

# Синхронизация часов, движущихся прямолинейно и равномерно, и связанные с нею парадоксы СТО

С.А. Толчельникова

ГАО РАН, С.-Петербург, Россия

Статья «К электродинамике движущихся тел» является первым пояснением специальной теории относительности (СТО), А. Эйнштейн начинает ее с рассмотрения задачи синхронизации земных часов, а затем часов, движущихся прямолинейно и равномерно, с помощью светового луча. По условию задачи часы, находящиеся в точке А, считаются покоящимися, из этой точки в момент  $T_0$  отправляются движущиеся часы, показания которых в момент  $T_0$  **приведены в соответствие с показаниями покоящихся часов**. При этом Эйнштейн ставит дополнительное условие: у обоих часов совпадающий ход – «часы в точности одинаковые» [1, с.13]. Зачем же определять поправку, если  $v \ll c$  известно, что показания идеальных часов с главными часами (по Эйнштейну покоящимися) будут совпадать и в дальнейшем? Несмотря на это, ставится задача определения поправки часов с помощью светового сигнала – луча, если сохранить терминологию Эйнштейна. Увы! Идеальных часов не существует, но из всех механизмов, наиболее близким к идеалу являются атомные часы, меньше других подверженные влиянию изменений среды, силы тяжести, режима движения. Невзирая на отмеченное противоречие в постановке задачи, **рассмотрим возможность её решения**.

Эйнштейн считает, что формулы классической механики, достаточно точны лишь при малых скоростях тел, и СТО он предназначает для описания движений со скоростями, близкими к скорости света. В природе нет ничего неподвижного, а движения в космическом пространстве не инерциальные, поскольку все тела подвержены воздействию сил взаимного тяготения [2]. Следовательно, предложение Эйнштейна и задача, рассмотренная нами далее, являются умозрительными рассуждениями, не имеющими значения для практики; как и, так называемые, мысленные эксперименты, **они интересны лишь с точки зрения логичности выводов**.

## I. Историческая справка

В начале XX века физики (например, Х. Лоренц) в своих опытах имели дело со скоростями электронов и фотонов, и задачей определения времени интересовалась широкая общественность. Об этом свидетельствует популярность статей А. Пуанкаре об астрономии и определении точного времени. Пуанкаре пишет о синхронизации земных часов с помощью посылки радиосигнала, в двух направлениях, не упоминая о связи задач определения времен и долготы. После краткого описания способа, предназначенного для неподвижных относительно друг друга часов, он приходит к выводу о невозможности определения истинного времени, если часы движутся. Истинным Пуанкаре

называет Международное время, определявшееся по наблюдениям астрономов; оно использовалось для трансляции сигналов, которые нужны были обсерваториям для согласования хода их часов. Вывод Пуанкаре: «...одни часы будут отставать от других. Но это не существенно, поскольку у нас нет никакого средства заметить это» [3, с.240]. Отсюда ясен вывод Пуанкаре о непригодности *земного* метода для решения задачи синхронизации часов астронавта, движущегося в космосе, не понятно только, почему Пуанкаре считал этот вопрос несущественным.

## II. О связи вопроса синхронизации часов по Эйнштейну с преобразованиями координат и времени Лоренца

Свет распространяется во все стороны от источника, но в задаче только один наблюдатель – приёмник излучения с часами, поэтому условия задачи, с решения которой Эйнштейн начинает развивать идеи СТО, будут выполнены, если мы сохраним одну ось координатной системы. Это избавит нас от необходимости повторения, что скорости часов по двум другим координатам равны нулю, о чем Эйнштейну приходится постоянно напоминать читателю [1, с. 7-35].

