

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ



имени

П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

Е. Г. БЕССОНОВ

11

**ОБ ОДНОМ ПУТИ
К ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ ЛОРЕНЦА**

Москва 2012

ОБ ОДНОМ ПУТИ К ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ ЛОРЕНЦА

Е.Г. Бессонов*

Аннотация

Приводится вывод Преобразований Лоренца (ПЛ), основанный на Принципе Относительности и зависимости темпа хода часов от их скорости. Анализ различных путей вывода ПЛ позволяет смотреть на них и вытекающие из них следствия с разных сторон, сделать их более доступными широкому кругу читателей, интересующихся релятивистской физикой.

ONE WAY TO LORENTZ'S TRANSFORMATIONS

E.G. Bessonov*

Abstract

The derivation of Lorentz Transformations (LT) based on the Principle of Relativity and dependence of the rate of clocks tick on their velocity is presented. The analysis of different ways of the LT derivation allows looking at them and their consequences from different standpoints, to make them more accessible to a wide circle of readers interested in the relativistic physics.

* - bessonov@x4u.lebedev.ru

I. Введение

Законы Природы открываются человеком при проведении им экспериментов, анализе полученных данных и поиске уравнений, из которых следуют решения, наиболее точно описывающие полученные данные. Если новые экспериментальные данные не описываются ранее найденными уравнениями, то под них подбираются другие более точные уравнения. Например, такие законы, как принцип относительности Галилео Галилея (ПОГГ, 1632), преобразования Галилея (ПГ, 1638) и три закона Исаака Ньютона (1687), открытые при анализе экспериментальных данных, полученных им и его предшественниками, стали основой стройной, логически замкнутой теории, называемой теорией классической механики Галилея-Ньютона. Казалось, что устои этой теории непоколебимы. Однако прогресс в изучении электродинамических явлений в XIX веке привел к открытию уравнений Максвелла (1861 г.), которые оказались не инвариантными по отношению к ПГ (меняли форму при переходе из одной системы координат в другую). Это означало, что если уравнения Максвелла верны, то ПГ имеют ограниченную область применимости. Для нахождения новых преобразований предлагались различные пути, например, такие:

1. ПОГГ и ПГ верны. Уравнения Максвелла неверны.
2. В системе координат, связанной с эфиром, уравнения Максвелла верны, скорость света не зависит от скорости источника и направления излучения. В системах координат, движущихся относительно эфира, уравнения Максвелла меняют форму. ПОГГ и ПГ нарушаются.
3. Справедлив Принцип (Постулат) Относительности, сформулированный А.Пуанкаре в 1904 г. (ПОАП) в виде: «законы физических явлений должны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, совершающего равномерное поступательное движение, так что мы не имеем и не можем иметь никакого способа определить, находимся ли мы в подобном движении или нет»¹/1, 2/. Допускается существование всепроникающего эфира.

Проблема новых преобразований должна была решиться экспериментально. Наиболее значимые и убедительные результаты содержались в знаменитых отрицательных экспериментах Майкельсона по обнаружению движения земли относительно эфира /3/, /4/. Эти эксперименты продолжались с 1881 по 1929 г. Эфир оставался неуловимым.

Для поиска новых преобразований выдвигались различные гипотезы, требующие новой экспериментальной проверки. Среди них были такие, как ока-

¹ По смыслу ПОАП не отличается от ПОГГ: "в каюте корабля, движущегося равномерно и без качки, вы не обнаружите ни по одному из окружающих явлений, ни почему-либо, что станет происходить с вами самими, движется ли корабль или стоит неподвижно". В ПОАП подчеркивалось включение не только механических, но и электромагнитных и гравитационных явлений, которые мог бы включить Галилей, если бы уравнения Максвелла появились раньше. Из обеих формулировок следовало равноправие инерциальных систем координат. Поэтому далее мы будем пользоваться одним термином – ПОГГ.

