Май 2016 г. **УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК** *Том 186, № 5*

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Об одном пути к преобразованиям Лоренца

Е.Г. Бессонов

Приводится вывод преобразований Лоренца (ПЛ), основанный на принципе относительности Г. Галилея и зависимости темпа хода часов от их скорости. Анализ различных путей вывода ПЛ позволяет рассмотреть их и вытекающие из них следствия с разных сторон, сделать их более доступными широкому кругу читателей, интересующихся релятивистской физикой.

Ключевые слова: принцип относительности, преобразования Галилея, преобразования Лоренца, специальная теория относительности

PACS numbers: **01.40.–d**, **01.65.+g**, **04.20.–q** DOI: 10.3367/UFNr.2015.11.037648

Содержание

1. Введение

Законы природы открываются человеком при проведении им экспериментов, анализе полученных данных и поиске уравнений, решения которых наиболее точно описывают экспериментальные 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 г.), преобразования Галилея (ПГ) (1638 г.) и три закона Исаака Ньютона (1687 г.), открытые при анализе экспериментальных данных, полученных этими учёными и их предшественниками, стали основой стройной, логически замкнутой теории, называемой теорией классической механики Галилея – Ньютона.

Казалось, что устои классической механики непоколебимы. Однако прогресс в изучении электродинамических явлений в XIX в. привёл к открытию уравнений Максвелла (1861 г.), которые оказались не инвариантными по отношению к ПГ — меняли свою форму при переходе из одной системы координат в другую. Это означало, что если уравнения Максвелла верны, то ПГ имеют ограниченную область применимости. Основы науки заколебались. Максвелл при выводе уравнений, впоследствии названных его именем, предположил, что они справедливы только в выделенной абсолютной системе координат, связанной с некоторым гипотетическим эфиром — носителем электромагнитных полей. Существование абсолютной системы координат противоречило ПОГГ, что стимулировало экспериментаторов и теоретиков к поиску эфира и новых преобразований координат и времени. 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 (ПОАП) в 1904 г.: "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] (цитируется по переводу в [2])[1]. Допускалось существование всепроникающего эфира, который приводил к сокращению продольных размеров движущихся через него предметов и к замедлению темпа хода движущихся часов.

Проблема абсолютной системы координат, связанной с эфиром, и новых преобразований должна была решиться экспериментально. Наиболее значимые и убе-

Е.Г. Бессонов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: bessonov@x4u.lebedev.ru

Статья поступила 13 мая 2014 г., после доработки 18 ноября 2015 г.

[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 по чему-либо, что станет происходить с вами самими, движется ли корабль или стоит неподвижно" [3]. В ПОАП подчёркивалось включение в рассмотрение не только механических, но и электромагнитных и гравитационных явлений. Г. Галилей не исключал их. В интегральном виде уравнения электромагнитного поля существовали. Скорость света была измерена с достаточно большой точностью. Из обеих формулировок следовало равноправие инерциальных систем координат. Поэтому далее мы будем пользоваться одним термином — ПОГГ.

дительные результаты содержались в знаменитых отрицательных экспериментах Майкельсона по обнаружению движения Земли относительно эфира [4, 5]. Эти эксперименты продолжались с 1881 г. по 1929 г. Эфир оставался неуловимым. Положение ПОГГ укреплялось.

Для поиска новых преобразований выдвигались различные гипотезы, требующие экспериментальной проверки. Среди них были такие, как оказавшая большое влияние на ход поиска ПЛ гипотеза о сокращении длины предметов (Г. Фицджеральд (1889 г.), Г. Лоренц (1892 г.)) и витавшая в воздухе гипотеза об изменении темпа хода часов, движущихся через эфир (В. Фойгт (1887 г.), Дж. Лармор (1898 г.)). К этим гипотезам вели следствия из решений электродинамических задач, основанных на использовании уравнений Максвелла и нерелятивистской динамики электрона ("сжатие" электромагнитных полей равномерно движущихся заряженных частиц в продольном направлении (О. Хэвисайд, 1888 г.), "неправильный" закон изменения энергии полей, сопровождающих равномерно движущиеся частицы, в зависимости от скорости этих частиц, зависимость периода обращения электрона по орбите молекулы от её скорости). На смену ПГ должны были прийти новые, более сложные, преобразования с изменением масштабов коъординат и времени вида

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

где v — скорость системы координат K', движущейся относительно другой системы координат K в случае параллельно направленных соответствующих осей координат.

