ГРАВИТАЦИЯ Том 3 Выпуск 1 1997
Журнал по дискуссионным проблемам гравитационной физики .... стр. 76–82

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СТО

СВЕРХСВЕТОВЫЕ СКОРОСТИ, НЕСОБСТВЕННЫЕ ВРАЩЕНИЯ И ЗАРЯДОВАЯ СИММЕТРИЯ

Г. М. Тележко[1,2]

[1] *ВИЧП "Информаналитика", С.-Петербург, Россия*
[2] *Научно-образовательное обьединение "Земля и Вселенная", С.-Петербург, Россия*

В статье рассматривается возможность непосредственного наблюдения движений со скоростями, большими скорости света. Показано, что из инвариантности интервала в специальной теории относительности следует невозможность наблюдения сверхсветовых перемещений. Однако симметрия скорости, входящей в классические преобразования Лоренца, относительно скорости света физически реальна и проявляется как зарядовая симметрия (обращение времени) и/или симметрия зеркального пространственного отражения. CPT-инвариантность — естественное следствие этой симметрии, которая математически соответствует несобственным 4-мерным вращениям.

Возможность существования тахионов — частиц, движущихся в вакууме со скоростью, большей скорости света c, не противоречит специальной теории относительности (СТО), запрещающей лишь переходы "светового барьера". Отсутствие доказательств их существования не приводит пока ни к каким трудностям в теории, тем не менее проблеме симметрии скоростей относительно скорости света посвящены сотни работ (подробная библиография приведена в [1]). Принято считать, что тахионы имеют мнимую массу при $|v| < c$ так, чтобы масса при $|v| > c$ была действительной [2], которая при этом стремится к нулю при $|v| \to \infty$, а импульс стремится к константе [3]. При ряде условий сверхсветовые перемещения должны были бы приводить к нарушению порядка следования причины и следствия, что заставляет сторонников тахионной гипотезы либо постулировать относительность разделения зависимых явлений на причины и следствия [4], либо отказываться от применения СТО в области $|v| > c$ [5], либо запрещать проявления тахионов в макроявлениях и ограничивать возможности их обнаружения такими малыми масштабами пространства-времени, где обращение во времени причинно-следственных связей, возможно, не противоречит второму началу термодинамики [6].

Обобщение СТО на область $|v| > c$ дополнением СТО постулатом реинтерпретации или "запаздывающей причинности" [3, 7] с изменением знака квадрата интервала при формальном переходе светового барьера означает, что мир тахионов существует в трех времениподобных измерениях и одном пространственноподобном, если только и досветовой, и сверхсветовой миры не $(3+3)$-мерны [3]. Известна попытка исключить мнимые величины сверхсветовых преобразований введением досветовой системы отсчета, одна из пространственных осей которой совмещается с мировой линией тахиона (“стоп-время” тахиона) [8].

Эти попытки, кроме того, что узаконивают обращение причинно-следственных связей при известных условиях, ведут также к признанию неопределенности отношений “тахион — антитахион” и “частица — античастица”, находящихся в зависимости от выбора инерциальной системы отсчета. В [10] предлагается интересное обоснование возможности наблюдения сверхсветовых перемещений, не нарушающих причинности, требующее, однако, введения в теорию некоторой гипотетической среды (гипержидкости) для распространения сверхсветовых сигналов. В настоящей статье уточнены выводы, следующие из представлений ее автора о последовательном применении СТО к сверхсветовой области, изложенных в более ранней работе [11] и которые с его точки зрения, позволяют и без дополнений к классической СТО рассмотреть свойства объектов в области $|v| > c$. Повторим основные положения [11]. Под последовательным применением СТО будем понимать экстраполяцию на сверхсветовую область: а) постулата о равноправии всех инерциальных систем в смысле описания любых физических явлений, в частности, в трехмерном пространстве и с одномерным временем (при этом квадраты пространственных отрезков отличаются знаком от квадратов временных интервалов, для определенности будем полагать последние отрицательными в любых системах отсчета; б) утверждения о применимости преобразований Лоренца к дифференциальным физическим величинам.

