

ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ НА $x-t$ -ДИАГРАММАХ

Н.Н. Чаварга

Ужгородский национальный университет, 88 000, ул. Пидгирна, 46.
E-mail: chavarga@mail.uzhgorod.ua

Изложен способ представления событий на $x-t$ -диаграммах для теории относительности Галилея, а также для теорий, в которых цена деления осей пространственной и временной координат зависит от состояния движения. Дано сравнение с диаграммами Минковского.

1. Введение

В литературе диаграммы Минковского считаются весьма наглядным способом демонстрации сущности специальной теории относительности (СТО) и убедительным доказательством ее истинности. Подробный анализ показывает, однако, что не все так очевидно, и не все так просто.

2. Сущность $x-t$ -диаграмм

Понятие физического события характеризуется набором четырех чисел – значениями пространственных координат (x , y , z) и момента времени (t). Исходная идея состоит в следующем: представить физический мир событий на диаграмме, в которой одна из осей представляет пространство, а вторая – время. Для простоты пространство представляют одной осью, например, осью x . В таком упрощенном случае под событием понимают набор двух чисел, являющихся некоторыми координатами на осях пространства и времени. Математические соотношения, позволяющие рассчитать координаты пространства и времени произвольного события из одной системы в другую, называют преобразованиями пространства и времени.

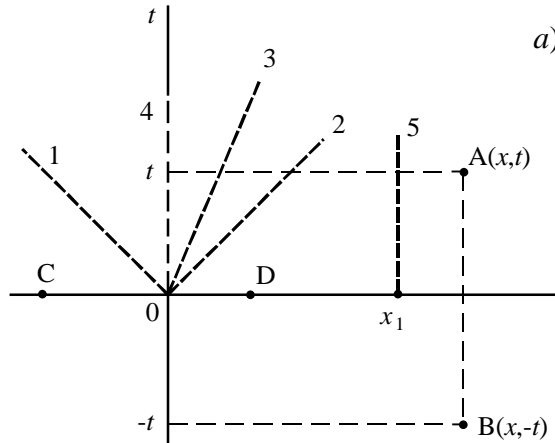
Обычно в литературе пространственную ось представляет абсцисса, а временную – ордината. В связи с независимостью указанных величин, единицы измерения пространства и времени могут быть выбраны так, чтобы скорость света была равна единице. В этом случае гра-

фиком движения фотона в координатах $x-t$ будет прямая линия, размещенная под углом 45 градусов к пространственной оси – мировые линии 1 и 2, рис.2.1. Исходную диаграмму рационально строить так, чтобы нулевые отметки на временной и пространственной осях совпадали, рис. 2.1, *a*. Очевидно, что график покоящегося в точке x_1 объекта будет иметь вид вертикальной линии 5 с началом в точке x_1 – время течет, но положение материального объекта не изменяется. Графики равномерно движущихся объектов будут представлены прямыми линиями 3, при этом, чем больше скорость объекта, тем больше наклон графика, но для материального объекта наклон не может превышать угла 45 градусов. Графики тел, движущихся неравномерно, будут представлять собой кривые линии, наклон которых на любом их участке не может превышать 45 градусов ни в одну, ни в другую сторону.

Все события, произошедшие в момент времени $t=0$, изображаются точками, размещенными на оси x . Все точки, которые находятся выше оси x – это будущие события. Если точка *A* на рисунке 2.1, *a* имеет координаты (x, t) , то это событие еще не произошло, оно произойдет в точке x через промежуток времени t . Если точка *B* имеет координаты $(x, -t)$, то это событие произошло t времени назад в точке с координатой x .

С помощью этого графика можно также продемонстрировать, как будет выглядеть ситуация для покоящегося на-

блюдетеля в момент времени t . Для этого начало пространственной оси нужно сместить на величину t вверх по оси времени, рис.2.1, b , ибо графиком движения начала пространственной оси (мировой линией) является сама ордината, т.е. ось времени (график 4). Очевидно, что в произвольный момент t начала пространственной и временной осей уже не будут совпадать. В отличие от начала пространственной оси, начало временной оси не движется вместе с наблюдателем – оно



«остаётся в прошлом». Как видно из рисунка 2.1, b , событие A для неподвижного наблюдателя теперь уже (в момент t) является настоящим, а событие B – на расстоянии $2t$ в прошлом.

Следует подчеркнуть особо, что пространство и время в определенном смысле обладают противоположными свойствами – на пространственной оси не может быть двух одинаковых координат, а время не может быть разным. В этом смысле они дополняют друг друга.

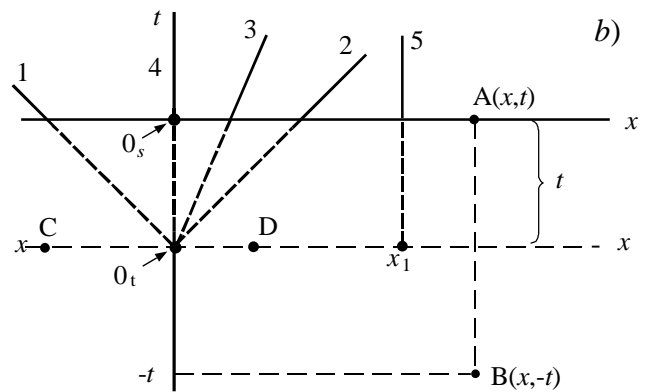


Рис.2.1. Изображение одних и тех же событий на x - t -диаграммах в разные моменты времени:

a) – в момент $t=0$. Мировые линии в данном случае – это прогноз на будущее, поскольку законы движения объектов известны. 1,2 – мировые линии фотонов, испущенных из начала координат в противоположных направлениях, 3 – мировая линия тела, движущегося равномерно из начала координат, 4 – мировая линия начала координат, совпадает с осью времени, 5 – мировая линия тела, покоящегося в точке с координатой x_1 . Событие A находится в будущем, оно наступит через t времени. Все события на оси x (например, C и D) находятся в настоящем, событие B – в прошлом. Начала пространственной 0_s и временной 0_t осей координат совпадают – точка 0 ;

b) – в момент t . Начало покоящейся пространственной координаты движется вдоль временной оси (вдоль его мировой линии), вследствие чего положения 0_s и 0_t не совпадают. Событие A теперь оказывается в настоящем времени, события C , D и B – в прошлом. Мировые линии 1-4 берут свое начало из точки 0_t .