Последние четыре уравнения в (1) следуют из четырёх первых уравнений, и ПОГГ 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 ещё в 1887 г. получил такие преобразования координат, которые включали в себя время $t'|_{v\neq 0} \neq t$ и относительно которых волновое уравнение для свободного электромагнитного поля было инвариантным [6]. Но преобразования Фойгта расходились с мысленным экспериментом: изменялись масштабы по поперечным осям (что противоречит ПОГГ), масштаб времени изменялся как квадрат релятивистского фактора.

Преобразования, находящиеся в согласии с опытом, были найдены Дж. Лармором [2] [7] в 1897 г. и Г. Лоренцем [8, 9] в 1899 и в 1904 г. По предложению А. Пуанкаре их назвали преобразованиями Лоренца (ПЛ). Вывод ПЛ был основан на инвариантности относительно них уравнений Максвелла (волнового уравнения электродинамики) [3]. Г. Лоренц не полностью осознал смысл открытых им преобразований. Глубоко осознал и оценил их А. Пуанкаре [10]. Ранее А. Пуанкаре уже обращал внимание на важнейшие для релятивистской теории проблемы синхронизации движущихся часов и указывал на важность сохранения ПОГГ для инерциальных систем отсчёта (дав для него несколько более детальных формулировок). Пуанкаре интерпретировал ПЛ как повороты в четырёхмерном пространстве-времени и указал, что они обладают групповыми свойствами (следующими из ПОГГ). Позднее, в 1905 г., ПЛ были получены А. Эйнштейном из ПОГГ (который, так же как и А. Пуанкаре, предположил, что ПОГГ справедлив и для электродинамических явлений) и принципа постоянства скорости света (независимости от скорости источника света). Подход Эйнштейна к выводу ПЛ был более коротким и изящным и привлёк внимание многих учёных. Кроме того, Эйнштейн открыл интересную для широкого круга читателей тему о парадоксе часов (парадокс близнецов).

В 1910 г. Владимир Сергеевич Игнатовский (1875–1942), российский и советский физик и математик, выводит ПЛ без привлечения электродинамики, основываясь на ПОГГ и линейной зависимости между координатами и временами неподвижной и движущейся систем координат и используя теорию групп (аксиоматический метод построения теории, использование трёх инерциальных систем координат) [12, 13]. В следующем году в *Annalen der Physik* публикуется работа Филиппа Франка и Германа Роте [14], развивающая результаты В.С. Игнатовского. В [14] 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 [12–14] основывался только на ПОГГ, не несущем каких-либо количественных данных. В полученные ПЛ входила некоторая неопределённая константа n. При этом величина $\tilde{C} = 1/\sqrt{n}$ имела размерность скорости и входила в уравнения в виде отношения $v/\tilde{C}$. Величину $\tilde{C}$ можно было определить из экспериментально проверенных Г. Герцем в 1888 г. уравнений Максвелла, убедившись в том, что они инвариантны относительно полученных ПЛ, если положить, что входящие в уравнения Максвелла и ПЛ константы равны между собой ($\tilde{C} = c$, c — скорость света), или из экспериментов по измерению зависимости времени жизни частиц либо возбуждённых состояний молекул от скорости [4].

[2] Дж. Лармор не только одним из первых нашёл преобразования координат и времени, но и был одним из немногих, кто уже в 1900 г. осознанно воспринимал ПЛ. Так, в книге [11] (см. перевод в [2]) Лармор вычислил во втором порядке зависимость от скорости молекулы периода обращения в ней электрона и отметил, что в этом случае орбита из круговой превращается в эллиптическую. Представленные результаты рассматривались как реальность, а не как ухищрение (по терминологии Г. Лоренца).

[3] Ток смещения, введённый Максвеллом ещё в то время, 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 (Г. Герц, 1887 г.) подтвердили необходимость введения тока смещения. Поэтому уравнения Максвелла оказались релятивистки инвариантными ещё до создания специальной теории относительности и способствовали её развитию.