завшая большое влияние на ход поиска ПЛ гипотеза о сокращении длины предметов (Фицджеральд, 1891, 1893); Г.Лоренц, 1892) и витавшая в воздухе гипотеза об изменении темпа хода часов, движущихся через эфир. К этим гипотезам вели следствия из решений электродинамических задач, основанных на использовании уравнений Максвелла и существовавшей нерелятивистской динамики электрона («сжатие» электромагнитных полей равномерно движущихся заряженных частиц в продольном направлении, «неправильный» закон изменения энергии полей движущихся частиц от их скорости, зависимость периода обращения электрона по орбите молекулы от скорости этой молекулы). На смену ПГ должны были прийти новые, более сложные преобразования с изменением масштабов координат и времени вида:

$$\begin{aligned} x &= f_x(x', y', z', t', v), \quad y = f_y(x', y', z', t', v), \quad z = f_z(x', y', z', t', v), \quad t = f_t(x', y', z', t', v), \\ x' &= f_x(x, y, z, t, -v), \quad y' = f_y(x, y, z, t, -v), \quad z' = f_z(x, y, z, t, -v), \quad t' = f_t(x, y, z, t, -v). \end{aligned} \quad (1)$$

Последние четыре уравнения в (1) следуют из четырех первых уравнений, ПОГГ и при учёте знака скорости одной системы координат относительно другой.

Оказалось, что решение задачи по отысканию функций f_α существует, и не одно. Фойгт был первым, кто в 1887 г. включил время $t'|_{v \neq 0} \neq t$ в преобразования координат и получил такие преобразования, относительно которых волновое уравнение для свободного электромагнитного поля было инвариантно /5/. Но его преобразования расходились с мысленным экспериментом (изменялись масштабы по поперечным осям, что противоречит ПОГГ), масштаб времени менялся как квадрат релятивистского фактора. Преобразования, находящиеся в согласии с опытом, были найдены Дж.Лармором в 1898 г. /6/ и Г.Лоренцем в 1899 г. (во втором порядке) и в 2004 г. /7/. По предложению А.Пуанкаре их назвали преобразованиями Лоренца (ПЛ). Вывод ПЛ был основан на инвариантности относительно них уравнений Максвелла ². Авторы не полностью осознали смысл открытых ими преобразований. Глубоко осознал и оценил их А.Пуанкаре /8/. Ранее он уже обращал внимание на важнейшие для релятивистской теории проблемы синхронизации движущихся часов, относительности одновременности и указал на важность сохранения ПОГГ для инерциальных систем отсчета (дав для него несколько более детальных формулировок) ³. Он интерпретировал ПЛ как повороты в четырехмерном пространстве-времени, указал, что они обладают групповыми свойствами. Позднее в 1905 г. ПЛ были получены А.Эйнштейном из ПОГГ и из принципа постоянства скорости света (независимости от v). Его

² Ток смещения, введенный Максвеллом во времена, когда все токи считались замкнутыми, рассматривался как догадка. Позднее, когда стали рассматриваться незамкнутые токи, введение его стало необходимостью, следующей из закона сохранения заряда. Эксперименты по генерированию электромагнитных волн (1888) подтвердили необходимость его введения.

³ Дж. Лармор не только первым нашел, но уже в 1900 г. также осознанно воспринимал ПЛ. Так в книге /9/ он вычислил во втором порядке зависимость от скорости молекулы периода обращения в ней электрона (см. перевод в /2/). Отметил, что в этом случае орбита из круговой превращается в эллиптическую. Представленные результаты рассматривались как реальность, а не как ухищрение (по терминологии Г.Лоренца).