Изложенное, по-видимому, есть практически вся полезная информация, которую можно извлечь из рисунка 2.1. Все это пока не имело никакого отношения к теории относительности, ибо мы еще не сопоставляли точки зрения наблюдателей из разных систем координат на какое-либо событие по той простой причине, что рассматривали ситуацию в одной системе координат.

3. Световые конусы

Теперь рассмотрим вопрос так называемого светового конуса, заключенного между мировыми линиями фотонов, рис.3.1. Считается [1, 2], что область со-

бытий верхнего конуса является областью «абсолютного будущего», а область нижнего конуса – областью «абсолютного прошлого», оставшаяся часть – абсолютно безразличной областью. Такая классификация связана с предположением, что в физическом мире нельзя послать сигнал со скоростью, превышающей скорость света.

Как видно из рисунка, событие A с пространственной координатой x_1 находится в будущем, но из начала координат нельзя послать электромагнитный сигнал в точку x_1 так, чтобы он прибыл туда в момент t_1 , – в точку x_1 электромагнитный сигнал придет в момент t_2 , а это уже бу-

дет неким событием B . Ракета, стартовавшая в направлении x_1 , прибудет в эту точку еще позже (штриховая линия), в момент t_3 , и момент прибытия будет событием C . Если из точки x_1 в момент t_1 , будет отправлен электромагнитный сигнал в направлении начала координат, он прибудет туда в момент t_4 . Если в будущем тахионы будуд обнаружены, или торсионные поля окажудся не выдумкой, то сигнал из начала координат можно будуд посылать и в точку A .

Событие D находится в прошлом. Электромагнитный сигнал от него при-

ходит в начало пространственной координаты также в прошлом, в момент $-t_1$. Более того, от всех событий, находящихя внутри нижнего конуса, электромагнитные сигналы уже прибыли в прошлом. Однако если пользоваться более медленными средствами связи, например, ракетой, то информация об этих событиях может быть передана в начало координат в момент $t=0$ (штрихпунктирная мировая линия), или в момент $t > 0$, если пользоваться еще более медленной ракетой.

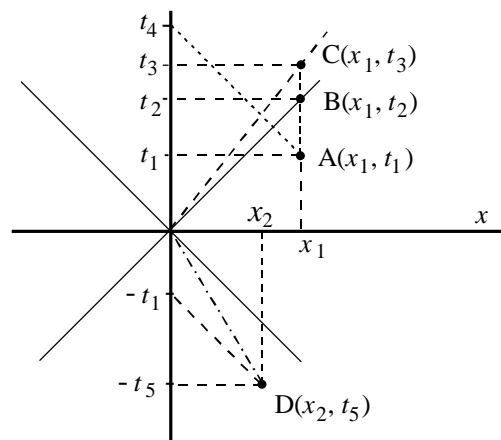


Рис.3.1. Настоящие, прошлые и будущие события на x - t -диаграммах. Световые конусы.

Все точки на пространственной оси x являются настоящими событиями; все точки при $t > 0$ являются будущими событиями; все точки при $t < 0$ являются прошлыми событиями.

4. Теория Галилея на x - t -диаграммах

В литературе этот вопрос подробно, по-видимому, не рассматривался – то ли по ненужности, то ли просто никто не задавался этим вопросом. Однако если имеется некий способ наглядного представления теории относительности, то он должен быть пригодным и полезным для любого ее варианта, в том числе и для теории Галилея. Предположим, что относительно неподвижной системы K движется система координат K' со скоростью V . Спрашивается, как будет выглядеть ситуация (какими будут координаты событий) с точки зрения движущегося наблюдателя в различные моменты времени? Пока что мы выяснили, что для этого на рисунке ось x нужно переносить на расстояние t вдоль оси времени. Теперь же к этому добавляется и движение вдоль

пространственной оси. Вместе эти движения представляют мировую линию.

Во всех теориях для удобства и упрощения допускают, что в момент $t=0$ начала пространственной 0_s и временной 0_t осей обеих систем совпадали, рис.4.1, а. В теории Галилея цены делений на осях движущейся системы K' (тонкие линии) такие же, как и в неподвижной K . Отсюда следует вывод, что для K' ситуация (положение точки A) в момент $t=0$ выглядит точно такой же, как и для K .

В произвольный момент времени t начало неподвижной системы переместится вдоль собственной мировой линии на расстояние t , а начало движущейся системы переместится дополнительно и по пространственной координате. В итоге перемещение начала движущейся системы осуществится по наклонной линии, в

соответствии с уравнением движения начала координат $x=Vt$, рис.4.1, *b*. Как видно из рисунка, событие *A* (имеющее временную координату t), которое прежде было будущим, теперь стало настоящим для обоих наблюдателей. Тот факт, что событие стало для обоих наблюдателей настоящим, может ввести в заблуждение, будто в этот момент времени для обоих наблюдателей $t=0$. Нужно, однако, помнить, что момент $t=0$ (момент синхрони-

зации часов) остался в прошлом. Поскольку мы не можем остановить время, мы не можем все время находиться с нашим началом пространственной координаты против метки $t=0$ на шкале времени, т.е. против 0_t . Таким образом, хронометры обоих наблюдателей покажут одно и то же значение времени, т.е. $t'=t$. Это простое соотношение и есть математическая запись временного преобразования Галилея.

