О постулате постоянства скорости света в СТО[1)].

В.А. Касимов (E-mail: *quadrica-m@mail.ru*)

On the postulate of the constancy of the speed of light in the STR

Анализ гипотезы и следствий из неё
The analysis of the hypothesis and conclusions of it

Вопрос о том, так ли необходим постулат о постоянстве скорости света для построения Специальной Теории Относительности был поставлен и рассмотрен, по-крайней мере, двумя независимыми авторами [1,2]. Ответ на этот вопрос методологически оказывается весьма важным в связи с осознанием того факта, что исходными посылками вывода преобразований Галилея и Лоренца являются одни и те же базовые свойства субстанциональных пространства и времени Ньютона. Оказалось, что в самой классической физике "скрывается" противоречие в свойствах субстанциональных пространства и времени. В чем суть этого противоречия? В статье предпринимается попытка ответить на этот вопрос.

Отметим, что авторы упомянутых работ получили свои выводы вообще избегая упоминания слов "свет" и "скорость его распространения".

Арифметизация пространственно-временных отношений

Введём после АА Фридмана [3] понятие арифметизации пространственно-временных отношений. В результате выполнения процедуры арифметизации каждая точка пространства получает тройку координат (x, y, z). Разместив в каждой точке пространства часы, мы получим 4-систему координат. Единственным требованием к результату арифметизации на данном этапе является выполнение условия непрерывности: бесконечно близким пространственно-временных событиям должны соответствовать бесконечно близкие точки концептуального 4-пространства. Обозначим эту систему координат как систему отсчёта Σ[2)] и назовём её лабораторной системой отсчёта. Сам результат арифметизации образно можно представить как возможность в каждой точке пространства и в каждый момент времени "найти ярлык" с четвёркой координат (t, x, y, z). Необходимо только помнить, что эта четвёрка чисел получена как результат произвольной арифметизации с произвольной метрикой, а "длины" и "промежутки времени", как характеристики смежных точек множеств, имеют ничем не нормированные меры Жордана.

Рассмотрим вторую систему отсчёта Σ', которая получается *переобозначением* координат лабораторной системы согласно формулам:

$$\begin{aligned} x' &= x - V\,t\,, \\ t' &= t\,. \end{aligned} \tag{1}$$

Если мы проследим из системы Σ за точкой $x' = 0$ начала координат системы Σ', то увидим, что координата этой точки, в силу первого соотношения (1), $x = V\,t$. То есть система Σ' в лабораторной системе отсчёта движется со скоростью V вдоль общей оси X.

Введём в рассмотрение третью систему отсчёта Σ'', которая получается также переобозначением координат лабораторной системы, но уже согласно формулам:

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{x - V\,t}{\sqrt{1 - V^2}}, \\ t'' &= \frac{t - V\,x}{\sqrt{1 - V^2}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Если, как и в предыдущем случае, мы проследим из системы Σ за точкой $x'' = 0$ начала координат системы Σ'', то увидим, что координата и этой точки, в силу первого соотношения (2), $x = Vt$. То есть и система Σ'' в лабораторной системе отсчёта движется со скоростью V вдоль общей оси X.

[1)] Так получилось, что статья [5] появилась раньше этой работы и потому её результаты оказались недостаточно убедительными. Цель данной работы восполнить пробел в аргументации. См. также [6,7]

[2)] Формально системой отсчёта называют такую систему, арифметизация пространственно-временных отношений в которой может быть реализована с помощью реальных физических процедур.

В результате переарифметизации пространственно-временных отношений по формулам (1) и (2) наблюдатели, связанные с системами отсчёта Σ' и Σ'', получат свой "набор этикеток" для обозначения координат 4-событий[3)] .

Возможности описания движения.

Решим "задачу о встрече" двух наблюдателей. Собственно, для решения задач такого типа и возник координатный метод арифметизации. Понятий длины, длительности и их измерений этот метод не требует и не предлагает.

Пусть наблюдатель лабораторной системы Σ назначил встречу наблюдателям, связанным с системами Σ' и Σ'' в точке x в момент времени t. Сам он начал движение из точки $x = 0$ в момент времени $t = 0$. Для достижения точки встречи он должен двигаться со скоростью $v = x/t$.

Рассмотрим возможности "угадать" эту точку и попасть именно туда и в нужный момент времени наблюдателями систем Σ' и Σ'' с переарифметизированными координатами пространственно-временных событий согласно (1) и (2), используя только свои координатные данные и свои законы сложения скоростей.

