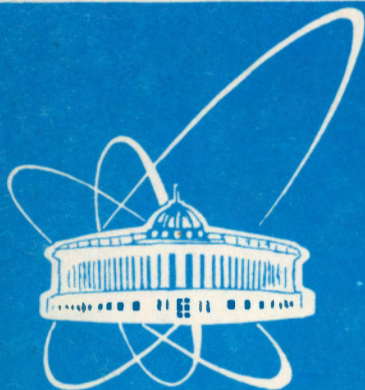


94-18



Объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
Дубна

P2-94-18

В.С.Барашенков

ТАХИОНЫ — КОНЕЦ ИСТОРИИ?

Направлено в журнал «ЭЧАЯ»

1994

## Введение

В формулы теории относительности вакуумная скорость света  $c$  входит в качестве некоторой универсальной постоянной, ограничивающей допустимые скорости передачи сигналов. Поскольку масса тела  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  при приближении его скорости  $v$  к этой постоянной становится бесконечно большой, долгое время считалось, что область сверхсветовых скоростей  $v > c$  недостижима. Однако Я.П.Терлецкий<sup>/1-4/</sup>, а затем М.П.Биланюк, В.Дешпанде и Е.Сударшан<sup>/5/</sup> обратили внимание на то, что это ограничение можно устранить, если предположить, что сверхсветовые частицы, тахионы, не переходят, ускоряясь, через световой барьер, а рождаются, имея уже сразу скорость  $v > c$  и (формально) мнимую массу  $im_0$ . Это стимулировало огромное количество теоретических и даже экспериментальных исследований различных аспектов "тахинной проблемы", и к середине 80-х годов библиография публикаций насчитывала уже около тысяч наименований<sup>/6/</sup>.

Результаты исследований были суммированы в обзорах<sup>/7-10/</sup>. Главный вывод состоял в том, что передача сверхсветовых сигналов приводит к акаузальным эффектам, когда причина и следствие меняются местами и становятся возможными временные петли, с помощью которых можно влиять на прошлое - на уже реализовавшиеся события. По мнению части авторов это ограничивает область существования тахионов ультрамалыми интервалами  $\Delta x \lesssim 10^{-16}$  см, где нарушается Т-инвариантность и строгая временная упорядоченность связанных взаимодействием событий утрачивает свою универсальность. Другие авторы (см., например, энциклопедический обзор Э.Реками<sup>/10/</sup>) считают, что трудности можно обойти и на макроскопических расстояниях за счет более расширенной трактовки смысла причинно-следственной связи. Высказывалось также мнение, что образование акаузальных петель является всего лишь надуманной проблемой, поскольку в силу особых свойств сверхсветовых частиц их поведение в нашей реальной, фридмановской Вселенной существенно отличается от того, что имеет место в абстрактном случае плоского пространства-времени, и тахиян всякий раз поглощается вакуумом прежде, чем успевают замкнуть акаузальную временную петлю.

Вместе с тем выяснилось, что независимо от области их существования, тахионам угрожает еще одна грозная опасность. Поскольку в

кинематическом отношении до- и сверхсветовые частицы совершенно равноправны и нет оснований предпочесть одни другим, то систему координат можно связать с любой из них. Это означает, что преобразования Лоренца тоже должны быть обобщены на сверхсветовые скорости движения, когда совершаются переходы из области внешней к световому конусу, внутрь последнего и обратно. Только в этом случае теория может считаться релятивистски инвариантной<sup>1)</sup>. К сожалению, многочисленные попытки сверхсветового обобщения преобразований Лоренца до сих пор неизменно приводили к противоречащим эксперименту следствиям.

Акаузальные эффекты и противоречивость сверхсветовых преобразований координат – главные причины снижения интереса к гипотезе тахионов. Ниже мы рассмотрим, можно ли преодолеть эти трудности.

Вместе с тем нельзя не заметить, что тахионы возникают в различных вариантах струнных моделей, в теориях с лагранжианами высших порядков. при суперсимметричных обобщениях и многие авторы убеждены, что это – не просто досадный теоретический эффект, а отражение определенной реальности, с которой мы еще не научились должным образом обращаться.

Целью нашей работы является проанализировать состояние тахионной гипотезы, как оно выглядит сегодня – через 8 лет после последних обзоров<sup>9,10</sup>.

Изучение свойств гипотетических сверхсветовых частиц, даже если они и не будут обнаружены в природе, имеет значение как исследование одного из возможных обобщений теории относительности – как теоретическая разведка в область "запредельных" пространственно-временных отношений.

### Можно ли избежать нарушений причинности ?

Эти нарушения проистекают из свойств релятивистских преобразований. Если сигнал, связывающий события в пространственно-временных точках  $(x_1; t_1)$  и  $(x_2; t_2)$ , передается со скоростью

<sup>1)</sup> Указанная трудность имеет место в любой теории с нелокальным взаимодействием  $\int \psi_1(x_1)\psi_2(x_2)\psi_3(x_3)\mathcal{F}(x_1, x_2, x_3)d^4(x_1x_2x_3)$ , где

пространственно- и времяподобные точки  $x_i$  совершенно равноправны и любая их пара может быть связана сигналом. Формально релятивистская запись теории сама по себе еще не гарантирует ее полной релятивистской инвариантности.

$$v = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1) \equiv \Delta x / \Delta t > c$$

то в системе координат, движущейся со скоростью  $u$  (это может быть "обычная" досветовая скорость), временной интервал

$$\Delta t' = (\Delta t - \Delta x u / c^2) \gamma = \Delta t (1 - uv/c^2) \gamma < 0,$$

где  $\gamma = \sqrt{1 - u^2/c^2}$ . Другими словами, порядок связанных тахионным сигналом событий зависит от выбора системы координат и всегда можно сделать так, что событие-следствие будет опережать событие-причину.

