

Релятивизм или СТО на пальцах

Макарченко Иван Павлович

2003 год

Аннотация

Макарченко И.П. Релятивизм или СТО на пальцах. Санкт Петербург 2003.

Предлагается новое построение Специальной Теории Относительности. Объяснения от очевидных вещей к пониманию СТО. Все выводы СТО остаются в силе. Суть СТО — в объединении пространства и времени в единое пространство-время, в котором и предполагается развитие всех процессов нашего мира.

Всем хорошо известно наше время и пространство. С точки зрения физики пространство и время представляют собой арену развития событий. Классическая физика предполагает, что пространство и время абсолютны и независимы. То есть во всех точках пространства время идет одинаково, независимо ни от каких событий, и расстояния между точками пространства не зависят от времени и движения объектов. Однако, исследования, проводимые в конце XIX-го и начале XX-го веков, привели к иному отношению к пространству и времени. Стало ясно, что пространство и время зависят друг от друга и связаны в единое целое — четырехмерное пространство-время.

В стандартном объяснении СТО связь между пространством и временем устанавливается через постулирование инвариантности скорости света — ее независимости от скорости движения системы отсчета. Вот этот момент и вызывает множество непонятностей и не принимается обыденным сознанием, поэтому я и предлагаю произвести некоторые изменения в постулатах, которые помогут легко понять сущность СТО, но не приведут к каким-либо изменениям в выводах.

Постулат 1: *Пространство и время являются координатами конкретной прямоугольной системы отсчета (СО), в абсолютном линейном четырехмерном пространстве-времени. Координата времени есть ось, направленная вдоль направления движения, а координаты пространства есть три других направления, перпендикулярных к временной оси. Абсолютность пространства-времени означает, что интервалы (расстояния в 4-хмерном пространстве) между точками пространства-времени не зависят от системы отсчета (имеется в виду, конечно же, системы с одинаковыми единицами длин). Здесь и далее будут рассматриваться только линейные системы отсчета, которые обычно называют инерциальными системами отсчета (ИСО).*

Определение: *Собственное время физического объекта есть длина пройденного этим объектом пути в пространстве-времени. Для приведения пути к единицам времени используется константа перевода расстояния во время, которая может быть выбрана достаточно произвольно. В системе единиц СИ в качестве нее выбирается «скорость света*

в вакууме» — 299792458 м/с. (Замечу, что в современной физике именно так и выбрана скорость света. Приведенная цифра является абсолютно точной, т.е. после запятой можно приписать сколько угодно нулей точности. Цифра взята из справочника «Физические величины», Москва, Энергоатомиздат, 1991г.)

Здесь же следует определиться, что время может измеряться как в секундах, так и в метрах. Чтобы не было путаницы, далее везде время T будет измеряться в метрах, а t — в секундах. Очевидная формула преобразования: $T = ct$.

Следует отметить, что для любого движущегося объекта, в каждый момент времени, можно определить сопутствующую систему отсчета. Не важно, ускоряется объект или нет, сопутствующая система определяется так, что ее ось времени совпадает с направлением движения объекта в пространстве-времени в конкретный момент.

Рассмотрим различные системы отсчета (СО) по отношению к выбранной лабораторной СО и с совпадающим началом координат. Их можно разделить на две группы.

Первая — группа «покоящихся» СО. Вторая — группа «движущихся» СО. Покоящиеся системы отсчета выделяются тем, что их ось времени совпадает с осью времени лабораторной системы. В движущихся СО ось времени не совпадает с осью времени лабораторной СО. (Несовпадение по определению, постулат 1.)

Надо отметить, что понятия «покоящаяся» и «движущаяся» не являются признаками движения или покоя самих СО. Системы отсчета вводятся сразу во всем пространстве-времени и имеют начало в виде некоего события (точки в пространстве-времени). «Покоящейся» называется лабораторная система отсчета, в которой лаборатория находится всегда в нуле пространственных координат. Временная же координата соответствует прошедшему в лаборатории времени. То же самое можно сказать о «движущейся» СО, но по отношению к некоему объекту, который движется так, что он находится в начале пространственных координат «движущейся» СО, а время этой СО соответствует собственному времени движущегося объекта (например, движущихся часов).

