

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОЭКОЛОГИИ РАН
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Б.Г. Сапожников

ГАЛИЛЕЕВА И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

(деп. в ВИНТИ РАН 27. 10. 2008 г. № 821-В2008)

Санкт-Петербург 2008 г.

УДК 530.12

Галилеева и релятивистская системы отсчета / Сапожников Б.Г.;
СПб отд-е Инст-та геоэкологии РАН, СПб, 2008. – 30 с. 1 ил.
Библиогр.: 21 назв. - Рус.
Деп. в ВИНТИ РАН 27. 10. 2008 г. № 821-B2008

Координатное время релятивистской системы представлено в виде линейной неоднородной функции с независимой переменной, отвечающей абсолютному течению времени, и свободным членом, отвечающим фазе времени. В общем случае фаза зависит от пространственных координат. Размеры и масса тел, длительность процессов, электрический заряд и скорость c световой волны рассматриваются как абсолютные величины, не зависящие от движения тел. Однако численные выражения размеров и массы тел, а также длительностей процессов различны в разных системах при сохранении численного постоянства величин заряда и скорости c . В релятивистской системе для выделенной скорости наблюдателя отсутствуют парадокс световой волны галилеевой системы, а также парадоксы времени и длины теории относительности. Рассмотрены соотношения единиц измерений систем отсчета. Показана связь абсолютности интервала псевдоевклидова пространства с абсолютностью течения времени.

UDC 530.12

Galilean and relativistic frames of reference / Sapozhnikov B.G.;
St. Petersburg Division of Institute of Geoecology of RAS, SPb, 2008. – 30 p., 1 ill.
Bibliography: 21 names. – Rus.
Depositing in VINITI RAS 27. 10. 2008 г. № 821-B2008

The coordinate time of the relativistic frame of reference is presented in the form of linear non-uniform function from the independent variable answering to an absolute current of time, and the free term answering to a phase of time. The sizes and mass of bodies, duration of processes, electric charge and velocity c of a light wave are considered as the absolute quantities which are not dependent on movement of bodies. However numerical expressions of the sizes and mass of bodies, and also duration of processes are various in different systems of reference at conservation of a numerical constancy of values of a electric charge and velocity c . In the relativistic system for the allocated velocity of the observer there are no paradox of a light wave of the Galilean system, and also paradoxes of time and length of the theory of a special relativity. Relations of units in different systems of reference are considered. A relationship of absoluteness of an interval S of pseudo-Euclidean space with absoluteness of a current of time is shown.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
1. ГАЛИЛЕЕВА СИСТЕМА ОТСЧЕТА	4
2. НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ФАКТЫ	6
3. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА	8
3.1. Математическая постановка задачи	8
3.2. Вывод преобразований Лоренца	14
3.2.1. Распространение света вдоль осей Z, Z' (Y, Y')	14
3.2.2. Распространение света вдоль осей X, X'	16
3.3. Неподвижная релятивистская система отсчета	18
3.4. Общие свойства релятивистских систем	19
3.4.1. Преобразования координат и скорости	19
3.4.2. Релятивистские единицы измерений	19
3.4.3. Масштабирование и синхронизация	20
3.4.4. Парадоксы и доказательства	21
3.5. Особенности релятивистской и галилеевой систем	25
3.6. Псевдоевклидово пространство	25
ВЫВОДЫ	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	28
Рис. 1.	30

ВВЕДЕНИЕ

Для описания физических тел, их движений и взаимодействий используются различные системы отсчета, представляющие собой некоторые совокупности координат пространства и времени. Описание, полученное в одной системе отсчета, можно записать в координатах другой на основе заданной связи – формул преобразования координат. В общем случае на вид связи не накладывается каких-либо ограничений за исключением требования однозначности. Поэтому преобразование координат можно рассматривать как некоторое кодирование старых координат новыми.

Вполне очевидно, что в соответствии с выбранным преобразованием характер рассматриваемого физического процесса в новой системе отсчета может существенно измениться вплоть до смены качества процесса на противоположное. Так, материальная точка, неподвижная в старой системе отсчета, в новой может перемещаться по весьма сложной траектории, соответствующей выбранной кодировке. Однако вследствие *однозначности* преобразований описание процессов в новой кодировке *не менее строго*, чем в старой [1; 2, с.29].

Естественно, кодирование осуществляется мысленно (субъективно). По этой причине выбор той или иной системы отсчета *не может* “экстрасенсорно” *изменить объективную реальность* – течение времени, электрический заряд, размеры и массу физических тел, их взаимодействие и отношения друг к другу.

Выбор естественных систем отсчета базируется на постулатах пространства и времени, экспериментальных фактах, согласующихся с постулатами, и принципе “бритвы Оккама”, отдающем предпочтение наиболее простому объяснению фактов из ряда альтернативных.

В настоящей работе рассматриваются простые физические процессы в вакууме – равномерное прямолинейное движение (в частном случае – покой) совокупностей материальных тел (точек) и процесс распространения электромагнитного поля – фронта световой волны. Цель работы – показать преимущества выделенной естественной *релятивистской* инерциальной системы отсчета (ИСО), в рамках которой отсутствуют известные парадоксы распространения световой волны галилеевой ИСО, а также парадоксы времени и длины специальной теории относительности.

Для определенности формулировок *инерциальными* будем называть такие системы отсчета, центры пространственных координат которых перемещаются в евклидовом пространстве относительно друг друга *равномерно и прямолинейно*. В работе используется система единиц СИ.

1. ГАЛИЛЕЕВА СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Введем условно неподвижную правую прямоугольную систему координат XYZ с центром O , горизонтальными осями X , Y , вертикальной осью Z и координатами x, y, z . В этой системе описываются две совокупности материальных тел “1” и “2” – неподвижная и равномерно движущаяся вдоль оси X с постоянной скоростью $v > 0$.

Как известно, для описания механики Ньютона (равномерное и ускоренное движение тел и их взаимодействие) используются инерциальные системы отсчета, называемые *галилеевыми* [2].

Постулатами галилеевых ИСО являются:

- однородное трехмерное пространство с евклидовой геометрией (нулевой кривизной);
- однородное и изотропное время (координата момента времени не зависит от пространственных координат).

Экспериментальные факты, положенные в основу рассматриваемых ИСО, отвечают своему обобщению – законам механики Ньютона (в частности, закону инерции).

Таким образом, галилеева система отсчета K соответствует введенной выше прямоугольной системе координат x, y, z с *единой* для всего пространства координатой времени t . В соответствии с законом инерции на тела в системе K не действуют какие-либо силы, если тела покоятся (“1”) или находятся в равномерном и прямолинейном движении (“2”).

Для описания совокупностей тел “1”, “2” можно сформулировать чисто *математическую* задачу кодирования, *не затрагивающую* состояние покоя и движения тел:

- определить формулы преобразования координат x, y, z, t в новые координаты x', y', z', t' для описания рассматриваемых тел в *равномерно движущейся галилеевой* ИСО.

Из множества возможных решений, соответствующих различным переносам и поворотам осей координат, выберем наиболее простое:

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (1)$$

Это решение, известное как *галилеево преобразование* координат, отвечает системе координат $X'Y'Z'$ с новыми одноименными осями, параллельными старым, и центром O' , равномерно скользящим со скоростью V вдоль оси X старой системы. Для некоторого заданного “нулевого” момента времени ($t = 0$) координатные оси XYZ и $X'Y'Z'$ совпадают друг с другом. В выбранной системе отсчета при $V = v$ происходит

обмен состоянием движения совокупностей тел “1”, “2”. Подчеркнем так же, что прямое преобразование (переход в систему x', y', z', t') и обратное (возвращение в систему x, y, z, t по формулам (1), отнесенным к старым переменным) *инвариантны* по отношению к системе отсчета (оба преобразования *сохраняют* систему отсчета *галилеевой*).

Указанный выбор новой системы координат не умаляет общности галилеева преобразования, так как старая система координат XYZ путем стандартных процедур поворота и переноса осей всегда может быть приведена для заданного момента времени к совпадению с новой. Новая система отсчета K' полностью *форминвариантна* относительно уравнений механики Ньютона старой системы K (замена старых координат новыми не изменяет форму записи и решений уравнений) [2].

Подчеркнем, что решение (1) *не следует* непосредственно из принципа относительности Галилея, а является чисто математической конструкцией. Конечно, в связи с рядом “неудобств” (необходимость вычисления слагаемого Vt для определения *изменяющихся во времени* координат x' *покоящихся* тел “1”) введение в обиход новых координат вряд ли будет одобрено наблюдателями “1” и “2”, неподвижными относительно одноименных совокупностей тел. Тем более, что в случае *галилеевых* ИСО (в этом их особенность) наблюдатели могут с одинаковым успехом использовать для подстановок в формулы механики Ньютона как *новые*, так и *старые* координаты.

Далее, дополним математическую постановку задачи вопросом:

- что изменится для наблюдателей “1” и “2” в случае $V = v$, если при *сохранении движущейся* системы координат $X'Y'Z'$ обе совокупности тел будут мысленно или реально вовлечены в *дополнительное* равномерное движение вдоль оси X со скоростью v ?