подход к выводу был более коротким и изящным. Он привлек внимание многих ученых. Кроме того, А.Эйнштейн открыл интересную для широкого круга читателей тему о парадоксе часов (парадокс близнецов). В 1910 году В.Игнатовский выводит ПЛ, основываясь на ПОГГ, без привлечения электродинамики и используя групповые математические приёмы (аксиоматический метод построения теории, использование трёх инерциальных систем координат) /10/. В следующем году в *Annalen der Physik* публикуется аналогичная работа Филиппа Франка и Германа Роте /11/, развивавшая результаты В.Игнатовского. В ней обращено внимание на существование более общего дробно-линейного преобразования между двумя инерциальными системами, из которого ПГ и ПЛ вытекают как частные случаи. Вывод ПЛ в /10/, /11/ основывался только на ПОГГ, не несущем каких-либо количественных данных. Поэтому входящая в них константа интегрирования, имевшая размерность скорости, оставалась неопределенной. Её можно было определить из эксперимента и, в частности, из проверенных экспериментально уравнений Максвелла (убедившись в том, что они инвариантны относительно полученных ПЛ, если положить, что входящие в них и в уравнения Максвелла константы равны) или, например, из экспериментов по измерению зависимости времени жизни частиц или возбужденных состояний молекул от скорости.

Таким образом была решена проблема нахождения ПЛ - основы новой, логически замкнутой специальной теории относительности (СТО), обязанной своим появлением большому числу выдающихся математиков, физиков-теоретиков и экспериментаторов.

В настоящей методической работе приводится короткий и, как нам кажется, простой для широкого круга читателей вариант вывода ПЛ, основанный на ПОГГ и наличии зависимости темпа хода часов от их скорости. Обсуждаются другие варианты вывода ПЛ и интерпретации следующих из них следствий.

II. Вывод преобразований Г. Лоренца, основанный на замедлении темпа хода движущихся часов.

Введем две инерциальные системы координат: лабораторную неподвижную систему K и систему K' движущуюся вдоль оси x со скоростью v (см. Рис. 1). Оси x, y, z системы K и соответствующие оси системы K' одинаково направлены, их начала отсчёта в моменты времени $t = t' = 0$ совпадают. Часы, в обеих системах координат идентичны и синхронизованы. Справедлив ПОГГ. Отсюда следует, что пространство является однородным и изотропным, а связь между системами координат описывается линейными уравнениями.

Так как масштабы в поперечном направлении могут сравниваться путем наложения один на другой одновременно для наблюдателей в каждой из систем координат, то они, согласно ПОГГ, не изменяются:

$$y = y', \quad z = z'. \quad (2)$$

Примем за основу экспериментальный факт, согласно которому часы, покоящиеся относительно движущейся системы координат K' , идут в $g(v)$ раз медленнее, чем часы, покоящиеся в неподвижной системе координат K . Здесь фактор растяжения времени $g(v) \geq 1$ - функция скорости v движущихся часов. Это означает, что наблюдатели системы K по их часам, расположенным вдоль оси x , найдут, что через отрезок времени t двигающиеся мимо них часы, расположенные в начале системы координат K' , покажут время⁴

