УДК 530.121

К вопросу о выводе преобразований Лоренца

Леонид Иосифович Филиппов

Академический лицей «Физико-техническая школа»
194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литера «А»; e-mail: z@tf.ru

Тема корректного вывода преобразований Лоренца вновь стала предметом обсуждения в ряде недавних публикаций. В продолжение темы предлагается вывод преобразований Лоренца, построенный на мысленном эксперименте. В этом подходе независимость скорости света от движения источника и наблюдателя – не аксиома, а необходимое следствие конечности скорости распространения электромагнитных волн. Описан механизм возникновения релятивистских эффектов.
Ключевые слова: преобразования Лоренца, теория относительности.

1. Введение

В ряде публикаций последних лет в ([1–5]) обсуждается проблема вывода преобразований Лоренца. В качестве развития возникшей на страницах «Оптики и спектроскопии» и «УФН» своеобразной дискуссии предлагается еще один подход к выводу ПЛ.

В СТО постулируется независимость скорости света в вакууме от движения источника и наблюдателя – иначе неразличимость инерциальных систем отсчета недостижима. Огромная база экспериментальных данных безоговорочно подтвердила и сам этот постулат, и выводы теории. Тем не менее интерес к проблеме не угасает. В частности, появлялись и появляются статьи, посвящённые альтернативному выводу преобразований Лоренца и даже преобразований, которые, по мнению авторов, могли бы их заменить. Среди этих работ есть логически корректные, однако и их объединяет одно свойство, отмеченное еще В. Паули ([6]) при анализе работ [7] и [8]: авторам удаётся «получить лишь внешний вид формул преобразования, но не их физическое содержание».

Возможно, одной из причин частого непонимания того, о чем писал Паули, является предельный лаконизм самого Эйнштейна: многое ему представлялось самоочевидным, и он не считал нужным это оговаривать. В частности, в ранних работах по СТО Эйнштейн не писал, почему и одновременность разноместных событий, и синхронизация часов могут быть построены только на световых сигналах. Результатом такого лаконизма стало восприятие некоторыми авторами СТО не как прикладной физической теории, а как математического абстрактного построения, в котором можно без ущерба для сути варьировать основные положения (скажем, одну из теорем сделать аксиомой и наоборот, как в [2]) или отменять их – лишь бы не была нарушена логическая замкнутость.

Анализ корректных выводов преобразований Лоренца и «паралоренцевских» очень грамотно проведен в статьях Г.Б. Малыкина: [1, 3, 4].

Любая физическая теория имеет смыл, если у нее есть выход на эксперимент. И хотя прямое наблюдение «замедления» времени стало возможным лишь через десятилетия после революционного опыта Айвса и Стиллуэлла ([9]), а прямой опыт по «сокращению» длины нереален и сегодня, такие эксперименты и не нужны для проверки СТО. В природе нет ни координатных сеток, нанесенных на протяженные твердые объекты, ни синхронизированных светом часов в узлах этих сеток. Нет и движущихся друг относительно друга наблюдателей, проводящих прямые измерения эффектов СТО. Тем не менее физические проявления этих эффектов вполне наблюдаемы. Прежде всего – электродинамические. Потому Эйнштейн и назвал свою основополагающую работу по СТО так, как назвал, а не «К кинематике движущихся тел».

Но начал он все же с кинематической части. Ибо «суждения всякой теории касаются соотношений между твердыми телами (координатными системами), часами и электромагнитными процессами. Недостаточное понимание этого обстоятельства является корнем тех трудностей, преодолевать которые приходится теперь электродинамике движущихся тел.» ([10]) Эйнштейн полагал, что этим сказано достаточно. Но, как оказалось, пояснения не были бы лишними[1].

Можно ли произвести синхронизацию часов «световыми зайчиками», скорость которых практически безгранична? ([11]) Да, можно. Можно ли построить на такой синхронизации логически замкнутую схему преобразования координат и времени? ([7, 12]) Да, можно. Будет ли такая теория иметь отношение к физической реальности? Нет, не будет. Ибо физическая реальность – это взаимодействия. А никакие изменения в одной системе отсчета не могут повилять на реальность в другой системе быстрее, чем ее достигнет электромагнитная информация об этих изменениях[2].