Из инерциальности систем отсчета K , K' и полученного математического решения (1) непосредственно следует, что новые координаты x', y', z', t' заменят исходные старые координаты x, y, z, t неподвижной системы K . В системе K совокупности тел “1” и “2” приобретают соответственно скорости v и $2v$. При этом относительно *движущейся* системы $X'Y'Z'$ телам “1” и “2” будут возвращены их *прежние* состояния движения. Это означает, что относительно тел “1” и “2” *движущуюся* систему $X'Y'Z'$ вновь можно рассматривать как *условно* неподвижную. Тем не менее, распространение света в этой системе будет отвечать закону распространению световой волны в движущейся системе $X'Y'Z'$. Как показано ниже (раздел 3.1), указанный закон имеет различное выражение в движущейся $X'Y'Z'$ и неподвижной XYZ галилеевых ИСО.

Стандартный наглядный прием рассмотрения совокупности тел “1”, “2” – внутри закрытого объема пространства (обычно в “каюте”, “вагоне” и т.п.), позволил сформулировать для галилеевых ИСО *принцип относительности Галилея*, заключающийся в том, что никакие механические опыты в закрытом объеме не дают возможность установить покоятся или движутся совокупности тел “1”, “2” относительно внешнего пространства.

Особенностью галилеевых ИСО является так же то, что для всего бесконечного пространства при желании может быть введена *мировая неподвижная* галилеева ИСО с *абсолютными* координатами x, y, z и *абсолютным* временем t . Однако вследствие форминвариантности уравнений механики Ньютона для *любых* галилеевых ИСО абсолютные координаты пространства и времени полностью *равноправны* координатам местных неподвижных или движущихся ИСО.

Следует подчеркнуть, что в рамках *механики Ньютона* галилеевы ИСО пригодны для описания *любых видов движения* – как *равномерного* (прямолинейного), так и *ускоренного* (криволинейного).

Подводя итоги рассмотрения галилеевых ИСО, можно заключить, что разумные постулаты и известные в то время экспериментальные факты позволили вплоть до конца XIX века считать галилеевы ИСО *естественными* системами с однородным трехмерным евклидовым пространством и однородным изотропным единым временем, *координата* которого *не зависит* от пространственных координат.

2. НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ФАКТЫ

Изучение в XVIII веке электромагнитных и оптических явлений привело в середине XIX века к их научному обобщению в виде системы уравнений Максвелла (1864).

Опыт показал, что законы распространения электромагнитных волн (в частности, света) во многом аналогичны законам распространения механических колебаний в упругих средах. Можно считать, что в однородных изотропных средах распространение колебаний, как в том, так и в другом случаях, происходит в виде волн со сферическим фронтом. Однако для распространения механических колебаний нужна упругая среда (например, воздух для акустических колебаний). Отсюда был сделан вывод, что и для распространения света необходима некоторая гипотетическая среда – однородный неподвижный “*светоносный эфир*”, заполняющий все мировое пространство неподвижной *абсолютной* галилеевой ИСО. Согласно этому взгляду вектор \mathbf{c} скорости движения фронта световой волны *не зависит* от движения источника света (световая волна каждый раз начинает свое движение в эфире с “чистого листа”). В соответствии с этим

точка вспышки света оказывается в мировом пространстве (эфире) **всегда неподвижной**.

Все это указывало на то, что принцип относительности Галилея для электромагнитных явлений не выполняется. В закрытом объеме (в “вагоне”), **неподвижном** относительно эфира, свет распространяется от точки вспышки в центре “вагона” с одинаковой скоростью $c = |c|$ во всех направлениях. В случае “вагона”, **движущегося** в эфире со скоростью V в положительном направлении мировой оси X , центр “вагона” O' будет удаляться от **неподвижной** точки вспышки света, отвечающей, например, центру O мировой системы координат. По этой причине скорость распространения фронта световой волны относительно центра O' будет равна $(c - V)$ и $(c + V)$ соответственно в положительном и отрицательном направлениях оси X . В направлениях, перпендикулярных движению “вагона”, скорость распространения фронта волны относительно центра O' будет весьма медленно уменьшаться по мере удаления “вагона” от точки вспышки.

На “невыполнение” принципа относительности Галилея указывало также то обстоятельство, что в отличие от уравнений механики Ньютона подстановка галилеева преобразования координат в систему уравнений Максвелла **не приводила** к форминвариантности уравнений в новой ИСО.

Описанный выше условный эксперимент, предсказывающий возможность установления в движущемся “вагоне” (например, Земле, летящей в эфире с орбитальной скоростью 30 км/с) различий в скоростях света в продольном и поперечном направлениях был в реальности осуществлен А. Майкельсоном (1881) [3-6, 10]. Эксперимент Майкельсона, по своим последствиям (изменение представлений о пространстве-времени), пожалуй, **самый драматичный в истории физики**, дал отрицательный результат, подтвердив, тем самым, выполнение “принципа относительности” не только для механических, но и для электромагнитных явлений. Впервые (1899) на возможность такой **строгой** интерпретации результатов эксперимента указал А. Пуанкаре [3, 7, 8].

В результате опыта Майкельсона сложилась парадоксальная ситуация, противоречащая изложенным выше, казалось бы, **естественным** постулатам галилеевых ИСО. **Подчеркнем**, что суть парадокса заключалась именно в **галилеевых** ИСО. Вопрос о существовании или отсутствии эфира **уходил на второй план**, так как отказ или принятие гипотезы эфира никак не могли помочь в устранении возникших противоречий.

Действительно, рассмотрим (**без какого-либо упоминания эфира**) две движущиеся относительно друг друга со скоростью $V = v$ галилеевы ИСО с параллельными одно-

именными осями прямоугольных координат XYZ и $X'Y'Z'$. Как и прежде, одну из них, K (неподвижный центр координат O), будем считать условно покоящейся, другую, K' (центр координат O' скользит вдоль оси X), – движущейся.

В момент времени $t = 0$ (момент совпадения осей) в объединенном центре координат (точке “0”) происходит вспышка света. Наблюдатели “1” и “2” фиксируют в точке “0” начало распространения со скоростью c сферического фронта световой волны. Однако в последующие моменты времени возникает парадокс “*световой волны*” галилеевых ИСО. *Одной и той же* сферической световой волне *одновременно* отвечают две “*неподвижно-движущиеся*” точки вспышки света – центр O (неподвижен для наблюдателя “1”) и центр O' (неподвижен для наблюдателя “2”), *удаляющиеся* друг от друга [6].

С позиций принципа относительности все происходящее в порядке вещей. В объемах, закрытых для внешнего пространства, электромагнитное поле распространяется в виде сферической световой волны относительно центров координат объемов O, O' со скоростью c , одинаковой, как в продольном, так и поперечном направлениях (результат *опыта Майкельсона*).

Рассмотренный электромагнитный эксперимент, также как и любые физические измерения, согласно *принципу относительности Пуанкаре* не позволяет определить движется или покоится закрытый объем в мировом пространстве.

Новый экспериментальный факт, подтвержденный последующими более точными опытами (А. Майкельсон, Э. Морли, 1987), и возникший парадокс галилеевых ИСО *потребовал* пересмотра постулатов принципа относительности Галилея. Парадокс был разрешен путем отказа от второго постулата галилеевых ИСО.

Это означает, что в настоящее время *естественной* должна считаться такая ИСО, в которой *координата* момента времени в общем случае *зависит* от пространственных координат. До сих пор по ряду причин, рассмотренных ниже, такой *естественный взгляд* на координату времени оказывается трудным для освоения.

3. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как и прежде, совокупности тел “1” и “2” будем рассматривать в условно *неподвижной* галилеевой системе отсчета. Сформулируем опять *чисто математическую* задачу кодирования, *не затрагивающую* состояний покоя и движения тел:

- определить формулы преобразования *галилеевых* координат x, y, z, t в новые

релятивистские координаты x', y', z', t' для описания рассматриваемых тел в релятивистской ИСО, **равномерно движущейся** со скоростью V относительно неподвижной галилеевой системы.

При этом должны быть удовлетворены следующие условия

- сохранение **первого постулата** галилеевой ИСО,
- выполнение нового **принципа относительности**,
- выполнение для неподвижного наблюдателя “1” и наблюдателя “2”, движущегося со скоростью $v=V$, **естественного** закона **распространения световой волны** (**сферический фронт**, распространяющийся с **координатной** скоростью, численно равной c , из **одного** центра – точки вспышки “0”).

Вначале подтвердим, что поставленные условия не могут быть выполнены в рамках галилеевых ИСО.

При вспышке света в неподвижной галилеевой ИСО (например, в момент $t=0$) траектория движения S точки фронта световой волны от места вспышки и далее может быть представлена векторным уравнением светового луча $S = ct$. Для световых лучей вдоль положительного (+) или отрицательного (–) направлений оси X имеем

$$S = x_s = x_0 \pm |dx_s / dt| t, \quad |dx_s / dt| = c, \quad (2)$$

где x_0, x_s – координаты точки вспышки и текущего положения конца светового луча, $|dx_s / dt| = c$ – модуль **координатной** скорости световой волны [2].