Пусть в некоторой инерциальной системе отсчета (далее — неподвижная система) координаты двух событий равны соответственно (icT, X) и $(icT + ic\,dT, \mathbf{X} + d\mathbf{X}$, т.е. квадрат интервала $i\,dS$ между этими событиями в пространстве-времени Минковского равен:

$$(i\,dS)^2 = -(c\,dT)^2 + |d\mathbf{X}|^2 = (ic\,dT)^2 + |d\mathbf{X}|^2. \tag{1}$$

В системе отсчета, движущейся относительно первой с постоянной скоростью (далее — подвижная система), тот же интервал выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}(i\,dS)^2 = \left(ic\frac{dT - v\,dX_1/c^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{dX - v\,dT_1}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}\right)^2 + dX_2^2 + dX_3^2 \equiv \\ \equiv (ic\,dT')^2 + (dX_1')^2 + (dX_2')^2 + (dX_3')^2,\end{aligned} \tag{2}$$

где dX_1, dX_1' — проекции интервала на направление перемещения подвижной системы в неподвижной и подвижной системах отсчета соответственно, $dX_2 = dX_2'$, $dX_3 = dX_3'$ — проекции интервала на взаимно ортогональные направления, ортогональные направлению движения подвижной системы; $ic\,dT'$ — проекция интервала на ось времени движущейся системы.

В обеих системах отсчета интервал имеет одну времениподобную проекцию, выражаемую в (1) и (2) мнимым числом, и три пространственноподобных, выражаемых в (1) и (2) действительными числами. Две действительные проекции, перпендикулярные направлению относительного перемещения, не преобразуются, а действительная проекция, параллельная направлению относительного перемещения, и мнимая (времениподобная) — преобразуются при переходе от неподвижной системы к подвижной по Лоренцу.

Переходя к интересующему нас случаю сверхсветовых скоростей, обнаруживаем, что в правой части (2) при подстановке $|v| > c$ три проекции интервала остаются действительными: $ic\,dT'$, dX_2' и dX_3' и по-прежнему имеется одна мнимая:

dX'_1. Исходя из равноправия инерциальных систем, мы считаем, что и в "сверхсветовых" системах отсчета интервал имеет три пространственно-подобных проекции, измеряемых действительными единицами длины, две из которых, перпендикулярные направлению движения, не преобразуются: $dX'_2 = dX_2$ и $dX'_3 = dX_3$, и одну времениподобную проекцию, измеряемую мнимыми единицами длины. Третьей пространственно-подобной проекцией X''_1, параллельной направлению относительного перемещения, необходимо оказывается единственная оставшаяся действительная величина $ic\,dT' = (dX_1 - dT c^2/v)(1 - c^2/v^2)^{1/2}$, а единственной времениподобной проекцией $ic\,dT''$ оказывается единственная мнимая величина $dX'_1 = -ic(dT + dX_1/v)/(1 - c^2/v^2)^{1/2}$, и преобразования координат в рассматриваемом случае оказываются совпадающими с преобразованиями Лоренца с точностью до знака времениподобной проекции и при условии замены $v \to c^2/v$.

А. Пуанкаре [9] первым указал на тождественность преобразований Лоренца (с мнимой временной координатой) и преобразований поворота в плоскости осей icT и X_1 на мнимый угол φ', определяемый соотношениями:

$$\begin{gathered} ic\,dT' = ic\,dT\cos\varphi' + dX_1\sin\varphi', \\ dX'_1 = dX_1\cos\varphi' - ic\,dT\sin\varphi', \\ \varphi' = \frac{1}{i}\ln(\cos\varphi' + i\sin\varphi') = \frac{1}{i}\ln\left(\frac{1}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} + i\frac{v/ic}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}\right) = \\ = \frac{1}{2i}\ln\frac{1+v/c}{1-v/c}. \end{gathered} \tag{3}$$