$$t' = t / g(v). \quad (3)$$

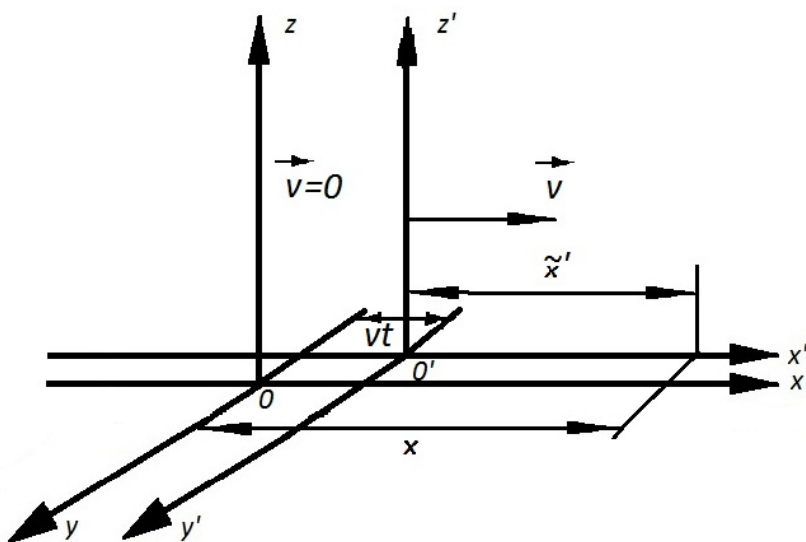


Рис. 1

По показаниям этих наблюдателей часы, расположенные в начале движущейся системы координат K' за отрезок времени t пройдут путь $l = vt$. Наблюдатели, расположенные в движущейся системе координат K' найдут, что по их часам за соответствующее время t' часы, покоящиеся в начале системы координат K , пройдут путь $l' = vt'$, который, согласно (3), равен $l' = l / g(v)$, т.е. в $g(v)$ раз меньший. Это означает, что масштаб длины, расположенный вдоль продольной оси в системе координат K для наблюдателей, расположенных в системе K' , выглядит в $g(v)$ раз меньшим. С другой стороны, из ПОГГ (из равноправия систем координат K и K') следует, что тела, находящиеся в системе координат K' и наблюдаемые из системы координат K , также выглядят сокращенными в то же число раз, что и растяжение времени $g(v)$.

Таким образом, из закона замедления темпа хода движущихся часов и ПОГГ следует другой важный закон: движущиеся тела выглядят сокращенными в $g(v)$ раз⁵.

⁴ Замедление темпа хода часов имеет место как для равномерно движущихся часов, так и часов движущихся с ускорением, например по окружности, в кольцевых ускорителях.

⁵ Справедливо и обратное утверждение: «из закона сокращения движущихся тел и ПОГГ следует закон замедления темпа хода движущихся часов».

Между координатой x (длиной отрезка Ox) и координатой \tilde{x}' (длиной отрезка $O'x'$), измеренной в неподвижной системе координат K , существует связь $\tilde{x}' = x - vt$ (см. Рис. 1). Так как координата x' (длина отрезка $O'x'$) в системе координат K' , согласно закону сокращения длины движущегося отрезка, равна $x' = g(v)\tilde{x}'$, то отсюда следует связь между координатами x' , x , t :

$$x' = g(v)(x - vt). \quad (4)$$

Из (4) и ПОГГ для измерений, ведущихся в движущейся системе координат K' , следует аналогичная связь между координатами x , x' , t' :

$$x = g(v)(x' + vt'). \quad (5)$$

При написании этого уравнения учтено, что во втором случае скорость системы координат K в системе координат K' имеет противоположный знак.

Система уравнений (2), (4), (5) связывает координаты и времена событий, происходящих в неподвижной и движущейся системах координат. Подставив координату x' , определяемую (4), в (5) найдём явную зависимость времени в движущейся системе координат K' от продольной координаты и времени в системе координат K :

$$t' = g(v)\{t - [g^2(v) - 1]x/vg^2(v)\}. \quad (6)$$

Аналогично подставив координату x в выражение (4), найдём явную зависимость времени в неподвижной системе координат K от продольной координаты и времени в системе координат K' :

$$t = g(v)\{t' + [g^2(v) - 1]x'/vg^2(v)\}. \quad (7)$$

Выражения (6), (7) удобно записать в виде

$$t' = g(v)[t - xv/C^2(v)], \quad (8)$$

$$t = g(v)[t' + x'v/C^2(v)], \quad (9)$$

где величина $C^2(v) = v^2g^2(v)/[g^2(v) - 1]$.

Из выражений (5), (9) следует закон преобразования продольной скорости частицы v_x' из движущейся системы координат в неподвижную

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{v_x' + v}{1 + v_x'v/C^2(v)}. \quad (10)$$

Заметим, что согласно «механическим» (не связанным с электродинамикой) экспериментальным данным (см., например, /12/), фактор $g(v)$ с большой точностью $\approx 10^{-3}$ совпадает с релятивистским фактором тела $\gamma(v) = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$, где $\beta = v/c$, а величина $C(v)$, имеющая размерность скорости, примерно равна скорости света c .