Траектория S' луча света вдоль оси X' для равномерно движущейся галилеевой ИСО, рассмотренной в разделе 2, с учетом преобразований (1) записывается в виде

$$S' = x'_s = x_s - Vt = x_0 \pm ct - Vt = x_0 + (\pm c - V)t' = x_0 + (dx'_s / dt') t', \quad |dx'_s / dt'| = c \pm V. \quad (3)$$

Отсюда непосредственно следует, что в новой галилеевой ИСО модуль **координатной** скорости световой волны вдоль оси X' оказывается различным в положительном и отрицательном направлениях оси.

Таким образом, в случае движущейся галилеевой ИСО закон (3) распространения света не отвечает условию поставленной задачи. Этот результат **противоречит** также стандартному утверждению [2-6, 9-12] о **неизменности** основных законов физических явлений, записанных в координатах **любых** ИСО.

С другой стороны, закон (3) **не противоречит** принципу относительности – общепринятому постулату о невозможности определения факта движения закрытого объема

относительно внешнего пространства по результатам *любых* физических измерений *внутри* объема.

Действительно, изучение в закрытом объеме скорости распространения световой волны в разных направлениях оси X' позволяет на основании формулы (3) надеяться на возможность положительного решения поставленного вопроса. Однако постановка эксперимента по определению скорости света в каком-либо *одном* заданном направлении *принципиально невыполнима* [8; 13, с.19]. Этот важный принцип теории относительности впервые (1898) сформулирован Пуанкаре. По результатам измерений можно определить лишь *среднюю* скорость света по прямому и обратному пути в выбранном направлении. В соответствии с формулами (2) и (3) среднее значение модуля c скорости света сохраняется всегда *неизменным*, как в рассматриваемом случае, так и в случае условно неподвижной галилеевой ИСО.

Как отмечено выше, вследствие однозначности преобразования (1) движение тел и распространение электромагнитных волн описываются в обеих кодировках (2) и (3) одинаково строго. Тем не менее, с позиций физики явлений галилееву систему отсчета, допускающую неоднозначность формулировки физического закона распространения световой волны, *нельзя считать естественной*.

Опять же из множества возможных решений поставленной задачи кодирования выберем наиболее простое, известное как преобразования Лоренца:

$$x' = \gamma(x - Vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma(t - \beta x/c), \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}, \quad \beta = V/c. \quad (4)$$

Формулы преобразований (4) впервые (1897) были введены Дж. Лармором и, по видимому, независимо Х. Лоренцем (1899). Преобразования (4) найдены Лоренцем методом *подбора* с целью обеспечения форминвариантности уравнений Максвелла для вакуума в движущейся и неподвижной ИСО [8, с.7]. Способ *вывода* преобразований (4) впервые (1905) указан Пуанкаре, который нашел, что преобразования Лоренца можно описать как алгебраическую систему теории групп [14]. Этот способ реализован, например, в работе [9]. Различные варианты вывода формул (4) предложены А. Эйнштейном (1905, 1922) и впоследствии другими авторами [4-6, 10-12, 15-17]. Эйнштейн первый (1905) отказался от представлений о “светоносном эфире” как среде, необходимой для объяснения процесса распространения электромагнитных волн [1, 15].

На основе преобразований (4) А. Пуанкаре, А. Эйнштейном и Г. Минковским создана *теория относительности движения*, по предложению Эйнштейна получившая

название “специальной теории относительности” (СТО).

Общим в выводах преобразований (4) является представление новых координат x', t' как **неоднородных** линейных функций старых (по аналогии с представлением координаты x' галилеевой ИСО). Определению (на основе равенств, вытекающих из принципа относительности) подлежат коэффициенты при старых переменных и свободные (постоянные) члены функций. Поиск неизвестных ведется с помощью формальных математических операций, смысл каждого шага которых не иллюстрируется и часто остается непонятным с физической точки зрения.

В старой, галилеевой системе для всего пространства используется **единое** время, которое согласно И. Ньютону (1687) “... в силу своей природы протекает равномерно и безотносительно к какому-либо объекту” [17]. **Можно считать**, что время t здесь одновременно – **координатное** время t пространства-времени и **абсолютное** время τ длительности (продолжительности) физических процессов, всюду **одинаково текущее** в пространстве. **Абсолютное** время τ , отвечающее, по мнению автора, представлениям И. Ньютона, количественно характеризует независимое от нашего сознания **естественное физическое течение** (ход, темп) времени, определяющее длительность всех процессов (в частности, длительность процесса распространения световой волны).

Пространство и время как **формы** существования материи не имеют каких-либо **собственных** материальных меток, пригодных для использования в качестве центров координат систем отсчета. Постулируемые свойства пространства и времени:

- **общие** – взаимно обусловленная **однородность** во времени и пространстве;
- **специальные** – **отсутствие** какого-либо состояния движения **пространства** (в том числе состояния покоя) и **неизменность** течения **времени**.

В соответствии с этими постулатами **абсолютного** движения материи (движения относительно “неподвижного” или “движущегося” пространства) **не существует**. Согласно Пуанкаре (1885) возможно лишь **относительное** движение – движение разных видов материи и материальных тел относительно друг друга [18].

С этих позиций время t **галилеевой** ИСО можно одновременно рассматривать как **абсолютное** течение времени τ и как **координатное** время t , определяемое линейной однородной функцией $t = \gamma\tau$ переменной τ при безразмерном масштабном коэффициенте $\gamma = 1$.

Как указано выше, при решении задачи релятивистской кодировки ожидаемое функциональное представление **координатного** времени t' расширяется до неоднородной линейной функции:

$$t' = \tau' + \varphi = \gamma \tau + \varphi = \gamma t + \varphi \quad (5)$$

с *независимыми* от τ безразмерным масштабным коэффициентом $\gamma \neq 1$ и свободным членом φ , играющим роль условной начальной “*фазы*” *координатного* времени (начальная, нулевая установка значения координаты t' при $\tau = 0$). В общем случае фаза φ , а следовательно и координатное время t' , *зависят* от пространственных координат.

В отличие от галилеевой в релятивистской системе *координатные* промежутки времени $\Delta t'$ зависят от координат пространства и *не совпадают* с промежутками времени $\Delta \tau'$ (или $\Delta \tau$) по длительности *абсолютного* времени. Последние в обеих ИСО являются физическими величинами с *одинаковым размером* [19, с.10]. Для релятивистской системы Эйнштейном впервые (1905) отмечен эффект “*замедления времени*” [2, 15], в соответствии с которым численное значение *координатного* промежутка времени $\Delta t'$ (при фиксированном значении координаты x') уменьшается в сравнении с промежутком времени Δt (или $\Delta \tau$) галилеевой ИСО:

$$\Delta t' = \Delta t / \gamma, \quad \gamma > 0. \quad (6)$$

По аналогии с галилеевой системой в научной литературе, посвященной СТО, *не различают* абсолютное и координатное времена релятивистской ИСО. По-видимому, именно этим обстоятельством можно объяснить происхождение известного тезиса о *различном течении времени* в разных ИСО [9, с.13; 12, с.50], а также утверждения [2-6, 10] о реальном *физическом замедлении всех* процессов в движущихся телах (тем не менее, *исключая* процесс распространения световой волны!). Наибольшую остроту этот тезис приобрел при обсуждении, так называемого, “парадокса близнецов” [2], рассмотренного в разделе 3.4.4.

Абсолютную длину l какого-либо отрезка протяженности физического тела в рассматриваемых системах отсчета определим как расстояние между концами отрезка *в один и тот же* момент *абсолютного* времени τ (или τ'). *Абсолютная* длина (какой-либо размер тела) сохраняется *неизменной* в процессе *перемещения* физического тела в пространстве-времени. Если длительности τ , τ' распространения световой волны вдоль длин l , l' известны, значения l , l' могут быть определены по формулам $l = c \tau$, $l' = c \tau'$. В этих выражениях *все* размеры физических величин c , l , l' , τ , τ' имеют *абсолютный* смысл – они *неизменны* в пространстве-времени. Отличие величин состоит лишь в том, что скорость c является не только физической величиной с *неиз-*

менным размером, но и **численной постоянной**, а физические величины l, l', τ, τ' , также **неизменного** размера, имеют в различных ИСО **разное численное** выражение l, τ и $l' = \gamma l, \tau' = \gamma \tau$ – соответственно в **галилеевой** (неподвижной и движущейся) и **релятивистской** системах.

Координатная длина L' (или L) протяженности пространственного отрезка определяется в ИСО как расстояние между концами отрезка, каждый из которых характеризуется своим набором пространственных координат при **одном и том же** значении **координатного** времени t' (или t). В галилеевой ИСО вследствие единства абсолютно-го и координатного времени $L = l$.