Вновь полученные для случая $|v| > c$ преобразования координат являются частным случаем преобразований координат при четырехмерном повороте на комплексный угол φ', действительная часть которого равна нечетному числу $\pi/2$:

$$\begin{gathered} \varphi' = \frac{1}{2i}\ln\left(-\frac{1+c/v}{1-c/v}\right) = \frac{1}{2i}\left(\ln(-1) + \ln\left(\frac{1+c/v}{1-c/v}\right)\right) = \\ = \frac{1}{2i}\left((2n-1)\pi i + \ln\left(\frac{1+c/v}{1-c/v}\right)\right) = (2n-1)\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2i}\ln\frac{1+c/v}{1-c/v} \end{gathered} \tag{4}$$

с инверсией или времени (при нечетных n), или координаты в направлении движения (при четных n).

Наблюдаемая скорость движения подвижной системы отсчета во всех случаях определяется следующим образом:

а) рассматривается элементарный интервал, имеющий в подвижной системе только одну не равную нулю проекцию, а именно, времениподобную (интервал собственного времени);

б) с помощью преобразований поворота на угол φ' (3) определяются времениподобная проекция $ic\,dT$ и проекция dX_1 на направление относительного перемещения в неподвижной системе отсчета;

в) наблюдаемая скорость w находится как отношение пространственноподобной проекции dX_1 к элементарному промежутку времени dT.

В случае $|v| > c$ имеем:

$$w = \left.\frac{dX_1}{dT}\right|_{dX''_k=0} = \left.\frac{dX_1}{dT}\right|_{ic\,dT'=dX_2=dX_3=0} = \left.\frac{dX_1}{dT}\right|_{dX_1 - dTc^2/v=0} = \frac{c^2}{v}. \tag{5}$$

Из (5) следует, что в последовательной СТО с инвариантным интервалом при $|v| > c$ 3-вектор v теряет смысл наблюдаемой относительной скорости, сохраняя роль (по интерпретации Пуанкаре) одного из параметров, определяющих взаимную ориентацию координатных осей двух инерциальных систем отсчета, имеющих мнимые временные оси. Наблюдаемая же относительная скорость w оказывается меньшей скорости света как при $|v| < c$, так и при $|v| > c$. Совпадающая величина $\beta = c/v$ в [8] является не наблюдаемой скоростью тахиона, а наблюдаемой скоростью часов досветовой системы отсчета, для которой мировая линия тахиона является одной из пространственных осей. Возможно, развитие предлагаемого варианта СТО покажет неслучайность "превращения" v при $|v| > c$ в фазовую скорость частицы, движущейся со скоростью w, т.е. того факта, что при $|v| > c$ меняются ролями фазовая и групповая скорости частиц.

Углы (4) не исчерпывают множества возможных поворотов в плоскости icT, X. Из соображений равноправия инерциальных систем отсчета, в частности, равноправия систем, повернутых на угол (4) по отношению к неподвижной, и систем с $\mathrm{Re}\,\varphi' = 2\pi n$ ("досветовых") мы должны еще потребовать существования инерциальных систем отсчета, повернутых на угол (4) по отношению к "сверхсветовым" системам; угол поворота этих "новых" систем по отношению к неподвижной составит с учетом замен в (4) c/v на w_0/c и w/c:

$$\varphi' = \left((2n-1)\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2i}\ln\frac{1+w_0/c}{1-w_0/c}\right) + \left((2m-1)\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2i}\ln\frac{1+w/c}{1-w/c}\right) =$$
$$= (n+m-1)\pi + \frac{1}{2i}\ln\frac{1+(1/c)(w_0+w)/(1+w_0w/c^2)}{1-(1/c)(w_0+w)/(1+w_0w/c^2)} = k\pi + \frac{1}{2i}\ln\frac{1+w_S/c}{1-w_S/c}, \tag{6}$$

где w_0 — наблюдаемая скорость движения "сверхсветовой" системы; w — наблюдаемая из "сверхсветовой" системы скорость движения "новой" системы.

