

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Паралоренцевские преобразования

Г.Б. Малыкин

В специальной теории относительности события, происходящие одновременно в одной инерциальной системе отсчёта (ИСО) в другой ИСО уже не являются одновременными. 75 лет назад Л.И. Мандельштам показал, что если осуществлять синхронизацию часов не светом, а бесконечно быстрыми сигналами, то одновременность событий в различных ИСО будет абсолютной. Соответствующие преобразования для пространственных координат и времени при переходе из одной ИСО в другую были получены 50 лет назад Ф.Р. Тангерлини. Однако в этом случае различные ИСО уже не являются равноправными, привилегированной является та ИСО, в которой находится наблюдатель. Тем не менее указанные преобразования могут описывать результаты известных экспериментов по проверке СТО.

PACS numbers: 01.65.+g, 03.30.+p

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903e.0285

В 1933–1934 гг. Л.И. Мандельштам прочитал в МГУ курс лекций по физическим основам теории относительности [1]. Эти лекции были настолько важны по существу затронутых вопросов и по глубине и ясности изложения [2], что привлекли весьма обширную аудиторию — не только студентов и аспирантов, но и известных научных работников [3]. Уже после смерти Л.И. Мандельштама эти лекции были восстановлены по записям С.М. Рытова, Г.С. Горелика, М.А. Дивильковского, М.А. Леонтовича, З.Г. Либина и по конспектам и черновикам самого Л.И. Мандельштама, обработаны С.М. Рытовым и изданы в 1950 г. [1]. Второе издание вышло в 1972 г. [4].

Большое внимание в своих лекциях Л.И. Мандельштам уделял принципу причинности и одновременности событий с точки зрения наблюдателей, находящихся в различных инерциальных системах отсчёта (ИСО). Отметим, что, хотя в то время специальная теория относительности (СТО) А. Эйнштейна [5] была принята большинством физиков, находилось еще немало таких исследователей, которые либо высказывали некоторые сомнения в ее справедливости, либо даже выступали с резкой критикой СТО. Это было связано, в основном, с двумя обстоятельствами: 1) отсутствием экспериментального подтверждения замедления времени в движущейся ИСО по отношению к наблюдателю, находящемуся в неподвижной ИСО и 2) недопониманием (или неприятием) относительности одновременности в различных ИСО. Первое обстоятельство было устранено в 1938 г. — эксперименты Г.Е. Айвса и Дж.Р. Стилуэлла [6] подтвердили наличие релятивистского (поперечного) эффекта Доплера¹, после чего число про-

тивников СТО резко уменьшилось. Что же касается второго обстоятельства, то противники СТО практически сразу после ее создания начали попытки замены преобразований Лоренца (ПЛ) другими типами преобразований², связывающих пространственные координаты и время в неподвижной ИСО K , в которой находится наблюдатель, и в движущейся ИСО K' . За прошедшие сто лет было получено несколько десятков некорректных паралоренцевских преобразований, которые в отличие от ПЛ, не могли описать результаты всех известных экспериментов по проверке СТО. Подробный критический анализ большинства некорректных паралоренцевских преобразований представляется нам здесь нецелесообразным. Тем не менее существует исключение — так называемые преобразования Тангерлини (ПТ) [10], которые являются корректными и будут рассмотрены ниже.

Так возможно ли предложить преобразования отличные от ПЛ, но которые в то же время были бы корректными? 10 марта 1934 г. Л.И. Мандельштам, полемизируя с противниками СТО в связи с формулировкой принципа причинности в СТО и проблемой одновременности событий в различных ИСО отметил: "Таким образом, требование, чтобы при определении одновременности не был нарушен принцип причинности, может быть удовлетворено однозначно³ ... если бы существовал сигнал, который движется

работы (Ives) пытается объяснить свои результаты на основе до-эйнштейновских представлений, что является полнейшим анахронизмом" [7].

² В работе [8] такие преобразования было предложено именовать паралоренцевскими. Насколько нам известно, первым в 1908 г. такую попытку предпринял немецкий физик Макс Абрагам [9].