Выберем пространственные оси в обеих системах отсчета так, чтобы плоскости XT обеих систем совпадали. Это возможно, так как в пространстве можно выбрать плоскость, параллельную двум прямым — осям времени двух систем, а оси X , соответственно, выбираются перпендикулярными осям времени и параллельно выбранной плоскости. Таким образом, мы легко получаем двумерный случай, когда оси Y и Z обеих систем отсчета можно выбросить из рассмотрения, ибо они просто совпадают друг с другом.

Рассмотрим оси пространства и времени обеих систем, выпишем соотношения осей лабораторной СО X, T и осей движущейся СО — X', T' .

Из линейности систем отсчета следует простое линейное преобразование осей друг в друга с постоянными коэффициентами:

$$X' = M_{xx}X + M_{xt}T$$

$$T' = M_{tx}X + M_{tt}T$$

Рассматривая единичные отрезки лабораторной СО в движущейся СО не сложно найти коэффициенты M_{ik} , как проекции этих отрезков на оси X', T' . Пространство-время одно, поэтому имеет место равенство $X^2 + T^2 = X'^2 + T'^2$, которое означает, что интервал между любыми двумя событиями (точками в пространстве-времени) не зависит от системы отсчета. Из этого следует:

$$M_{xx}^2 + M_{xt}^2 = M_{tx}^2 + M_{tt}^2 = M_{xx}^2 + M_{tx}^2 = M_{xt}^2 + M_{tt}^2 = 1.$$

и, следовательно:

$$M_{xx}^2 = M_{tt}^2 = 1 - M_{xt}^2,$$

$$M_{xt}^2 = M_{tx}^2 = 1 - M_{xx}^2.$$

Рассматривая любые два различных события, легко видеть, что разности координат между этими событиями не совпадают в лабораторной и движущейся системах. Преобразование одних в другие производится с помощью той же самой матрицы M_{ik} . Т.е. имеет место «относительность» времени и расстояния между событиями для различных систем отсчета. Фактически, речь идет об относительности не самих расстояний и времен, а относительности проекций реального четырехмерного интервала между событиями на конкретные оси конкретных СО. Эта относительность очевидна.

Все это не сложно понять, если отвлечься от того, что T есть координата времени и принять, что это некая пространственная координата. Тогда системы отсчета XT и $X'T'$ представляются просто как две повернутые относительно друг друга координатные сетки в плоскости (возможны еще и зеркально-отраженные системы, но в них просто изменяется знак одной из координат и преобразования, очевидно, почти те же). Преобразования XT в $X'T'$ в этом случае становятся очевидны:

$$X' = \cos(\alpha)X - \sin(\alpha)T$$

$$T' = \sin(\alpha)X + \cos(\alpha)T$$

где α есть угол поворота систем отсчета относительно друг друга.

Проекции конкретного отрезка на оси координат, очевидно, зависят от выбора системы отсчета, но длина отрезка никак от выбора системы координат не зависит. Скорость «движения» систем отсчета относительно друг друга в приведенном примере, очевидно, равна $\operatorname{tg}(\alpha)$.

Что же происходит в нашей действительности? Почему время для нас все же выделено? И почему ограничена скорость, когда $\operatorname{tg}(\alpha)$ вроде ничем не ограничен?

Во-первых, выделенность времени возникает от нашего движения во времени. С точки зрения данной статьи, любая система отсчета выделяет определенное движение в четырехмерном пространстве, ибо таким образом определена координата времени. Если движения нет, то нет и координаты времени (она не определена). Кроме этого, по определению собственного времени (определение 1), движение это происходит всегда «со скоростью света». Это есть следствие выбора единиц длины и времени в каждой СО.

Во-вторых, в нашей действительности движение в пространстве-времени происходит немного не так, как это выглядело бы при рассмотрении объектов в обычном евклидовом пространстве.