1. Координаты точки встречи в системе Σ' определяются согласно (1). Если наблюдатель системы Σ' начал движение из точки $x' = 0$ в момент времени $t' = 0$, то он должен будет двигаться со скорость v' , которую он должен определить согласно своему закону сложения скоростей из (1). Имеем

$$dx' = dx - V\,dt\,, \qquad dt' = dt,$$

откуда следует

$$v' = v - V. \tag{a}$$

Как и ожидалось, мы получили закон сложения скоростей, по форме совпадающий с классическим.

Если наблюдатель системы Σ' будет двигаться по показаниям "перенормированного" спидометра согласно (1), то он должен будет попасть в заданную наблюдателем лабораторной системы отсчёта. Проверим это.

В точке встречи наблюдателей (x', t') по координатам системы Σ' должно выполняться условие

$$x' = v't'\,. \tag{b}$$

Подставив (1), (a) в (b) получим: $x - Vt = (v - V)t = vt - Vt$ или

$$x = v\,t\,. \tag{c}$$

2. Координаты точки встречи в системе Σ'' определяются согласно (2). Если наблюдатель системы Σ'' начал движение из точки $x'' = 0$ в момент времени $t'' = 0$, то он должен будет двигаться со скорость v'' , которую он должен определить согласно своему закону сложения скоростей из (2). Имеем

$$dx'' = \frac{dx - V\,dt}{\sqrt{1 - V^2}}, \qquad dt'' = \frac{dt - V\,dx}{\sqrt{1 - V^2}},$$

откуда следует

$$v'' = \frac{v - V}{1 - vV}. \tag{a'}$$

Как и ожидалось, мы получили закон сложения скоростей, по форме совпадающий с релятивистским.

Если наблюдатель системы Σ'' будет двигаться по показаниям "перенормированного" спидометра согласно (2), то он должен будет попасть заданную наблюдателем лабораторной системы отсчёта. Проверим это.

В точке встречи наблюдателей (x'', t'') по координатам системы Σ'' должно выполняться условие

$$x'' = v''t''\,. \tag{b'}$$

Подставив (2), (a') в (b') получим:

$$\frac{x - V\,t}{\sqrt{1 - V^2}} = \frac{(v - V)\dfrac{t - V\,x}{\sqrt{1 - V^2}}}{1 - vV} \quad \text{или}$$

$$(x - V\,t)(1 - vV) = (t - V\,x)(v - V)\,, \text{то есть}$$

$$x = v\,t \tag{c'}$$

Решения задачи о встрече в разных вариантах показывают, что координация пространственно-временных событий возможна без привлечения физически метрических свойств пространства и времени. Достаточными свойствами являются упорядоченность и непрерывность. При непрерывной арифметизации и непрерывных преобразованиях 4-координат возможны и интегральные решения с привлечением понятия скорости v_x как производной: $v_x = dx/dt$.

[3)] Системы отсчёта, полученные при переарифметизации $\Sigma \to \Sigma'$ и $\Sigma \to \Sigma''$ с помощью (1) и (2) будем называть для краткости галилеевой и лоренцевой системами отсчёта в связи с их законами сложения скоростей (a) и (a'). Отметим, что это только символические названия.

Измерения. Эталоны. Метризация

Рассмотрим особенности *линейных* преобразований (1) и (2).

1. Галилеевы преобразования (1) оставляют инвариантными Жордановы меры отрезков t и x: $\Delta t = \Delta t'$ и $\Delta x = \Delta x'$ при $\Delta t = 0$.
2. Из лоренцевых преобразований (2) следует существование максимальной величины скорости. Свойство максимальности значения обеспечивает её единственность, а значит и инвариантность относительно лоренцевых преобразований (см. (a$'$)). Значение этой скорости в релятивистской системе единиц измерения (РСИ) принимается равным 1.

Таки образом, появляются две возможности для нормировки мер Жордана с помощью разных эталонов:

1. Пары классических эталонов длины и времени (галилеев случай (1)).
2. Единого эталона скорости со значением равным 1; здесь в качестве эталона используется скорость распространения света в вакууме (лоренцев случай (2)).

   В первом случае мы получаем описание пространственно-временных отношений классической динамикой, во втором – релятивистской динамикой. Именно это обстоятельство и приводит к противоречивым трактовкам пространственно-временных отношений в СТО.