Правда, само по себе это еще не означает нарушения причинности, поскольку одновременно изменяет свой знак энергия тахиона,

$$E' = (E - pu) \gamma = E (1 - uv/c^2) \gamma < 0$$

благодаря чему в новой системе координат процесс взаимодействия можно интерпретировать как движение антитахиона от точки  $(x_1; t_1)$  к точке  $(x_2; t_2)$ . Такая точка зрения - ее называют принципом реинтерпретации<sup>2)</sup> - означает, что общепринятая формулировка причинности, требующая, чтобы событие-причина оставалось таковым при всех условиях, заменяется более "мягкой", когда абсолютным, не зависящим от выбора системы отсчета, является лишь сам факт передачи информации между двумя событиями<sup>3)</sup>, что же касается их идентификации как порождающего (причины) и порождаемого (следствия), то это обстоятельство имеет такой же относительный, условный смысл, как понятие одновременности в современной релятивистской теории.

2) В работе /II/ развит подход, при котором знак энергии определяется в зависимости от того, является данная частица испускаемой или же поглощаемой. Это позволяет обойтись только лишь положительными энергиями тахионов и не использовать принципа реинтерпретации. Однако на обсуждении проблемы причинности это не сказывается.

3) Напомним, что в отличие от всех других связей в природе причинно-следственная связь отличается как раз наличием передачи информации (глубокой генетической связью, как говорят философы). Иногда причинно-следственное отношение определяют как такое, которое обязательно сопровождается передачей энергии-импульса. Однако определение через информацию является более общим, поскольку возможны ситуации - например в гравитационной теории Эйнштейна - когда понятия энергии и импульса утрачивают смысл.

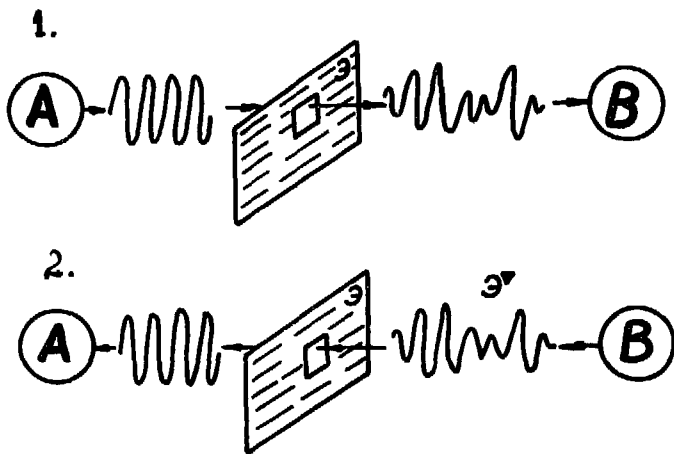
В рамках T-инвариантных микроскопических теорий такое обобщение принципа причинности не вызывает затруднений, однако при переходе к реальным макроскопическим условиям со строго фиксированной стрелой времени, на которую принцип реинтерпретации не оказывает влияния, сразу же возникают акаузальные эффекты.

Напомним пример, приведенный в нашем обзоре<sup>4/</sup> (см. рис. I). Источник и детектор тахионов разделены экраном, модулирующим по заданной программе интенсивность тахионного пучка. Если в одной системе координат действие модулятора предшествует детектированию, то в другой системе детектор становится источником самопроизвольно кодированного пучка антитахионов, вариации которого затем сглаживаются экраном-модулятором. Тот факт, что в пучке испускаемых частиц в этой системе изначально закодирован, к примеру, сонет Шекспира или текст Конституции, является в глазах наблюдателя необъяснимым, беспричинным явлением. Макроскопические источник и детектор не являются T-инвариантными, принцип реинтерпретации на них действует; и если на рождение тахионного пучка в источнике была затрачена определенная энергия, то для генерации антитахионного пучка к детектору никакой энергии не подводится. Сам факт превращения совершенно неприспособленного для этого детектора в тахионный генератор выглядит подлинным чудом. Получается, что мощным генератором сверхсветовых частиц может служить фактически любой предмет.

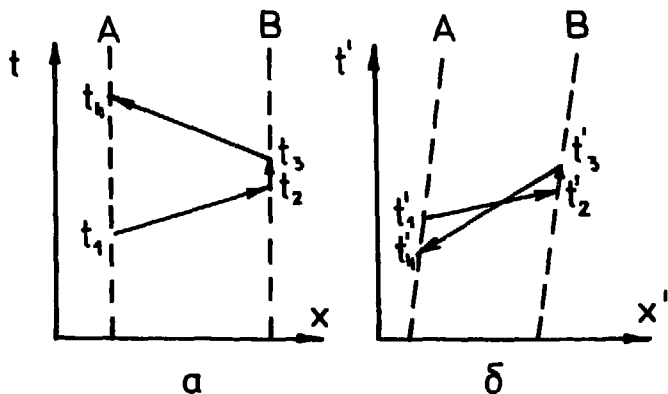
Устранить парадокс можно одним из двух способов: запретить тахионам обладать скоростями  $v > c^2/u$  или попытаться так расширить толкование самого принципа причинности, чтобы перестановку причин и следствия в макропроцессах можно было считать всего лишь иллюзией и иметь возможность всякий раз точно установить первичное, инициирующее событие<sup>4)</sup>.