Для релятивистской системы известен эффект Фицджеральда-Лоренца – “**сокращение длины**” L' отрезка, параллельного осям X, X' , согласно которому численное значение L' (при одном и том же значении координаты времени t' обоих концов отрезка) уменьшается в сравнении с координатной (абсолютной) длиной L (l) того же отрезка в галилеевой системе [2-6, 9-12]:

$$L' = L / \gamma = l / \gamma, \quad \gamma > 0 . \quad (7)$$

Подводя итоги анализа координат пространства-времени, можно предложить следующие постулаты **естественной** релятивистской ИСО:

- однородное трехмерное пространство с евклидовой геометрией (нулевой кривизной);
- однородное и изотропное **течение времени**, не зависящее от пространственных координат.

Как видно из определений, постулаты **релятивистской** ИСО отличаются от постулатов **галилеевой** формулировкой свойств **течения времени** – ранее не выделявшейся в СТО **абсолютной независимой** скалярной переменной, являющейся **составной частью** координатного времени релятивистской системы.

К перечисленным постулатам необходимо добавить новые экспериментальные данные:

- физическое и численное **постоянство** скорости c распространения электромагнитного поля (фронта световой волны) как для неподвижного, так и для движущегося источников (возможное следствие нулевой массы покоя фотонов);
- физическое и численное **постоянство** величин электрических зарядов [20, с.162] (считается, что электрические заряды материальных тел не имеет функциональной связи с массой тел).

3.2. ВЫВОД ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЛОРЕНЦА

Ниже рассматривается вывод преобразований (4) как результат чисто *математической* операции *кодирования* старых координат x, y, z, t *неподвижной галилеевой* ИСО (система отсчета K) новыми значениями координат x', y', z', t' *движущейся релятивистской* ИСО (система отсчета K'). Скорость перемещения центра координат O' системы K' вдоль осей X, X' равна V . При этом состояние движения совокупностей тел “1” (покой) и “2” (равномерное движение со скоростью v) остаются *неизменными*. Этот прием позволяет контролировать физический смысл каждого шага вывода преобразований.

3.2.1. Распространение света вдоль осей Z, Z' (Y, Y')

На рис.1а в плоскости XOZ неподвижной галилеевой системы XYZ показано два положения оси Z' (с отрезком $O'B'$) движущейся релятивистской системы $X'Y'Z'$ (положения осей Z', Z'_1 и отрезков $O'B', O'_1B'_1$).

Каждое положение оси Z' отвечает определенному физическому моменту *абсолютного* времени, выражаемому в системах K и K' соответственно разными числовыми значениями величин τ и τ' . Начальный момент времени $\tau = \tau' = 0$ отвечает совпадению центров координат O, O' (*нулевая* точка “0”) и координатных осей систем $XYZ, X'Y'Z'$.

Цель и условия кодирования галилеевых координат сформулированы в математической постановке задачи (раздел 3.1).

Согласно *первому* ($z \rightarrow z'$) и *второму* ($y \rightarrow y'$) условиям кодирования *координаты* концов отрезков $OB, O'B', O'_1B'_1$ в нулевой и последующие моменты времени τ, τ' *приняты* в системах K и K' *численно* равными друг другу. Отсюда вытекает равенство значений координат $z' = z$ (и по аналогии координат $y' = y$), удовлетворяющее преобразованиям Лоренца (4), и равенство координатных длин отрезков $OB, O'B', O'_1B'_1$. Абсолютные длины l, l' указанных отрезков также сохраняются неизменными и *физически* равными друг другу, хотя их численные выражения *различны* в разных системах.

В начальный момент времени “0” в точке “0” происходит мгновенная вспышка света, в результате которой начинается процесс распространения световой волны.

Согласно *принципу относительности* распространение света в *обеих системах* происходит *с одной и той же* абсолютной скоростью c в виде сферической волны с центром в начале координат. *Абсолютная длина* радиуса фронта волны выражается в

системах K и K' соответственно, как $r = ct$ (центр сферы O) и $r' = ct'$ (центр сферы O'). В процессе распространения света отрезок $O'B'$ перемещается относительно отрезка OB (рис.1а).

Неизменность в разных системах координат скорости c и длин отрезков OB , $O'B'$ означает для неподвижного (в точке O) и движущегося (в точке O') наблюдателей **одновременность** прихода световой волны в точки B и B' . В рамках галилеевой системы ($\tau = \tau'$) вследствие удаления друг от друга центров координат O, O' нельзя преодолеть парадокс “световой волны”, рассмотренный в разделе 2.

Однако, остается возможность при помощи **третьего** ($\tau \rightarrow \tau'$) и **четвертого** ($x \rightarrow x'$) условий кодирования **подобрать** более естественную систему отсчета.

Так как световая волна **одновременно** приходит в точки B и B' , то в новой системе отрезок OB' так же, как и отрезок OB , должен быть радиусом $r = ct$ сферической волны с центром в точке O . Однако, как видно из рис.1а, в рамках **галилеевой** ИСО геометрическая длина отрезка OB'_1 больше длин равных отрезков $O'_1B'_1$ и OB . Это означает, что в системе K световая волна должна распространяться вдоль отрезка OB'_1 со **сверхсветовой** скоростью, чтобы в один и тот же момент абсолютного времени τ , τ' достичь точек B и B'_1 . Указанное нарушение закона распространения световой волны в системе K , подчеркивает **неестественный** характер не только **движущейся**, но и рассматриваемой **неподвижной** галилеевой ИСО.

Для **устранения** в релятивистской ИСО отмеченной “неправильности” галилеевой системы воспользуемся кодированием координат времени ($\tau \rightarrow \tau'$), основанным на решении треугольника $OO'_1B'_1$ [5, с.125]. С этой целью абсолютные длины сторон треугольника OO'_1 и OB'_1 оставим выраженными через **старую** независимую переменную τ , а длину стороны $O'_1B'_1$ (радиус фронта световой волны согласно принципу относительности) выразим через **новую** независимую переменную τ' (рис.1а). Решение треугольника $OO'_1B'_1$ в галилеевой системе позволяет определить масштабный коэффициент γ , связывающий **старую** и **новую** независимые переменные:

$$\begin{aligned} OO'_1 = V\tau, \quad OB'_1 = r = ct, \quad O'_1B'_1 = r' = ct', \quad (O'_1B'_1)^2 &= (OB'_1)^2 - (OO'_1)^2, \\ \tau' &= \frac{\tau}{(1 - V^2/c^2)^{1/2}} = \gamma\tau. \end{aligned} \quad (8)$$

Изменение в системе K' масштаба абсолютного течения времени приводит к необходимости соответствующего изменения масштаба абсолютных длин. Вполне очевидно, что для сохранения в системе K' **численного** постоянства **физически неизменной**

величины **абсолютной** скорости света c , значения **абсолютных длин** отрезков и размеров тел **l' любых направлений** должны вычисляться в системе K' по приведенной в разделе 3.1 формуле преобразований **абсолютных** длин $l' = \gamma l$.

Определим для рассматриваемого случая (распространение световой волны вдоль оси Z' и по аналогии вдоль оси Y') введенную выше (раздел 3.1) новую физическую величину – условную начальную фазу φ **координатного** времени. С этой целью вычислим **координатное** время t' прихода световой волны в точку B'_1 (рис.1а).

В соответствии с **первым** условием кодирования $z' = z$ перемещение системы координат $X'Y'Z'$ не изменяет во времени координат z' точек B', B'_1 . Поэтому приращение $\Delta z'$ значений координат z' фронта световой волны по отношению к исходной для волны точке O' ($z' = x' = 0$) за абсолютное время τ' движения фронта волны в точку B'_1 составит $\Delta z' = z'$.

По условиям кодирования (раздел 3.1) **координатные** скорости световой волны c в системах K, K' полагаются неизменными и **численно** равными друг другу. Это условие и результат (8) позволяют определить искомое координатное время t' : $t' = \Delta z' / c = z' / c = \tau' = \gamma \tau$. Сопоставляя полученный результат с общим выражением координатного времени (5), можно заключить о **неизменности** фазы φ для **координатных** времен t' при фиксированной координате x' . В рассматриваемом случае распространения световых волн из **нулевой** точки “0” ($\tau' = x' = 0$) фаза φ остается равной нулю на всем протяжении осей Z', Y' .

3.2.2. Распространение света вдоль осей X, X'

Рассмотрим распространение световой волны вдоль осей X, X' из **нулевой** точки “0” в точку A , неподвижную в системе K (рис.1б).

В рассматриваемом случае **абсолютная** длина пути луча света в обеих системах K, K' отвечает абсолютной длине отрезка OA (рис 1б). Поэтому луч света достигает точки A в **один и тот же** момент **абсолютного** времени τ, τ' .

В **неподвижной галилеевой** системе K координата x точки A и абсолютная длина $l = |x|$ отрезка OA и не изменяются во времени. В **движущейся галилеевой** системе координата $x' = x - Vt$ точки A и абсолютная длина $l = |x'|$ отрезка $O'A$ изменяются с течением времени вследствие перемещения центра координат O' (1).