Споры о том, можно ли из корректных преобразований Тагерлини или Игнатовского без неявного использования второго постулата Эйнштейна вывести преобразования Лоренца, полезны для понимания логики СТО. Но эти споры остаются абстрактно-философскими, ибо выхода на физическую реальность такие модели не имеют. Можно покрыть все объекты во Вселенной координатной сеткой с часами в

[1] Вот яркий пример: «Два или три так называемых точных вывода ПЛ очень абстрактны и малопонятны. Таким образом, справедливость вывода ПЛ находится под вопросом... На основе нашего систематического подхода даётся убедительное объяснение того, что сокращение длины не создаёт никакого механического напряжения.» ([5])

[2] Если бы на наблюдаемые процессы заметное влияние оказывали гравитационные волны, то же мы могли бы сказать и о них. А вот если будут открыты тахионы, это никаким образом не отменит преобразования Лоренца и не изменит входящую в них мировую константу.

узлах. Но чем бы мы ни синхронизовали такие часы, это никак не повлияет на реальный физический мир. Вселенная «сделала свой выбор» без нашего участия, и этот выбор – электромагнитное взаимодействие. Именно поэтому сказанное в [13] верно: «релятивистские эффекты представляют собой проявления фундаментальных свойств пространства-времени... позволяет избежать ложного представления, что релятивизм связан исключительно со световыми явлениями.»

В СТО принцип постоянства скорости света – постулат. Следование ему приводит к преобразованиям Лоренца. В настоящей статье рассмотрен физический механизм, обеспечивающий соблюдение постоянства скорости света. Постулат вводится не как абсолютный математический принцип, а физически – из мысленных экспериментов, которые строятся по следующей схеме. В гипотетической системе отсчета информация о любых физических событиях распространяется в вакууме во всех направлениях с одинаковой скоростью. Находящийся в ней наблюдатель исследует другие, равномерно движущиеся, системы отсчета. Наблюдатели в движущихся системах пользуются для получения информации сигналами, которые распространяются в исходной системе отсчета изотропно. Задача: описать результаты экспериментов по измерению длин отрезков и промежутков времени, проводимых движущимися наблюдателями.

2. Вывод преобразований Лоренца

Abs – воображаемый наблюдатель, он находится в некой произвольной исходной системе отсчета и способен получать информацию без запаздывания. Реальный способ бесконечно быстрой передачи информации для такого абстрактного рассмотрения не нужен – это исключительно мысленный эксперимент. Введение в логическую схему такого, хоть и чисто абстрактного, наблюдателя, делает все инерциальные системы отсчета равноправными, то есть принцип относительности признатся верным.

При дальнейшем рассмотрении надобность в такой модели отпадет и мысленные эксперименты будут привязаны к реальности.

Далее, имеются две системы отсчета, движущиеся равномерно относительно исходной. В каждой из них есть покоящийся наблюдатель, который пользуется световыми сигналами. *Световые сигналы распространяются относительно исходной системы отсчета во всех направлениях со скоростью c*. Это – единственное предположение. Из него будут выведены свойства света, наблюдаемые в других инерциальных системах отсчета.

2.1. Длины движущихся отрезков

Пусть с точки зрения *Abs* картина такова: в покое длины двух отрезков одинаковы. Так как *Abs* получает сигналы без запаздывания, то и в движении для него эти отрезки будут равной длины. Отрезки движутся относительно исходной системы со скоростями V_1 и V_2, в середине каждого отрезка располагается наблюдатель.