Наблюдаемая скорость $w_S = (w_0 + w)/(1 + w_0 w/c^2)$ оказывается удовлетворяющей классическому правилу сложения скоростей, и поскольку абсолютные величины скоростей w_0 и w не превышают скорости света, то и наблюдаемые скорости систем, повернутых на угол (6) по отношению к неподвижной, не превышают скорости света. Таким образом, объекты, формально соответствующие, с точки зрения классической СТО, тахионам, наблюдаются во всех случаях движущимися с досветовыми скоростями. Вопрос, поставленный в [12] (о том, действительно ли тахионы движутся быстрее света), встречается здесь с вариантом определенно отрицательного ответа. Преобразования координат при четных k совпадают с преобразованиями Лоренца, а при нечетных — отличаются знаками времениподобной проекции интервала и его пространственноподобной проекции на направление относительного перемещения (вследствие инверсии $\cos\varphi'$ и $\sin\varphi'$ при изменении φ' на нечетное число π).

Существование четырех различных видов преобразований, именно:

$$\begin{aligned} dT^{(l)} &= (-1)^{[l/2]}\frac{dT - (w/c^2)dX_1}{(1-w^2/c^2)^{1/2}}, \\ dX_1^{(l)} &= (-1)^{[(l-1)/2]}\frac{dX_1 - w\,dT}{(1-w^2/c^2)^{1/2}}, \\ dX_2^{(l)} &= dX_2, \\ dX_3^{(l)} &= dX_3, \end{aligned} \tag{7}$$

(где $l = 1, 2, 3, 4$, а квадратные скобки означают целую часть), связывающих координаты в системах, движущихся с одной и той же наблюдаемой скоростью w, с координатами в неподвижной системе, — означает наличие четырех различных возможных состояний одной и той же системы:

— состояние с $l = 1$, соответствующее известным преобразованиям Лоренца со знаками "+" в правых частях (7);
— состояние с $l = 2$ с обращением времени;
— состояние с $l = 3$ с обращением времени и зеркальной пространственной структурой (преобразования со знаками "−" в правых частях (7);
— состояние с $l = 4$, характеризуемое зеркально отраженной структурой по отношению к состоянию с $l = 1$.

В каждом состоянии объект может наблюдаться с различными относительными досветовыми скоростями w и различными ориентациями в трехмерном пространстве.

Анализ преобразований проекций элементарного инвариантного интервала, может быть проведен аналогичным образом по отношению к тензорным дифференциальным величинам любого ранга. Учтем, что в пространстве-времени Минковского с мнимой осью времени нет различий в преобразованиях ковариантных и контравариантных тензоров; введем обозначение $icT = X_0$, и соответствующие компоненты тензоров будем обозначать нулевым индексом; штрихом будем отмечать компоненты, преобразованные по Лоренцу. Таким образом, для компоненты тензора произвольного ранга в состояниях $l = 1, 2, 3, 4$ будем иметь:

$$T^{(l)}_{\alpha_1,\ldots,\alpha_n}(w) = (-1)^{k_l} T'_{\alpha_1,\ldots,\alpha_n}, \tag{8}$$

где $k_1 = 0$; k_2 — количество нулевых индексов тензора; k_3 — суммарное количество нулевых и единичных индексов тензора; k_4 — количество единичных индексов тензора.

Приняв, что величины типа плотностей преобразуются по Лоренцу и применяя к ним проведенный анализ, и, переходя к интегральным величинам, мы получим для наблюдаемых массы m, электрического заряда q и углового момента J_{23} в плоскости X_2, X_3, перпендикулярной вектору наблюдаемой скорости:

а) масса (скалярная составляющая 4-импульса):

$$m = \iiint\limits_{X_1 X_2 X_3} T_{00}\, dX_1 dX_2 dX_3 =$$

$$= \begin{cases} \displaystyle\iiint\limits_{X_1^{(l)} X_2^{(l)} X_3^{(l)}} \frac{T_{00}^{(l)}}{1 - w^2/c^2}[dX_1^{(l)}(1 - w^2/c^2)^{1/2}]dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ \displaystyle = \frac{m_{\text{соб.}}}{(1 - w^2/c^2)^{1/2}}, \quad l = 1, 2, \\ \displaystyle\iiint\limits_{X_1^{(l)} X_2^{(l)} X_3^{(l)}} \frac{T_{00}^{(l)}}{1 - w^2/c^2}[-dX_1^{(l)}(1 - w^2/c^2)^{1/2}]dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ \displaystyle = -\frac{m_{\text{соб.}}}{(1 - w^2/c^2)^{1/2}}, \quad l = 3, 4, \end{cases} \tag{9}$$