Опытом установлено, что в нашем пространстве-времени интервалом является не сумма квадратов расстояния и времени, а их разность, то есть:

$$I^2 = X^2 - c^2t^2 = X'^2 - c^2t'^2 = \text{invariant (независимо от СО)}$$

Чисто математически это означает, что коэффициент пропорциональности между секундой и метром мним. И, если принять, что:

$$T[\text{метры}] = ict = i 299792458[\text{метр/сек}] t[\text{секунды}], (i^2 = -1)$$

то сохранится обычное математическое декартово соотношение с $X^2 + T^2 = X'^2 + T'^2$, а выражения для преобразования координат будут выглядеть так же, как для поворота обычных координат, но с мнимым углом α .

Проводя простые математические преобразования, заменяя α на α/i , применяя $\sin(\alpha/i) = -ish(\alpha)$, $\cos(\alpha/i) = ch(\alpha)$, получим для преобразования координат и времени обычный вид СТО:

$$\begin{aligned} X' &= ch(\alpha)X + i sh(\alpha)T \\ T' &= -i sh(\alpha)X + ch(\alpha)T \end{aligned}$$

или, переходя к времени в секундах:

$$\begin{aligned} X' &= ch(\alpha)X - sh(\alpha)ct \\ t' &= -sh(\alpha)X/c + ch(\alpha)t \end{aligned}$$

где sh и ch , соответственно, функции гиперболических синуса и косинуса. Скорость движения системы отсчета выразится через гиперболический тангенс угла поворота СО: $v = c th(\alpha)$. Вот здесь и появляется ответ на вопрос, почему скорость ограничена величиной c . Гиперболический тангенс от вещественной величины всегда меньше единицы по модулю и только стремится к единице, когда α стремится к бесконечности.

С точки зрения СТО любое изменение движения — ускорение — сопровождается процессом поворота сопутствующей объекту системы отсчета. И здесь опять же становится очевидно, каким образом при поворотах меняются соотношения пространства и времени для объекта меняющего свое движение.

Рассмотрим обычное движение в обычном пространстве. Представим, что мы едем на автобусе через поле по прямой дороге. При таком движении мы мысленно разбиваем поле пополам линией *перпендикулярной* движению и определяем, таким образом, что находится впереди, а что позади. Пока автобус движется прямо, предметы в поле, находящиеся впереди, постепенно оказываются позади.

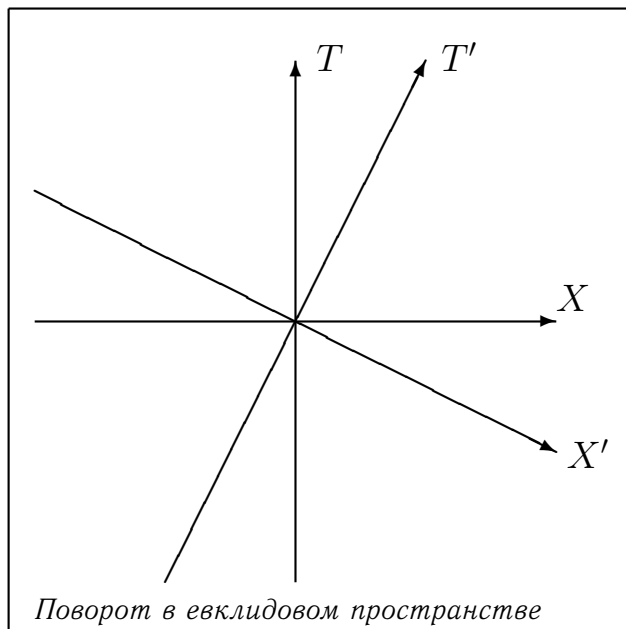


Рис.1 Поворот в евклидовом пространстве сопровождается одинаковым поворотом осей координат. Вещественная соизмеримость осей (отношение длины вдоль X к длине вдоль X' — вещественно) позволяет произвести поворот так, что ось T' совместится с осью X . Изображение на бумаге полностью отражает действительность двумерного евклидова пространства, так как бумага представляет собой реальное его воплощение (в отличие от рис.2).