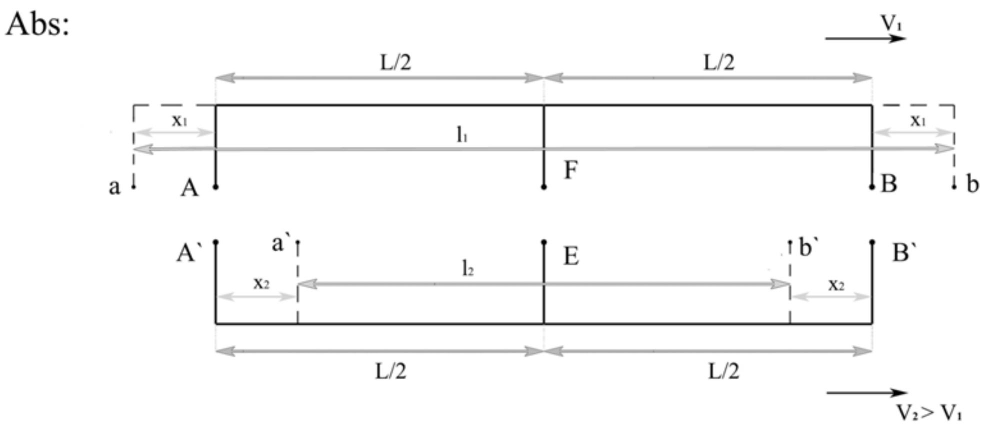

Рисунок 1.

Система E «обгоняет» систему F, при этом касание точек A и A' и точек B и B' с точки зрения *Abs* происходит одновременно. Наблюдатель *Abs* видит: сигнал от соприкосновения точек B и B' пришел к F раньше, чем сигнал от соприкосновения A и A' на $\Delta t = \frac{L/2}{c - V_1} - \frac{L/2}{c + V_1}$. Это означает, что с точки зрения наблюдателя F, который синхронизирует часы световыми сигналами *и пользуется эйнштейновским определением понятия одновременности разноместных событий*, отрезок $A'B'$ в системе E длиннее, чем отрезок AB в система F. Построим в системе отсчета F такой отрезок ab с центром в точке F, чтобы, с точки зрения F, он был равен отрезку $A'B'$ в системе E: световой сигнал из точки b вылетел позже, чем из точки B, на время $\frac{x_1}{V_2 - V_1}$ и двигался влево относительно наблюдателя F со скоростью $c + V_1$. Сигнал из точки a вылетел раньше, чем из A, на время $\frac{x_1}{V_2 - V_1}$ и двигался вправо со скоростью $c - V_1$. Эти сигналы пришли в центр отрезка ab – к наблюдателю F – одновременно, из чего он и заключает, в рамках принятой аксиоматики, что его отрезок ab равен по длине отрезку $A'B'$ в движущейся системе отсчета.

Найдем длину отрезка ab, равную l_1. Сигнал из точки b вылетел позже, чем из точки a на время $\frac{2x_1}{V_2 - V_1}$.

$$\frac{l_1/2}{c - V_1} = \frac{l_1/2}{c + V_1} + \frac{2x_1}{V_2 - V_1}; \ 2x_1 = l_1 - L$$

В итоге:

$$l_1 = L\cdot\left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2V_1}\right); \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2V_1}\right) > 1$$

Аналогичные рассуждения для наблюдателя *E*. С точки зрения *Abs*: световой сигнал от соприкосновения *B* и *B′* пришел в точку *E* раньше, чем сигнал от соприкосновения *A* и *A′* на $\Delta t = \frac{L/2}{c - V_2} - \frac{L/2}{c + V_2}$.

То есть с точки зрения *E*, отрезок *AB* в система *F* короче, чем отрезок *A′B′* в системе *E*. Построим в системе *E* отрезок *a′b′* с центром в точке *E*, длина которого, с точки зрения *E*, равна длине отрезка *AB* в системе *F*: сигнал из *b′* вылетел позже, чем из *B′*, на время $\frac{x_2}{V_2 - V_1}$ и двигался влево относительно наблюдателя *E* со скоростью $c + V_2$. Сигнал из *a′* вылетел раньше, чем из *A′*, на $\frac{x_2}{V_2 - V_1}$ и двигался вправо со скоростью $c - V_2$. Эти сигналы пришли в точку *E* одновременно. Длина отрезка *a′b′* равна l_2. Сигнал из точки *b′* вылетел позже, чем из *a′* на время $\frac{2x_2}{V_2 - V_1}$;

$$\frac{l_2/2}{c - V_2} = \frac{l_2/2}{c + V_2} + \frac{2x_2}{V_2 - V_1};\ 2x_2 = L - l_2.$$