4) Вообще говоря, есть еще и третий способ — отказаться от релятивистской инвариантности и, в частности, от известных нам преобразований Лоренца. Обзор таких попыток в связи с проблемой сверхсветовых частиц см. в работах /10, 12/. Подобный подход представляется нам мало перспективным. Если отказ от релятивистской инвариантности распространяется и на досветовые частицы, то возникает противоречия с экспериментом, поскольку в настоящее время нет каких-либо достаточно достоверных данных о нарушении принципа относительности /13/. С другой стороны, если допустить, что релятивистская инвариантность нарушается только лишь для сверхсветовых объектов, возникает проблема обоснования этой гипотезы, для чего сегодня нет никаких физических оснований.

Имеются определенные теоретические соображения ожидать нарушения релятивистской инвариантности в области планковских ( $\sim 10^{-32}$  см) и сверхбольших космических расстояний, несущих на себе следы первичного космологического взрыва (см., например, /14-15/). Можно ожидать нарушения лоренцовских преобразований также в очень узкой области вблизи светового барьера  $v/c=1$ , где современная теория приводит к физическим бессмысленным расходящимся выражениям. Однако все эти области пока далеко за пределами наших экспериментальных возможностей.



**Рис. 1.** Модулирование пучка тахионов. В системе координат I, для неподвижного наблюдателя, сигнал модулируется при прохождении им щели экрана S. В системе координат 2, для движущегося наблюдателя—еще до достижения им экрана



**Рис. 2.** Временная петля, образованная обменом двумя тахионами или сигналами:

а — неподвижная, б — движущаяся системы координат. А и В — траектории двух источников тахионов. В движущейся системе испускание и поглощение тахионов, испущенных неподвижным источником, происходит в обратном порядке. В расширяющейся Вселенной нельзя послать тахионного сигнала из  $t'_3$  в  $t'_4$  так, чтобы момент времени  $t'_4$  предшествовал моменту  $t'_1$ . Т.е. временная петля не замыкается

Первый способ рассматривался в работах Э.Реками с сотрудниками /16-19/ и В.Ф.Перепелицы /20-22/. Реками и его соавторы показали, что условие  $v < c^2/u$  автоматически обеспечивается законом сохранения энергии-импульса, если скорости и массы тахиона, источника и детектора удовлетворяют определенному кинематическому соотношению; во всех же других случаях тахион не поглощается детектором - он его просто не замечает. Однако запрет поглощения тахиона детектором, как целым, вовсе не исключает поглощения его частью детектора. Кроме того, поглощение - не единственный процесс взаимодействия; рассеяние тахиона в детекторе также может использоваться для детектирования и тоже способно порождать акаузальные явления.

В.Ф.Перепелица заметил, что на поведении тахионов существенно сказывается фридмановское "распухание" пространства-времени. Учет этого обстоятельства приводит к заключению о том, что тахион не может иметь скорость  $v > c^2/u$ , где  $u$  - скорость движения системы координат, в которой рассматривается тахион, по отношению к так называемой сопутствующей системе, определяемой тем, что "распухание" пространства-времени там происходит изотропно. При  $v = c^2/u$  осциллирующая волновая функция сверхсветовой частицы превращается в экспоненциально затухающую, что можно интерпретировать как "растворение тахиона в вакууме" /22/.

Мы не будем останавливаться на обоснованиях этих утверждений, поскольку трудности на этом пути все равно удаётся устранить лишь частично. Действительно, поскольку в сопутствующей системе координат допустимы любые скорости тахионов  $0 \leq v < \infty$  ( $v_{\max} = c^2/u \rightarrow \infty$  при  $u \rightarrow 0$ ), в другой системе, движущейся со скоростью  $u = c^2/v$ , причина и следствие поменяются местами. Однако из движущейся системы теперь уже нельзя послать тахионный сигнал со скоростью  $v > c^2/u$ , который воздействовал бы на прошлое сопутствующей системы координат (см. рис.2).

Таким образом, если учесть фридмановское расширение пространства-времени, то с помощью тахионов нельзя образовать акаузальных петель. Другими словами, нельзя послать тахионную телеграмму в прошлое, которая изменила бы уже сложившийся ход событий (нельзя "убить самого себя в колыбели" или получить информацию от наблюдателя из будущего о том, что нас ожидает). Это справедливо не только для сопутствующей, но и для любых других пар систем отсчета, поскольку при переходах между ними можно использовать в качестве промежуточной сопутствующую систему координат, что гарантирует отсутствие временных петель.

К сожалению, на фоне перестановок причин и следствий эти выводы напоминают врачебный диагноз, констатирующий, что "больной перед

смертью потел, что, несомненно, является обнадеживающим симптомом"...

Впрочем, можно ли с уверенностью утверждать, что инвариантность временного порядка в причинно-следственных цепочках событий действительно - дефект теории? Может, дело просто в нашей привычке, порожденной ограниченностью опыта? Например, по мнению автора работы<sup>727</sup> "принцип причинности как логический принцип есть требование того, чтобы следствие не влияло на причины. И это все. Ничего не говорится о временной упорядоченности причины и следствия. Требуется только отсутствие причинных петель".

В применении к микропроцессам такое обобщение общепринятого принципа причинности (см.<sup>723,24</sup>) вполне допустимо, однако, возвращаясь к рассмотренному выше примеру с модулирующим экраном, едва ли можно считать безразличным, что заставляет экран "отстукивать" сонет Шекспира - заранее составленная программа или самопроизвольное высвечивание приемника, превратившегося вдруг в передатчик<sup>5)</sup>. Какие бы логические рассуждения не приводились в оправдание, эти две ситуации явно не совместимы, и следует признать, что одна из них просто не реализуется.