где T_{00} — компонента тензора плотности энергии-импульса, которая не меняет знака в различных состояниях в связи с четным числом нулевых индексов и отсутствием единичных; $m_{\text{соб.}}$ — собственная масса объекта, выражаемая следующим образом:

$$m_{\text{соб.}} = \iiint\limits_{X_1^{(l)} X_2^{(l)} X_3^{(l)}} T_{00}^{(l)}\, dX_1^{(l)} dX_2^{(l)} dX_3^{(l)};$$

б) электрический заряд:

$$icq = \iiint\limits_{X_1 X_2 X_3} j_0 \, dX_1 dX_2 dX_3 =$$

$$= \begin{cases} \displaystyle\int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} \frac{\pm j_0^{(l)}}{(1-w^2/c^2)^{1/2}} \left[\pm dX_1^{(l)} \left(1-\frac{w^2}{c^2}\right)^{1/2}\right] dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ = icq_{\text{соб.}}, \quad l = 1,3 \\ \displaystyle\int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} \frac{\mp j_0^{(l)}}{(1-w^2/c^2)^{1/2}} \left[\pm dX_1^{(l)} \left(1-\frac{w^2}{c^2}\right)^{1/2}\right] dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ = -icq_{\text{соб.}}, \quad l = 2,4, \end{cases} \tag{10}$$

где j_0 — времениподобная компонента 4-плотности электрического тока, меняет знак одновременно с $X_0 = icT$; $q_{\text{соб.}}$ — собственный электрический заряд, выражаемый следующим образом:

$$icq_{\text{соб.}} = \int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} j_0 \, dX_1 dX_2 dX_3.$$

в) момент импульса:

$$J_{23} = \iiint\limits_{X_1 X_2 X_3} (X_2 T_{30} - X_3 T_{20}) \, dX_2 dX_3 =$$

$$\begin{aligned} &= \int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} \frac{\pm(X_2^{(l)} T_{30}^{(l)} - X_3^{(l)} T_{20}^{(l)})}{(1-w^2/c^2)^{1/2}} \left[\pm dX_1^{(l)} \left(1-\frac{w^2}{c^2}\right)^{1/2}\right] dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ &\qquad\qquad = J_{23\text{соб.}}, \quad l = 1,3, \\ J_{23} &= \int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} \frac{\mp(X_2^{(l)} T_{30}^{(l)} - X_3^{(l)} T_{20}^{(l)})}{(1-w^2/c^2)^{1/2}} \left[\pm dX_1^{(l)} \left(1-\frac{w^2}{c^2}\right)^{1/2}\right] dX_2^{(l)} dX_3^{(l)} = \\ &\qquad\qquad = -J_{23\text{соб.}}, \quad l = 2,4, \end{aligned} \tag{11}$$

где X_2, X_3 — координаты в системе центра масс; T_{20}, T_{30} — компоненты тензора плотности энергии-импульса, меняющие знак одновременно с X_0 в связи с обладанием нечетным числом нулевых индексов; $J_{23\text{соб.}}$ — момент вращения в системе центра масс (собственный), выражаемый следующим образом:

$$J_{23\text{соб.}} = \int\limits_{X_1^{(l)}}\int\limits_{X_2^{(l)}}\int\limits_{X_3^{(l)}} (X_2^{(l)} T_{30}^{(l)} - X_3^{(l)} T_{20}^{(l)}) \, dX_2^{(l)} dX_3^{(l)}.$$

Из (9)–(11) следует, что одна и та же частица в состояниях 2 и 3 имеет отношения заряда и момента вращения к массе, противоположные по знаку соответствующим отношениям в состояниях 1 и 4, т.е. наблюдается либо как частица (например, в состояниях 1 и 4), либо как античастица (в состояниях 2 и 3, соответственно), а в различных состояниях с одним и тем же знаком отношения q/m наблюдается с противоположными по знаку моментами вращения.