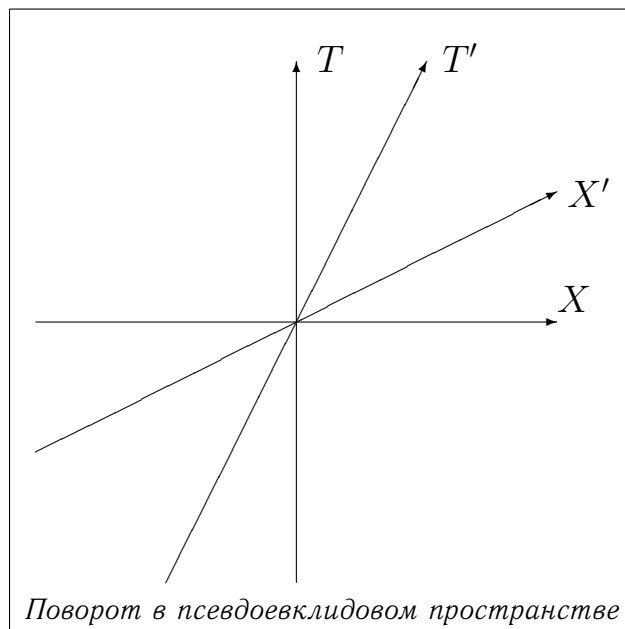
Но что происходит, когда автобус поворачивает? В этом случае меняется сама линия разграничения на то что находится впереди, а что позади. Становится очевидно, что понятия «впереди» и «позади» применительно к какому-либо предмету в поле имеет смысл только для конкретного движения и конкретной точки, относительно которой эти понятия определяются.

Поворот автобуса приведет к резкому изменению положения с понятиями «впереди» и «позади». В пределе, если автобус просто развернется на 180 градусов, то все что находилось позади окажется впереди и наоборот.

Такая же ситуация возникает и при поворотах (ускоренном движении) в пространстве-времени. В момент ускорения для движущегося объекта меняется его сопутствующая система отсчета, поворачиваются сами оси времени и пространства. При этом события, которые ранее определялись как прошедшие, могут оказаться в будущем, и наоборот.

Однако, в СТО и здесь есть некоторые отличия от ситуации с автобусом. Ввиду ограниченности скорости движения есть ограничение и на повороты осей, то есть они не способны развернуться на 180 градусов в плоскости пространство-время. Это приводит к тому, что для любой движущейся точки в четырехмерном пространстве (напомню, что даже и покоящаяся, в обычном понимании, СО представляет движение в пространстве-времени) все пространство разбивается на три области: область абсолютного будущего, область абсолютного прошлого и область событий, которые могут оказаться как в прошлом, так и в будущем, в зависимости от выбранной системы отсчета.

Рис.2 Поворот в псевдоевклидовом пространстве приводит к «разному» повороту осей координат. Слово «разному» взято в кавычки специально! Дело в том, что реально изобразить две оси координат псевдоевклидового пространства на бумаге невозможно. На бумаге соотношение длин по осям T и X вещественно, а в реальности оно — мнимо. Это означает, что совместить ось T' с осью X в реальности никаким поворотом не удастся. Кажущийся острый угол между осями T' и X' не отражает реальность, в которой они остаются перпендикулярными, как и оси T и X . По этой же причине не удастся верно отразить реальные расстояния вдоль осей. Отрезки одинаковой длины на осях T и T' на бумаге будут казаться различными.



Все формулы для преобразований в зависимости от скорости движения v легко получаются из приведенных формул для поворотов осей координат. Достаточно вспомнить, что:

$$ch^2(\alpha) - sh^2(\alpha) = 1$$

$$v/c = th(\alpha) = sh(\alpha)/ch(\alpha)$$

$$ch(\alpha) = 1/\sqrt{1 - th^2(\alpha)} = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

$$sh(\alpha) = th(\alpha)ch(\alpha) = (v/c)/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Получаем обычные формулы СТО (приведенные к времени t и t' в секундах):

$$X' = \frac{X - tv}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$t' = \frac{-Xv/c^2 + t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

В СТО эти формулы называются *преобразованиями Лоренца*.