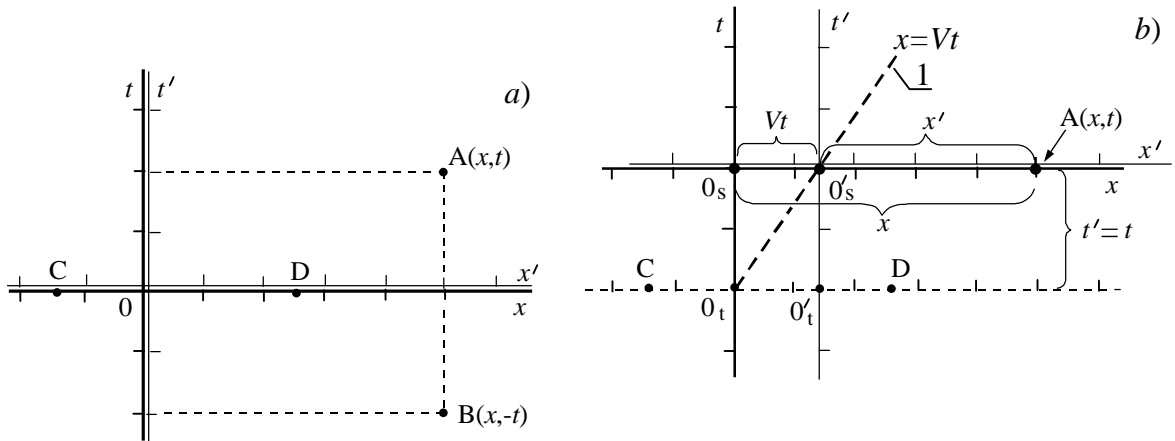


Рис.4.1. Теория относительности Галилея на x - t -диаграммах. Фигурными скобками обозначены величины, входящие в преобразования Галилея:

a) – момент времени $t=t'=0$. Событие *A* для обоих наблюдателей наступит через t времени. События *C* и *D* для обоих наблюдателей находятся в настоящем для них времени и одновременны. Событие *B* находится в прошлом на расстоянии $-t$. Четыре начала координат (начала пространственных 0_s и $0'_s$, а также временных 0_t и $0'_t$) находятся в общей точке 0 ;

b) – момент времени $t=t' \neq 0$. Начало пространственной координаты 0_s неподвижной системы смещено по временной шкале на величину t (нулевая метка покоится в пространстве, но движется во времени). Начало временной координаты 0_t осталось на месте. Начало пространственной координаты движущейся системы смещено по обеим координатам в точку $0'_s$. Временная координата движущейся системы смещена по оси пространства на величину Vt .

В отличие от временной координаты, как неподвижный, так и движущийся наблюдатель могут находиться рядом с нулевой отметкой своей пространственной координаты все время. Событие *A*, таким образом, для движущегося наблюдателя в момент t окажется ближе по расстоянию на величину Vt . Поскольку цены деления на пространственных осях (движущейся и неподвижной) в теории Галилея одинаковы, из рисунка 4.1, *b* имеем: $x'=x-Vt$, т.е. мы получили пространственное преобразование Галилея. Вместе с $t'=t$ имеем систему уравнений, в которой x имеет смысл координаты произвольным обра-

зом выбранной точки ($x=const$), а x' имеет смысл координаты этой же точки в движущейся системе ($x' \neq const$) в момент времени t , причем момент времени также выбирается произвольно, вне всякой зависимости от величины x .

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - Vt \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Очевидно, что поскольку графики – это та же самая математика, только представлена другими – не символьными, а наглядными средствами, – на x - t -диаграммах должны четко просматриваться математические связи, описываю-

щие анализируемый процесс. На рис.4.1 это видно хорошо.

5. Солитонная теория относительности на $x-t$ -диаграммах

В работах [3, 4] предложена теория относительности в предположении, что все элементарные частицы являются солитонными образованиями светоносного эфира («солитонная теории относительности», СолТО). В этом случае цена деления как на пространственной, так и на временной осях движущейся системы зависит от скорости системы:

$$\begin{cases} x' = \frac{x - Vt}{G} \\ t' = t G \end{cases} \quad (5.1)$$

где $G = \sqrt{1 - V^2 / C^2}$.

Первое уравнение системы (5.1) совпадает с пространственным преобразованием Лорентца как по форме, так и по смыслу входящих в формулы величин. Коэффициент G , который можно назвать «коэффициентом негалилеевости», входит в уравнения (5.1) принципиально по-разному. Указанная асимметрия связана с тем, что по мере увеличения скорости V цена деления пространственной оси x' уменьшается (Фитцджеральд–Лорентцевское сокращение), а цена деления на

оси t' увеличивается, что соответствует замедлению темпа хода физических процессов в движущейся системе – так называемое «замедление времени».

Согласно принципу соответствия всякая новая теория должна математически переходить в старую при тех условиях, при которых старая согласуется с экспериментом. На языке математики это означает, что преобразования всякой новой теории относительности при малых скоростях должны переходить в преобразования Галилея, если пренебречь отдельно стоящими членами высших порядков, в данном конкретном случае – величиной V^2/C^2 . Как видим, система (5.1) при этих условиях переходит в систему (4.1), т.е. СолТО переходит в теорию Галилея, и принцип соответствия не нарушается. Поскольку графика – это та же математика, принцип соответствия должен просматриваться и в графическом представлении теории. В этом случае $x-t$ -диаграмма новой теории не должна сильно отличаться от старой, и должен просматриваться путь, каким образом диаграмма новой теории переходит в диаграмму старой.

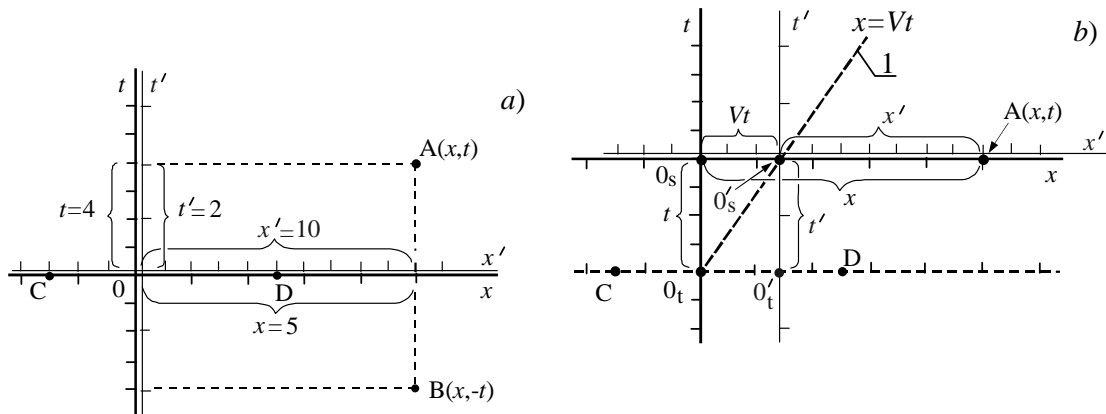


Рис.5.1. Солитонная теория относительности на $x-t$ -диаграммах:

a) – момент $t = 0$. Событие A находится в будущем времени, но расстояние до него по измерениям разных наблюдателей разное, причем как по временной координате, так и по пространственной. События C и D одновременны для обеих систем, но пространственное расстояние до них разное в связи с уменьшением цены деления движущейся пространственной оси координат – в связи с сокращением размеров солитонов (и физических тел в целом) в направлении движения;

b) – момент времени t . Ситуация во многом аналогична теории Галилея на рис. 4.1. Основное отличие в том, что деления на пространственной оси движущейся системы размещены плотнее (движущиеся тела сокращаются), а на оси времени, наоборот, – метки размещены реже (замедляется темп хода хронометров). По мере уменьшения разницы между метками рисунок 5.1 постепенно переходит в рисунок 4.1, а СолТО – в теорию относительности Галилея. 1 – мировая линия начала координат движущейся системы.

На рисунку 5.1, *a* показан момент, ко-гда начала покоящейся и движущейся систем совпадают. Движущаяся система изображена тонкими линиями. Цена деления на движущейся пространственной координате меньше, чем на неподвижной (движущиеся тела сокращаются, коэффициент G находится в знаменателе). В соответствии с временным преобразованием цена деления на движущейся временной координате больше, чем на неподвижной (движущиеся хронометры тикают медленнее). В момент $t=0$ все события на оси x одновременны в обеих системах, но расстояние до них по пространственным координатам в разных системах разное. Для события D в соответствии с рисунком 5.1, *a* в системе K имеем 2,5 пространственных делений, а в системе K' – 5 делений.

Событие A для обоих наблюдателей находится в будущем, но это событие наступит по мнению движущегося наблюдателя быстрее (в соответствии с рисунком – через две единицы времени), в то время как по мнению неподвижного наблюдателя позднее (через четыре единицы времени). Очевидно, однако, что данные о событии A будут сниматься в обеих системах одновременно. Тот факт, что результаты измерений будут разные – это другое дело, и относительностью одновременности оно никак не может быть названо.

На рисунке 5.1, *b* показано, как будет выглядеть ситуация для обоих наблюдателей в момент времени t (этот момент одновременно является одной из характеристик события A). Как видим, событие A теперь также находится в настоящем времени для обоих наблюдателей, хотя характеристика этого настоящего в разных системах разная – в движущейся системе она меньше, всего 2 деления против 4 делений в неподвижной системе. Хронометры в обеих системах были пущены в ход (обнулены показания) одновременно, в момент $t = t' = 0$. Показания хронометров также были сняты одновременно, в момент наступления события A (в момент t), но наличие разницы в

показаниях хронометров, $t' \neq t$, еще не означает, что показания сняты не одновременно, что события были неодновременными.

Пространственное расстояние от начала координат до точки A для неподвижного наблюдателя осталось прежним, но для движущегося уменьшилось на величину Vt . Из сравнения рисунков 4.1 и 5.1 видно, что по мере уменьшения разницы в ценах деления на осях координат диаграмма СолТО все меньше и меньше отличается от диаграммы ТО Галилея. В этом мы имеем наглядную (графическую) демонстрацию выполнения принципа соответствия.

На x - t -диаграммах хорошо иллюстрируется неравноправность систем координат. В соответствии с рисунком 5.1 скорость системы K' по измерениям K равна

$$V = 1,5/4 = 3/8 \quad (5.1)$$

однако по измерениям самого K' она равна

$$V' = -3/2 \quad (5.2)$$

При $G=0,5$ эти результаты соответствуют формуле СолТО, [3, 4].

$$V' = -\frac{V}{G^2} \quad (5.3)$$

6. СТО на x - t -диаграммах

Представим для удобства пространственное преобразование Лорентца в виде:

$$x' = \frac{x - Vt}{G} = \frac{x}{G} - \frac{Vt}{G} \quad (6.1)$$

В этой записи более наглядно представлен тот факт, что цена деления на оси x' меньше, чем на оси x , а также что величина Vt/G соответствует простому сдвигу по оси x' , рис.5.1, *b*.

Представим таким же образом и временное преобразование Лорентца:

$$t' = \frac{t - \frac{V}{C^2}x}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} = \frac{t}{G} - \frac{Vx/C^2}{G} \quad (6.2)$$

Поскольку x имеет смысл координаты произвольным образом выбранной точки, малость величины V/C^2 всегда можно компенсировать величиной x . Это озна-

чает, что в процедуре упрощения уравнения (6.2) величиной Vx/C^2 пренебрегать (с целью перехода к малым скоростям) уже нельзя, а это в свою очередь означает, что временное преобразование Лорентца при малых скоростях не переходит в преобразование Галилея. Имеем явное нарушение принципа соответствия.

В этом случае обычно возражают, что величина t в преобразованиях пространства и времени означает не интервал времени, а момент времени. Нетрудно увидеть, однако, что понятие момента времени нельзя представить математически иначе, как через понятие интервала времени, а понятие пространственной координаты точки – иначе, как через понятие пространственного расстояния. Во всех уравнениях, в которых встречаются величины x и t как координаты пространства и времени, x всегда означает количество делений на пространственной оси, а t всегда означает количество делений на временной оси, т.е. интервал времени.

Второе обычно выдвигаемое возражение заключается в том, что для перехода от временного преобразования Лорентца к преобразованию Галилея предлагают устремлять к бесконечности скорость света, мол, в механике Ньютона или в теории относительности Галилея скорость света равна бесконечности. На самом деле ни механика Ньютона, ни теория относительности Галилея не налагают абсолютно никаких ограничений на скорость света – в преобразования Галилея скорость света просто не входит. Тот факт, что синхронизацию часов в теории Галилея можно бы провести с помощью бесконечно быстрой передачи информации, еще не означает, что скорость света должна быть равной бесконечности, даже если у нас нет другого выхода. В теории синхронность хода часов постулируется, а выполнение корректной синхронизации в действительности – это задача для экспериментаторов. Кроме того, устремление C к бесконечности существенно изменит уравнения Максвелла, которые, вне всякого сомнения, относятся к классической физике.

