

ТЕОРИЯ ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 530.12; 530.16, 535.14, 537, 539.17

Олейник В. П.

**СВЕРХСВЕТОВЫЕ СИГНАЛЫ,  
ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННАЯ СВЯЗЬ  
И ЯВЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Заблуждение века: истоки, суть, преодоление**

*Национальный технический университет Украины «КПИ»,  
Кафедра общей и теоретической физики  
проспект Победы 37, Киев, 03056, Украина  
e-mail: [valoleinik@users.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:valoleinik@users.ntu-kpi.kiev.ua)  
<http://www.chronos.msu.ru/lab-kaf/Oleynik/eoleynik.html>*

Результаты данной работы, завершающей цикл наших многолетних исследований по сверхсветовым сигналам, позволяют сделать вывод, что сохранявшийся почти в течение века предрассудок в отношении существования светового барьера окончательно преодолен. Поняты истоки и причины заблуждения относительно сверхсветовых сигналов, вскрыты механизмы, способствовавшие длительному сохранению его в сознании людей, и осознана истинная роль сверхсветовых сигналов в природе. Тем самым устраняются препятствия на пути исследований в области сверхсветовой коммуникации и открываются широкие перспективы создания качественно новых средств и систем коммуникации.

До сих пор в литературе отсутствовал последовательный, основанный на динамической модели, анализ причинной связи, обусловленной сверхсветовыми сигналами. Цель данной работы — устранить этот пробел в наших знаниях. На простой динамической модели причинно-следственной связи между двумя событиями показано, что в случае сверхсветовых сигналов не возникает каких-либо затруднений с принципом причинности. Имеющиеся в литературе доводы против существования сверхсветовых сигналов ошибочны по той причине, что они основаны на отождествлении различных величин — глобального времени, входящего в уравнения движения, и локального времени, входящего в преобразования Лоренца. Разъясняется физическая сущность явления относительности физических процессов и отмечается его универсальный характер. Уточняется физическое содержание принципа относительности.

*Ключевые слова:* сверхсветовая коммуникация, информационное поле, собственное поле, причинно-следственная связь, динамическая модель, глобальное и локальное время, самодействие.

Динамику надо принимать всерьез  
и не довольствоваться смутными гипотезами.

*В. Гейзенберг*

## 1. Введение

Согласно Эйнштейну ([1](a), с. 157), «... не существует никакого способа посылать сигналы, которые распространялись бы быстрее, чем свет в пустоте». Это высказывание породило световой барьер — представление о том, что имеется принципиальное ограничение на скорость передачи информации, вытекающее из законов физики. **Вывод о существовании светового барьера представлен в [1] как прямое следствие фундаментальных положений физики — принципа относительности и принципа причинности, т.е. как следствие, которое не требует никаких обоснований и доказательств.** Этим обстоятельством объясняется огромная сила воздействия высказывания Эйнштейна по поводу сверхсветовых сигналов на умы людей: до сих пор существование светового барьера воспринимается большинством физиков как абсолютный закон природы, справедливость которого не может подвергаться сомнению.

Между тем, проведенный нами анализ [2–4] показывает, что вывод о существовании

предельной скорости передачи информации противоречит уравнениям Максвелла для электромагнитного поля, т.е. этот вывод не следует из физических принципов и является дополнительной гипотезой. Ни Эйнштейн, ни кто-либо из других исследователей не представили доказательства того, что информацию невозможно передать со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Световой барьер и обусловленный им запрет на проведение исследований по сверхсветовым сигналам не имеют под собой, таким образом, доказательной базы. Более того, гипнотическое воздействие высказывания Эйнштейна оказалось столь велико, что никто и не пытался его обосновать. Вместо доказательства в литературе имеются лишь наводящие соображения и качественные рассуждения, которые повторяют с незначительными вариациями те доводы, которые приведены в работе [1], и не содержат ничего существенно нового по сравнению с этой работой.

В данной работе анализируются **истоки и причины заблуждения**, сохранившегося в естествознании почти сто лет, — **представления о том, что сверхсветовая передача информации запрещена физическими законами**. Как физик-теоретик, занимающийся фундаментальными проблемами электродинамики и квантовой физики, автор видит свою задачу в том, чтобы, опираясь на физические принципы, способствовать преодолению глубоко укоренившегося в сознании как физиков, так и людей, далеких от физики, **предрассудка в отношении сверхсветовых сигналов**.

Принято считать, что события, разделенные пространственно-подобным интервалом, не могут быть причинно связаны между собой, так как в природе не существует сигналов, способных переносить информацию со скоростью, превышающей скорость света в вакууме [1].

Однако теоретические и экспериментальные исследования [5–16] свидетельствуют в пользу того, что сверхсветовые сигналы могут существовать в природе. Согласно [2–4, 17], физические законы не накладывают каких-либо ограничений на скорость передачи информации. Имеется ограничение лишь на скорость перемещения материальных тел и на скорость переноса энергии в пространстве. **Физическим носителем сверхсветовых сигналов являются собственные поля электрически заряженных частиц, а информационным полем, способным переносить информацию, не перенося при этом энергию, от передатчика сигналов к приемнику, служит поле электромагнитных потенциалов** [3, 4].