В отличие от Пуанкаре Эйнштейн уверен в возможности синхронизации движущихся часов при инерциальном движении. Он посвящает определению одновременности пять первых страниц статьи 1905г. [1, с. 7-11], при этом пользуется классическим правилом сложения скоростей света и тела — использует  $c+v$  при сближении луча и тела (часов) и  $c-v$  при их удалении (sic!). После рассуждений об одновременности событий Эйнштейн приходит к следующему выводу: «Итак, мы видим, что не следует придавать *абсолютного* (курсив Эйнштейна) значения понятию одновременности. Два события, одновременные при наблюдений из одной координатной системы, уже не воспринимаются как одновременные при рассмотрении из системы, движущейся относительно данной системы» [1, с.13]. Заметим, что интервалы времени между событиями, происходящими в Природе, не зависят от людей – астрономов, от которых зависят устанавливаемые ими (не Природой!) системы координат с целью определения места и времени события. Вопрос о промежутке времени между событиями не решается их восприятием наблюдателями, находящимися в разных пунктах на Земле или в космическом пространстве, но требует разнообразных измерений.

Непосредственно за выводом Эйнштейна об «*относительности одновременности*» следует параграф №3 «Теория преобразования координат и времени от покоящейся системы к системе, равномерно и прямолинейно движущейся относительно первой». В новой *теории преобразования координат* галилеевы преобразования заменяются преобразованиями координат и времени Лоренца. При этом Эйнштейн предпринимает попытку вывести преобразования Лоренца

$$x' = \beta(x - vt), \dots y' = y, \dots z' = z, \dots t' = \beta\left(t - \frac{v}{c^2}x\right), \text{ где } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

из собственных соображений о поведении эталонов для измерения расстояния и времени в покоящихся и движущихся системах координат. Лоренц вывел свои преобразования, опираясь на результаты экспериментов с движущимися электронами, которые, по его мнению, сокращались в направлении движения. Причём неподвижной системой он считал мировой эфир, и чтобы согласовать результаты экспериментов, ему пришлось ввести местное время для движущегося электрона, отличающееся от времени электрона, неподвижного в эфире.

Пытаясь вывести преобразования Лоренца, Эйнштейн продолжает пользоваться классическим правилом сложения скоростей сигнала и тела, т.е. по формулам

$$c+v \neq c-v \neq c. \quad (2)$$

Он вводит сначала две, а затем дополнительные координатные системы, дифференцирует уравнения движения при «бесконечно малых значениях координаты  $x'$  движущихся часов» (с.14). Это удивляет, потому что Эйнштейн предназначает СТО для движений с огромными скоростями на соответствующих расстояниях. Если астронавт движется со скоростью, приближающейся к  $3 \cdot 10^5$  км/с, то его часы еще за первую секунду удалятся на десятки или сотни тысяч километров от начала движения, где остались покоящиеся часы, с которыми сверялись показания. Если проследить за всеми манипуляциями с координатными системами, становится ясно, что Эйнштейн не выводит преобразований Лоренца, но опирается на них, т.е. допускает логическую ошибку, которая заключается в скрытом использовании недоказанной посылки для доказательства. В логике такая ошибка называется *petitio principii*, а в школе – подгонкой под ответ.

### III. Парадокс близнецов, часов или времени?

В следующем параграфе №4 «Физический смысл полученных уравнений для двигающихся твердых тел и двигающихся часов» Эйнштейн утверждает: «При  $v=c$  все движущиеся объекты, наблюдаемые из покоящейся системы, сплюсциваются и превращаются в плоские фигуры. Для скоростей, превышающих скорость света, наши рассуждения теряют смысл; впрочем, из дальнейших рассуждений будет видно, что скорость света в нашей теории физически играет роль бесконечно большой скорости» (NB!) [1,с.18], в статье 1910 г. он утверждает противоположное: полагает, что преобразования, совместимые с механикой Ньютона, получаются при  $c=\infty$  [1, с.160], что, разумеется, неверно. Далее, продолжая писать о часах, движущихся равномерно и прямолинейно, Эйнштейн пишет, что показания двигающихся часов, «наблюдаемые из покоящейся системы, отстают за секунду на величину с точностью до четвертого и высших порядков, равную  $1/2(v^2/c^2)$  sec. Отсюда вытекает своеобразное следствие». «Часы, передвигающиеся из А в В, отстают по сравнению с часами, находящимися в В с самого начала, на  $1/2(v^2/c^2)$ , если  $t$  – время, в течение которого часы из А двигались в В». «Сразу видно, что этот результат получится и тогда,

когда часы движутся из *A* в *B* по ломаной линии, а также, когда точки *A* и *B* совпадают. Если принять, что результат, доказанный для ломаной линии, верен также для непрерывно меняющей свое направление кривой, то получим следующую теорему<sup>1</sup>. Если в точке *A* находятся двое синхронно идущих часов и мы перемещаем одни из них по замкнутой кривой с постоянной скоростью до тех пор, пока они не вернутся в *A* (на что потребуется, скажем, *t* сек), то эти часы по прибытии в *A* будут отставать по сравнению с часами, оставшимися неподвижными, на  $1/2t(v^2/c^2)$  sec» [1, с. 19].