Не спасает положения и ссылка на то, что и в обычных условиях далеко не всегда можно без дополнительной информации различить причину и следствие. Так, зафиксировав звуковой и световой импульсы (см. рис.3), наблюдатель не в состоянии решить, какой из них был причиной другого - звук инициировал световую вспышку или, наоборот, световой луч включил сирену. Чтобы ответить на этот вопрос, наблюдатель должен выполнить дополнительное исследование - узнать скорость сигналов, выяснить пути их распространения и т.д. Аналогичным образом, изучая сопутствующие события, всегда можно установить, какое из связанных тахионным взаимодействием событий является истинной причиной. Например, путем рассматривания предшествующей истории - цепочки связанных тахионами явлений<sup>6)</sup>. Однако случаи с до- и сверхсветовыми

---

5) Еще более впечатляющим выглядит пример с охотником, стреляющим тахионной пулей в ворону. В движущейся системе координат это событие предстает перед наблюдателем как неожиданный выстрел вороны анти-тахионной пулей в охотника, после которого сама ворона падает мертвой, а пуля влетает точно в дуло дужья охотника!

6) При этом мы должны примириться с нарушением принципа относительности, поскольку в этом случае всегда можно установить, какая из двух инерциальных систем отсчета покоится, а какая движется. Нулевая скорость у той системы, в которой причина предшествует следствию и где нет парадоксальных явлений. Принцип относительности сохраняется в микропроцессах, где элементарные частицы одинаковым образом взаимодействуют с тахионами и где действительно безразлично, какое событие считать причиной, а какое - следствием.



сигналами принципиально различаются в том отношении, что, если детектирование звуковых и световых сигналов при любом временном их порядке само по себе не является чем-то парадоксальным, то самопроизвольное испускание кодированных тахионных сигналов совершенно непредназначенными для этого предметами имеет именно такой характер. Ни в одной системе координат, каким бы способом она ни была связана с другими системами отсчета (это уже субъективный фактор), не может быть событий "из ниоткуда". В макроскопических явлениях акаузальные эффекты, порождаемые сверхсветовыми сигналами, неустраимы.

Таким образом, вывод о том, что частицы со сверхсветовыми скоростями, если и существуют, то только в области ультрамалых пространственно-временных масштабов<sup>7,9/</sup>, сохраняет свою силу. Гипотеза тахионов в этом случае фактически совпадает с изучавшейся многими авторами идеей нелокального взаимодействия. Гипотеза тахионов по существу является корпускулярной реализацией нелокальной теории поля. Условие причинности в этой теории эквивалентно требованию интегрируемости уравнений движения<sup>24/</sup>.

### Преобразования Лоренца для сверхсветовых скоростей

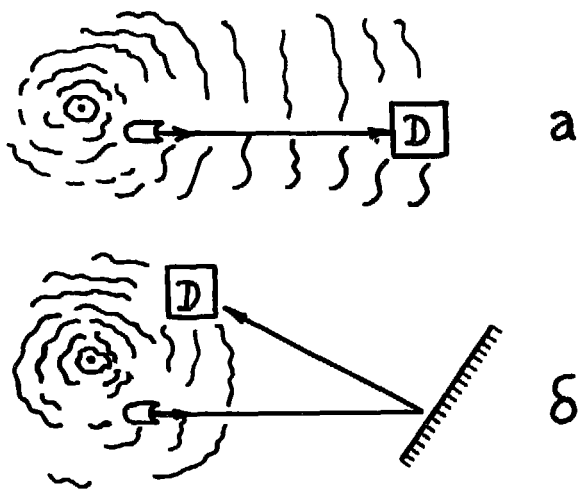
В случае двумерного пространственно-временного мира, который в качестве простейшего примера рассматривается во многих работах по тахионам, существует элегантно обобщение лоренцовских преобразований на сверхсветовые скорости относительного движения  $v > c$ ;<sup>12,25/</sup>

$$\left. \begin{aligned} x' &= \varepsilon \gamma (x - vt) \\ t' &= \varepsilon \gamma (t - vx/c^2) \end{aligned} \right\}, \quad (I)$$

где  $\gamma = \sqrt{|1 - v^2/c^2|}$ ;  $\varepsilon = 1$ , если  $|v| < c$ , и  $\varepsilon = -v/|v|$ , если  $|v| > c$ . Нетрудно убедиться, что эти преобразования составляют группу<sup>7)</sup>, а области до- и сверхсветовых явлений оказываются совершенно симметричными. Одна и та же частица в зависимости от того, в какой системе координат ее рассматривать, может быть и тахионом, и обычным, досветовым телом. (В частности, с точки зрения "тахионного наблюдателя", движущегося со скоростью  $v > c$ , и мы и окружающее нас вещество - все состоит из тахионов). Система координат по отношению к объектам с разной скоростью тоже может проявляться и как досветовая, и как сверхсветовая<sup>8)</sup>.

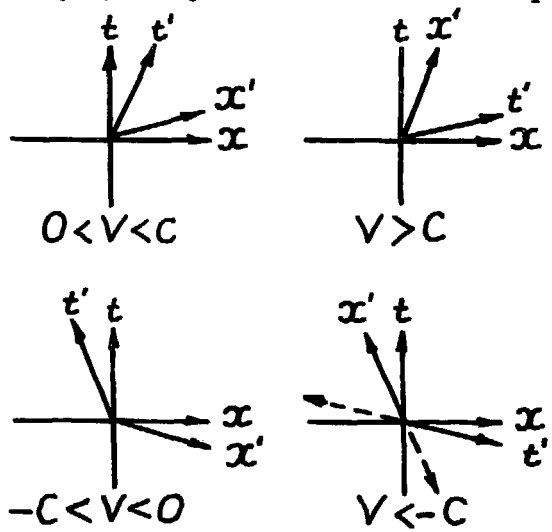
7) Интересно отметить, что два последовательных преобразования со скоростями  $v_1 > c$  эквивалентны лоренцовскому преобразованию с досветовой скоростью  $v = (v_1 + v_2) / (1 + v_1 v_2 / c^2) < c$ . В граничном случае, когда  $v_1 \rightarrow c$ ,  $v_2 \rightarrow c$ ; при  $v_1 \rightarrow \infty$ , суммарная скорость  $v \rightarrow 0$ .