³ Здесь Л.И. Мандельштам, очевидно, рассматривает предложенную Г. Рейхенбахом в [11, 12] (и отличную от эйнштейновской) процедуру синхронизации разнесённых часов. Напомним, что согласно Эйнштейну [5], для синхронизации часов, находящихся в точках A и B , следует запустить из точки A в точку B световой сигнал и отразить его назад в точку A . Время прибытия светового сигнала в точку B в этом случае составляет $t_2 = t_1 + 0,5(t_3 - t_1)$, где t_1 — время выхода сигнала из точки A , t_3 — время возвращения сигнала в точку A . Согласно же Рейхенбаху $t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1)$, где ε ($0 < \varepsilon < 1$) иногда именуется параметром Рейхенбаха. В частности, в рамках СТО $\varepsilon = 0,5$. В рамках же рейхенбаховской процедуры синхронизации

¹ К сожалению, сам Г.Е. Айвс до конца своей жизни так и остался противником СТО. По поводу его работы [6] еще в 1940 г. В.Л. Гинзбург отметил: "... Заметим, кстати, что автор цитируемой

Г.Б. Малыкин. Институт прикладной физики РАН,
ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
Тел. (8312) 16-48-70
E-mail: malykin@ufp.appl.sci-nnov.ru

Статья поступила 18 апреля 2008 г.,
после доработки 16 декабря 2008 г.

с бесконечной скоростью, то требование удовлетворения принципа причинности давало бы однозначное условие и это требование было бы универсальным для всех систем [отсчёта] ... Таким образом, нужно уяснить, что не должен быть быстрее света ни один *такой* сигнал, который может *воздействовать* ... если же я имею процесс, при помощи которого нельзя воздействовать, то это принципа причинности не нарушает ... Многие стремились дать такое понятие одновременности, которое, как они думали, не зависит от определения, а вытекает из того, что есть какая-то априорная одновременность...⁴ [1, с. 196, 197], [4, с. 182, 183]. Далее Л.И. Мандельштам рассмотрел возможность синхронизации разнесённых часов в различных ИСО с помощью фазовой скорости сигнала, которая может быть сколь угодно больше скорости света. Если фазовая скорость стремится к бесконечности, будет иметь место абсолютная одновременность во всех ИСО и при этом принцип причинности не будет нарушен, так как фазовая скорость не переносит ни энергии, ни информации. К сожалению, в [1, 4] был сделан вывод о невозможности практически реализовать этот метод, поскольку в [1, 4] рассматривалась соответствующая скорость для механического устройства (типа движения точки пресечения двух половинок ножниц), которое имеет конечную скорость распространения возмущения (если начать сдвигать ножницы, то возмущение по ним будет распространяться со скоростью звука в металле).

Однако такую синхронизацию всё же можно осуществить, если использовать предложенный в работе В.Л. Гинзбурга [13] и более подробно рассмотренный в работе Б.М. Болотовского и В.Л. Гинзбурга [14] так называемый световой "зайчик", который может иметь сверхсветовую скорость. В [13, 14] рассмотрено движение по экрану луча прожектора, вращающегося с угловой скоростью Ω . Если точки A и B равноудалены от прожектора на достаточно большое расстояние R , то для линейной скорости "зайчика" v будет выполняться условие $v = R\Omega \gg c$, где c — скорость света в вакууме. Разумеется, "зайчик" не может переносить со сверхсветовой скоростью информацию из точки A в точку B : фотоны, пришедшие в точку A , никогда не попадут в точку B и, следовательно, принцип причинности не нарушается. В литературе рассматривались различные способы реализации сверхсветовых скоростей "зайчика" произвольной физической природы [15]. Наибольшую скорость имеют "зайчики", образованные излучением пульсаров [13, 14, 16]. Более подробно вопросы синхронизации разнесённых часов с помощью светового "зайчика" рассмотрены в наших работах [15, 17, 18].