В статье 1911г. идея зависимости хода часов от скорости их движения заменяется зависимостью времени от скорости, Эйнштейн утверждает: «Например, если бы мы поместили живой организм в некий футляр и заставили бы всю эту систему совершать такое же движение вперед и обратно, как описанные выше часы, то можно было бы достичь того, что этот организм после возвращения в исходный пункт из своего сколь угодно далекого путешествия изменился бы как угодно мало, в то время, как подобные ему организмы, оставленные в пункте отправления в состоянии покоя, давно бы уже уступили место новым поколениям. Для движущегося организма долгое время путешествия будет лишь мгновением, если движение будет происходить со скоростью, близкой к скорости света! Это – неизбежное следствие наших исходных принципов, к которым нас приводит опыт» [1, с. 185].

Какой опыт? Нам неизвестно, с какими медиками советовался Эйнштейн, не сообщают об этом ни его сторонники, ни популяризаторы его учения. Можно привести дополнительные примеры того, что в СТО скорость движения влияет то на часы (вплоть до изменения положения их стрелок), то на время. Напомним, что у Лоренца размеры электрона сокращаются в направлении движения, у Эйнштейна сокращаются стержни – эталоны, используемые для измерений расстояний. Соответственно должны бы сокращаться, сплющиваться, и движущиеся часы, но кто же доверит измерениям времени по деформированному прибору?! Эйнштейн «спасает» СТО тем, что сокращение стержней, а также изменения положений стрелок часов в движущейся системе координат «воспринимается наблюдателем, находящимся в покоящейся системе». Определяющим является его *восприятие (ощущение)*, в философии Э. Маха), а не умение определять размеры тел по измерениям, не связанным с наложением эталона длины. Такого способа Эйнштейн не знает, хотя в астрономии он давно используется при измерениях дисков тел Солнечной систем для определения их размеров – ведь наложение эталонов длины в таких случаях невозможно.

Эйнштейн имеет в виду изменения показаний часов, когда пишет о поведении их стрелок в зависимости от скорости часов *v* [1, с.74, 148 и др.]. Это согласуется с заявленным им стремлением заменить математическое время механики Ньютона физическим временем. Однако в 1917г.

---

<sup>1</sup>Странное представление о теоремах у Эйнштейна.

Эйнштейн пишет об «открытии Минковского» [1, с.559] и о том, что «...необходимо вместо обычной временной координаты  $t$  ввести пропорциональную ей величину  $\sqrt{-1} ct$ ... благодаря этому чисто формальному положению теория относительности чрезвычайно выиграла в наглядности и стройности» [1, с.559]. В результате пути теоретиков и практиков не могли не разойтись! Ведь ни по часам, ни по астрономическим наблюдениям невозможно определить **мнимое время**, к тому же выраженное в километрах ( $c$  в км/сек. умножается на  $t$  в сек.). Как бы то ни было, большинство физиков согласилось с Эйнштейном в том, что «когда скорость тела не очень мала по сравнению со скоростью света» (например, при движении электронов и ионов) потребуется использовать СТО [1, с. 553].

Активное обсуждение парадокса близнецов захватило главным образом популярную литературу (см., например, книгу М. Гарднера [4]). Под влиянием средств массовой информации до сих пор некоторые надеются стать свидетелями обещанного сохранения молодости при путешествиях к звездам. Значительная часть *научной* литературы, посвященной «парадоксу времени» или «парадоксу с часами», представлена в монографии И. И. Гольденבלата [5]. В книге представлены мнения наиболее авторитетных отечественных и зарубежных авторов, среди которых есть академики и нобелевские лауреаты. Они признают разъяснения Эйнштейна «совершенно правильными и глубокими» [5, с. 21], но потребовались еще разнообразные объяснения; список цитируемой литературы состоит из 47 названий.