Случай произвольного расположения плоскости четырехмерного поворота осей по Пуанкаре и случай сложения таких поворотов в разных плоскостях, содержащих мнимую ось времени, сводятся к одному из преобразований с $l = 1, 2, 3, 4$, рассмотренных выше (в зависимости от от того, какой вычет по модулю 4 имеет число действительных углов $\pi/2$ в суммарном угле поворота оси icT' относительно оси icT) с помощью чисто пространственных поворотов, не влияющих на существо рассматриваемого вопроса.

Итак, из экстраполяции СТО на сверхсветовую область следуют выводы:

а) наблюдение объектов, движущихся со скоростями, большими скорости света, невозможно;

б) разрешаемая в СТО симметрия параметра v относительно светового барьера есть комбинированная симметрия обращения времени и/или зеркального отражения пространственной оси, параллельной вектору "фиктивной" скорости $\mathbf{v}$; иначе говоря, эта симметрия дополняет группу преобразований Лоренца несобственными вращениями или вращениями с отражением;

в) одно из проявлений этой симметрии — это симметрия частиц и античастиц, т.е. зарядовая симметрия;

г) CPT-инвариантность оказывается следствием выводов б) и в);

д) при формальном пересечении светового барьера групповая скорость частицы становится фазовой скоростью ее "зеркального" состояния, т.е. наблюдаемая групповая скорость частиц, соответствующих "сверхсветовым" состояниям, всегда меньше скорости света.

Разумеется, выводы настоящей статьи справедливы лишь в силу справедливости ее исходных допущений, любое из которых может быть однажды опровергнуто (например, обнаружением "живого" тахиона будут опровергнуты все), поэтому автор ни в коей мере не претендует на окончательное закрытие темы исследования фактически сверхсветовых движений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Философские проблемы гипотезы сверхсветовых скоростей. Под ред. Ю.Б.Молчанова. М., Наука, *1986*.
2. *Terletsky Ja.P.* Masses propres positives, negatives et imaginaires. J.Phys. et Radium, *1962*, **23**, p. 910–920.
3. *Реками Э.* Теория относительности и ее обобщения. В кн.: Астрофизика, кванты и теория относительности. М., Мир, *1982*.
4. *Csonka P.L.* Causability and faster-than-light particles. N.P. *1970*, **B21**, p. 436–444.
5. *Перепелица В.Ф.* Принцип причинности, теория относительности и сверхсветовые сигналы. В кн.: Философские проблемы сверхсветовых скоростей. М., Наука, *1986*.
6. *Терлецкий Я.П.* Парадоксы теории относительности. М., Наука, *1966*.
7. *Maccarone G.D., Pavsic M., Recami E.* Formal and physical properties of the generalized (subluminal and superluminal) Lorentz transformations. NC, *1983*, **B73**, p. 91–111.
8. *Косевич А.М.* Кинематика и динамика сверхсветовых движений (к вопросу о тахионах). Укр. Физ. Ж-ал, *1979*, т.24, № 5, с. 703–705.
9. *Poincare H.* Sur la dinamique de l'electron. Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des sciences, Paris, *1905*, V.140, p. 1504–1508.
10. *Анисович К.В.* Релятивистский сверхсветовой сигнал, передающий информацию. Гравитация, *1997*, т. 3, с. 36–31.
11. *Тележко Г.М.* К симметрии относительно светового барьера. Укр. Физ. Ж-ал, *1993*, т. 38, № 2, с. 183–189.
12. *Киржниц Д.А., Сазонов В.Н.* Сверхсветовые движения и СТО. В кн.: Эйнштейновский сборник 1973. М., Наука, *1974*, с. 84–111.