С помощью непрерывных преобразований

$$\tilde{x}^i = f^i(x^k), \qquad (i,k = 0,1,2,3) \tag{3}$$

введём в рассмотрение систему отсчёта $\tilde{\Sigma}'''$. Преобразования (3) должны быть выбраны таким образом, чтобы квадрат дифференциальной формы ds^2 принял вид:

$$ds^2 = \tilde{g}_{ik}(\tilde{x}^l)d\tilde{x}^i\, d\tilde{x}^k, \quad (i,k = 0,1,2,3), \tag{4}$$

а $\tilde{g}_{ik}$ удовлетворял формальным требованиям, предъявляемым к метрическому тензору псевдориманова пространства. Эту систему отсчёта назовём *псевдоримановой*. Приставка *псевдо*-необходима для того, чтобы обозначит сигнатуру метрического тензора $\tilde{g}_{ik}$ как $(+,-,-,-)$.

Закон преобразования скоростей в этом случае, в отличие от (a) и (a$'$), будет довольно произвольным в силу произвольности самих преобразований (3) и его трудно будет назвать законом *сложения* скоростей, хотя "задача о встрече" будет иметь своё решение и в этом случае.

При достаточно гладких функциях $\tilde{g}_{ik}(\tilde{x}^l)$ в окрестности любой точки матрица $\tilde{g}_{ik}$ может быть приведена локально к диагональному виду:

$$(g^o_{ik}) = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{Vmatrix} \tag{5}$$

Нетрудно убедиться, что в этом случае (4) приобретает форму:

$$ds^2 = (d\tilde{x}^0)^2 - (d\tilde{x}^1)^2 - (d\tilde{x}^2)^2 - (d\tilde{x}^3)^2, \tag{6}$$

а при $d\tilde{x}^1 = d\tilde{x}^2 = d\tilde{x}^3 = 0$ соотношение (6) принимает вид:

$$ds^2 = (d\tilde{x}^0)^2 = d\tau^2. \tag{7}$$

Можно увидеть, что в силу (7) $d\tau$, как и ds, является инвариантом преобразований вида (3), как элемент 4-длины мировой линии. Время τ, определяемое (7), будем называть *собственным временем*, а время определяемое как $\tilde{x}^0 = \tilde{t}$, $(c = 1)$ – *координатным временем*

В общем случае (4) связь между дифференциальными элементами интервала, собственного и координатного времён даётся выражением[4)]:

$$ds^2 = d\tau^2 = \tilde{g}_{00}(\tilde{x}^l)(d\tilde{x}^0)^2? \tag{7'}$$

что обуславливает *необходимость* различения собственного и координатного времён.

[4)] ЛД Ландау, ЕМ Лифшиц. Теория поля, §84, ф. (84.1)

Главной особенностью представления (4) является инвариантность ds при произвольных непрерывных преобразованиях вида (3), следствием которой является инвариантность собственного времени τ при всех преобразования, включая (1) и (2).

Казалось бы (1) и (2) дают две альтернативы в описании пространственно-временных отношений, из которых необходимо выбрать одну. Однако (3) объединяет их и добавляет существенно новый момент. Рассмотрим это подробнее.

Первое. Измерение собственных величин - времени, длины.

Координатные величины интервала времени, длины, скорости $-\Delta t,\ \Delta x,\ v_x$, определяются соотношениями:

$$\Delta t = t_2 - t_1, \qquad \Delta x = x_2 - x_1, \qquad v_x = dx/dt.$$

Эти величины пока ещё физически не измерялись с помощью каких-либо эталонов. Единственной мерой для них является мера Жордана, а "величины" их, как континуальных подмножеств, оказываются "равными", поскольку между множествами и подмножествами их смежных значений можно установить взаимно однозначное соответствие. Все эти множества обладают единственным свойством упорядоченности. Преобразования (1) и (2) являются линейными. Это означает, что при этих преобразованиях будет сохраняться линейная упорядоченность, а значит и 4-координаты будут обладать свойством аффинности.

Таким образом, координатные пространственно-временные параметры обладают свойством изначальной упорядоченности, которая для линейных преобразований (1) и (2) приобретает аффинный (линейный) статус.

Для измерения пространственно-временных характеристик необходимо найти какие-то эталоны. Поскольку эталон по определению должен быть неизменяемым, искать эталоны необходимо среди инвариантов.