Отметим, что Л.И. Мандельштам рассмотрел ещё второй способ синхронизации разнесённых часов, находящих в различных ИСО, который обеспечивал бы абсолютную одновременность в ИСО K и K' : "... Представьте себе, что у нас есть одна система [отсчёта] и в ней, как-нибудь, например по-эйнштейновски, установлена синхронность ... Пусть далее имеется другая система. Я мог бы произвольно установить синхронность в этой другой системе таким образом, чтобы часы в ней всегда показывали то же самое время, что и в первой системе ... Тогда одновременность представляет собой понятие уже для всех одинаковое, т.е., если в этой системе что-либо одновре-

часов скорость света в прямом (c^+) и обратном (c^-) направлениях может различаться: $c^\pm = c/(1 \mp \Delta)$, где $\Delta = 2\varepsilon - 1$. Поскольку в СТО $\varepsilon = 0,5$, то $\Delta = 0$ и $c^+ = c^- = c$. Л.И. Мандельштам акцентирует внимание слушателей на том, что рейхенбаховская процедура синхронизации часов не нарушает принципа причинности.

⁴ Здесь Л.И. Мандельштам акцентирует внимание слушателей на том, что синхронизация часов бесконечно быстрыми сигналами приводит к одновременности во всех ИСО.

менно, то и в другой оно будет одновременно ... Но тогда нельзя требовать, чтобы был соблюден принцип относительности ... Когда Эйнштейн говорит, что в природе имеет место принцип относительности, то это значит, что если вы все определения дадите для любых систем одинаково, то явления [в любых системах отсчёта] будут протекать одинаково" [1, с. 202, 203], [4, с. 188]. Иными словами, при таком способе синхронизации уже не все ИСО равноправны: та ИСО, в которой была осуществлена первичная синхронизация, становится выделенной (привилегированной).

Однако Л.И. Мандельштам не рассмотрел вопрос о том, каков будет вид преобразований пространственных координат и времени, связывающих ИСО K и K' , в случае, если разнесенные часы в обоих ИСО будут синхронизованы бесконечно быстрыми сигналами и чем эти преобразования будут отличаться от классических ПЛ. Такие преобразования были получены в 1958 г. американским физиком Ф.Р. Тангерлини в его диссертации [10]⁵. Эти преобразования получили впоследствии наименование преобразования Тангерлини (ПТ). Прямые и обратные ПТ имеют вид [10]:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt), & x &= \gamma^{-1}x' + \gamma vt', \\y' &= y, & y &= y', \\z' &= z, & z &= z', \\t' &= \gamma^{-1}t, & t &= \gamma t',\end{aligned}\quad (1)$$

где v — скорость движения ИСО K' относительно привилегированной ИСО K , направленная вдоль осей X и X' , $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ — лоренц-фактор. Сам Тангерлини назвал (1) абсолютными преобразованиями Лоренца. Из (1) можно получить выражение для связи коллинеарных скоростей V и V' в ИСО K и K' или, что то же самое, закон сложения скоростей для ПТ [10]:

$$V' = \frac{v + V}{(1 + v^2/c^2)}.\quad (1^*)$$

Выражение (1*) существенным образом отличается от релятивистского закона сложения скоростей

$$V' = \frac{v + V}{(1 + vV/c^2)}.$$

Для случая $V = c$ [10]:

$$c' = \frac{c}{1 + (v/c) \cos \theta'},\quad (2)$$

где угол θ' отсчитывается от оси X' в K' . Для общего случая, когда свет распространяется в оптической среде с коэффициентом преломления n , покоящейся в ИСО K' , ПТ имеет вид [10]:

$$c' = \frac{c}{n + (v/c) \cos \theta'}.\quad (3)$$

Отметим, что ПТ соответствует параметр Рейхенбаха $\varepsilon = 0,5[1 + v/c]$. Для ПЛ ИСО K и K' являются равноправными, т.е. для наблюдателя, находящегося в K время в K' замедляется в γ раз, и для наблюдателя, находящегося в K'

⁵ Биография Ф.Р. Тангерлини и история написания и защиты его диссертации [10] приведены в работе [19]. Отметим, что в [10] рассматривалась также так называемая экстерналиная (внешняя) процедура синхронизации часов в различных ИСО, которая полностью совпадает со вторым способом синхронизации, предложенным ранее Л.И. Мандельштамом [1, 4].