Система уравнений (2), (4) - (7) является аналогом ПЛ. С ней можно работать также, как и с обычными ПЛ. Зависимость в них функции $g(v)$ может браться из существующих экспериментальных данных, записанных в виде таблиц и графиков. Их можно аппроксимировать подходящими аналитическими функциями (например $\gamma(v)$). Два из четырех уравнений (4) - (7) являются независимыми. Уравнения для x , t являются прямыми, а для x' , t' - обратными аналогами ПЛ.

До сих пор полагалось, что зависимость фактора $g(v)$ от скорости в полученных нами аналогах ПЛ берётся из экспериментов по растяжению времени. Аналитическую зависимость $g(v)$ можно найти и теоретически различными путями, исходя из ПОГГ. Первый путь был указан В.Игнатовским (см. выше). Второй, самый короткий путь, следует из анализа выражения (10). Если в нём положить, что скорость v_x' представляет скорость третьей инерциальной системы координат, то, согласно ПОГГ, она должна входить в (10) равноправно со скоростью v . Но v_x' не входит в величину $C(v)$. Поэтому $C(v)$ должна быть константой, не зависящей и от скорости v : $C(v) = C$. Отсюда и из определения $C(v)$ следует зависимость $g(v) = 1/\sqrt{1-(v/C)^2}$. Наконец, можно указать на способ нахождения величины $C(v)$, связанный с процессом синхронизации часов путём переноса их из одной точки координатной системы K' в другую при малой скорости относительно этой системы (см. /13/, с.24). Для этого можно разнести вдоль оси координат x' часы, находящиеся в центре движущейся системы координат K' , при факторе $g(v)_\delta = g(v) + \delta g(v) = g(v) + [\partial g(v)/\partial v]\Delta v$, где $\Delta v = v_\delta - v \ll v$, v_δ - скорость разносимых часов в системе координат K . В этом случае темп хода часов, двигающихся с фактором $g(v)_\delta$, будет отличаться от темпа хода часов, двигающихся с фактором $g(v)$ и поэтому, согласно (3), появится сдвиг по времени у движущихся часов относительно часов, находящихся в центре движущейся системы координат K' , на величину $\Delta t' = -\Delta t \Delta g(v) / g^2(v) = -\Delta t \Delta v [(\partial g(v)/\partial v) / g^2(v) = -(\tilde{x}' / g^2(v)) [\partial g(v)/\partial v]$, где $\tilde{x}' = \Delta t \Delta v = x' / g(v)$. Таким образом, показания часов в движущейся системе координат K' будут определяться показаниями часов (3), расположенных в её центре, и сдвигом $\Delta t'$: $t' = t / g(v) - [\tilde{x}' / g^2(v)] \cdot [\partial g(v)/\partial v]$. Отсюда следуют показания часов в системе координат K'

$$t = g(v)\{t' + [x' / g^3(v)][\partial g(v)/\partial v]\}. \quad (11)$$

При наблюдении из движущейся системы координат за синхронизацией часов в подвижной системе координат, в соответствии с ПОГГ, появится аналогичная зависимость

$$t' = g(v)\{t - [x / g^3(v)][\partial g(v)/\partial v]\} \quad (12)$$

Уравнениями (11), (12) можно пользоваться с тем же успехом, что и уравнениями (6), (7). Они идентичны, несмотря на то, что имеют различный аналитический вид. Из равенства вторых членов в выражениях (6) и (12) следует уравнение $[g^2(v) - 1] / v g^2(v) = [1 / g^3(v)] [\partial g(v)/\partial v]$ или $[dg(v)/dv] = g(v)[g^2(v) - 1] / v$, решение которого имеет вид:

$$g(v) = 1/\sqrt{1-(v/C)^2}, \quad (13)$$

где C - постоянная интегрирования. Отсюда следует, что введенная выше (см. (9)) величина $C(v)$ не зависит от скорости: $C(v) = C$.