В итоге:

$$l_2 = L\cdot\left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2V_1}\right); \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2V_1}\right) < 1$$

Описанная картина с точки зрения наблюдателя *F*:

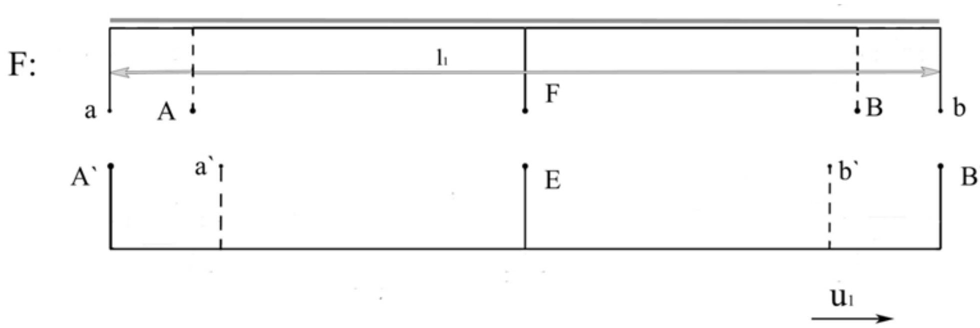

Рисунок 2.

С точки зрения *F*, длины отрезков *ab* и *A′B′* равны – сигналы от их соприкосновения приходят в точку *F* одновременно. Наблюдатель *E* летит вправо (навстречу сигналу из *B′* и удаляясь от сигнала из *A′*), он видит сигнал из *B′* раньше, чем из *A′*, следовательно, в логике «световой одновременности» с точки зрения *E* отрезок *ab* короче, чем *A′B′*.

С точки зрения наблюдателя *E*:

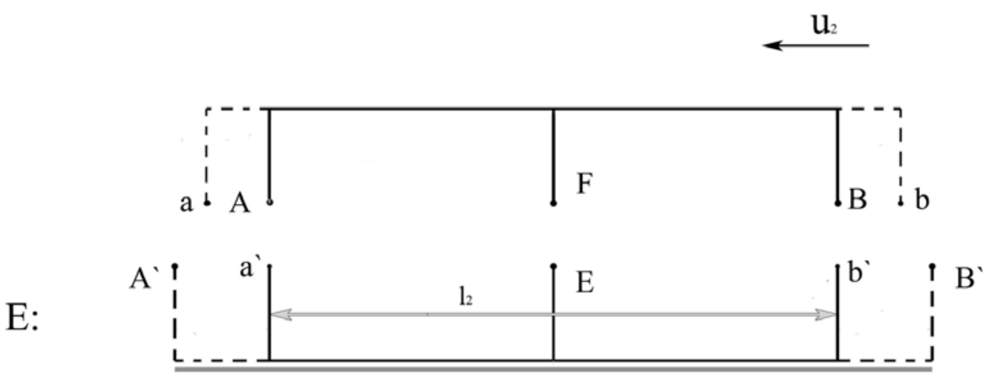

Рисунок 3.

С точки зрения *E*, длины отрезков *a′b′* и *AB* равны: сигналы от их соприкосновения приходят в точку *E* одновременно. Наблюдатель *F* летит навстречу сигналу из *A* и удаляясь от сигнала из *B*, он видит сигнал из *A* раньше, чем из *B*, то есть с точки зрения *F* отрезок *a′b′* короче, чем *AB*.

Вычислим, во сколько раз один из отрезков короче другого в каждом из двух рассмотренных случаев.