Чтобы понять, что означают преобразования Лоренца, рассмотрим событие происходящее начале отсчета пространства, в лабораторной СО, через секунду после начала отсчета времени, т.е. $X = 0, t = 1$

Очевидно, в этом случае:

$$X' = \frac{-v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Т.е. в движущейся системе отсчета в момент наступления данного события прошло времени больше, чем в покоящейся. Точно так же, в движущейся СО эта точка оказалась дальше, чем на расстояние $1v$, что впрочем, очевидно, раз в ней времени прошло больше, а скорость движения систем относительно друг друга: $v = v'$.

Точно то же самое получится, если рассматривать в покоящейся системе отсчета отрезок в 1 секунду в движущейся. Обратные преобразования координат есть не что иное, как поворот на обратный угол и, легко видеть, что:

$$X = \frac{X' + t'(v/c)}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$t = \frac{X'v/c^2 + t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

И, очевидно, имеются эффекты «замедления» времени и «сокращения» расстояния для движущихся систем относительно покоящихся. Очевидно, что все эти «замедления» и «сокращения» есть не что иное, как эффекты проецирования одних координат на другие. Реальных же изменений *интервалов* между событиями — нет.

Рассмотрим один из так называемых «парадоксов» СТО: *Пусть имеются два наблюдателя движущихся друг относительно друга, тогда, время одного течет медленнее времени второго и аналогично, время второго течет медленнее времени первого. Получается, что время первого наблюдателя течет медленнее чем у него самого — парадокс!*

Но, на самом деле, это не парадокс. И я постараюсь это объяснить как можно более понятно. Вернемся к аналогии с обычным евклидовым пространством. Представим себе две машины в поле, которые выехали из одной точки и поехали в разных но близких направлениях с *одинаковыми* скоростями.

Что получается?

Первый шофер смотрит в окно и видит, что вторая машина от него удаляется и *отстает*. Второй видит *то же самое* первая машина от него удаляется и тоже *отстает*. Очевидно, что парадокса в этом нет, потому что каждый шофер оценивает отставание не по пройденному второй машиной пути, а по проекции того пути на свой. Т.е. «отставание» есть не более чем эффект проецирования одной линии движения на другую.

Если положить, что между направлениями движения машин угол α , каждый шофер видит отставание соперника на $(1 - \cos(\alpha))S$, где S — пройденный путь. Думаю, это очевидно. И так же очевидно, что реально сравнивать, кто отстал, а кто уехал вперед можно только *задав* направление, в котором проводить сравнение. Если направление совпадает с направлением движения первой машины — отстала вторая. Если со второй — отстала первая. Это и есть *относительность* понятия «отстал».

В СТО картина практически совпадает с выше описанной. Два наблюдателя, движущихся относительно друг друга, выглядят как наблюдатели движущиеся в разных направлениях пространства-времени. Собственное время каждого наблюдателя — по определению — это путь пройденный в пространстве-времени. Из аналогии должно быть ясно, что каждый экспериментатор, наблюдая за соседом, видит что время соседа «течет не так как у него». Это наблюдение совершенно взаимно, т.е. первый видит, что часы отстают у второго наблюдателя, второй видит, что часы отстают у первого, но это не есть противоречие, потому что каждый наблюдатель сравнивает показания своих часов не с реальным временем второго, а с *проекцией* его времени на свое. Становится очевидно, что наблюдение «замедления» времени оказывается взаимно и *относительно*. Эта относительность ни коим образом не противоречит логике.

Очевидно так же, что в сравнении прошедшего времени между двумя событиями для различных движений в пространстве-времени, смысла не больше чем в сравнении длин различных путей между двумя точками обычного пространства. На этом сравнении, так же как на сравнении проекций, а не реальных расстояний, основаны всякого рода «парадоксы» СТО, которых на самом-то деле и нет. Парадокс возникает только при неправильном поверхностном рассмотрении сути происходящего.

Надеюсь, читатель сумел понять все, что я хотел сказать. Данное объяснение не претендует на строгую обоснованность, но призвано облегчить вхождение в курс дела. В заключении хочу отметить, что суть СТО заключается в объединении пространства и времени в единое пространство-время, в котором она и предполагает развитие всех процессов нашего мира.

С уважением, *Ivan Mak*

PDF подготовлен с помощью ЛАТ_EX.