Из (6.2) ясно виден один обескураживающий факт, заключающийся в том, что во временном преобразовании Лорентца на самом деле содержится информация не о «замедлении времени», а об его «ускорении»! В соответствии с (6.2) метки на оси t' должны быть размещены чаще, чем на оси t , а не реже, как это утверждают в СТО. Очевидно, что величина Vx/C^2 представляет собой только сдвиг по оси времени. Сказанное можно проиллюстрировать с помощью обычных расчетов, выполненных в соответствии с (6.2). В таблице 1 приведены расчеты для времени t' в движущейся системе при $V=2 \cdot 10^8$, $x=10^8$ в различные моменты времени t , а также время t^* в движущейся системе без вычитания поправки на местное время.

Таблица 1

t	0,0000	10,0000	20,0000	30,0000
t'	-0,2981	13,1186	26,5347	39,9511
t^*	0,0000	13,4164	26,8328	40,2492

Как видно из таблицы, при скорости $2 \cdot 10^8$ часы в движущейся системе согласно временному преобразованию Лорентца идут в примерно на треть ускоренном темпе (против 10-й метки абсолютного времени размещена 13-я метка «движущегося времени», и т.д.), что находится в резком противоречии с декларируемым «замедлением времени». Поправка на местное время при указанной скорости на расстоянии 10^8 составляет всего треть секунды.

Еще одна неприятная особенность временного преобразования СТО (в отличие от преобразования Галилея или СолТО) состоит в том, что величина t' зависит от координаты x произвольным образом выбранной точки. Можно сделать несколько предположений о причине подобной зависимости.

1. Создатели СТО под величиной x во временном преобразовании понимали не координату произвольной точки (как в пространственном преобразовании), а ко-

ординату точки, до которой за время t перемещается начало движущейся системы, $x=Vt$. В этом случае мы имеем дело с элементарной математической ошибкой, когда разные физические величины обозначают общим символом. Физической ошибки в этом случае нет, ибо нетрудно показать, что t' в этом случае имеет смысл времени во всей движущейся системе.

2. Подразумевается, что величина x и в самом деле имеет смысл координаты произвольным образом выбранной точки. Из этого следует, что величина t' в преобразовании Лорентца имеет другой физический смысл, чем в преобразовании Галилея – она определяет значение времени не во всей системе, а только в точке x . Достаточно в (6.1) положить $t=0$, как мы увидим, что в момент, когда все часы в системе K показывают $t=0$, в системе K' движущиеся часы показывают разное время – те, которые размещены правее точки $x=0$, показывают «отрицательное время», те же, которые размещены левее $x=0$, спешат, (6.3).

$$t' = -\frac{V x}{C^2 G} \quad (6.3)$$

Принципиальное отличие пространственной и временной координат состоит в том, что, вводя эти понятия в качестве базовых, мы утверждаем, что на пространственной оси не существует двух или более одинаковых координат, но время в данный момент должно быть одно и то же на всей бесконечной пространственной оси. Это исходные позиции, базовые предположения любой теории, в которой используются понятия пространственной и временной координаты. Разрешение времени быть не одним и тем же на всей пространственной оси по своей сути равноценно разрешению разным (или даже всем) точкам на пространственной оси иметь одинаковую координату. Таким образом, на этот раз мы имеем дело с грубой физической ошибкой. Лорентц, естественно, видел это несоответствие, поэтому называл t' «местным временем», «математическим фоку-

сом», который надеялся со временем устранить.

Мы видели, что СТО не переходит в теорию Галилея при малых скоростях, однако определенный интерес представляет и численная величина несоответствия. Оценим эту величину. Возьмем для простоты $V=900$ (скорость среднего современного истребителя) и определим показания часов движущейся системы в разных точках пространства в момент, когда все часы неподвижной системы показывают нули, $t=0$. При этих условиях в соответствии с временным преобразованием Лорентца (6.3) имеем, таблица 2.

Таблица 2

t'	100	10	1	0	-1	-10	-100
x	-10^{16}	-10^{15}	-10^{14}	0	10^{14}	10^{15}	10^{16}

Как видно из таблицы, в момент, когда все часы в K показывали нули, все часы в движущейся системе показывали разное время, и ноль показывали только часы напротив $x=0$. Для того чтобы теория дала результат, согласующийся с идеей инвариантности скорости света, нужно пользоваться некорректно настроенными приборами. Так, для того, чтобы скорость света, измеренная по моментам прохождения фотоном координаты $x'=0$ и $x'=10^{16}$, оказалась такой же, как и в неподвижной системе, часы напротив $x=10^{16}$ нужно подкорректировать на 100 секунд (при указанной скорости системы, естественно). В процессе измерения скорости света в движущейся системе фотон все время будет догонять нужную метку на оси x' , сами метки на оси размещены чаще, чем на оси x , движущиеся часы тикают быстрее, чем в системе K , но в итоге, учитывая еще и поправку на местное время, скорость света численно снова получается равной C (но не фактически).

Представим этот процесс на $x-t$ -диаграмме, рис.6.1. Заметим, что если точки $t'=0$ нанести на $x-t$ -диаграмму, то получим линию 1, наклон которой к оси x окажется таким же, как и наклон мировой линии 2 начала движущейся системы к оси t . Сама линия 1 при этом должна

проходить через начало системы K – имеем некий аналог диаграммы Минковского, только теперь наклонена не ось x' , а линия нулей на осях местного времени, которое, в отличие от поясного местного времени, изменяется непрерывно с изменением пространственной координаты.

Относительно другой координаты наклонена не ось t' , а мировая линия начала движущейся системы. Сами же оси t' и x' движущейся системы остаются параллельными соответствующим осям неподвижной системы, рис.6.1.