время в K также замедляется в γ раз. Для ПТ ИСО K и K' же неравноправны: для наблюдателя, находящегося в K , время в K' замедляется в γ раз, но для наблюдателя, находящегося в K' , время в K растягивается в γ раз. Тем не менее ПТ (см. (2)) могут описать результаты экспериментов Майкельсона-Морли [20, 21] и Кеннеди-Торндайка [22], поскольку, как следует из (2), суммарное время распространения света в прямом и обратном направлении не зависит от скорости v движения ИСО K' относительно привилегированной ИСО K . Можно показать, что ПТ могут описать также результаты экспериментов Саньяка [23–25], причём даже при наличии оптической среды в кольцевом интерферометре, а также эксперименты Гека [26] и Рагульского [27]. ПТ могут также описать результаты измерения релятивистского эффекта Доплера [6] (которые многократно повторялись на более высоком уровне точности; см., например, [28]), но, как было отмечено выше, только для наблюдателя, находящегося в ИСО K . Краткое изложение основных результатов [10] и, в частности, ПТ были опубликованы Ф.Р. Тангерлини в 1961 г. в разделе 1.3 работы [29] и в 1994 г. в приложении к его работе [30].

Классические ПЛ с теоретико-групповой точки зрения являются представлением группы вращений (группы Лоренца) в пространстве Минковского в декартовой (прямоугольной) системе координат на угол $\varphi = \operatorname{arsinh}(v/c)$. В случае, если скорость ИСО K' относительно K параллельна оси X , то поворачиваются только оси X' и icT' . ПТ переводят нас из декартовой системы координат, соответствующей ИСО K в косоугольную систему координат, соответствующую ИСО K' . При этом ось X' , так же как и для ПЛ, поворачивается относительно оси X на угол $\varphi = \operatorname{arsinh}(v/c)$, а ось icT' остаётся параллельной оси icT . Такие ИСО иногда именуют обобщёнными ИСО [31]. Как показано в монографии В. Паули [32] (см. также [31]), только в декартовых (прямоугольных) системах координат (иногда именуемых галилеевыми системами координат) скорость света является физической, во всех же других системах координат, в том числе и в косоугольных, скорость света является координатной, т.е. она зависит от выбора системы координат. Все это относится к скорости света, следующей из ПТ (см. (2)). Отметим, что только в декартовой (прямоугольной) системе координат метрический тензор имеет диагональный вид. ПТ не относятся к группе Лоренца, поскольку ПТ можно представить в виде произведения двух последовательных преобразований: преобразования Галилея (ПГ) и локального преобразования для времени, и, следовательно, как показано в [10], их произведение уже не относится к группе Лоренца.

Интересно рассмотреть вопрос о том, как зависит вид преобразований, связывающих ИСО K и K' , от способа синхронизации часов. Как было показано Л.И. Мандельштамом [1, 4] и Г. Рейхенбахом [11, 12], принцип причинности не нарушается, если параметр Рейхенбаха ε лежит в пределах $0 < \varepsilon < 1$. В работе Т. Съёдна [33] рассмотрены более общие, по сравнению с ПЛ и ПТ, преобразования (так называемые преобразования Съёдна (ПС)):

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt), & y' &= y, & z' &= z, \\ t' &= \gamma - \xi \frac{v}{c^2} x + \left[1 - (1 - \xi) \frac{v^2}{c^2} \right] t, \end{aligned} \quad (4)$$

где ξ — некоторый безразмерный параметр, который лежит в пределах $1 - c/v < \xi < 1 + c/v$ и связан с параметром Рейхенбаха ε соотношением

$$\varepsilon = 0,5 \left[1 + \frac{v}{c} (1 - \xi) \right].$$

ПС отличаются от ПЛ только видом преобразования для времени. При $\xi = 1$ ПС переходят в ПЛ, а при $\xi = 0$ — в ПТ. При произвольном значении ξ (лежащем, однако, в указанных выше пределах) ПС может описать результаты экспериментов Майкельсона-Морли [20, 21] и Кеннеди-Торндайка [22]. Однако, как нетрудно показать, из ПС можно получить корректное выражение для коэффициента увлечения Френеля только при $\xi = 0$, т.е. для ПТ (см. (3)) и, разумеется, для $\xi = 1$, т.е. для ПЛ.