[4] В.С. Игнатовский отмечает: "... чтобы определить числовое значение и знак n, мы должны обратиться к эксперименту. Так как ... мы не опирались на какое-либо специальное физическое явление, следовательно, мы можем определить n на основании любого явления и всегда должны получать одинаковое его значение, поскольку n является универсальной константой". Эта константа выведена из самого общего принципа. В.С. Игнатовский отмечал также, что в

В.С. Игнатовский для нахождения неизвестной постоянной обратился к электродинамическим уравнениям для равномерно движущегося точечного заряда и без использования ПОГГ. Им было показано, что "эквипотенциальная поверхность поля этого заряда для неподвижного наблюдателя будет эллипсоидом О. Хевисайда с отношением длин продольной и поперечных осей, равным $1/\gamma = [1 - (v/c)^2]^{1/2}$, а для наблюдателя, движущегося совместно с точечным зарядом, поверхность уровня потенциала является сферой" [12]. Отсюда (из закона сокращения длины движущихся предметов) следовало, что $n^{-2} = \tilde{C} = c$.

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 статье приводится короткий и, как нам кажется, простой для широкого круга читателей физический подход к выводу ПЛ. Этот подход основан на ПОГГ и наличии зависимости темпа хода часов от их скорости. Обсуждаются другие варианты вывода ПЛ и интерпретации вытекающих из них следствий.

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

Введём две инерциальные системы координат: лабораторную неподвижную систему K и систему K', движущуюся вдоль оси x со скоростью v (см. рисунок). 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.

Примем, что справедлив ПОГГ. Из него следует, что пространство является однородным и изотропным, а связь между системами координат описывается линейными уравнениями. Кроме того, из ПОГГ следует важный вывод о том, что ПЛ обладают групповыми свойствами, так как, согласно ПОГГ, при переходах из одной системы координат в другую непосредственно или через третью систему вид преобразований не изменяется [5].

Так как масштабы, расположенные в поперечных направлениях y, z и y', z' в системах координат K и K', можно сравнивать посредством наложения одного на другой одновременно для наблюдателей в каждой из систем координат, их длина, согласно ПОГГ, не зависит от скорости (релятивистски инвариантна). Отсюда следуют преобразования

$$y' = y\,, \quad z' = z\,. \tag{2}$$

Примем за основу экспериментальный факт, согласно которому часы, покоящиеся относительно дви-

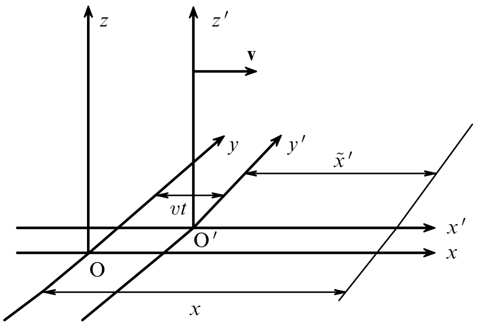

Рисунок. Неподвижная система координат $K(x, y, z)$ и движущаяся система координат $K'(x', y', z')$.

жущейся системы координат K', идут в g раз медленнее, чем точно такие же часы, покоящиеся в неподвижной системе координат K. Здесь фактор растяжения времени $g = g(v/\tilde{c})$ — неизвестная чётная функция скорости v движущихся часов, $\tilde{c}$ — неизвестная константа с размерностью скорости. Величина $g(0) = 1$, $g|_{v/\tilde{c} \ll 1} = 1 + k(v/\tilde{c})^2 + \ldots, \quad k > 0$. Это означает, что наблюдатели системы K по своим часам, расположенным вдоль оси x, найдут, что через отрезок времени t движущиеся мимо них часы, расположенные в начале системы координат K', покажут время [6]

$$t' = \frac{t}{g}\,. \tag{3}$$

Таким образом, часы, расположенные в начале движущейся системы координат K', за отрезок времени t по часам системы K пройдут путь $l = x = vt$ и покажут время $t' = t/g$. При этом наблюдатели, расположенные в движущейся системе координат K', найдут, что по их часам за соответствующее время t' часы, покоящиеся в начале системы координат K, двигаясь в отрицательном направлении оси x', окажутся в точке $x' = -vt'$ и, таким образом, пройдут путь $l' = |x'| = vt'$, который, согласно (3), равен $l' = l/g$. Это означает, что масштаб длины вдоль продольной оси в системе координат K для наблюдателей, расположенных в системе K', выглядит в g раз меньшим масштаба длины в системе K'. Предполагается, конечно, что масштабы длины, так же как и часы, в системах K и K' совершенно одинаковы.