8) В недавней работе<sup>26/</sup> этот вопрос подробно обсуждается с чисто геометрической точки зрения как поворот осей в комплексном пространстве Минковского.



**Рис.3.** Световая вспышка и звуковой сигнал сирены фиксируются детектором Д:

а - если звук и свет распространяются по одному направлению, то первый будет зафиксирован раньше второго, независимо от того, звуковой импульс зажег прожектор или же луч прожектора включил сирену; б - если звуковой и световой сигналы проходят различные пути, то звук может попасть в детектор раньше света



**Рис.4.** Расположение осей координат неподвижной ( $x; t$ ) и движущейся ( $x'; t'$ ) систем координат в случае до- и сверхсветовой скорости движения  $v$ . Пунктир соответствует функции  $\xi(v)=1$

Симметричными оказываются и координаты  $x, t$  : переход в сверхсветовую систему сопровождается их перестановкой - величина  $t'$  принимает на себя роль пространственной координаты, а  $x'$  играет роль времени. В этом легко убедиться, если в формулах (1) сделать замену  $v=c^2/w$ . Тогда переменные ( $t'/c$ ) и ( $x'/c$ ) будут преобразовываться соответственно, как пространственная координаты и время:

$$\left. \begin{aligned} x'/c &= \varepsilon_w \gamma_w (t - xw/c^2) \\ t'/c &= \varepsilon_w \gamma_w (x - tw) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\gamma_w = (1 - w^2/c^2)^{-1/2}$ ,  $\varepsilon_w = -\varepsilon$ , а скорость становится до-световой:  $w < c$ .

Перестановка пространства и времени проявляется особенно наглядно в пределе  $v \rightarrow \infty$ ,  $w \rightarrow 0$ . Соотношения (2) приобретают тогда вид

$$x' = ct, \quad t'c = x \quad (3)$$

(см. рис.4)<sup>9)</sup>. Например, если в лабораторной системе координат мезон рождается и поглощается, оставаясь в одной и той же точке  $x$ , то в системе отсчета, движущейся с бесконечной скоростью, его история будет выглядеть как одновременно происходящее рождение, существование и распад на разных расстояниях вдоль одной прямой. Другими словами, время жизни частицы сжимается до бесконечно малой величины (становится мгновенным), а ее "возрастные изменения" приобретают смысл пространственных характеристик. Если мезон в лабораторной системе координат перемещается, то сверхсветовой наблюдатель будет воспринимать это перемещение как увеличение продолжительности жизни мезона, т.е. точ-

9) С перестановкой координат  $x', t'$  связано и появление знаковой функции  $\varepsilon$ . В случае преобразований с  $|v| < c$  возможен непрерывный переход от положительных скоростей  $v$  к отрицательным. В преобразованиях с  $|v| > c$  такой переход происходит скачком, благодаря чему существуют две возможности выбора направления осей движущейся системы координат:  $x \rightarrow t'$ ,  $t' \rightarrow x'$  и  $x \rightarrow -t'$ ,  $t \rightarrow -x'$  (см.рис.4). Знаковая функция  $\varepsilon(v)$  соответствует первому способу, обеспечивая полную симметрию до- и сверхсветовых систем отсчета. Кроме того, как показано в работе<sup>25/</sup>, если не вводить функцию  $\varepsilon(v)$ , то преобразования (2) не образуют группу:  $L(v_2)L(v_1) \neq L(v_2 \oplus v_1)$ .

но так, как мы воспринимаем наше время. Нечто подобное происходит при пересечении шварцшильдовского радиуса черной дыры – пространство и время там тоже меняются местами.

Казалось бы, переход к трехмерному пространству не вызовет затруднений – нужно лишь дополнить соотношения (I) еще двумя:

$$y' = y; \quad z' = z. \quad (4)$$

Действительно, преобразования (I), (4) образуют группу, однако скорость света при этом перестает быть универсальной постоянной и зависит от выбора системы координат и от направления распространения световой волны. Если в исходной системе координат вспышка света воспринимается наблюдателем как расширяющаяся с течением времени сферическая поверхность  $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$ , то в сверхсветовой системе отсчета она выглядит как два мгновенно вспыхивающих и разлетающихся друг от друга гиперболоида  $x'^2 - y'^2 - z'^2 = c^2 t'^2$  с равноосвещенными близкими и бесконечно удаленными точками (рис.5). На сферических поверхностях скорость света

$$c(x', y', z') = c^2 + 2(y'^2 + z'^2)/t'^2,$$

а квадрат четырехмерного пространственно-временного интервала, определяющий фронт световой волны,

$$s^2 = x'_\mu x'^\mu \neq x_\mu x^\mu.$$

Понятно, что это сразу же нарушает принцип относительности, поскольку по форме светового фронта можно сделать вполне определенные заключения о скорости движения наблюдателя.