Из уравнений (6) - (13) следуют прямое и обратное уравнения для преобразований времени из одной системы координат в другую:

$$t = g(v)(t' + vx' / C^2), \quad t' = g(v)(t - vx / C^2). \quad (14)$$

Таким образом, основываясь на одном ПОГГ мы нашли ПЛ (2), (4), (5), (14) и аналитическую зависимость входящего в них фактора растяжения времени $g(v)$. Постоянная C в этих преобразованиях является некоторой фундаментальной постоянной. Её можно определить из выражения (13) по одной экспериментальной точке. Определившись таким образом с постоянной C мы получаем ПЛ, выведенные без использования электродинамики. По существу мы получили результат В.Игнатовского, но в отличие от него вместо теории групп использовали метод синхронизации часов. Этим мы ещё раз подчеркнули, что за основы релятивистской физики ответственны более общие законы Природы, а не электродинамика (напомним, что впервые ПЛ были получены из электродинамики).

Из ПОГГ следует, что темп хода часов (3) не зависит от их ориентации относительно скорости, от конструкции (пружинные, основанные на вращении, гравитационном притяжении) или от принадлежности к неживой или живой природе. Из ПОГГ также следует, что фундаментальная постоянная в полученных ПЛ равна скорости света и скорости гравитационных волн, т.к. волновые уравнения соответствующих полей удовлетворяют ПЛ только в том случае, когда их постоянные равны.

Если при выводе ПЛ исходить из предположения, что все законы Природы, включая электродинамику Максвелла, подчиняются ПОГГ, то отсюда будет следовать вывод о том, что скорость света (также как и гравитационных волн) в свободном пространстве имеет одну и ту же величину в произвольной инерциальной системе координат находящейся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. В этом случае можно воспользоваться часами, основанными на периодических колебаниях светового волнового пакета в открытом оптическом резонаторе⁶. Период колебаний этого пакета в таких часах находящихся в состоянии покоя равен $T_0 = 2l/c$, где l - длина резонатора. Если часы движутся со скоростью v , их ось нормальна скорости, то в покоящейся системе координат волновой пакет света распространяется под углом к вектору скорости часов. Его продольная компонента скорости равна v , а поперечная компонента скорости уменьшается до $c/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Соответственно период колебаний пакета увеличивается в фактор растяжения времени $g(v) = \gamma(v) = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ раз. Если бы мы вначале вычислили фактор растяжения времени и в виде $g(v) = \gamma(v)$ подставили его в выражение (3), то вывод ПЛ заметно сократился бы (ограничился выражениями (2) - (7)). Но в этом случае мы отошли бы от общего случая.

Заключение

В данной работе, допустив возможность изменения темпа хода часов с изменением их скорости и обозначив его некоторым неизвестным фактором растяжения времени $g(v)$, нами из ПОГГ выведен закон преобразования координат и

⁶ Простейший открытый резонатор состоит из двух вогнутых зеркал расположенных на некотором расстоянии друг от друга на некоторой оси. Используются в лазерной технике.

времени (2), (4) - (7) из одной инерциальной системы координат в другую. Это аналог ПЛ, в котором вместо релятивистского фактора $\gamma(v)$ стоит фактор $g(v)$ который должен браться из экспериментальных данных, задаваемых в виде таблиц, или из аппроксимирующих их аналитических выражений. Далее, воспользовавшись процедурой синхронизации часов мы прямым вычислением нашли тот же закон преобразования показаний часов из движущейся системы координат K' в неподвижную, но в другой форме. Из условия равенства этого и ранее найденного показаний часов мы нашли явный вид фактора $g(v)$. По виду он, как и следовало ожидать, совпал с релятивистским фактором $\gamma(v)$. В этом случае аналог ПЛ перешел в найденные В.Игнатовским ПЛ с неизвестной фундаментальной постоянной с размерностью скорости, которую можно взять из эксперимента, не связанного с измерением скорости света и другими электродинамическими измерениями. Отсюда следует вывод о том, что в ПОГГ (постулате) заложены общие законы Природы, что законы электродинамики, гравитации и другие известные и вновь открываемые законы обязаны быть инвариантными относительно ПЛ.