С другой стороны, из ПОГГ следует, что находящиеся в системе координат K' тела, наблюдаемые из системы координат K, также выглядят сокращёнными в то же число раз, что и растяжение времени g. Отсюда вытекает, что из закона замедления темпа хода движущихся часов и ПОГГ автоматически следует другой важный закон: движущиеся тела выглядят сокращёнными в продольном направлении в g раз [7].

рамках сделанного им вывода уравнений преобразований "оптика утрачивает своё особое положение в отношении принципа относительности. При таком подходе сам принцип относительности приобретает бóльшую общность, поскольку он не зависит от частного физического явления, а зависит лишь от универсальной константы" [12].

[5] Заметим, что ПЛ обладают групповыми свойствами только для преобразований с параллельными скоростями.

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

[7] Справедливо и обратное утверждение: из закона сокращения движущихся тел и ПОГГ следует закон замедления темпа хода движущихся часов. В этом случае неподвижный наблюдатель системы K увидит, как сокращённый в g раз масштаб длиною d пройдёт мимо него за время $\Delta t = d/gv = \Delta t'/g$, где $\Delta t' = d/v$ — время по часам движущейся системы координат K', за которое расположенный в этой системе координат масштаб пройдёт мимо наблюдателя системы K.

Между длиной отрезка $x = \mathrm{O}x$ и длиной отрезка $\tilde{x}' = \mathrm{O}'x'$, измеренными в неподвижной системе координат K в момент времени t, существует связь $\tilde{x}' = x - vt$ (см. рисунок). Длина отрезка x', измеренная в собственной системе координат K', в g раз больше, чем его же длина, измеренная в движущейся относительно него системе координат K, т.е. $x' = g\tilde{x}'$. Отсюда следует связь между координатами x', x, t:

$$x' = g(x - vt)\,. \tag{4}$$

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

$$x = g(x' + vt')\,. \tag{5}$$

В уравнении (5) учтено, что скорость системы координат K в системе координат K' имеет ту же величину, но противоположный знак.

Система четырёх уравнений (2), (4), (5) связывает три координаты и время событий, происходящих в неподвижной и движущейся системах координат. Таким образом, проблема нахождения релятивистских преобразований координат и времени из неподвижной системы координат K в движущуюся систему координат K', и наоборот, решена столь простым и коротким путём. В них неизвестная зависимость фактора растяжения времени $g = g(v/\tilde{c})$ находится экспериментально.

В системе уравнений (4), (5) время присутствует неявно. Явную зависимость времени в системе координат K' от продольной координаты и времени в системе координат K можно найти, подставив координату x', определяемую (4), в выражение (5):

$$t' = g\left(t - \frac{xv}{C^2}\right), \tag{6}$$

где $C^2 = v^2g^2/(g^2-1)$. Аналогично, подставив координату x, определяемую выражением (5), в (4), найдём явную зависимость времени в системе координат K от продольной координаты и времени в системе координат K':

$$t = g\left(t' + \frac{x'v}{C^2}\right). \tag{7}$$

Зависимость $C^2 = C^2(v,g)$ можно представить в обращённом виде:

$$g = \frac{1}{\sqrt{1-(v/C)^2}}\,. \tag{8}$$

Система уравнений (2), (4)–(7) является аналогом прямых и обратных ПЛ. С ней можно работать так же, как и с обычными ПЛ. Зависимость в (2), (4)–(7) функции g от скорости может быть найдена из экспериментальных данных, представленных в виде таблиц и графиков. Эту зависимость можно аппроксимировать подходящими аналитическими функциями [8] (например, $g = \gamma(\beta)$, где $\gamma(\beta) = (1-\beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v/c$). Два из четырёх уравнений (4)–(7) являются независимыми. Уравнения для x, t являются прямыми, а для x', t' — обратными аналогами ПЛ.