#### **IV. О правилах сложения скоростей и двух принципах СТО**

Правила сложения скоростей в СТО радикально отличаются от правил классической механики. В параграфе 5 «Теорема о сложении скоростей», выводится новое правило сложения скоростей света и тела, исходя из релятивистского закона сложения скоростей двух тел [I с.20-21]. Развивая идеи СТО в статьях 1910 и 1911гг, Эйнштейн излагает два принципа, являющихся её основой. Приведем слова Эйнштейна: «Если оставить в покое обычную кинематику и на новых принципах создать новую, то при этом возникают формулы преобразования, отличные от приведенных выше. (От преобразований координат, называемых преобразованиями Галилея С.Т.). Итак, мы сейчас покажем, что из

*1. Принципа относительности и 2. Принципа постоянства скорости света следуют формулы преобразования, позволяющие видеть, что теория Лоренца совместима с принципом относительности. Теорию, основанную на этих принципах, мы называем теорией относительности» [1, с.152, 217].*

Правило сложения скорости света и тел несколько раз четко формулировалось Эйнштейном: «... складывая скорость света со скоростью, меньшей  $c$ , мы всегда получим скорость света» [1,

с.157]. «...при сложении скорости света со скоростью, меньшей  $c$ , опять получается скорость света» [1, с.76]. Запишем математическое выражение этого правила, вошедшего в учебную, и научную литературу:

$$c + v \equiv c, \text{ и } c - v \equiv c \quad (3)$$

При этом оказывается невозможным различить, когда луч движется навстречу телу и когда лучу приходится догонять тело. В классической механике эти относительные движения света и тел четко различаются, поскольку используются приведенные выше правила (2). Благодаря использованию классических правил, ещё не достигнув больших скоростей, но значительно повысив точность наблюдений, исследователи стали учитывать члены второго порядка относительно  $v/c$ , при радарных, а затем лазерных определениях расстояний до планет. При этом утвердилась терминологическая ошибка: члены второго порядка стали называть релятивистскими, несмотря на очевидную невозможность их появления при использовании релятивистского правила сложения скоростей (3). Ясно, что члены второго порядка следовало бы назвать анти релятивистскими, потому что **они появляются в результате использования классического правила сложения скоростей** [6,7].

Разумеется, скорость света так велика по сравнению со скоростями транспорта и даже современных космических кораблей, что влияние малых скоростей не учитывали на практике, когда они не оказывали влияния на значения *искомых* величин. В начале прошлого века ещё была возможность отвергнуть правила (2), ссылаясь на опыт прошлого, и требовать особых правил для скорости света. Возможно, современные физики забыли принципы СТО, когда, учитывая члены второго порядка, называли их релятивистскими членами, или поправками. Кому потребовалась такая терминологическая диверсия?

Прежде, чем вернуться к вопросу о синхронизации движущихся часов, рассмотрим простую задачу, решаемую в средней школе.

## V. Школьная задача и апория Парменида

Курьерский поезд в момент  $T_0$  со скоростью  $V$ , которую мы обозначим буквой  $c$ , вышел из пункта  $A$  одновременно с товарным поездом, вышедшим из пункта  $B$ , скорость которого равна  $v$  ( $c > v$ ). В задаче даны скорости обоих поездов и расстояние  $R$  между пунктом  $A$  и местом встречи поездов в пункте  $C$ , а также момент начала движения обоих поездов  $T_0$ . Требуется определить время встречи – прибытия поездов в пункт  $C$ .



Рис.1

**Решение.** Идя одновременно от старта в разных точках  $A$  и  $B$  до встречи, оба поезда затратили на движение одинаковый интервал времени  $\Delta T$ , за который они прошли разные расстояния  $AC$  и  $BC$ . Исходя из того, что известны скорости поездов и место встречи – расстояние  $R = AC$ , получаем

$$R = c \Delta T - v \Delta T. \quad (4)$$

Отсюда следует, что курьерский поезд догонит товарный через интервал времени  $\Delta T$  после старта поездов

$$\Delta T = R/(c-v) \quad (5)$$

Используя известный момент старта  $T_0$ , получим момент встречи

$$T_e = T_0 + \Delta T. \quad (6)$$

Решение школьной задачи основано на *непрерывности и одновременности движений* обоих тел от их старта в *разных* точках  $A$  и  $B$  до встречи в точке  $C$ , расстояние которой от точки  $A$  и обе скорости – заданные величины.