Как отмечено выше (раздел 3.1), **абсолютные** длины l, l' галилеевой (**неподвижной** и **движущейся**) и релятивистской систем связаны друг с другом соотношением

$l' = \gamma l$. Поэтому в *релятивистской* системе K' *абсолютная* длина отрезка $O'A$ должна быть представлена в виде $l' = |\gamma(x - Vt)|$.

Учитывая это соотношение, *выберем* для релятивистской системы K' в качестве *четвертого* условия кодирования ($x \rightarrow x'$) новое выражение для координат x' : $x' = \gamma(x - V\tau) = \gamma(x - Vt)$.

В отличие от координат z', y' абсолютные значения координаты x' *релятивистской* системы так же, как координаты x, x' *галилеевой* системы, выражают собой *абсолютные* расстояния между центрами координат O, O' и точками на оси X' .

Фазу φ для рассматриваемого случая, как и ранее, определим, вычислив *координатное* время t' прихода световой волны в точку A . Перемещение системы координат $X'Y'Z'$ приводит здесь к изменению во времени координат x' точек, неподвижных в *галилеевой* системе K . Поэтому за абсолютное время τ' движения фронта световой волны в точку A приращение $\Delta x'$ координаты x' фронта волны по отношению к исходной для волны точке O' ($x' = 0$) составит $\Delta x' = c\tau' - V\tau'$ (рис.1б). Отсюда координатное время t' с учетом равенства $t = x/c$ и результата (8) определяется формулой: $t' = \Delta x'/c = \tau' - V\tau'/c = \gamma\tau - V\gamma\tau/c = \gamma\tau - V\gamma t/c = \gamma\tau - \gamma Vx/c^2$. Из сопоставления полученного результата с общим выражением для *координатного* времени (5) имеем: $\varphi = -(V/c)\tau' = -\beta\tau' = -\gamma Vx/c^2 = -\gamma\beta x/c$.

Общее выражение для *фазы* φ завершает вывод преобразований (4), основанный на новом представлении координатного времени t' в виде функции $t' = \tau' + \varphi$.

Заметим, что условная начальная фаза φ , помимо единиц времени, может быть выражена в единицах измерений, обычных для физических величин с этим названием, – в *радианах* или *градусах*. Действительно, *абсолютное* время τ' прихода световой волны из “нулевой” точки в заданную можно рассматривать как половину *периода* распространения световой волны из центра координат O' в точку A и обратно (после отражения в точке A). Отсюда фаза φ может быть представлена в виде: $\varphi = -\beta\tau' = -\beta\tau' = -\pi\beta$ [рад] = $-180^\circ\beta$.

Как и в случае галилеевой ИСО, *мысленная* перекодировка галилеевых координат тел “1” и “2” в координаты движущейся релятивистской ИСО *не изменяет* состояния движения тел и их физические свойства. Переход к координатам новой ИСО также как и в случае галилеевой системы сопровождается для наблюдателей “1” и “2” рядом “неудобств”, связанных с необходимостью:

- вычисления *изменяющихся во времени* координат x' *покоящихся* тел “1”;

- вычисления *координатного времени*, учитывающего новый масштаб времени и его фазу (из-за *мысленного* введения новой системы “часы” сами по себе, конечно, *не изменяют* прежние, галилеевы показания).

Однако в отличие от движущейся галилеевой ИСО новая система *согласована* с принципом относительности и при условии $v = V$ *обеспечивает* для неподвижного “1” и движущегося “2” наблюдателей заданное “*правильное*” описание процесса распространения световой волны – как перемещение сферического фронта с *одним* неподвижным центром, совпадающим с точкой “0” вспышки света.

3.3. НЕПОДВИЖНАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Далее, также как и в случае движущейся галилеевой ИСО, дополним математическую постановку задачи вопросом:

- что изменится для наблюдателей “1” и “2” в случае $V = v$, если при сохранении *движущейся релятивистской* системы $X'Y'Z'$ обе совокупности тел “1” и “2” будут мысленно или реально вовлечены в *дополнительное* равномерное движение вдоль оси X' со скоростью v ?

Из инерциальности систем отсчета K , K' и полученного математического решения (4) непосредственно следует, что новые координаты x', y', z', t' заменят исходные, старые галилеевы координаты x, y, z, t неподвижной системы K . В системе K согласно формуле (9), приведенной ниже, совокупности тел “1” и “2” приобретают соответственно скорости v и $2\gamma v$. При этом относительно *движущейся* релятивистской системы $X'Y'Z'$ телам “1” и “2” будет возвращены их *прежние* состояния движения в системе K . Это означает, что относительно тел “1” и “2” движущуюся систему $X'Y'Z'$ вновь можно рассматривать как *условно* неподвижную.

Выполненная операция по возвращению в новой системе совокупностям тел “1” и “2” их прежних состояний движения показывает, что движущуюся релятивистскую систему $X'Y'Z'$ вполне можно рассматривать как *условно неподвижную* относительно *исходных* состояний движения совокупностей тел “1” и “2” в неподвижной галилеевой системе XYZ . Тем не менее, для наблюдателей “1” и “2” распространение света в неподвижной системе $X'Y'Z'$ будет отвечать “*правильному*” закону распространению световой волны в движущейся релятивистской системе.

Таким образом, для *совокупностей тел* “1”, “2” показана возможность преобразования *неподвижной* галилеевой системы K в *неподвижную* релятивистскую систему K' . Эта возможность обусловлена частным случаем преобразований (4), когда ско-

рость V перемещения центра координат O' вдоль осей X, X' принята равной скорости v движения тел “2” относительно тел “1” в *релятивистской* системе K' . В общем случае скорость V преобразований (4) не зависит от скоростей движущихся тел и удовлетворяет лишь условию $|V| < c$.

3.4. ОБЩИЕ СВОЙСТВА РЕЛЯТИВИСТСКИХ СИСТЕМ

3.4.1. Преобразования координат и скорости

В отличие от галилеевых прямое и обратное преобразования Лоренца *не являются инвариантными* по отношению к системам отсчета. Прямое преобразование (4) отвечает переходу из неподвижной *галилеевой* системы координат x, y, z, t в координаты x', y', z', t' *релятивистской* системы, движущейся со скоростью V (или условно неподвижной для частного случая $V = v$). Соответствующее обратное преобразование, следующее из (4), возвращает релятивистские координаты x', y', z', t' в координаты x, y, z, t неподвижной галилеевой системы:

$$x = \gamma(x' + Vt'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \gamma(t' + \beta x'/c).$$

Преобразование *скоростей* тел при переходах в релятивистскую ИСО из галилеевой и обратно осуществляется с помощью формул, впервые (1900) полученных Лармором, и, по-видимому, независимо предложенных (1905) Пуанкаре [2, с.33; 14] и Эйнштейном [15]. В частном случае $V = v$ формулы прямого и обратного преобразований скоростей тел, движущихся параллельно осям X, X' со скоростями w и w' соответственно в галилеевой и релятивистской системах, записываются в виде

$$w' = (w - v)/(1 - wv/c^2), \quad w = (w' + v)/(1 + w'v/c^2). \quad (9)$$

Как показано выше, переход (9) из неподвижной галилеевой ИСО в движущуюся релятивистскую систему означает для рассматриваемых тел “1” и “2” простой обмен состояниями движения: $w_1 = 0 \rightarrow w'_1 = v$, $w_2 = v \rightarrow w'_2 = 0$.

Отметим, что использование *мгновенных сопутствующих* релятивистских ИСО позволяет в рамках СТО описывать, как *равномерные* (прямолинейные), так и *ускоренные* (криволинейные) перемещения тел [2, 9, 10, 21, с.126].

3.4.2. Релятивистские единицы измерений

Преобразования (4) устанавливают связь единиц измерений координатных длин и координатного времени в релятивистской (*итрихованные* единицы) и галилеевой сис-

темах.

Соотношение единиц *релятивистского* (координатного) и *галилеева времени* не зависит от направлений в пространстве и определяется выражением $1 [c'] = \gamma \cdot 1 [c]$, что соответствует упомянутому выше разному численному выражению *абсолютного* времени (τ', τ) в релятивистской и галилеевой системах $\tau' = \gamma \tau$.

Необычность *штрихованных* единиц длины в релятивистской системе $X'Y'Z'$ заключается в их “*анизотропности*”. По каждому радиальному направлению, например, в пределах квадранта $Z'O'X'$, штрихованные единицы длины $[m']$, имеют разное соотношение с галилеевой единицей – метром $[m]$. На осях Z' и X' (границы квадранта) это различие наибольшее – соответственно $1 [m'_z] = 1 [m]$ и $1 [m'_x] = \gamma \cdot 1 [m]$.