Более того, можно показать<sup>/27,28/</sup>, что последовательное применение в трехмерном пространстве нескольких до- и сверхсветовых преобразований Лоренца (I), (4) эквивалентно группе четырехмерных линейных преобразований  $x'_\mu = \Lambda(\nu)_{\mu\nu} x^\nu$  с единственным ограничением

$\det \Lambda = \pm 1$ . Требование лоренцевской инвариантности приводит в этом случае к ряду ненаблюдаемых на опыте симметрий. В этом легко убедиться, рассмотрев, например, оператор  $L_{ty} \Lambda(\nu) L_{ty}$ , где  $L_{ta}$  – преобразование (3), (4), в котором  $x$  заменено на  $a$ ,  $\Lambda(\nu)$  – лоренцевский буст (I), (4). При этом результирующие координаты

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

что равносильно повороту в плоскости  $(x, y)$  на угол  $\varphi = -\arctg \nu$

и растяжению осей  $x, y$  в  $R = \gamma \sqrt{1+v^2/c^2}$  раз.

Еще один наглядный пример - преобразование  $L_{tx} R_z L_{tx} L_{ty}$  где  $R_z$  - поворот на угол  $\pi/2$  вокруг оси  $z$ . Результатом является инверсия времени  $t' = -t$ ,  $\bar{x}' = \bar{x}$  по отношению к которой явления природы инвариантны далеко не всегда.

### Как исправить положение ?

Некоторые авторы (см. обзор [10]) пытались избавиться от трудностей путем перехода от привычных нам реальных координат к комплексным, заменив соотношения (4) на

$$y' = iy, \quad z' = iz \quad (4a)$$

В этом случае квадрат мнимой единицы  $i^2$  компенсирует изменение знака перед  $y'^2$  и  $z'^2$  и квадрат четырехмерного интервала с точностью до знака сохраняет свою величину:

$$s^2 = x_\mu x^\mu = -x'_\mu x'^\mu$$

К сожалению, также, как при использовании одних только реальных переменных, результатом нескольких последовательных преобразований (I), (4a) являются линейные ("нелоренцовские") преобразования, соответствующие ненаблюдаемым на опыте симметриям [12]. При этом наряду с мнимыми переменными  $iy$  и  $iz$  автоматически появляются комплексные значения всех четырех пространственно-временных координат

$x'_\mu = x'_\mu + ix''_\mu$ , и не только в области сверхсветовых движений, но и при  $|v| < c$ .

Общий случай преобразований систем координат в четырехмерном комплексном пространстве рассмотрел Е. Коул: [28]

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= \gamma (x - vt) \\ t' &= \gamma (t - vx/c^2) \\ y' &= \gamma y, \quad z' = \gamma z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где функция  $\gamma = 1$ , если  $|v| < c$ , и  $\gamma = i\varepsilon$  для  $|v| > c$ . Такой подход сохраняет величину пространственно-временного интервала  $s^2$ , однако не устраняет трудностей с ненаблюдаемыми на опыте дополнительными симметриями, возникающими в результате последователь-

ного применения нескольких преобразований (5) 10).

Кроме того, неясной остается физическая интерпретация комплексных координат. В области  $|v| < c$  переменные  $\text{Re}x_{\mu}$  и  $\text{Im}x_{\mu}$  остаются не связанными между собой, т.е. реальная и мнимая "половины" мира существуют тут совершенно независимо и можно считать, что в обеих из них фронт световой волны сохраняет сферическую форму:

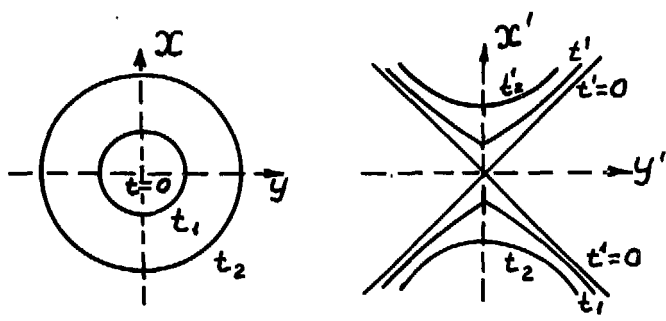
$\text{Re}x_{\mu} \text{Re}x^{\mu} = \text{Im}x_{\mu} \text{Im}x^{\mu} = 0$ . Иначе обстоит дело в области  $|v| > c$ , где переход к сверхсветовой системе отсчета смешивает реальные и мнимые координаты, благодаря чему сферическая световая волна  $\text{Re}x_{\mu} \text{Re}x^{\mu}$  искажается в зависимости от величины дополнительных переменных. Скорость частицы, если ее определять, как это принято в области досветовых скоростей, в виде  $u^2 = (dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2$ , тоже оказывается зависящей от этих переменных<sup>II)</sup>.

Трудности обобщения трехмерных лоренцовских преобразований на область сверхсветовых скоростей были, пожалуй, основной причиной потери интереса к тахионной гипотезе. Важно, однако, подчеркнуть, что эти трудности относятся не только к теориям классических частиц-тахионов, но и вообще ко всем нелокальным теориям. В то же время отказ от симметрии до- и сверхсветовых систем отсчета был бы весьма нежелательным, т.к. требование релятивистской инвариантности является