Интервал собственного времени τ является инвариантом непрерывных общих преобразований вида (3). Поэтому величина τ будет одна и та же в системах отсчёта $\Sigma^{'}, \Sigma^{''}, \widetilde{\Sigma}^{'}{''}$ в точке с координатами, связанными преобразованиями координат (1), (2), (3). Измерение осуществляется в системе отсчёта Ξ, которая получается с помощью преобразований координат $\xi^i = \xi^i(x^{i*})$ при выполнении условий:

$$d\xi^1 = d\xi^2 = d\xi^3 = 0, \qquad g_{00}^{(\Xi)} = 1\,. \tag{8}$$

Здесь: ξ^i – координаты точки в системе Ξ, в которой измеряется интервал собственного времени; x^{i*} – координаты одной из систем $\Sigma^{'}, \Sigma^{''}, \widetilde{\Sigma}^{'}{''}$, если речь идёт об одной из них, либо любой другой. Эти условия определяют требования к процедуре измерения собственного времени: первое из них означает измерение времени неподвижными часами, второе – одинаковость "хода" часов в разных точках пространства для получения возможности синхронизации разноместных часов, то есть согласования координатного и собственного времени. В системе отсчёта Ξ собственное время τ совпадает с интервалом координатного времени ξ^0: $\tau = \xi_2^0 - \xi_1^0$.

Измерение собственных длин или пространственных расстояний осуществляется преобразованием координат $\eta^i = \eta(x^{i*})$ к системе отсчёта Θ при выполнении условий:

$$\eta^0 = \mathrm{const}\ \text{и}\ g_{0\alpha}^{(\Theta)} = 0, (\alpha = 1,2,3); \tag{9}$$
синхронизация часов вдоль измеряемой траектории .

Здесь: η^0 – временн**а**я координата точки в системе Θ. Требование на компоненты метрического тензора вытекают при выделении пространственной части $\gamma_{\alpha\beta}$ из 4-метрического согласно [5)]

$$\gamma_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta} + \frac{g_{0\alpha}g_{0\beta}}{g_{11}}\,. \tag{10}$$

Тогда квадрат длины траектории определяется по формуле

$$l^2 = \int\limits_{\eta^0=\mathrm{const}} \gamma_{\alpha\beta}dx^\alpha\, dx^\beta\,. \tag{11}$$

Интегрирование в (11) производится по траектории, лежащей на гиперповерхности $\eta^0 = \mathrm{const}$.

[5)] ЛД Ландау, ЕМ Лифшиц. Теория поля, §84, ф. (84.7)

Условия на метрический тензор (8) и (9) определяют *синхронную* систему отсчёта.

Второе. Выражение (11) для длины не обладает свойством 4-ковариантности. Поэтому для измерения скоростей необходим другой подход. Воспользуемся тем, что представление (5) псевдоевклидовости является возможным для каждой точки 4-псевдориманова пространства, а единственное значение максимальной скорости, определяемое (a′) является инвариантом преобразований (2). Это говорит о том, что именно она и должна быть физически измеримой. Это значение полагается равным 1. Таким образом, новыми мерами измерения пространственно-временных отношений становятся эталон времени и эталон максимально возможной скорости распространения сигнала. Однако, как нетрудно заметить, инвариантность 4-интервала есть просто другое оформление инвариантности максимальной скорости. Приняв её значение равным единице мы приходим к единому эталону измерения пространственно-временных отношений вместо отдельных длины и времени.

Третье. Аффинная ковариантность. Вид (5) локального представления для метрического тензора g^{o}_{ik} также сохраняется при преобразованиях (2), что приводит к формулировке *принципа локальной лоренц-инвариантности (ЛЛИ)*. Преобразование (2) сохраняет локальный вид метрики (5), что и является предметом выполнения локальной лоренц-инвариантности.

Выводы

Ни одна из систем $-\Sigma'$, Σ'' , $\tilde{\Sigma}'''$, не "нагружена" метрическими свойствам. Изначально 4-координаты этих систем отсчёта обладают только свойством упорядоченности, а системы Σ' , Σ'' – свойством линейной упорядоченности, то есть аффинностью. Физически метрическая же измеримость возникает при использовании для измерений эталонов.

Таким эталоном в СТО является максимальная скорость распространения сигнала c в лоренцевой системе отсчёта. Свойство максимальности обеспечивает ей единственность значения и инвариантность при преобразования координат (2), что соответствует требованиям для эталона измерения. Однако этот эталон оказывается локальным и не обладает свойством общей ковариантности. Благодаря свойству локальной инвариантности вместо второго постулата СТО на сцену вступает *принцип локальной лоренц-инвариантности (LLI)*, который является одой из составных частей общего принципа эквивалентности Эйнштейна (*EEP*)[*)]. Принцип *LLI* утверждает ковариантность уравнений физики относительно лоренцевых преобразований (2) и даёт выход концепции координатного времени, обладающего аффинным свойством. На сегодняшний день сам принцип подтверждён с феноменальной точностью по масштабам макрофизики.