Необходимость определения *координатных* длин в однородном изотропном пространстве с помощью “*анизотропных*” единиц измерений представляет собой дополнительное “неудобство” релятивистской ИСО, весьма неожиданное для наблюдателей “1” и “2”. Для сравнения заметим, что численное соотношение единиц *абсолютных* длин l, l' в релятивистской и галилеевой системах в соответствии с зависимостью $l' = \gamma l$ не зависит от направлений в пространстве $1 [m'] = \gamma \cdot 1 [m]$.

Наименование единиц скоростей в релятивистской системе также зависит от направлений. Например, $v_x [m'_x/c']$, $c_x [m'_x/c']$ и $c_z [m'_z/c']$, что, однако, не изменяет *физических* размеров и численных значений скоростей по отношению к неподвижной галилеевой системе.

3.4.3. Масштабирование и синхронизация

Масштаб релятивистской *штрихованной* единицы длины $[m'_x]$ по оси X' для движущейся (или неподвижной) релятивистской ИСО должен быть более крупным в сравнении с масштабом галилеевой единицы СИ.

В релятивистской системе, так же как и в галилеевой, в качестве средства измерения длин по оси X' может быть использована обычная рулетка с *основными* штрихами, нанесенными через $1 [m'_x]$ ($1 \gamma [m]$ в единицах СИ). Например, при скорости $v = 0.866 c$ ($\gamma = 2$) интервал между основными релятивистскими штрихами должен быть равен $2 [m]$. Для других направлений интервал между основными штрихами уменьшается так, что для оси Z' уже возможно использование рулетки с обычной разметкой основных штрихов.

Формула (7) сокращения координатных длин отрезков, параллельных осям X, X' , становится тривиальной при указании единиц измерений: $L' [m'_x] = L [m] / \gamma = l [m] / \gamma$.

Это означает, что сокращение абсолютных длин движущихся тел в действительности *не происходит*. В различных ИСО количественный размер одной и той же величины (*абсолютной длины*) выражается в разных единицах измерений, причем в релятивистской системе *численные* значения длин записываются *меньшими* числами.

С рассматриваемых позиций физический размер величин абсолютных длин *не зависит* от состояния движения тел и выбранной системы отсчета. Поэтому в релятивистской системе, так же как и в галилеевой, физические размеры одних и тех же *неподвижных* или *движущихся* тел одинаковы.

Совершенно аналогично измерению длин по осям X, X' в движущейся (или неподвижной) релятивистской ИСО используется более крупный масштаб релятивистской *итрихованной* единицы времени $1 [c'] = \gamma \cdot 1 [c]$.

В релятивистской системе в качестве средств измерений могут быть использованы часы любых видов. Однако для приведения часов в рабочее состояние, согласованное с неподвижной галилеевой ИСО, необходим ряд операций, затрагивающих регулировку *хода* τ часов и корректировку их *показаний* (учет фазы времени φ). Указанные операции могут быть выполнены на основе *вычислений* по формулам (4).

Для примера, приведенного выше (скорость $v = 0.866 c$, $\gamma = 2$), часы в новой, релятивистской системе должны “тикать” в 2 раза медленнее, чем в исходной, галилеевой. При изменении координаты x' (а следовательно и фазы φ) показания часов должны каждый раз корректироваться, либо “вручную” – согласно вычислениям по формулам (4), либо с помощью автоматического устройства, в состав которого входит модуль, определяющий пространственные координаты.

Синхронизации хода часов, удаленных друг от друга, может быть выполнена способом обмена световыми сигналами, впервые (1900) предложенным А. Пуанкаре [8, с.6].

В релятивистской системе формула (6) сокращения координатных промежутков времени при указании единиц измерений также становится тривиальной $\Delta t' [c'] = \Delta t [c] / \gamma$. Это также означает, что в реальности замедления времени в движущейся релятивистской системе *не происходит*. В различных ИСО количественный размер одной и той же величины (абсолютного течения времени) выражается в разных единицах измерений. В релятивистской ИСО *численные* значения этих промежутков *меньше* таковых в галилеевой системе.

3.4.4. Парадоксы и доказательства

Парадоксы длины

Парадокс “контактного реле” – один из известных, связанных с сокращением коор-

динатных длин в релятивистской ИСО.

Исходные данные. Реле с двумя элементами (контактной парой с широкими пластинами и замыкающим стержнем с точечными контактами) ориентировано вдоль осей X, X' . Расстояния между внутренними краями пластин контактной пары и контактными точками стержня равны соответственно L_p и L_s . Два элемента, неподвижные в галилеевой системе K , замыкают электрическую цепь, так как $L_p = L_s$.

В первом случае стержень скользит вдоль неподвижной контактной пары. В релятивистской системе координатная длина L'_s , движущегося стержня сокращается. В связи с этим стержень при любой скорости скольжения **не может замкнуть** контактную пару, неподвижную в галилеевой системе.

Во втором случае в релятивистской системе сокращается координатная длина L'_p контактной пары, скользящей вдоль стержня, неподвижного в галилеевой системе. В этом случае **замыкание** электрической цепи **неизбежно** при любой скорости скольжения и достаточной ширине контактных пластин.

С позиции **относительности движения** первый и второй случаи эквивалентны друг другу. Однако выводы о работоспособности реле противоположны. Ошибка в рассуждениях состоит в том, что анализ работы элементов реле выполняется с использованием разных единиц длины ($[m]$ и $[m'_x]$). После “переноса” обоих элементов в релятивистскую систему их координатные длины выражаются в одних и тех же единицах $[m'_x]$. Численные значения длин L_p, L_s сокращаются в **одинаковой** степени и реле срабатывает при **любой** взаимной скорости элементов.

В настоящее время согласно принципу относительности **реальность** сокращения движущихся тел по Фитцджеральду-Лоренцу **не поддерживается** научной литературой. Действительно, до момента субъективного выбора состояний движения тел, последние просто “**не знают**” движутся они или нет, а если и движутся, то “**не знают**” скорости V перемещения центра координат O' релятивистской системы, **субъективно выбранной** для их описания. В отличие от **абсолютных**, понятие **координатных** длин возникает и начинает работать лишь **после** выбора системы координат. Однако выбор системы координат, как отмечено во введении, не может изменить объективную реальность – **абсолютные** размеры тел.

Парадоксы времени

“Парадокс близнецов” – один из наиболее известных парадоксов, связанных с эффектом “замедления времени” в релятивистской системе.

Исходные данные. Брат-близнец “1” вначале провожает, а затем встречает брата-близнеца “2” после его счастливого возвращения из космического полета с околосветовой скоростью.

В момент встречи брат “2” на взгляд окружающих и брата “1” оказывается намного **моложе**. Меньший возраст брата “2” документально подтверждается записями **координатного** времени в бортовом журнале и расчетами **координатного** времени полета, выполненными с учетом равномерных и ускоренных движений ракеты [2, с.143]. В современной научной литературе парадоксальное соотношение возрастов братьев считается вполне **реальным** и объясняется релятивистским эффектом “замедления времени”, подтвержденным **экспериментально**.

Расчеты **координатного** времени полета t' **безусловно** заслуживают доверия. Тем не менее, биологический (**абсолютный**) возраст близнецов должен быть **одинаков**. По мнению автора, ошибки в рассуждениях обусловлены, **с одной стороны**, упомянутым выше **отсутствием** в настоящее время **различий** между **абсолютным** и **координатным** временами, с другой, – выражением возрастов братьев “1” и “2” в **разных** единицах времени [c] и [c'], отвечающим различным ИСО (аналогично рассмотренному выше парадоксу длины).

Действительно, при вычислении **координатного** времени полета t' его длительность, определяемая течением времени τ' [c'], суммируется с “набегом” фазы φ [c'], который не имеет какого-либо отношения к продолжительности полета τ' . В итоге координатное время полета t' [c'] **численно** оказывается меньше длительности полета t [c], вычисленной для галилеевой системы.

Очевидно, что реальность эффекта “замедления времени” имеет немаловажное техническое значение. В частности, выполненный анализ показывает, что в отличие от литературных источников [21, с.124, № 489] планирование космических полетов с околосветовой скоростью, к сожалению, **должно** учитывать “земные” нормы расхода топлива и средств жизнеобеспечения.

Доказательства

Наиболее часто в качестве экспериментального доказательства **реальности** замедления длительности процессов, связанных с движущимися телами, используется вывод, полученные при наблюдениях искусственных и естественных потоков нестабильных частиц [2-5]. Например, в лабораторной (**галилеевой**) системе измеряют период полураспада [c] и соответствующий ему пробег [m] π -мезонов, односкоростные пучки которых формируют в ускорителях при облучении мишеней протонами высоких энергий [5, с.126]. Затем по формулам (6) вычисляют **собственный период** полураспа-

да пионов в *релятивистской* системе. При этом полагают, что рассчитывают время полураспада *неподвижной* совокупности частиц, так как согласно определению [2] *собственное время* движущейся частицы отсчитывается по часам, *неподвижным* относительно последней. Вычисленный *собственный период* полураспада пионов, если его выразить в [c] (что *неправильно*), оказывается *меньше* периода полураспада движущихся пионов [c] в лабораторной системе. При скорости пионов $v = 0.99c$, ($\gamma = 7.09$) *расчетный* пробег частиц за время их полураспада составит в релятивистской системе $5.35 [m'_x]$, что *численно* значительно *меньше* пробега $37.9 [m]$, измеренного в лабораторной системе. Отсюда делается вывод, что вследствие *движения частиц* с околосветовой скоростью процесс их распада *автоматически замедляется* (эффект “замедления времени”) и частицы оказываются способными преодолеть большее расстояние.