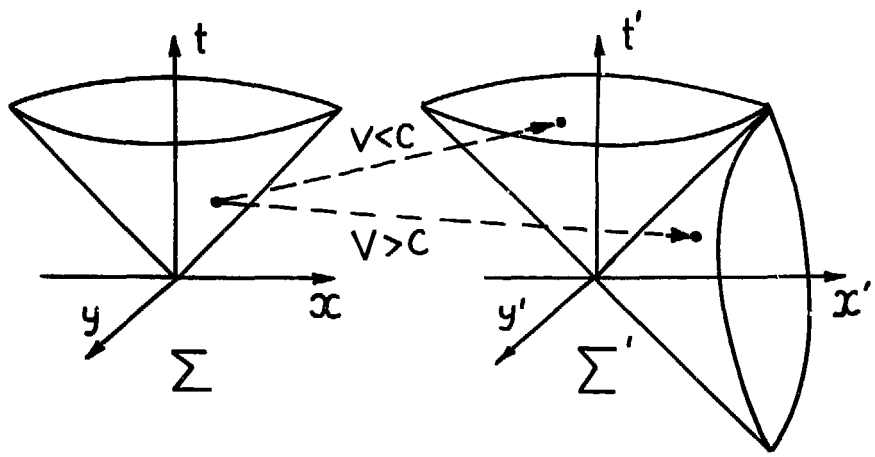
---

10) Условие сохранения величины  $s^2$  недостаточно для того, чтобы имела место только лишь одна релятивистская инвариантность. Интервал  $s^2$  остается неизменным при всех преобразованиях  $x' = \Lambda x$ , у которых  $\Lambda^T G \Lambda = +G$ , где метрическая матрица  $G_{11} = -1$ ,  $G_{\mu\mu} = 1$  при  $\mu > 1$ ,  $G_{\mu\nu} = 0$  при  $\mu \neq \nu$ . В их число входят, в частности, преобразования, связывающие покоящиеся друг относительно друга системы координат. Комбинации таких "статических" преобразований с "динамическими" (I), (4) нельзя заменить единым "лоренцовским бустом". Подробнее см. об этом в работе<sup>12/</sup>.

II) В работах<sup>29,30/</sup> предлагалось использовать комплексные переменные для описания протяженных объектов: одной компонентой можно характеризовать центр такого объекта, другой — его длину. Действительно, в мире, где сверхсветовые скорости позволяют мгновенно переходить от одного конца отрезка к другому, понятие точечного объекта становится в известной степени анахронизмом. Однако трудности с искажением фронта световой волны в вакууме и с определением скорости частицы на этом пути устранить не удается.



**Рис.5.** Поверхности светового фронта в лабораторной ( $x, y, t$ ) и в сверхсветовой ( $x', y', t'$ ) системах координат в различные моменты времени. Для простоты изображения ось  $z$  опущена



**Рис.6.** Преобразование к системе  $\Sigma'$ , движущейся со скоростью  $|v| < c$ , оставляет точки в том же световом конусе, что и в исходной системе  $\Sigma$ ; переход к сверхсветовой системе  $\Sigma'$  переводит их в другую область четырехмерного пространства

одним из немногих эвристических принципов, "освещающих дорогу" при нелокальных обобщениях <sup>12)</sup>.

Тем не менее положение не столь безнадежно, как это принято думать в последнее время. Есть основания предполагать, что затруднения обусловлены не специфическими особенностями самих тахионов, а противоречивостью рассматривавшихся преобразований. Действительно, эти соотношения относятся к случаю параллельно движущихся координатных осей  $x$  и  $x'$ , но, как уже упоминалось выше, в сверхсветовой области фактически происходит перестановка пространственной и временной осей, а это означает, что преобразованные точки располагаются в другом конусе четырехмерного пространства (см. рис.6). Это нарушает исходное условие коллинеарности. По существу мы имеем тут дело не с преобразованием координатных систем, когда одно и то же событие рассматривается с двух разных точек зрения, а с чисто математической операцией, устанавливающей соответствие (mapping) точек, расположенных внутри и вне светового конуса. (На это обстоятельство обращать уже внимание в работе <sup>33/</sup>).

Чтобы удовлетворить условию коллинеарности старых и новых координатных осей, будем рассматривать переменные  $(t'/c)$  и  $(x'/c)$  соответственно в качестве пространственной координаты и времени сверхсветовой области, как они и воспринимаются находящимся там наблюдателем. Тогда преобразования (1), (2) можно объединить в одно:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \gamma (x - tu) \\ t' &= \gamma (t - xu/c^2) \end{aligned} \right\} , \quad (6)$$

где  $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2}$ ,  $u = v$ , если  $|v| < c$  и  $u = c^2/v$  при  $|v| > c$ . Поскольку переход от отрицательных к положительным значениям "скорости"  $u$  происходит непрерывно (см. примечание 9), то надобность в знаковой функции  $\epsilon$  отпадает.

Нетрудно убедиться, что, как и (1), преобразования (6) составляют группу. При этом закон сложения скоростей имеет вид

<sup>12)</sup> В некоторых работах (см. <sup>31,32/</sup>, более ранние работы цитируются в обзоре <sup>10/</sup>) предлагалось сохранить требование релятивистской инвариантности лишь для досветовых движений, в то время как для  $|v| > c$  допустить нарушение принципа относительности и соответственно существование привилегированной системы отсчета. Однако такой подход не получил поддержки.



$$u = \frac{u_1 + u_2}{1 + u_1 u_2 / c^2}, \quad (7)$$

где величина  $u$  интерпретируется в зависимости от того, в какой системе координат рассматривается конечное событие ( $x$ ,  $t$ ). Если оно в досветовой (этому соответствуют случаи сложения двух досветовых или двух сверхсветовых скоростей  $v_i$ ), то правая часть выражения (7) равна  $(v_1 + v_2) / (1 + v_1 v_2 / c^2)$  и  $u = v$  — суммарная скорость. Если же ( $x$ ,  $t$ ) в сверхсветовой системе (этому отвечают случаи сложения до- и сверхсветовой скорости), то

$$u = (1 + v_1 v_2 / c^2) / (v_1 + v_2) = 1/v.$$

Поскольку преобразования (6) сохраняют не только величину, но и знак двумерного интервала  $x^2 - c^2 t^2$ , то для перехода к четырехмерному пространству-времени достаточно дополнить (6) равенствами (4).