Далее мы покажем, что величина $C(v,g)$, входящая в (8), постоянна. Используем метод синхронизации часов посредством их переноса вдоль оси координат x' из одной точки координатной системы K' в другую при факторе $g_\delta = g + \delta g = g(v) + \partial g \Delta v/\partial v$, где $\Delta v = v_\delta - v \ll v$, v_δ — скорость разносимых часов в системе координат K (см. [16, с. 24]) [9]. В этом случае темп хода часов, движущихся с фактором g_δ, будет отличаться от темпа хода часов, движущихся с фактором g. Поэтому, согласно (3), у движущихся часов появится сдвиг по времени относительно часов, находящихся в центре системы координат K', на величину $\Delta t' = -\Delta t \Delta g/g^2 = -\Delta t \Delta v(\partial g/\partial v)/g^2 = -(\tilde{x}'/g^2)(\partial g/\partial v)$, где $\tilde{x}' = \Delta t \Delta v = x'/g$. Таким образом, показания часов в движущейся системе координат K' будут определяться показаниями часов (3), расположенных в её центре, и сдвигом $\Delta t'$: $t' = t/g - (\tilde{x}'/g^3)(\partial g/\partial v)$. Отсюда следуют показания часов в системе координат K:

$$t = g\left(t' + \frac{x'}{g^3}\frac{\partial g}{\partial v}\right). \tag{9}$$

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

$$t' = g\left(t - \frac{x}{g^3}\frac{\partial g}{\partial v}\right). \tag{10}$$

Уравнениями (9), (10) 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 (10) следует уравнение $(g^2-1)/(vg^2) = (1/g^3)(\partial g/\partial v)$ (или $\mathrm{d}g/\mathrm{d}v = g(g^2-1)/v$), решение которого имеет вид

$$g(v) = \frac{1}{\sqrt{1-(v/\tilde{C})^2}}\,, \tag{11}$$

где $\tilde{C}$ — постоянная интегрирования. Отсюда следует, что введённая выше (см. (8)) величина $C(v,g)$ не зависит от скорости: $C(v,g) = \tilde{C} = \mathrm{const}$.

Из уравнений (9)–(11) следуют прямое и обратное уравнения для преобразований времени из одной системы координат в другую:

$$t' = g\left(t - \frac{vx}{\tilde{C}^2}\right), \tag{12}$$

$$t = g\left(t' + \frac{vx'}{\tilde{C}^2}\right). \tag{13}$$

Из выражений (5), (7) следует закон преобразования продольной скорости частицы v'_x из движущейся системы координат K' в неподвижную K:

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{v'_x + v}{1 + v'_x v/C^2}\,. \tag{14}$$

[8] Заметим, что, согласно не связанным с электродинамикой экспериментальным данным по времени жизни мюонов (см., например, [15]), фактор $g(v/\tilde{c})$ с большой точностью ($\sim 10^{-3}$) совпадает с релятивистским фактором тела $\gamma(v)$, а величина $C(v,g)$ примерно постоянна и равна скорости света c.

[9] Перенос часов можно произвести и при скорости v_δ, существенно отличной от v, если учесть соответствующее изменение темпа хода этих часов.

Если из системы K' перейти в систему K'', движущуюся относительно K' со скоростью v'', а затем, опираясь на ПОГГ, потребовать, чтобы зависимость v_x от v_x'' сохраняла вид (14), то, как нетрудно убедиться, мы придём к тому же выводу: $C(v) = \tilde{C} = \text{const}$. Существуют и другие пути доказательства постоянства этой величины.

Определившись таким образом с постоянной $\tilde{C}$, мы получили обобщённые ПЛ — преобразования Игнатовского, выведенные без использования электродинамики. Физический смысл постоянной $\tilde{C}$, согласно (14), — предельная скорость распространения сигнала в СТО.

3. Заключение

В данной статье, допустив возможность изменения темпа хода часов с изменением их скорости и обозначив его некоторым неизвестным фактором растяжения времени $g(v)$, мы из ПОГГ вывели закон преобразования координат и 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 определяться из экспериментальных данных, представленных в виде таблиц, или из аппроксимирующих эти данные 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 этих показаний часов и ранее найденных мы нашли явный вид фактора $g(v)$. По виду фактор $g(v)$, как и следовало ожидать, совпал с релятивистским фактором $\gamma(v)$. В этом случае аналог ПЛ переходит в найденные В.С. Игнатовским ПЛ с неизвестной фундаментальной постоянной с размерностью скорости, которую можно определить 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, согласно которым законы электродинамики, гравитации и другие известные и вновь открываемые законы обязаны быть инвариантными относительно обобщённых ПЛ — преобразований Игнатовского.