С точки зрения E длина отрезка *ab* (летящего мимо со скоростью u_2 – см. Рис. 3) больше, чем длина отрезка *a′b′*, расположенного в самой *E*, во столько раз, во сколько раз длина *ab* реально больше, чем длина *AB* – в покое. Длина *a′b′* в покое – это l_2. «На самом деле» – т.е. с точки зрения наблюдателя *Abs*, длина *AB* – это *L*.

Получаем:

$$\left|ab\right|_E = \left|a`b`\right|_E \cdot \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1}\right) = L \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1}\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1}\right)$$

Итак, с точки зрения *E*, длина отрезка *ab* меньше, чем длина покоящегося отрезка *A′B′*: $|ab| = Lk$; $k < 1$.

Аналогично – “в обратную сторону”: **с точки зрения F** длина *a′b′* (летящего мимо со скоростью u_1 – см. Рис. 2) меньше, чем длина отрезка *ab*, расположенного в самой *F*, во столько раз, во сколько раз длина *a′b′* реально меньше, чем длина *A′B′* – в покое.

Получаем:

$$\left|a`b`\right|_F = \left|ab\right|_F \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1}\right) = L \cdot \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1}\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1}\right)$$

Значит, с точки зрения F, длина отрезка $a'b'$ меньше, чем длина покоящегося отрезка AB: $|a'b'| = Lk$; $k < 1$.

Итак, симметрия: *если с точки зрения лабораторной системы отрезок «B», расположенный в движущейся системе, равен отрезку «A», расположенному в лабораторной системе, то с точки зрения движущейся системы отрезок «A» короче, чем отрезок «B», и коэффициент уменьшения равен*

$$k = \frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1} \cdot \frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1} \quad (k < 1) \tag{1}$$

2.2. Скорость света

Найдем c_2 – продольную скорость света, измеренную в системе отсчета E. Пусть свет идет от A' к B'. С точки зрения Abs часы A' и B', синхронизированные в системе E светом, не синхронны: часы A' спешат по отношению к часам B' на $L \cdot \left(\frac{V_2}{c^2 - V_2^2} \right)$. Значит, время прохождения светом длины L в системе E, измеренное часами в E, будет меньше:

$$\Delta t = \frac{L}{c - V_2} - L \cdot \left(\frac{V_2}{c^2 - V_2^2} \right).$$

Получаем:

$$c_2 = \frac{L}{\Delta t} = c\left(1 - \frac{V_2^2}{c^2}\right) \tag{2}$$

(Разумеется, для светового импульса, движущегося от B' к A', получается тот же результат.)

Аналогично, скорость света, измеренная в системе отсчета F равна

$$c_1 = c\left(1 - \frac{V_1^2}{c^2}\right) \tag{3}$$

2.3. Относительные скорости движения систем отсчета

Найдем u_2 – скорость системы F, измеренную в системе E. Учитывая, что часы A' спешат по отношению к часам B' на $L \cdot \left(\frac{V_2}{c^2 - V_2^2} \right)$, время, за которое точка F пролетает всю длину L в системе отсчета E, будет измерено наблюдателем E «с ошибкой»: F летит влево, поэтому время получится больше:

$$\Delta t = \frac{L}{V_2 - V_1} + L \cdot \left(\frac{V_2}{c^2 - V_2^2} \right);$$

Скорость системы F, измеренная в системе E:

$$u_2 = \frac{L}{\Delta t} = (V_2 - V_1) \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1} \right), \text{ где } \frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_2 V_1} < 1 \tag{4}$$

Точно такие же рассуждения приводят к формуле для скорости системы *E*, измеренной наблюдателем *F*:

$$u_1 = \frac{L}{\Delta t} = (V_2 - V_1) \cdot \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1} \right), \text{ где } \frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_2 V_1} > 1 \tag{5}$$

(При $V_2 = c$ получаем $u_1 = c_1$. Верно.)