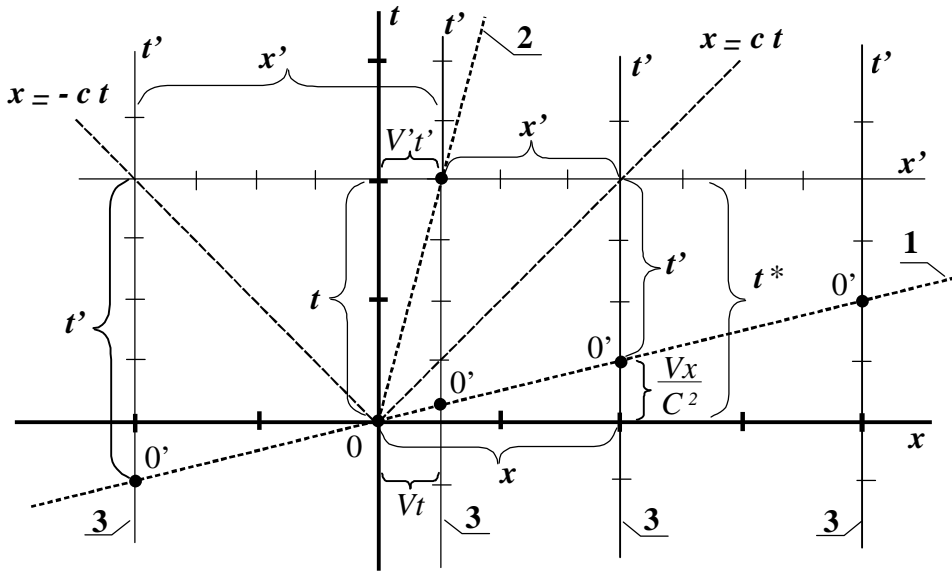


Рис.6.1. СТО на x-t-диаграммах (масштаб не соблюден).

1 – линия нулей временных осей 3 местного времени. 2 – мировая линия начала координат системы K' . Фигурными скобками обозначены величины, входящие в преобразования Лорентца. t^* - время в движущейся системе без поправки на местное время. На рисунке изображена ситуация $x/t=c=1, x'/t'=c'=1$.

Для доказательства этого утверждения нужно сравнить поправки Vt и Vx/C^2 для одинаковых отрезков на осях x и t , рис. 6.1. В соответствии с рисунком, $x=Ct$, поэтому:

$$\frac{Vx}{C^2} = Vt \quad (6.4)$$

После подстановки $x=Ct$, имеем $C=1$, что соответствует условию построения рисунка 6.1 – равенству пространственной и временной единиц.

Как видно из рисунка, если от x отнять Vt и разделить это на коэффициент G , получим величину x' – как и прежде, имеем наглядное представление пространственного преобразования Лорентца, утверждающего, что цена деления пространственной оси движущейся системы уменьшается.

Если от t отнять поправку на местное время Vx/C^2 и разделить это на G , полу-

чим t' во временном преобразовании Лорентца. Таким образом, три фактора вместе – сокращение длины, увеличение темпа хода движущихся часов и введение поправки на местное время – приводят к сохранению прежнего численного значения скорости света. При движении фотона в противоположную сторону соответствующие поправки не вычитаются, а добавляются, в итоге снова получается C .

Естественно, первым делом у нас возникает вопрос: а как же в СТО получали до сих пор «замедление времени» (которое к тому же «подтверждается экспериментально» в опытах с мюонами и пи-мезонами), если в самом преобразовании содержится информация об «ускорении времени»? Ответ на этот вопрос не простой. Первым делом нужно напомнить, каким образом в СТО получают формулу $\Delta t' = \Delta t \cdot G$, и проиллюстрировать этот процесс на x-t-диаграмме.

В літературі для визначення довжини деякого процесу за даними вимірювань в різних системах координат знаходять різницю показань годин в кінці і на початку процесу [6]. При цьому передполагается, що години розміщені в початку рухомої системи. Нехай для системи K початок процесу відбувається в

точці x_1 , а кінець – в точці x_2 , причому $x_2 - x_1 = V \Delta t$. Зв'язок між t_2 і t'_2 , а також t_1 і t'_1 шукають з допомогою перетворень Лоренца:

$$t'_2 = \frac{t_2 - Vx_2/C^2}{G} \quad \text{і} \quad t'_1 = \frac{t_1 - Vx_1/C^2}{G} \quad (6.5)$$

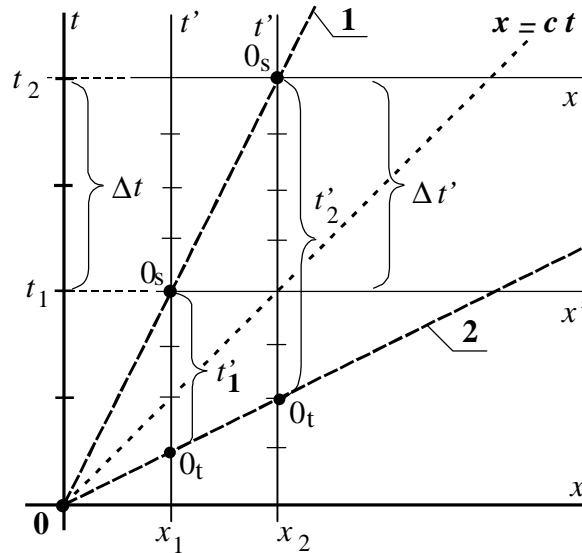


Рис.6.2. К виводу співвідношення інтервалів часу в СТО (масштаб не дотримано).

1 – світлова лінія початку рухомої системи. 2 – лінія нулів часової осі місцевого часу. 0_s – початок просторової осі, 0_t – початок часової осі місцевого часу.