Из формулы (4) видно, что скорый поезд за время  $\Delta T$  прошел бы расстояние, превышающее  $AC$ , если бы шел один. На прохождение заданного расстояния  $AC$ , как видно из формулы (5), он затратил бы интервал времени меньше  $\Delta T$ , если бы шел один. Мы повторяем очевидное потому, что подобная задача рассматривалась ещё в апории Парменида об Ахиллесе, который не сможет догнать черепаху. Скорости Ахиллеса и черепахи были выражены в числе их шагов за одно и то же время, однако, в задаче вместо расстояния  $AC$  было дано расстояние между Ахиллесом и черепахой в момент их старта,  $AB$  на рис.1.

Парадоксальный вывод объясняется тем, что задача является не доопределенной, поскольку расстояние  $AC$  от начала движения Ахиллеса до места встречи с черепахой не дано в условии задачи. Точное задание расстояний в шагах черепахи или Ахиллеса невозможно, это неделимые меры, дискретные величины, аналогичные квантам.

Задачу синхронизации, или приведения хода часов в единую систему, в средней школе не решают – предполагается, что на станциях и у машинистов есть часы с ходом и показаниями, сверенными с необходимой точностью, иначе не могла бы функционировать железная дорога. Поезда движутся не по прямой, но машинисты знают дорогу и умеют регулировать *среднюю* скорость, чтобы прийти в пункт назначения в заданный момент.

## **VI. Возвращаясь к способу синхронизации движущихся часов с помощью луча**

Рассмотрим возможности применения светового сигнала для синхронизации часов, астронавта будущих лет, движущегося с огромной скоростью. Используем метод синхронизации часов, отличающийся от используемого на Земле тем, что астронавт движется во время проведения опыта. Пусть показания часов астронавта совпадали с показаниями часов, покоящихся в точке  $A$  в момент  $T_0$  старта обоих (луча и астронавта) из *разных* точек  $A$  и  $B$ , расстояние между которыми известно. Расстояние от  $A$  до места встречи астронавта с лучом неизвестно, но астронавт получит

дополнительную информацию, если сумеет при огромной скорости движения зарегистрировать момент  $T_e$  прихода луча (приёма сигнала) по идеальным часам, показания которых в любой момент совпадают с показаниями главных часов в точке А.

Зная момент начала движения  $T_0$ , астронавт вычислит интервал времени  $\Delta T = T_e - T_0$ , затраченный им и лучом на преодоление расстояний  $BC$  и  $AC$  соответственно. Однако значение  $\Delta T$  окажется ошибочным даже при условии безошибочности показаний часов астронавта, поскольку можно а priori утверждать, что значение промежутка времени  $\Delta T$ , вычисленного по моменту прихода луча  $T_e$ , не совпадёт с показаниями главных часов А в тот же момент времени. Причина в том, что скорость света в межзвездном пространстве не равна значению фундаментальной постоянной астрономии, равной скорости света в вакууме. Если часы астронавта нуждаются в поправке, то появится вторая причина расхождения значений момента  $T_e$  по часам астронавта и по часам А. Отсюда **очевиден вывод о невозможности использования луча для определения поправки движущихся часов**. Напомним, что ещё во время проведения наблюдений Венеры, с целью уточнения значения астрономической постоянной (в километрах), астрономы отметили невозможность одновременных уточнений расстояний и скорости света в Солнечной системе [8]. С ростом уточняемых расстояний увеличиваются ошибки<sup>2</sup>

Какой же способ предложен Эйнштейном для синхронизации часов, двигающихся с огромными скоростями? К способу синхронизации *земных* часов он обращается в статье (1905г), где пользуется классическим правилом сложения скоростей, которое в той же статье им отвергнуто. Для определения поправки движущихся часов Эйнштейн не предложил конкретного способа; предложил только новые правила (3). Если руководствоваться словами Эйнштейна в [1, с.16], где из общего в заданный момент начала двух систем координат (пункта А на рис.1) отправляются одновременно астронавт с часами и световая волна, то лучу не придется кого-либо догонять:  $\Delta T = \Delta R/c$ . Очевидно не только за 1 секунду, но и за сколь угодно малый промежуток времени луч перегонит любое тело за исключением, того, которое двигалось бы со скоростью света, такое «тело» не отставало бы от луча.