Ключевое замечание

Если любой из наблюдателей будет измерять скорость другого наблюдателя, используя в качестве единицы измерения полученную им же скорость света, результаты у них получатся одинаковыми:

$$\frac{u_1}{c_1} = \frac{u_2}{c_2} = \frac{1}{c} \cdot \frac{V_2 - V_1}{1 - \frac{V_2 V_1}{c^2}};$$

$\dfrac{V_2 - V_1}{1 - \frac{V_2 V_1}{c^2}}$ – относительная скорость систем отсчета в СТО.

Аналогичное утверждение справедливо для *любых* кинематических измерений, произведенных в одной из равномерно движущихся систем отсчета, так как наблюдатель в каждой системе отсчета использует свои эталоны длины и времени. То есть – «свою» скорость света.

Тем самым мы уходим от абстрактной несуществующей выделенной системы «Abs» и приходим к релятивизму.

2.4. Преобразование координат и времени

Пусть с точки зрения исходной системы отсчета скорости систем *K* и *K'* сонаправлены и равны V_1 и V_2 соответственно, причем $V_2 > V_1$ («штрихованная» система отсчета – обгоняющая).

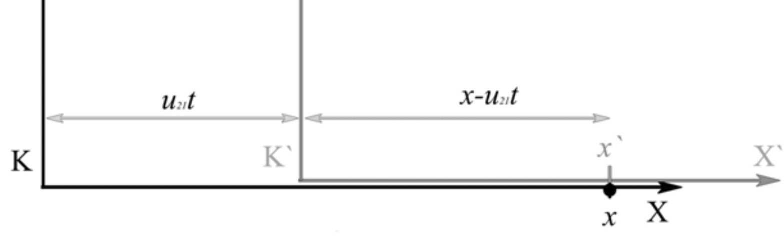

Рисунок 4.

С точки зрения системы K длина отрезка, неподвижного в системе K', равна $(x - u_{21}t)$, где u_{21} – скорость системы K', измеренная из системы K. Длина этого отрезка при измерении из системы K':

$$x' = \left(x - u_{21}t\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_1V_2}{c^2 - V_1^2}\right) \tag{6}$$

Отрезок длины x, расположенный в системе K, с точки зрения K' имеет длину

$$x \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_1V_2}\right).$$

Точка с координатой x' в системе K' «стартовала» в момент времени «ноль» по часам K', а к моменту времени t' по часам K' достигла точки

$$x \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_1V_2}\right),$$

значит, по часам K' прошло время

$$t' = \frac{x \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_1V_2}\right) - \left(x - u_{21}t\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_1V_2}{c^2 - V_1^2}\right)}{u_{12}} \tag{7}$$

Из формул (2) и (3):

$$u_{21} = \left(V_2 - V_1\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_1^2}{c^2 - V_1V_2}\right) \tag{8}$$

$$u_{12} = \left(V_2 - V_1\right) \cdot \left(\frac{c^2 - V_2^2}{c^2 - V_1V_2}\right) \tag{9}$$

Подставляя (8) и (9) в (6) и (7), получаем преобразования времени и координаты при переходе от одной движущейся равномерно системы отсчета – к другой (в простейшем случае движения по одной прямой в исходной системе отсчета):

$$t' = \left(\frac{c^2 - V_1V_2}{c^2 - V_2^2}\right)t - \frac{V_2 - V_1}{c^2}\left(\frac{c^2}{c^2 - V_1^2}\right)\left(\frac{c^2}{c^2 - V_2^2}\right)x\ ;$$

$$x' = -\left(V_2 - V_1\right)t + \left(\frac{c^2 - V_1V_2}{c^2 - V_1^2}\right)x.$$

Или, в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1-\dfrac{V_1V_2}{c^2}}{1-\dfrac{V_2^2}{c^2}} & -\dfrac{\dfrac{V_2-V_1}{c^2}}{\left(1-\dfrac{V_1^2}{c^2}\right)\left(1-\dfrac{V_2^2}{c^2}\right)} \\ -\left(V_2-V_1\right) & \dfrac{1-\dfrac{V_1V_2}{c^2}}{1-\dfrac{V_1^2}{c^2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix}$$

Матрица в этом выражении может быть записана в виде произведения:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V_2^2}{c^2}}} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\dfrac{V_2^2}{c^2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} & -\dfrac{V}{c^2\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} \\ -\dfrac{V}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} & \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\dfrac{V_1^2}{c^2}} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V_1^2}{c^2}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix},$$

где $V = \dfrac{V_2 - V_1}{1-\dfrac{V_1V_2}{c^2}}$ – относительная скорость систем отсчета В СТО .