Откуда

$$\begin{aligned} \Delta t' &= t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - (V/C^2)(x_2 - x_1)}{G} = \\ &= \frac{\Delta t - (V/C^2)V \Delta t}{G} = \frac{\Delta t (1 - V^2/C^2)}{G} = \Delta t G \end{aligned} \quad (6.6)$$

Процес виводу (6.6) графічно представлений на рисунку 6.2. Як видно з рисунка, різниця між t'_2 і t'_1 не дорівнює зображеному значенню $\Delta t'$, яке відповідає інтервалу Δt в нерухомій системі. Розрахункова величина менше, ніж $\Delta t'$, бо від t'_2 віднімається більше, ніж це потрібно для того, щоб отримати $\Delta t'$ (на рисунку ціна ділення осей рухомої системи показана для зручності зменшеною в два рази). В цьому і заключається причина того, що розрахунковий $\Delta t'$ виявився чисельно (по кількості позначок на своїй осі) менше, ніж Δt , хоча ціна ділення на осі t' менше, ніж на осі t . В цьому, власне-

но, і заключається весь «секрет» виводу співвідношення інтервалів часу в СТО. Без $x-t$ -діаграмм виявити цей секрет було б дуже складно. Абстрактність символічної математики часто не дозволяє побачити сутність математических операцій. Тут ми маємо наочну демонстрацію цінності $x-t$ -діаграмм.

В дійсності співвідношення між інтервалами часу потрібно отримувати з часового перетворення Лоренца в диференціальній формі. З (6.2) маємо:

$$dt' = \frac{dt - \frac{V}{C^2} dx}{G} \quad (6.7)$$

Ураховуючи, що $x = const$, маємо $dx = 0$, отже

$$dt' = \frac{dt}{G} \quad (6.8)$$

Після інтегрування маємо:

$$\int_0^{t'} dt' = \int_0^t \frac{dt}{G} \quad (6.9)$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{G} \quad (6.10)$$

Как видим, во временном преобразовании Лорентца на самом деле «защита» информация об ускорении темпа хода

хронометров по мере увеличения скорости, а не о замедлении, как об этом утверждают в СТО. Этот результат находится, естественно, в согласии с (6.2). Величина $\Delta t'$ на рисунке 6.1 обозначена как t^* , а величина Δt – как t .

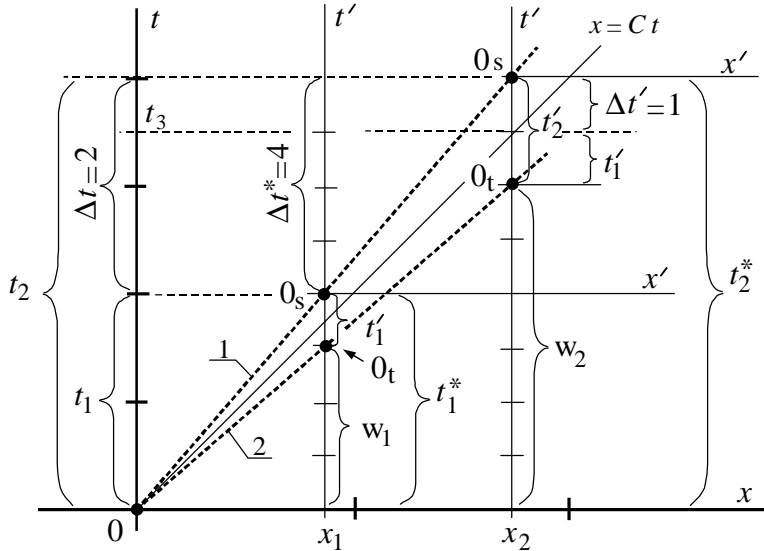


Рис.6.3. К выводу соотношения интервалов времени, случай $V=0,866 C$, масштаб соблюден. 1 – мировая линия начала движущейся системы. 2 – линия нулей временной оси местного времени. W_1, W_2 – поправки на местное время. Δt^* – интервал времени в движущейся системе без учета поправки на местное время. Величине t_1 сопоставляется не t_1^* , а разница $t_1^*-W_1$. Величине t_2 сопоставляется не t_2^* , а $t_2^*-W_2$. Величине Δt в СТО математически сопоставляется не Δt^* , а величина $\Delta t'$.

На рисунке 6.3 представлена та же ситуация, что и на рисунке 6.2, но с соблюдением масштаба. При скорости $V=0,866 C$ цена деления на осях движущейся системы уменьшается в два раза, т.е. $G=0,5$. Как видно из рисунка, в этом случае поправки на местное время $W_1=Vx_1/C^2G$ и $W_2=Vx_2/C^2G$ существенно превышают сами значения t'_1 и t'_2 , получаемые из временного преобразования Лорентца. Несмотря на уменьшение цены деления на оси времени в два раза, учет местного времени приводит к тому, что $\Delta t'$ в данном примере получилось равным всего лишь одному уменьшенному делению, что находится в согласии с формулой $\Delta t' = G\Delta t$, но противоречит ситуации, изображенной на рис. 6.2 или 6.3. В действительности же, в связи с увеличением темпа хода движущихся часов, интервал времени по оси движущейся системы

должен получаться численно в два раза большим, $\Delta t^*=t_2^*-t_1^*=8-4=4$. Величина t'_1 на рисунке изображена дважды – один раз на своем месте, второй раз для сравнения с величиной t'_2 и демонстрации способа получения величины $\Delta t'$ математическим путем. Как видно из рисунка 6.3, для того, чтобы $\Delta t'$ получилось равным единице, в движущейся системе измерения нужно начинать не в момент, t_1 , как это должно быть в соответствии с условиями измерения, а в некий момент t_3 . Некорректность подобных «измерений» очевидна.

Поскольку рисунок 6.3 построен в соответствии с преобразованиями Лорентца, из него видно, что в этих преобразованиях на самом деле «защита» еще и информация о равноправности систем координат. Приближенно можно считать, что $x_1=2$ и $x_2=4$ (на самом деле эти точки

находятся несколько правее, напротив пересечения осей x' с прямой $x=Ct$). Из рисунка видно, что $\Delta x \approx 2$, $\Delta t \approx 2$, $\Delta x' \approx -4$, $\Delta t' \approx 4$, откуда $V' = -V \approx 1$. Однако, если пользоваться расчетным значением $\Delta t' = 1$, учитывающим поправку на местное время, получим $V' = -4$.