Следует подчеркнуть, что неизбежность возникновения сверхсветовых сигналов вытекает из простых качественных рассуждений, основывающихся на опытном факте стабильности электрона. Одним из физических свойств электрона является способность частицы создавать в окружающем пространстве, благодаря наличию электрического заряда, собственное поле. Это поле, как и заряд, неотделимо от электрона. Оно является дальнедействующим и простирается от частицы до бесконечности, занимая, таким образом, все пространство. Создавая в окружающем пространстве силовое поле, электрон превращает пространство в физическую среду, которая способна оказывать влияние на его поведение. Возникает обратное действие поля, создаваемого электроном, на сам электрон — самодействие. В результате самодействия частица становится пространственно распределенной системой: электрически заряженная материя, составляющая электрон, не сосредоточена в геометрической точке, а распределена во всем пространстве [2].

Электрон состоит, таким образом, из области основной локализации электрического заряда (с линейными размерами порядка боровского радиуса), хвоста распределения электрического заряда и собственного поля, простирающихся до бесконечности. Такая физическая система может быть устойчивой, очевидно, лишь при условии, что между любыми ее частями, сколь бы далеко они ни отстояли друг от друга, имеется взаимодействие. Следовательно, наблюдаемая на опыте стабильность электрона означает, что в природе должны существовать сигналы, распространяющиеся со сколь угодно большой скоростью. По-видимому, именно такие сигналы обеспечивают устойчивость реальных физических систем.

Из результатов исследований, выполненных к настоящему времени по сверхсветовым сигналам, с определенностью следует вывод, что существование сверхсветовых сигналов не противоречит законам физики и поэтому такие сигналы могут существовать в природе наряду с обычными, скорость которых не превышает скорости света в вакууме.

Однако следует признать, что в наших знаниях о сверхсветовых сигналах имеется су-

щественный пробел, который способствует дальнейшему сохранению предрассудка в отношении рассматриваемой проблемы. Речь идет о том, что до сих пор не проведен последовательный, основанный на простой динамической модели, анализ процесса передачи сверхсветового сигнала из одной точки в другую. Такой анализ совершенно необходим, поскольку он позволит понять, как и почему возникло заблуждение и каков истинный физический смысл физического явления, которое принималось за невозможность существования сверхсветовых сигналов.

**Цель данной работы** и состоит в том, чтобы восполнить этот пробел: **показать на простой динамической модели причинно-следственной связи между двумя событиями, что никаких ограничений на скорость сигнала, передающего информацию, не возникает.**

Передача сверхсветового сигнала рассматривается нами в предположении, что сигнал является точечным. Хотя эта модель и нереалистична, так как точечных сверхсветовых сигналов, по-видимому, не существует в природе, она позволила достаточно убедительно разъяснить, почему сверхсветовая передача информации не противоречит физическим законам. В природе сверхсветовой обмен информацией между материальными телами, обеспечивающий их устойчивость, осуществляется, очевидно, через собственные поля, создаваемые в результате суперпозиции собственных полей частиц, образующих эти тела.

Перечислим основные результаты, содержащиеся в последующих разделах.

В разделе 2 дано предварительное рассмотрение задачи о переносе сверхсветового сигнала из одной точки в другую, имеющее чисто кинематический характер и приводящее к пятному течению времени. Обсуждаются следствия, вытекающие из принципа относительности, которые необходимо учитывать при динамическом описании причинно-следственной связи. В частности, отмечается, что время, в котором происходит эволюция физической системы (**глобальное время**), может отличаться от **локального времени**, которое входит в преобразования Лоренца. Предварительный анализ проблемы подсказывает то направление исследований, которое позволит в дальнейшем разрешить парадокс с нарушением принципа причинности в случае сверхсветовых сигналов.

В разделе 3 рассмотрена вспомогательная задача, в которой сравниваются **два способа описания движения**. Один из них состоит в том, что исследователи, находящиеся в различных инерциальных системах отсчета, описывают движение независимо друг от друга, а второй — в том, что исследователь, описав движение в той системе отсчета, в которой он находится, затем преобразует все свои результаты в другую, используя преобразования Лоренца. Согласно полученным результатам, **эти способы описания существенно отличаются друг от друга при рассмотрении систем из нескольких частиц.**

Раздел 4 посвящен рассмотрению переноса сверхсветового сигнала на основе принципа относительности в рамках простой динамической модели. Здесь показано, что локальное время сверхсветового сигнала может течь вспять, но это обстоятельство не приводит к нарушению принципа причинности. Как следует из полученных результатов, каких-либо ограничений на скорость сигнала, осуществляющего причинно-следственную связь между двумя событиями, не возникает.