Если для системы отсчета, имеющей скорость V_1, вместо времени и координаты t, x ввести новые $\tilde{t}, \tilde{x}$:

$$\tilde{t} = \left(\sqrt{1-\frac{V_1^2}{c^2}}\right) t\ , \tilde{x} = \frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V_1^2}{c^2}}}\, x\ ,$$

а для системы, имеющей скорость V_2:

$$\tilde{t}' = \left(\sqrt{1-\frac{V_2^2}{c^2}}\right) t'\ ,\ \tilde{x}' = \frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V_2^2}{c^2}}}\, x', \text{ то:}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{t}' \\ \tilde{x}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} & -\dfrac{\dfrac{V}{c^2}}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} \\ -\dfrac{V}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} & \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{t} \\ \tilde{x} \end{pmatrix},$$

что совпадает с видом преобразования Лоренца.

В новых координатах кинематические параметры приобретают свойство симметрии.

Заменяя в формулах (6) и (7) время t и координату x на $\tilde{t}$ и $\tilde{x}$, получаем формулы для относительных скоростей:

$$\tilde{u}_{21} = \frac{u_{21}}{1 - \frac{V_1^2}{c^2}} = \frac{V_2 - V_1}{1 - \frac{V_1 V_2}{c^2}} = V \;;\; \tilde{u}_{12} = \frac{u_{12}}{1 - \frac{V_2^2}{c^2}} = \frac{V_2 - V_1}{1 - \frac{V_1 V_2}{c^2}} = V \,,$$

(относительная скорость систем отсчета в СТО).

Одинакова и скорость света, измеренная в каждой из движущихся систем отсчета в новых координатах. Из формулы (3):

$$c_1 = c\left(1 - \frac{V_1^2}{c^2}\right).$$

Значит,

$$\tilde{c}_1 = c\,.$$

Аналогично,

$$\tilde{c}_2 = c\,.$$

В случае сравнения длин отрезков, которые находятся в движении, с отрезками, расположенными в лабораторной системе отсчета, в новых координатах получаем, как и следовало ожидать, полную симметрию.

Заключение

Предложенный подход, основанный на анализе передачи информации, позволяет наглядно получить группу Лоренца. Описанный здесь мысленный эксперимент построен на единственном исходном положении: о существовании системы отсчета, в которой скорость света в вакууме изотропна. Полученные результаты совпадают с результатми теории относительности.

Литература

1. *Малыкин Г.Б.* «Классические оптические эксперименты и специальная теория относительности (обзор)». Оптика и спектроскопия, 2009, том 107, № 4, с. 624-641.

2. *Бессонов Е.Г.* «Об одном пути к преобразованиям Лоренца». УФН, **186**, 537–541 (2016).

3. *Малыкин Г. Б.* «Паралоренцевские преобразования». УФН, **179**, 285–288 (2009).