Как видим, требование релятивистской инвариантности не запрещает существование тахионов. Запрет (во всяком случае, в макроскопической области) проистекает из физических и методологических соображений, лежащих вне теории относительности. В этой связи было бы крайне интересно указать какие-либо микроявления, экспериментальное исследование которых могло бы послужить проверкой гипотезы тахионов, ведь все эксперименты со сверхсветовыми эффектами до сих пор имели макроскопический характер<sup>6,7/</sup>.

### Заключение

Мы видим, что постулат теории относительности о максимальной величине скорости света в вакууме очень устойчив. Существование тахионов на макроскопических расстояниях приводит к неустранимым противоречиям; могут ли рождаться такие частицы в области ультрамалых пространственно-временных масштабов — это прежде всего вопрос эксперимента. Теоретических запретов этому не известно.

В работе Н. Бишоп<sup>34/</sup> показано, что гравитационное поле тахионной частицы может искривлять траектории составных частей других тел таким образом, что будет происходить распад и полное разрушение последних. Казалось бы, это — веский аргумент против гипотезы тахионов, поскольку ничего подобного никогда не наблюдалось. Однако этот вывод получен в классическом приближении, тогда как в области ультрамалых масштабов, где можно рассчитывать на появление тахионов, необходимо учитывать квантовую размазку траекторий, и как она скажется — не ясно.

Вопрос о существовании сверхсветовых частиц тахионов по-прежнему остается открытым. Конечно, физическую гипотезу очень редко удастся

закреть "до конца", и то обстоятельство, что область возможного "обитания" сверхсветовых частиц стянулась до ультрамалых размеров, а также отсутствие каких-либо экспериментальных указаний на их существование (и вообще любых нелокальных явлений), в глазах многих физиков является вполне достаточным, чтобы забыть о тахионах. Однако, как уже отмечалось выше, эти частицы удивительным образом проявляются при многих, самых различных обобщениях современной теории. Трудно думать, что это - случайность.

### Литература

1. Терлецкий Я.П. ДАН СССР, 1960, т.133, с.329.
2. Terletsy Ya.P., Phys. et Radium. 1960, v.21, p.681.
3. Terletsy Ya.P. Phys. et Radium. 1962, v.23, p.910.
4. Терлецкий Я.П. Парадоксы теории относительности. М.: Наука, 1968.
5. Bilaniuk M.P., Deshpande V.K., Sudarshan E. C. G. Amer. J. Phys. 1962, v.30, p.718.
6. Перепелица В.Ф. - В кн.: Философские проблемы гипотезы сверхсветовых частиц . М.: Наука, 1986, с.151.
7. Барашенков В.С. УФН, 1974, т.114, с.133.
8. Recami E., Mignani R. Rev. Nuovo Cim. 1974, v.4, p.209.
9. Барашенков В.С. - В кн.: Философские проблемы гипотезы сверхсветовых частиц . М.: Наука, 1986, с.5.
10. Recami E. Riv. Nuovo Cim. 1986, v.9, p.1
11. Schwarz C. Phys. Rev. 1982, v. D25, p. 356.
12. Marchildon L., Antippa A.E., Everett A.E. Phys. Rev. 1983, v.D8, p.1740.
13. Барашенков В.С., Юрьев М.В. Препринт ОИЯИ P2-93-147, Дубна, 1993.
14. Nielsen H.B., Picek N.P. Nucl. Phys. 1963, v.B211, p.269.
15. Gasperini M. Phys. Rev. Lett. 1985, v.163B, 84
16. Pavšić M., Recami E., Ziino G. Lett. Nuovo Cim. 1976, v.17, p.257.
17. Pavšić M., Recami E. Nuovo Cim. 1976, v. 36A, p.171.
18. Pavšić M. Recami E. Lett. Nuovo Cim., 1977, v.18, p.134
19. Recami E. Lett. Nuovo Cim. 1978, v.21, p.208.
20. Перепелица В.Ф. Препринт ИТЭФ-156, М., 1976.
21. Perepelitsa V.F. Prepr. ITP-121, М., 1978.
22. Перепелица В.Ф. В кн.: Философские проблемы гипотезы сверхсветовых частиц . М.: Наука, 1986, p.40.
23. Блохинцев Д.И. Пространство и время в микромире. М.: Наука, 1970.
24. Барашенков В.С. Проблемы субатомного пространства и времени. М.: Атомиздат, 1979.

25. Marchildon L., Antippa A.F., Everett A.E., Can. J. Phys. 1983, v. 61, p.256.
26. Тележко Г.М. *Укр.Фіз.ж.* 1993, т.38, с.183.
27. Gorini V. *Commun. Math. Phys.* 1971, v.21, p.150.
28. Cole E.A.B. *Nuovo Cim.* 1977, v.40A, p.171.
29. Kalnay A.J., Toledo. *Nuovo Cim.* 1967, v.48, p.997.
30. Kalnay A.J. *Lett. Nuovo Cim.* 1980, v.27, p.437.
31. Bishop N.T. *Found. Phys.* 1984, v.14, n.333.
32. Bishop N.T. *Found. Phys.* 1988, v.18, p.571.
33. Kowalczyński J.K. *Intern. J. Theor. Phys.* 1984, v.23, p.27.
34. Bishop N.T. *Found Phys.* 1989, v.19, p.619.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 января 1994 года.