## Заключение

1). Получить представления о СТО невозможно без изучения написанного Эйнштейном. Настолько велики расхождения авторов учебной литературы и комментаторов этой теории, что, не зная первоисточника, вы получите представление о суждениях многих физиков, но не Эйнштейна. Автор СТО «спасает свою теорию» тем, что ссылается на различия *восприятий* длины стержня и показаний часов, наблюдателями, находящимися в разных системах координат. Отсюда появляется

---

<sup>2</sup> Даже на Земле проблема установления единого времени не решается независимо от задачи уточнения долгот пунктов.

двоемыслие (термин Дж. Оруэлла), когда понятия истина, или соответствие природе, исключается в первую очередь из науки.

2). Не случайно школьный курс астрономии всегда начинался с астрометрической проблемы определения координат и времени *по измерениям*. Ученик понимал, что в природе нет координатных систем, они «строятся», устанавливаются астрономами и геодезистами для того, чтобы для тел и сигналов определить собственные (индивидуальные) движения, которые Ньютон назвал абсолютными [9], он пояснял, что у каждого тела можно найти множество относительных движений, но абсолютное движение тела единственное. Абсолютные движения выводятся после многих измерений относительных движений. Классическое правило сложения скоростей света и тел (2) обеспечивает возможность решения задач, связанных с разнообразными относительными движениями излучения (сигнала) и его приёмника, как навстречу друг другу, так и в рассмотренном здесь случае, когда сигнал (луч) догоняет тело (часы). Это оказывается невозможным при использовании релятивистского правила (3). Очевидно, **Эйнштейн отказывается от определения совместных движений излучения (светового сигнала) и тела, происходящих одновременно.** Ситуация парадоксальная: теория относительности отказывается от определения относительных движений.

Преимущество классической кинематики становится тем очевиднее, чем ближе скорость тела  $v$  к скорости света, однако, и при сравнительно малых скоростях тел необходимость учета скорости  $v$  при сложении со скоростью света уже обнаружена, благодаря повышению точности определения расстояния и времени [6, 7].

3). Чем бы ни заменял Эйнштейн время, определяемое астрономами, физическим или мнимым (не измеряемым) временем, он оставался верен своим словам: «Теорию относительности можно рассматривать как итог борьбы с фундаментальными представлениями физики Галилея и Ньютона» (1953г.). Можно ли считать «революцию в физике XX века» *итогом* этой борьбы?

### Литература

1. Эйнштейн А. Собрание сочинений в 4х томах. М.: Наука, 1965. Т. I, 700 с.
2. Толчельникова С. Инерциальная система координат и единство сил инерции и тяготения. В Сб. Пространство, время, тяготение. СПб: ТЕССА. 2003. С. 437-450.
3. Пуанкаре А. О науке. М., Наука. 1983. 560с.
4. Гарднер М. Теория относительности для миллионов. М.: Атомиздат, 1965, 80 с.
5. Гольденблат И.И. Парадоксы времени в релятивистской механике. М.: Наука. Изд.: физ-мат. лит. 1973, 190 с.
6. Tolchelnikova-Murri S.A. The Doppler Observations of Venus Contradict the SRT. Galilean Electrodynamics. 1992, v 4, № 1. P.3-6.
7. Толчельникова С.А. Радарные наблюдения Вверены и проблемы специальной теории относительности Геодезия и картография. – 2003. – № 4. – С. 8-18.
8. Muhlman D.O., Holdridge D.B., Block N. The Astronomical Unit Determined by Radar Reflection from Venus. 1962, Astron.J., v.67, № 1299. P.181-190.
9. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М.: Наука. 1989, 688с.