По мнению автора, приведенное доказательство, с одной стороны, носит не экспериментальный, а *косвенный* характер (отсутствуют непосредственные измерения времени полураспада *неподвижных* частиц в *лабораторной* системе), с другой, – оно повторяет ошибки рассуждений, рассмотренные выше в связи с “парадоксом близнецов”.

В настоящее время выполнен достаточно большой ряд *прямых* экспериментов [5] по проверке *реальности* замедления процессов в движущихся телах путем сравнения показаний *неподвижных* и *движущихся* высокоточных атомных часов (моделирование “парадокса близнецов”). Например, один комплект часов остается на аэродроме (в центре O условно неподвижной галилеевой ИСО), другой – в течение длительного времени (около суток) транспортируется самолетом. По возвращению на аэродром показания первоначально синхронизированных часов сравниваются. Эксперименты подтвердили *отставание* движущихся часов. Однако интерпретация результатов опытов, по мнению автора, далеко *неоднозначна*. Вследствие крайней малости эффекта измеренную разность показаний недостаточно сравнить только со стандартной погрешностью хода атомных часов в *обычных* условиях. Вполне очевидно, что перемещение в космическом пространстве за время эксперимента, как условно *неподвижных*, так и *движущихся* часов, нарушает рамки СТО:

- встреча часов происходит в точке пространства, отличающейся от исходной;
- перемещение часов происходит в гравитационном поле.

С другой стороны, на стабильность хода движущихся часов неизбежно влияют изменения их физических свойств, обусловленные влиянием *гравитации* (высота полета) и неоднородностью *ускорений* их отдельных частей (из-за малости рассматриваемого

эффекта элементы конструкции часов нельзя считать *абсолютно твердыми* телами).

Влияние перечисленных факторов на расхождение показаний часов может быть достаточно большим.

3.5. ОСОБЕННОСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ И ГАЛИЛЕЕВОЙ СИСТЕМ

Как описано выше, движущаяся релятивистская система K' введена с целью сохранить в новых координатах x', y', z', t' форминвариантность уравнений Максвелла, записанных в координатах x, y, z, t неподвижной галилеевой системы K . Общее доказательство инвариантности уравнений Максвелла для вакуума с *электрическими зарядами* впервые (1905) дано Пуанкаре [2, с.13; 14] и несколько позже Эйнштейном [15].

Помимо выполнения условия форминвариантности релятивистская ИСО *согласуется* с принципом относительности и *устраняет* описанный в разделе 2 парадокс “*световой волны*” – распространение света в галилеевой ИСО в виде *одной и той же* сферической волны с двумя *различными* центрами сферы, *удаляющимися* друг от друга. Именно разрешение указанного парадокса галилеевой системы лежит в основе предложенного в разделе 3.2 вывода преобразований Лоренца.

Однако *правильное* описание световой волны в движущейся и неподвижной релятивистской ИСО *распространяется только на две совокупности тел*, одна из которых неподвижна относительно центра координат O' релятивистской системы, а другая перемещается вдоль оси X' со скоростью $v = V$. Для тел со скоростями $v \neq V$ парадокс “световой волны” *сохраняется* и в релятивистских ИСО.

Рассмотренная особенность релятивистских ИСО (невозможность *полного* устранения парадокса “световой волны” в отношении трех и более тел, движущихся с разными скоростями) в некотором роде аналогична (хотя, быть может, существует и *причинная* связь) невозможности получения общего решения *гравитационной* задачи для трех и более тел.

Таким образом, универсальность релятивистской ИСО как средства разрешения парадокса “*световой волны*” галилеевой системы весьма ограничена. Однако, обращение к релятивистской системе представляется необходимым при изучении взаимоотношений парных совокупностей тел, движущихся относительно друг друга с околосветовыми скоростями.

3.6. ПСЕВДОЕВКЛИДОВО ПРОСТРАНСТВО

Из изложенного выше ясно, что “правильная”, релятивистская система противопоставлена “неправильной”, галилеевой. Казалось бы, их “примирение” невозможно. Од-

нако, эту задачу впервые (1905) успешно решил Пуанкаре, предложив объединение всех ИСО на основе 4-х мерной квадратичной формы $(x^2 + y^2 + z^2 - t^2)$, инвариантной относительно преобразований Лоренца [2, с.17, 14, с.85]. В дальнейшем пространство 4-х измерений Пуанкаре нашло развитие в мире Минковского (1908), где вышеупомянутая квадратичная форма заменена квадратичной формой интервала S – абсолютного расстояния между двумя точками 4-х мерного мирового пространства-времени. Впоследствии указанное пространство по предложению Ф. Клейна и Д. Гильберта получило название *псевдоевклидова* [2]. Как показано А.А. Логуновым, *псевдоевклидова метрика* нашего мира непосредственно *следует* из рассмотрения *геометрии фронта* электромагнитной волны уравнений Максвелла [2, с.17].

В мире Минковского координаты x, y, z, ct (галилеева система K) или x', y', z', ct' (релятивистская система K'), связанные преобразованиями (4), образуют форминвариантные равные друг другу квадратичные формы $S_{12}^2 = S_{12}'^2$:

$$\begin{aligned} S_{12}^2 &= c^2(t_1 - t_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2, \\ S_{12}'^2 &= c^2(t_1' - t_2')^2 - (x_1' - x_2')^2 - (y_1' - y_2')^2 - (z_1' - z_2')^2. \end{aligned}$$

Неизменность численных значений интервала S в разных ИСО покажем на простых примерах. Вычислим квадраты S_{12}^2 и $S_{12}'^2$ для 3-х пар мировых точек с общей для всех пар “нулевой” точкой “2”, совпадающей с мировым центром координат: $x_2 = y_2 = z_2 = t_2 = 0$, $x_2' = y_2' = z_2' = t_2' = 0$. Вторая точка “1” каждой пары – располагается на координатных осях X, Z, T мировой галилеевой системы, образуя соответственно интервалы S_x ($x_1 = x$, $y_1 = z_1 = t_1 = 0$), S_z ($z_1 = z$, $x_1 = y_1 = t_1 = 0$) и S_t ($t_1 = t$, $x_1 = y_1 = z_1 = 0$):

$$\begin{aligned} S_x^2 &= -x^2, & x' &= \gamma x, & y' &= z' = 0, & t' &= \gamma Vx/c^2, & S_x'^2 &= -x'^2 = S_x^2, \\ S_z^2 &= -z^2, & z' &= z, & x' &= y' = 0, & t' &= 0, & S_z'^2 &= -z'^2 = S_z^2, \\ S_t^2 &= c^2 t^2, & t' &= \gamma t, & x' &= -\gamma Vt, & y' &= z' = 0, & S_t'^2 &= c^2 t'^2 = S_t^2. \end{aligned}$$

В мире Минковского интервал S отвечает *абсолютной* длине 4-х мерного отрезка, определяемого двумя заданными мировыми точками [2]. Вследствие *абсолютности* интервала S его численное значение сохраняется постоянным при *поворотах* и *переносах* координатных осей псевдоевклидова пространства.

Размерность всех 4-х мировых координат соответствует размерности длины. Однако, только *метр* (единица СИ измерения длин в галилеевой системе) может рассматриваться как *универсальная* единица СИ для измерений 4-х мерных расстояний. Это обусловлено тем, что *только* в галилеевой системе масштаб единицы длины *одинаков* для

всех направлений (см. раздел 3.2.1). **Абсолютность** интервала S и возможность его измерения в **метрах** хорошо согласуется с абсолютностью **расстояний** и промежутков **времени** в галилеевой ИСО (см. раздел 3.1).

Представляет интерес сравнить на конкретном примере для **различных** ИСО численные выражения квадрата длины 4-х мерного отрезка в **разных** 4-х мерных пространствах – **псевдоевклидовом** (отрезки S и S') и **евклидовом** (отрезки \bar{S} и \bar{S}'). С этой целью вычислим длину 4-х мерного расстояния между мировой точкой прихода световой волны в точку B'_1 (рис.1a) и мировой “нулевой” точкой (объединенная точка O, O').

$$\begin{aligned} x = Vt, \quad y = 0, \quad z, \quad t; \quad x' = \gamma(x - Vt) = 0, \quad y' = 0, \quad z' = z, \quad t' = \gamma t (1 - \beta^2) \\ S^2 = c^2 t^2 - V^2 t^2 - z^2, \quad S'^2 = c^2 t'^2 - z'^2 = c^2 \gamma^2 t^2 (1 - \beta^2)^2 = S^2, \quad (10) \\ \bar{S}^2 = c^2 t^2 + V^2 t^2 + z^2, \quad \bar{S}'^2 = c^2 t'^2 + z'^2 = c^2 t^2 - V^2 t^2 + z^2 \neq \bar{S}^2. \end{aligned}$$

В отличие от евклидова 4-х мерного пространства ($\bar{S} \neq \bar{S}'$) соотношения (10) подтверждают для псевдоевклидова пространства тезис о неизменности длины 4-х мерного отрезка в разных ИСО ($S = S'$).

