссектрисы углов удовлетворяют уравнению $|R| = |cT|$, которое является уравнением движения светового луча, испущенного из начала координат в нулевой момент времени. Одно из событий помещаем в начало координат. Другое пусть определяется координатами т. А. Из диграммы видно, что для событий О и А $R < cT$, т. е. $S^2 < 0$. Следовательно, эти события являются временно-подобными, их чередование во времени

абсолютно, между ними может быть причинно-следственная связь.

Рассматривая события O и B , для которых $R > cT$, устанавливаем, что они являются пространственно-подобными, ни в одной ИСО между ними не может быть причинно-следственной связи, так как даже самый быстрый световой сигнал, испущенный из точки O , за время T чередования событий не может преодолеть расстояние, разделяющее события, не может тем самым повлиять на событие B .

Возникает вопрос: в какой причинной связи находятся между собой события A и B ? Для ответа на этот вопрос необходимо построить новую пространственно-временную диаграмму с началом в одном из этих событий, сохраняя направление осей, и провести рассуждения, аналогичные предыдущим.

Прямые $|R| = |cT|$ являются пространственно-временными траекториями световых лучей. С их помощью пространственно-временная плоскость разделяется на четыре квадранта, каждой точке которых (мировой точке) соответствует какое-либо событие. Все события, происшедшие в момент времени $T > 0$ и которым соответствуют мировые точки в 1-м квадранте, происходят в будущем по отношению к событию O , причем это утверждение имеет абсолютный характер. Точно также все события, мировые точки которых располагаются во 2-м квадранте, произошли в прошлом по отношению к событию O . 2-й квадрант определяет события, абсолютно прошлые по отношению к событию в т. O .

В квадрантах 3-м и 4-м находятся мировые точки событий, которые по отношению к событию O находятся абсолютно слева или справа, и это утверждение сохраняется в любой другой ИСО, так как для этих событий абсолютным является расположение в пространстве, временной же порядок каждого из этих событий по отношению к событию O — относителен.