Преобразования пространственных координат и времени при переходе из одной ИСО в другую могут описать результаты известных экспериментов по проверке СТО только при условии, что процедура синхронизации разнесённых часов в неподвижной и в движущейся ИСО соответствует преобразованию времени. Но даже и в этом случае полученная с помощью таких преобразований скорость света в движущейся ИСО не обязательно совпадает с реальной физической скоростью света, а может являться координатной скоростью света. Совпадение физической и координатной скоростей света в движущейся ИСО имеет место только для ПЛ.

На протяжении более ста лет после создания СТО [5] большинство исследователей полагали, что ПЛ следуют непосредственно из двух постулатов СТО: равноправия всех ИСО, а также равенства и изотропии скорости света во всех ИСО и ее независимости от скорости источника излучения [5]. Однако еще в 1934 г. в лекциях Л.И. Мандельштама [1, 4] было показано, что этого недостаточно и для получения ПЛ следует использовать еще и эйнштейновскую процедуру синхронизации разнесённых часов, находящихся в различных ИСО. Если же использовать другую процедуру синхронизации разнесённых часов, то мы получим другие преобразования (см. (4)). Возможность синхронизации часов с помощью бесконечно быстрых сигналов рассматривалась еще Г. Рейхенбахом [11, 12], но только Л.И. Мандельштам показал, что такая процедура приводит к абсолютной одновременности во всех ИСО [1, 4], а Ф.Р. Тангерлини получил соответствующие преобразования [10]. Укажем на ещё одно весьма важное отличие ПТ и ПЛ. Для случая ПТ скорость света c' (см. (2)) — это скорость света в ИСО K' , измеренная наблюдателем, находящимся в K при условии синхронизации часов в обеих ИСО бесконечно быстрыми сигналами; в то же время наблюдатель, находящийся в K' , обнаружит, что $c' = c$. Для ПЛ в любой ИСО (K , K' или иной) $c' = c$ и, следовательно, скорость света в K' , измеренная наблюдателем, находящимся как в K' , так и в K , всегда одинакова. Анизотропия координатной скорости света c' в K' для ПТ — это цена за абсолютную одновременность во всех ИСО [34]. ПТ могут, наряду с ПЛ, адекватно описывать процессы в движущейся ИСО, но ПЛ удобнее в подавляющем большинстве случаев, поскольку они оставляют скорость света постоянной и изотропной во всех ИСО.

В первое время ПТ практически не привлекали внимание исследователей. Однако после обнаружения в 1977 г. анизотропии реликтового излучения [35] выяснилось, что наша ИСО движется со скоростью порядка 360 км с^{-1} относительно некоторой привилегированной ИСО (в которой реликтовое излучение "наиболее" изотропно и суммарный импульс всех масс во Вселенной равен нулю), возникли различные предположения об анизотропии скорости света и ПТ оказались востребованными. Впервые на возможность использования ПТ для объяснения результатов экспериментов Майкельсона-Морли при наличии анизотропии скорости света было указано в [36]. В последнее время интерес к ПТ возрос вследствие возможного обнаружения гренобльской группой исследователей весьма незначительной ани-

зотропии скорости света [37–39]. ПТ могут также оказаться удобными при теоретических поисках возможностей "деликатного" нарушения лоренц-инвариантности, иногда привлекаемого для интерпретации некоторых экзотических явлений, например, в попытках объяснения происхождения космических лучей сверхвысокой энергии или частиц тёмной материи (и тёмной энергии), а также в различных космологических моделях и моделях квантовой гравитации (см., например, [34, 40–48]). К настоящему времени известно более ста работ, в которых использовались или обсуждались ПТ. Таким образом, в ряде случаев ПТ могут оказаться весьма удобными. Отметим также, что некоторые задачи электродинамики движущихся сред удобно решать с помощью преобразований Галилея [49].