Такой путь изложения классической физики может оказаться более общим, естественным и понятным на первом этапе изучения СТО, когда широкому кругу читателей аксиоматический вывод ПЛ кажется неестественным, а вывод, основанный на инвариантности уравнений Максвелла относительно ПЛ, громоздким и уводящим от уяснения природы самих ПЛ. Нам представляется, что именно на этом этапе проще обсуждать существующие вопросы и парадоксы, а некоторые из них отпадут автоматически⁷.

Интересно отметить, что конкретные непростые на вид аналитические выражения для ПЛ следуют из ПОГГ, не несущего конкретной численной информации, добытой в эксперименте (по сути они следуют из простого наблюдения Галилео Галилеем за явлениями Природы с Земли и из окон равномерно движущихся кораблей), а некоторые дополнительные экспериментальные данные (в объёме одной точки) нужны только для нахождения входящей в них неопределённой фундаментальной постоянной. Можно только удивляться тому, как много информации в ПОГГ, какую большую роль играет он в Природе. Некоторые из затронутых в настоящей работе вопросов в той же или иной интерпретации можно найти в работах /14/ - /17/ и цитируемой в них литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Poiankare. Bulletin des Sciences Mathematiques, December 1904, v.28, ser. 2, p. 302. Перевод см. в сборнике /2/, с.30.
2. Сборник «Принцип относительности», составитель А.А.Тяпкин, под редакцией Д.И.Блохинцева, Атомиздат, 1973.

⁷ Например, мы исходили из экспериментально установленного закона о растяжении времени для движущихся объектов. Поэтому исчезает наиболее трудная проблема с парадоксом близнецов.

3. Michelson, Albert Abraham (1881). "The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether". *American Journal of Science* **22**: 120–129.
4. Michelson, Albert Abraham & Morley, Edward Williams (1887). "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether". *American Journal of Science* **34**: 333–345.
5. Voigt W. Uber des Dopplersche Prinzip// Gott. Nachr. – 1887. - S. 41;
http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Special_relativity.html
6. Larmor, J. (1897), "On a Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium, Part 3, Relations with material media", *Philosophical Transactions of the Royal Society* **190**: 205–300,
7. Lorentz, Hendrik Antoon (1899), "Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems", *Proc. Acad. Science Amsterdam I*: 427–443; and Lorentz, Hendrik Antoon (1904), "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light", *Proc. Acad. Science Amsterdam IV*: 669–678.
8. A.Poiankare. Comptes Rendus, 1905, v. 140, 1504-1508
9. J.Larmor, «AETHER AND MATTER», Cambridge, 1900.
10. W. Ignatowsky - *Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip* {Berichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft}, p. 788 ff. (1910), Archiv der Mathematik und Physik, 17. p. 1 ff. (1910); <http://synset.com/>; http://synset.com/ru/%D0%98%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_1910
11. P. Frank and H. Rothe - "*Ober die Transformation der Raumzeitkoordinaten von ruhenden auf bewegte Systeme*", *Ann. Phys.* 34, 825-853 (1911); <http://synset.com/>; http://synset.com/ru/Релятивистский_мир
12. J.Bailey, K.Borer, F.Combley et al., Measurements of relativistic time dilation for positive and negative muons in a circular orbit. *Nature*, Vol. 268, 28 July 1977, p. 301-305.
13. Паули В. Теория Относительности. М.: Наука, Издание 3-е, исправленное.
14. A.R.Lee, T.M.Kalotas, Lorents transformations from the first postulate. *American J. Phys.* Vol. 43, No. 5, May 1975, p. 434-437.
15. Achin Sen, Galileo could have derived the special theory of relativity. *American J. Phys.* Vol. 62 (2), February 1994, p. 157-162.
16. S.Nishikawa, Lorentz transformation without the direct use of Einstein's postulates. *IL NUOVO CIMENTO*, Vol. 112B, No. 8, Agosto 1997, p. 1175-1187.
17. См. сайт http://en.wikipedia.org/wiki/Special_relativity.

Подписано в печать 17.05.2012 г.
Формат 60x84/16. Заказ №36. Тираж 140 экз. П.л 1.
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640