Такой путь изложения классической физики представляется более общим, естественным и понятным на первом этапе изучения СТО, когда широкому кругу приступающих к изучению СТО аксиоматический вывод ПЛ кажется неестественным, а вывод, основанный на инвариантности уравнений Максвелла относительно ПЛ, — громоздким и уводящим от прояснения природы самих ПЛ. На наш взгляд, именно на этом этапе проще обсуждать существующие вопросы и парадоксы, а некоторые из них отпадут автоматически [10].

Интересно отметить, что конкретные, непростые на вид, аналитические выражения для ПЛ и входящего в него релятивистского фактора следуют из ПОГГ, не несущего конкретной численной информации, добытой в эксперименте (по сути, они следуют из простого наблюдения Галилеем за явлениями природы с Земли и из окон равномерно движущихся кораблей), а некоторые дополнительные экспериментальные данные (для одной точки) нужны только для нахождения входящей в них неопределённой фундаментальной постоянной. Можно только удивляться тому, как много информации содержится в ПОГГ и какую большую роль он играет в природе. Некоторые из затронутых в настоящей статье вопросов в той же или иной интерпретации можно найти в работах [17–19] и цитируемой там литературе.

Список литературы

1. Poincaré H *Bull. Sci. Math.* **28** (2) 302 (1904); Пер. на русск. яз.: Пуанкаре А, в сб. *Принцип относительности* (Сост. А А Тяпкин) (М.: Атомиздат, 1973) с. 30; Пер. на англ. яз.: Poincaré H *Bull. Am. Math. Soc.* **37** 25 (2000)
2. Тяпкин А А (Сост.) *Принцип относительности* (М.: Атомиздат, 1973)
3. Галилей Г *Диалог о двух главнейших системах мира птоломеевой и коперниковой* (М.–Л.: Гостехиздат, 1948) с. 146
4. Michelson A A *Am. J. Sci.* **22** 120 (1881)
5. Michelson A A, Morley E W *Am. J. Sci.* **34** 333 (1887)
6. Voight W *Göttinger Nachrichten* (7) 41 (1887); O'Connor J J, Robertson E F, http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Special_relativity.html
7. Larmor J *Philos. Trans. R. Soc. London A* **190** 205 (1897)
8. Lorentz H A *Proc. R. Netherlands Acad. Arts Sci.* **1** 427 (1899)
9. Lorentz H A *Proc. R. Netherlands Acad. Arts Sci.* **4** 669 (1904)
10. Poincaré H *Comptes Rendus* **140** 1504 (1905)
11. Larmor J *Aether and Matter* (Cambridge: Univ. Press, 1900)
12. Ignatowsky W *Deutsche Phys. Gesellschaft* 788 (1910)
13. Ignatowsky W *Archive Math. Phys.* **17** 1 (1910); Разное о математике, физике и финансах, http://synset.com/
14. Frank P, Rothe H *Ann. Physik* **34** 825 (1911); Релятивистский мир, http://synset.com/ru/Релятивистский_мир
15. Bailey J et al. *Nature* **268** 301 (1977)
16. Pauli W *Relativitätstheorie* (Leipzig: Teubner, 1921); Пер. на англ. яз.: *Theory of Relativity* (New York: Pergamon Press, 1958); Пер. на русск. яз.: Паули В *Теория относительности* 3-е изд., испр. (М.: Наука, 1991)
17. Lee A R, Kalotas T M *Am. J. Phys.* **43** 434 (1975)
18. Sen A *Am. J. Phys.* **62** 157 (1994)
19. Nishikawa S *Nuovo Cimento B* **112** 1175 (1997)

[10] Например, поскольку мы исходили из экспериментально установленного закона о растяжении времени для движущихся объектов, исчезает наиболее трудная проблема с парадоксом близнецов.

Another route to the Lorentz transformations

E.G. Bessonov
Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: *bessonov@x4u.lebedev.ru*

This paper uses the Galilean relativity principle and the dependence of the rate of a clock on its velocity to derive the Lorentz transformations (LTs). Analyzing different ways of deriving the LTs provides different perspectives for them and their implications as well as making them more accessible to a wide range of readers with an interest in relativistic physics.

Keywords: relativity principle, Galilean transformations, Lorentz transformations, special theory of relativity

PACS numbers: **01.40.–d**, **01.65.+g**, **04.20.–q**
Bibliography — 19 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (5) 537–541 (2016)

DOI: 10.3367/UFNr.2015.11.037648
Received 13 May 2014, revised 8 November 2015
Physics–Uspekhi **59** (5) (2016)