Автор особо признателен Ф.Р. Тангерлини за предоставление его диссертации [10] и подробное обсуждение её результатов. Автор выражает благодарность В.Л. Гинзбургу и Вл.В. Кочаровскому за полезные обсуждения, Э.Г. Малыкину, В.И. Поздняковой и Н.В. Рудик за помощь в работе. Работа частично поддержана грантом Совета при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-1931.2008.2.

Список литературы

1. Мандельштам Л И "Лекции по физическим основам теории относительности. 1933–1934" *Полное собрание трудов* Т. 5 (Под ред. М А Леонтовича) (М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950) с. 90
2. Мандельштам Л И "Предисловие" *Полное собрание трудов* Т. 5 (Под ред. М А Леонтовича) (М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950) с. 5
3. Мандельштам Л И "Предисловие к книге" *Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике* (Под ред. С М Рытова) (М.: Наука, 1972) с. 5
4. Мандельштам Л И *Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике* (Под ред. С М Рытова) (М.: Наука, 1972) с. 83
5. Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 7 [Einstein A *Ann. Physik* **322** 891 (1905)]
6. Ives H E, Stilwell G R *J. Opt. Soc. Am.* **28** 215 (1938)
7. Гинзбург В Л, в кн. Паули В *Теория относительности* (Пер. с нем. под ред. В Л Гинзбурга) (М.-Л.: ГИТТЛ, 1947) с. 38, Подстрочное примечание
8. Vargas J G *Found. Phys.* **11** 235 (1981)
9. Abraham M *Theorie der Elektrizität* Bd. 2 (Leipzig: B.G. Teubner, 1908) s. 367
10. Tangherlini F R "The velocity of light in uniformly moving frame", PhD Thesis (Stanford: Stanford Univ., 1958)
11. Reichenbach H *Phys. Z.* **22** 683 (1921)
12. Reichenbach H *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* (Berlin: W. de Gruyter & Co., 1928) [*The Philosophy of Space & Time* (New York: Dover Publ., 1958)]; [Рейхенбах Г *Философия пространства и времени* (М.: Прогресс, 1985)]
13. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **62** 173 (1972) [Ginzburg V L *Sov. Phys. JETP* **35** 92 (1972)]
14. Болотовский Б М, Гинзбург В Л *УФН* **106** 577 (1972) [Boltovskii B M, Ginzburg V L *Sov. Phys. Usp.* **15** 184 (1972)]
15. Малыкин Г Б *УФН* **174** 801 (2004) [Malykin G B *Phys. Usp.* **47** 739 (2004)]
16. Гинзбург В Л *УФН* **103** 393 (1971) [Ginzburg V L *Sov. Phys. Usp.* **14** 229 (1971)]
17. Малыкин Г Б *ЖТФ* **75** (10) 135 (2005) [Malykin G B *Tech. Phys.* **50** 1383 (2005)]
18. Малыкин Г Б, Позднякова В И *ЖТФ* **77** (1) 138 (2007) [Malykin G B, Pozdnyakova V I *Tech. Phys.* **52** 133 (2007)]
19. Malykin G B *Prog. Phys.* **1** L9 (2009); **2** L14 (2009)
20. Michelson A A *Am. J. Sci. Ser. III* **22** 120 (1881)
21. Michelson A, Morley E W *Am. J. Sci. Ser. III.* **34** 333 (1887); *Philos. Mag. Ser. 5* **24** 449 (1887)
22. Kennedy R J, Thorndike E M *Phys. Rev.* **42** 400 (1932)
23. Малыкин Г Б *УФН* **167** 337 (1997) [Malykin G B *Phys. Usp.* **40** 317 (1997)]
24. Малыкин Г Б *УФН* **170** 1325 (2000) [Malykin G B *Phys. Usp.* **43** 1229 (2000)]
25. Малыкин Г Б *УФН* **172** 969 (2002) [Malykin G B *Phys. Usp.* **45** 907 (2002)]