Хотелось бы обратить внимание на **связь** выражения квадратичной формы **интервала** S с **основной** формулой (8) $\tau' = \gamma \tau$ вывода преобразований (4), предложенного в разделе 3.2.1.

Действительно, размерность длины, **одинаковая** для всех 4-х мировых координат псевдоевклидова пространства, позволяет дать **интерпретацию** интервала S в рамках обычного **3-х мерного евклидова** пространства **галилеевой** системы.

Не умаляя **общности** выражения S , квадратичная форма интервала $S^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2 t^2 - l^2$ в галилеевой ИСО может быть представлена для произвольно выбранного момента времени t (или τ) в виде решения (8) треугольника $OO'_1B'_1$ (рис.1a), полагая $S = O'_1B'_1 = c\tau'$, $ct = OB'_1$, $l = OO'_1 = Vt$. После подстановки новых обозначений в квадратичную форму интервала S получим формулу (8) соотношения абсолютных времен галилеевой и релятивистских систем. Таким образом, абсолютность интервала S , по мнению автора, обусловлена постулируемой в разделе 3.1 **абсолютностью** течения времени. С этих позиций свойства пространства Минковского уже не представляются такими необычными.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый взгляд на релятивистскую систему отсчета, согласно которому координатное время релятивистской ИСО представлено в виде линейной неоднородной

функции с независимой переменной, отвечающей абсолютному течению времени, и свободным членом, отвечающим условной начальной фазе времени. В общем случае фаза зависит от пространственных координат.

2. Размеры и масса физических тел, длительность процессов, электрический заряд и скорость c распространения электромагнитного поля рассматриваются как абсолютные величины, не зависящие от состояния движения тел. Однако численные выражения размеров и массы тел, а также длительностей процессов различны в галилеевой и релятивистской системах отсчета при сохранении численного постоянства величин электрического заряда и скорости c .

3. В движущейся или условно неподвижной релятивистской системе для некоторой выделенной скорости наблюдателя отсутствуют парадокс световой волны галилеевой системы, а также парадоксы времени и длины специальной теории относительности.

4. Предложены новые постулаты релятивистской системы, включающие тезис об абсолютном течении времени, и новый вывод преобразований Лоренца, соответствующих постулатам.

5. Установлены соотношения единиц измерений длины и времени в галилеевой и релятивистской системах; показана “анизотропность” релятивистских единиц измерений координатных длин; сделан вывод об отсутствии реальных эффектов сокращения длин и замедления течения времени для движущихся тел.

6. Рассмотрена интерпретация интервала S пространства Минковского в рамках 3-х мерного евклидова пространства галилеевой системы. Согласно интерпретации абсолютность интервала S обусловлена постулируемой в работе абсолютностью течения времени.

Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН, проф. В.Г. Румынину и к.ф.-м.н. В.Т. Ипполитову за поддержку настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. *Кадоццев Б.Б и др.* По поводу статьи А.А. Тяпкина. // Успехи физических наук. Т. 106, вып. 4. М.: Наука, 1972. С. 660-662.

[2]. *Логунов А. А.* Лекции по теории относительности. Современный анализ проблемы. 2-е изд., доп., М.: Изд. МГУ, 1984. 221 с.

[3]. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 2. Пространство, время, движение. М.: Мир, 1966. 343 с.

[4]. *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.* Берклеевский курс физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1971. 481 с.

- [5]. *Оррир Дж.* Физика. Т.1. М.: Мир, 1981. 336 с.
- [6]. *Детлаф А.А., Яворский Б. М.* Курс физики. Т.3. Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш.школа, 1979. 511 с.
- [7]. *Пуанкаре А.* Оптические явления в движущихся телах. // Принцип относительности. Сборник работ по специальной теории относительности. Состав. А.А. Тяпкин. М.: Атомиздат, 1973. С. 21-22.
- [8]. *Тяпкин А.А.* Об истории возникновения “теории относительности”. Дубна: ОИЯИ, 2004. 90 с.
- [9]. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т.2. Теория поля. 7-е изд., испр. М.: Наука, 1988. 512 с.
- [10]. *Хайкин С.Э.* Общий курс физики. Физические основы механики. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1971. 752 с.
- [11]. *Стрелков С.П.* Общий курс физики. Механика. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1975. 560 с.
- [12]. *Астахов А.В.* Курс физики. Т.1. Механика. Кинетическая теория материи. М.: Наука, 1977. 384 с.
- [13]. *Пуанкаре А.* Измерение времени. // Принцип относительности. Сборник работ по специальной теории относительности. Состав. А.А. Тяпкин. М.: Атомиздат, 1973. С. 12-21.
- [14]. *Логунов А. А.* К работам Анри Пуанкаре “О динамике электрона”. Дубна: Изд. ИЯИ АН СССР, 1984. 96 с.
- [15]. *Эйнштейн А.* К электродинамике движущихся тел. // Собрание научных трудов в 4-х томах. Т.1. Работы по теории относительности. М.: Наука, 1965. С. 7-35.
- [16]. *Эйнштейн А.* О специальной и общей теории относительности. Общедоступное изложение. М.: Госиздат, 1922. 79 с.
- [17]. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* Курс общей физики. Т.3. Оптика. Атомная физика. 6-е изд. М.: ГИФМЛ, 1962. 609 с.
- [18]. *Пуанкаре А.* К теории Лармора. // Принцип относительности. Сборник работ по специальной теории относительности. Сост. А.А. Тяпкин. М.: Атомиздат, 1973. С. 7-8.
- [19]. *Чертов А.Г.* Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы). М.: Высш. шк., 1990. 335 с.
- [20]. *Парселл Э.* Берклеевский курс физики. Т.2. Электричество и магнетизм. 2-е изд., исправ. М.: Наука, 1975. 440 с.
- [21]. *Батыгин В.В., Топтыгин И.Н.* Сборник задач по электродинамике. М.: ГИФМЛ, 1962. 480 с.

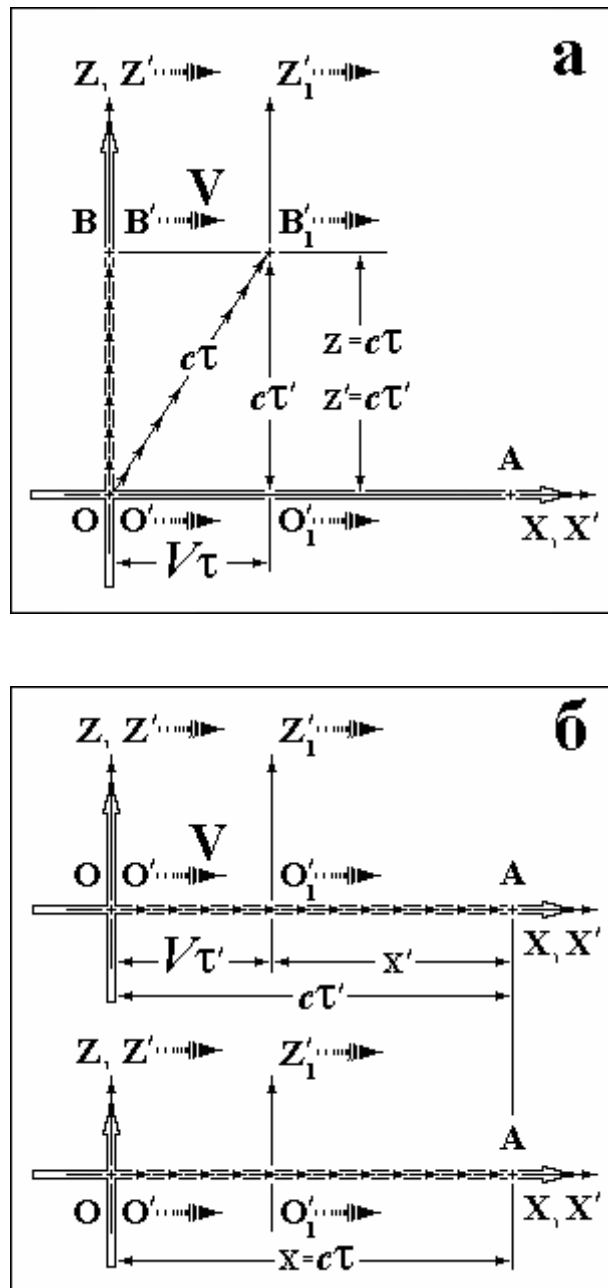


Рис.1. К выводу формул преобразований Лоренца:
распространение световой волны вдоль осей Z, Z' (а) и X, X' (б).