4. *Малыкин Г.Б.* «О возможности экспериментальной проверки второго постулата специальной теории относительности». УФН, **174**, 801–804 (2004).
5. *Хуан С.-Б.* «Строгий вывод преобразования Лоренца на основе минимальных предположений». УФН, **181**, 553–556 (2011).
6. *Паули В.* «Теория относительности» 27-28 (М.: Наука, 1983).
7. *Ignatowsky W.* Physikalische Zeitschrift, **11**, 972–976 (1910).
8. *Frank P., Rothe H.* Ann. Phys. **34**, 825 (1911).
9. *Ives H.E., Stilwell G.R.* «An experimrntal study of the rate of a moving atomic clock». Journal of the Optical Society of America **28**, 215-219 (1938).
10. *Einstein A.* «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», Annalen der Physik **322**(10), 891–921 (1905).
11. *Мандельштам Л.И.* «Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике». Под ред. С.М. Рытова (М.: Наука, 1972).
12. *Tangherlini F.R.* The Velocity of Light in Uniformly Moving Frames, Department of Physics, Stanford University, 1958.
13. *Алешкевич В.А.* «О преподавании специальной теории относительности на основе современных экспериментальных данных». УФН, **182**, 1301–1318 (2012).
14. *Browne K.M.* «Classical and special relativity in four steps» European Journal of Physics, Volume 39, Number 2 (2018).
15. *Логунов А.А.* «Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы» (М.: Наука,1987).
16. *Степанов С.* «100 лет без второго постулата Эйнштейна» http://synset.com/pdf/100.pdf
17. *Алескер М.* «Второй постулат Эйнштейна и смысл преобразований Тангерлини» http://aleskermark.blogspot.ru/2015/10/100.html

On the Derivation of the Lorentz Transformations

Leonid Filippov,
Lyceum «Physical-Technical High School»,
dom 8, korpus 3A, ulitsa Hlopina, Saint Petersburg, 194021, Russia;
e-mail: z@tf.ru

Received February 29, 2020 PACS 03/30 +p

The derivation of Lorentz transformations based on a mental experiment is proposed. In this approach, the independence of the speed of light from the motion of the source and the observer is a necessary consequence of the finiteness of the propagation velocity of electromagnetic waves. The mechanism of occurrence of relativistic effects is described.

Keywords: Lorentz transformations, the theory of relativity.

References

1. *Malykin G.B.* «Classical optical experiments and special theory of relativity (review)». Optics and Spectroscopy, 2009, Volume 107, No. 4, p. 624 641.
2. *Bessonov E.G.* «On one path to the Lorentz transformations.» Physics-Uspekhi, **186**, 537–541 (2016).
3. *Malykin G.B.* «Paralorentz transformations.» Physics-Uspekhi, **179**, 285–288 (2009).
4. *Malykin G.B.* «On the possibility of experimental verification of the second postulate of special theory of relativity.» Physics-Uspekhi, **174**, 801–804 (2004).
5. *Juan S.-B.* «Strict inference of the Lorentz transformation based on minimal assumptions.» Physics-Uspekhi, **181**, 553–556 (2011).
6. *Pauli V.* «The Theory of Relativity» 27-28 (Moscow, Nauka, 1983).
7. *Ignatowsky W.* Physikalische Zeitschrift, **11**, 972–976 (1910).
8. *Frank P., Rothe H.* Ann. Phys., **34**, 825 (1911).
9. *Ives H.E., Stilwell G.R.* «An experimrntal study of the rate of a moving atomic clock». Journal of the Optical Society of America **28**, 215-219 (1938).
10. *Einstein A.* «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», Annalen der Physik **322**(10), 891–921 (1905).
11. *Mandelstam L.I.* «Lectures on optics, theory of relativity and quantum mechanics». Under ed. C.M. Rytov (Moscow, Nauka, 1972).
12. *Tangherlini F.R.* The Velocity of Light in Uniformly Moving Frames, Department of Physics, Stanford University, 1958.

13. *Aleshkevich V.A.* «On the teaching of special theory of relativity based on modern experimental data.» Physics-Uspekhi, **182**, 1301–1318 (2012).
14. *Browne K.M.* «Classical and special relativity in four steps» European Journal of Physics, Volume 39, Number 2 (2018).
15. *Logunov A.A.* «Lectures on the Theory of Relativity and Gravity: A Modern Analysis problems» (Moscow, Nauka, 1987).
16. *Stepanov S.* «100 years without Einstein's second postulate» http://synset.com/pdf/100.pdf
17. *Alesker M.* «The second postulate of Einstein and the meaning of the Tangerlini transformations» http: //aleskermark.blogspot.ru/2015/10/100.html