26. Hoek M *Arch. Neerland.* **3** 180 (1868); **4** 443 (1869)
27. Рагульский В В *УФН* **167** 1022 (1997) [Ragul'skii V V *Phys. Usp.* **40** 972 (1997)]
28. Vagaev S N et al. *Laser Phys.* **6** 226 (1996)
29. Tangherlini F R *Suppl. Nuovo Cimento* **20** 1 (1961)
30. Tangherlini F R *Nuovo Cimento B* **109** 929 (1994)
31. Логунов А А *Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы* (М.: Наука, 1987) [Logunov A A *Lectures in Relativity and Gravitation: a Modern Look* (Oxford: Pergamon Press, 1990)]
32. Pauli W *Relativitätstheorie* (Leipzig: Teubner, 1921) [*Theory of Relativity* (New York: Pergamon Press, 1958)]; Паули В *Теория относительности* (Пер. с нем. под ред. В Л Гинзбурга) (М.-Л.: ГИТТЛ, 1947)]
33. Sjödin T *Nuovo Cimento B* **51** 229 (1979)
34. Cavalleri G, Bernasconi C *Nuovo Cimento B* **104** 545 (1989)
35. Smoot G F, Gorenstein M V, Muller R A *Phys. Rev. Lett.* **39** 898 (1977)
36. Mansouri R, Sexl R U *Gen. Relativ. Grav.* **8** 497; 515; 809 (1977)
37. Gurzadyan V G et al. *Mod. Phys. Lett. A* **20** 19 (2005)
38. Ерошенко Ю Н *УФН* **177** 230 (2007) [Eroshenko Yu N *Phys. Usp.* **50** 223 (2007)]
39. Gurzadyan V G et al. *Nuovo Cimento B* **122** 515 (2007); astro-ph/070127
40. Glashow S L *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **70** 180 (1999)
41. Bluhm R et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 090801 (2002)
42. Müller H et al. *Phys. Rev. D* **67** 056006 (2003)
43. Kostelecký A *Sci. Am.* **291** (3) 92 (2004)
44. Cho A *Science* **307** 866 (2005)
45. Lämmerzahl C, Macías A, Müller H *Phys. Rev. D* **71** 025007 (2005)
46. Jacobson T, Liberati S, Mattingly D *Ann. Physics* **321** 150 (2006)
47. Vay J-L *Phys. Rev. Lett.* **98** 130405 (2007)
48. Рубаков В А, Тиняков П Г *УФН* **178** 785 (2008) [Rubakov V A, Tinyakov P G *Phys. Usp.* **51** 759 (2008)]
49. Миллер М А, Сорокин Ю М, Степанов Н С *УФН* **121** 525 (1977) [Müller M A, Sorokin Yu M, Stepanov N S *Sov. Phys. Usp.* **20** 264 (1977)]

Paralorentz transformations

G.B. Malykin

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhnii Novgorod, Russian Federation
Tel. (7-8312) 16-48 70. E-mail: malykin@uap.appl.sci-nnov.ru*

In special relativity, events that are simultaneous in one inertial reference frame (IRF) are not so in another. 75 years ago L.I.Mandelstam showed that absolute simultaneity of events in different IRFs is achieved by using infinitely fast signals instead of light to synchronize clocks. 25 years later F.R. Tangherlini showed in an independent study how spatial coordinates and time will in this situation transform on transition from one IRF to another. Although different IRFs are on different footing in this case (the frame with the observer being the privileged one), the Tangherlini transformations are still capable of describing the known experiments testing special relativity.

PACS numbers: **01.65. +g, 03.30. +p**

Bibliography — 49 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (3) 285–288 (2009)

DOI: 10.3367/UFNR.0179.200903e.0285

Received 18 April 2008, revised 16 December 2008

Physics – Uspekhi **52** (3) (2009)