Математически $V' = -V$ получить не трудно. Для этого нужно взять преобразования Лорентца в дифференциальной форме, и учесть, что произвольным образом выбранная точка покоится, т.е. $x = \text{const}$, или $dx = 0$.

$$dx' = \frac{dx - Vdt}{G} = -\frac{Vdt}{G} \quad (6.11)$$

$$dt' = \frac{dt - Vx/C^2}{G} = \frac{dt}{G} \quad (6.12)$$

$$V' = \frac{dx'}{dt'} = -V \quad (6.13)$$

Нетрудно увидеть, что в процедуре вывода (6.13) была утеряна информация о местном времени, а в (6.12) содержится информация не о замедлении, а об «ускорении» времени. Уплотнение меток на оси пространства сопровождается уплотнением меток на оси времени, в результате получается $V' = -V$. Этот вывод в рамках понятий СТО является правильным, хотя и противоречит эксперименту. Однако, если попытаться получить (6.13) через «дельты», то с учетом общепринятого в СТО (6.6), а также известного $\Delta x' = \Delta x/G$, имеем:

$$V' = \frac{\Delta x'/G}{\Delta t \cdot G} = \frac{V}{G^2} = \frac{V}{1 - V^2/C^2} \quad (6.15)$$

Результат (6.15) на самом деле указывает на то, что выражение (6.6) противоречит преобразованиям Лорентца, т.е. (6.6) в рамках СТО является некорректным.

7. СТО на диаграммах Минковского

На диаграммах, предложенных Минковским, оси пространства и времени в движущейся системе просто наклоняются на одинаковый угол, зависящий от скорости движущейся системы, [1,2,5]. При этом цены делений на пространственной

и временной осях изменяются в одинаковой пропорции, причем в сторону увеличения цены деления, рис. 7.1. Отметим, что на диаграммах Минковского всем материальным объектам приписывается необходимость движения вдоль мировой линии, но это почему-то не касается самой движущейся системы – достаточно поворачивать оси координат.

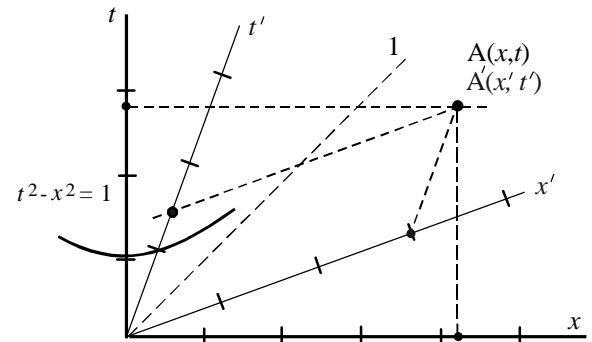


Рис.7.1. СТО на диаграмме Минковского, [3].

По мере увеличения скорости движения системы, ее оси все больше наклоняются, и в пределе сливаются с мировой линией фотона 1. Цены деления на осях x' и t' одинаковы. Для определения цены деления на шкале t' используют гиперболу $t^2 - x^2 = 1$. Цена деления движущейся оси t' при этом получается увеличенной по сравнению с осью t , что согласуется с результатами по исследованию времени жизни движущихся мюонов. На пространственной оси цена деления также увеличена, а это противоречит пространственному преобразованию Лорентца и результатам экспериментов Майкельсона.

В СТО как будто бы никто не отрицает, что движущиеся тела сокращают свои размеры (иначе эксперименты Майкельсона не объяснить), а хронометры замедляют свой ход (иначе не объяснить эксперименты с мюонами). Однако на диаграммах Минковского отражена существенно другая картина – замедление темпа хода хронометров сопровождается не уменьшением, а увеличением размеров движущихся тел. Цена деления на временной оси определяется с помощью гиперболы $t^2 - x^2 = 1$, что и в самом деле соответствует увеличению цены деления на оси t' , т.е. «замедлению времени». Цена деления на пространственной оси при этом ищется не из преобразований Лорентца, а просто объявляется равной цене

деления временной оси (иначе никак не получить то же самое числовое значение для скорости фотонов, что и в неподвижной системе, $C=x/t'$), а это уже соответствует не сокращению тел в направлении движения, а их удлинению, и противоречит экспериментам Майкельсона.

Выводы

На $x-t$ -диаграммах можно представить любую теорию относительности, при этом сущность теории удастся представить наглядно. Кроме того, на $x-t$ -диаграммах удастся наглядно представить и принцип соответствия.

Солитонная теория относительности согласуется с принципом соответствия, и это хорошо видно из $x-t$ -диаграмм. Все процессы, в том числе и движущиеся часы, замедляют свой ход.

Представление СТО на $x-t$ -диаграмме наглядно демонстрирует физический смысл временного преобразования Лорентца, сущность и вклад поправки на местное время. Движущиеся часы в соответствии с преобразованиями Лорентца должны ускорять темп хода по мере увеличения скорости системы, что противоречит экспериментам с мюонами и пимезонами.

Специальная теория относительности

противоречит принципу соответствия – на больших расстояниях поправка на местное время даже при малых скоростях оказывается весьма существенной.

На диаграммах Минковского СТО представлена некорректно, по крайней мере в связи с тем, что цена деления на пространственной оси изображается не уменьшенной, а увеличенной, что противоречит как преобразованиям Лорентца, так и экспериментам Майкельсона.

Литература

1. Тейлор Э.Ф., Уилер Дж.А. Физика пространства и времени. – Москва: Мир, 1971. – 320 с.
2. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. – Москва: Мир, 1972. – 368 с.
3. Чаварга М.М. Відносний рух солітонів у світлоносному ефірі. // Науковий вісник Ужгородського університету, серія «Фізика», випуск 7, 2000. – С.174–194.
4. www.chavarga.iatp.org.ua
5. Бйглане Х.Х. В мире больших скоростей. – Москва: Наука, 1967. – 364 с.
6. Ландсберг Г.С. Оптика. – Москва: Наука, 1967. – 928 с.

RELATIVITY THEORIES ON $x-t$ -DIAGRAMS

N. Chavarga

Uzhgorod National University, 46, Pidhirna Str., 88 000, Uzhgorod, Ukraine

E-mail: chavarga@mail.uzhgorod.ua

The way of representation of events on $x-t$ -diagrams for Galileo's relativity theory, and also for the theories, in which the division value of the axes of space and time coordinates depends on the motion state, is stated. The comparison with Minkowski's diagrams is given.