Эта же идея позволяет наделить метрическим свойством собственное время, величина которого инвариантна при любых непрерывных преобразованиях псевдориманова пространства. В качестве эталона измерения этого времени выступает величина максимальной скорости c. Инвариантность 4-интервала, непосредственная связь 4-интервала с собственным временем, локальность (одноместность) измерения собственного времени – всё это и обуславливает возможность измерения собственного времени с помощью скорости эталонного сигнала с максимальной и метризованной скоростью c. В релятивистской системе единиц измерения полагается $c = 1$. *Существенным является тот факт, что скорость эта может быть измерена и в галилеевой системе отсчёта с помощью классических эталонов длины и времени.* Современная физика ассоциирует максимальную скорость c со скоростью распространения света в вакууме.

[*)] Общий принцип эквивалентности Эйнштейна (*EEP*):
слабый принцип эквивалентности (*WEP*),
принцип локальной лоренц-инвариантности (*LLI*),
принцип локальной позиционной инвариантности (*LPI*).

Литература

[1]. ЯП Терлецкий. *Вывод преобразований Лоренца без постулата о постоянстве скорости света.* В кн. Парадоксы теории относительности. М., "Наука", 1966, (стр. 23). https://www.dropbox.com/s/pjdb2qxxyu4eapi/Terletskii-2.pdf?dl=0

[2]. НД Мермин. *Теория относительности без постулата о постоянстве скорости света.* В сб. '86 Физика за рубежом. Серия Б. Сборник статей. М., "Мир". 1986, (стр. 173). https://www.dropbox.com/s/3qrsqm5e213wffd/Mernin-2.pdf?dl=0

[3]. АА Фридман. *Мир как пространство и время.* М., "Наука", 1965 г. https://www.dropbox.com/s/ofsb4p9xub99s3t/Fridman.djvu?dl=0

[4]. ВА Касимов. *Парадокс близнецов*. Новосибирск. 2014. https://www.academia.edu/32443266/

[5]. ВА Касимов. *О втором постулате СТО*. Новосибирск. 2015. https://www.academia.edu/32452588/

[6] ВА Касимов. *Пространство, время, движение*. "Сибпринт", Новосибирск, 2013 г. https://www.academia.edu/36065258/

[7] Касимов ВА. *Специальная теория относительности (без 2-го постулата). Общая теория относительности принципы).* "Сибпринт", Новосибирск, 2013 г. https://www.academia.edu/35877014/

*****

Для связи:
quadrica-m@mail.ru

Авторский семинар

http://my.mail.ru/community/physiks.princips/?ref=cat

http://quadrica.ucoz.net/
https://independent.academia.edu/KasimovVladimir
https://vk.com/public128913510
https://www.facebook.com/notes/1557999174417186/

http://orcid.org/0000-0002-1435-9220

*****

В.А. Касимов. О постулате постоянства скорости света в СТО

Аннотация
Вопрос о том, так ли необходим постулат о постоянстве скорости света для построения Специальной Теории Относительности был поставлен и рассмотрен, по-крайней мере, двумя независимыми авторами [1,2]. Ответ на этот вопрос методологически оказывается весьма важным в связи с осознанием того факта, что исходными посылками вывода преобразований Галилея и Лоренца являются одни и те же базовые свойства субстанциональных пространства и времени Ньютона. Оказалось, что в самой классической физике "скрывается" противоречие в свойствах субстанциональных пространства и времени. В чем суть этого противоречия? В статье предпринимается попытка ответить на этот вопрос.

Отметим, что авторы упомянутых работ получили свои выводы вообще избегая упоминания слов "свет" и "скорость его распространения".

V.A. Kasimov. On the postulate of the constancy of the speed of light in the STR

Abstract
The question of whether the necessary postulate of the constancy of the speed of light for the construction of the Special Theory of Relativity was raised and discussed, at least two independent authors [1, 2]. The answer to this question is methodologically very important in recognition of the fact that the foundations of the output of the Galilean transformations and Lorentz are the same basic properties of substantial space and time of Newton. It turned out that in the classical physics "hiding" a contradiction in the substantial properties of space and time. What is the essence of this contradiction? The article attempts to answer this question.

Note that the authors of the mentioned works have received their findings generally avoiding mention of the words "light" and "the speed of its spread".