В разделе 5 кратко рассмотрено **явление относительности физических процессов, предсказанное автором в [18]<sup>1</sup>**. Отмечается, что это явление возникает не только в квантовых системах, но и в классических, т.е. имеет универсальный характер. Явление относительности обусловлено различием между глобальным временем, относящимся к инерциальной системе отсчета, в которой исследователь описывает временную эволюцию физической системы, и локальными временами частиц, возникающими при переходе из исходной системы отсчета в какую-либо другую, движущуюся относительно первой равномерно и прямолинейно.

Основные выводы работы сформулированы в разделе 6.

---

<sup>1</sup> Работа [18], направленная автором в 1976 г. в ЖЭТФ для опубликования, была, однако, отклонена редакцией журнала. Будучи убежденным в правильности полученных результатов и сознавая их не-тривиальность с точки зрения основ квантовой физики, автор опубликовал работу спустя два года в сборнике «Квантовая электроника», издававшемся в Институте полупроводников АН Украины. Несколько позднее эти результаты вошли в монографию [19] (см. с. 189–204), представляющую собой обзор работ автора и его учеников по фундаментальным проблемам квантовой электродинамики.

## 2. Предварительное рассмотрение

Рассмотрим два события,  $A$  и  $B$ , с точки зрения инерциальных систем отсчета  $K$  и  $K'$ , движущихся друг относительно друга. С каждой из систем отсчета свяжем галилеевы координаты и будем считать, что оси  $y, z$  параллельны осям  $y', z'$ , оси  $x$  и  $x'$  совпадают, причем система отсчета  $K'$  движется относительно системы отсчета  $K$  со скоростью  $v_0$  вдоль оси  $x$  в положительном направлении ( $v_0 > 0$ ) и в момент времени  $t = t' = 0$  совпадает с системой отсчета  $K$ .

Под событием мы понимаем здесь элементарное событие — нахождение точечной частицы (материальной точки) в некоторый момент времени в некоторой точке пространства. Для простоты считаем, что события  $A$  и  $B$  лежат на оси  $x$ , и поэтому координаты, например, события  $A$  в системе отсчета  $K$  обозначаем через  $t_A$  и  $x_A$ . Временная и пространственные координаты частицы образуют четырехмерный радиус-вектор (4-вектор)  $(ct, x)$  (выписываем только две компоненты 4-вектора). Полагаем, что события разделены пространственно-подобным интервалом, т.е.

$$c^2 dt^2 - dx^2 < 0, \quad (1)$$

где  $dt = t_B - t_A$ ,  $dx = x_B - x_A$ , причем  $t_B > t_A$ ,  $x_B > x_A$ .

Пусть в системе отсчета  $K$  в момент времени  $t = t_A$  из точки  $A$  вдоль оси  $x$  посылается сигнал, который достигает точки  $B$  в момент  $t = t_B$ . Для простоты рассмотрения считаем,

что точки  $A$  и  $B$  неподвижны в системе отсчета  $K$ . Скорость сигнала  $\frac{dx}{dt} \equiv u$ , в силу (1), пре-

вышает скорость света  $c$  в вакууме:  $u > c$ . Предполагается, что указанный сигнал передает из точки  $A$  в точку  $B$  некоторую физическую информацию, вызывая в точке  $B$  некоторое физическое действие. Поэтому событие  $A$  можно считать причиной, а событие  $B$  — следствием. События  $A$  и  $B$  образуют, таким образом, пару событий, связанных между собой причинно-следственной связью, обусловленной сверхсветовым сигналом.

Пространственно-временные координаты событий  $A$  и  $B$  в системах отсчета  $K'$  и  $K$  связаны между собой преобразованиями Лоренца:

$$x'_n = \Gamma(x_n - v_0 t_n), \quad t'_n = \Gamma\left(t_n - \frac{v_0}{c^2} x_n\right), \quad \Gamma = \left(1 - \frac{v_0^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad n = A, B. \quad (2)$$

Вводя обозначения  $dt' = t'_B - t'_A$ ,  $dx' = x'_B - x'_A$  и учитывая предыдущие равенства, получаем:

$$dt' = \Gamma \left(1 - \frac{v_0 u}{c^2}\right) dt, \quad dx' = \Gamma \left(1 - \frac{v_0}{u}\right) dx. \quad (3)$$

Из соотношений (3) вытекает следующее правило сложения скоростей:

$$u' = \frac{u - v_0}{1 - \frac{v_0 u}{c^2}}, \quad (4)$$

где  $u = \frac{dx}{dt}$  и  $u' = \frac{dx'}{dt'}$  — скорости распространения сигнала, обеспечивающего связь между событиями  $A$  и  $B$ , в системах отсчета, соответственно,  $K$  и  $K'$ . Величина  $dt$  ( $dt'$ ) представляет собой промежуток времени, за который сигнал проходит расстояние  $dx$  ( $dx'$ ) между точками  $A$  и  $B$  в системе отсчета  $K$  ( $K'$ ).

Согласно (3) величины  $dt$  и  $dt'$  имеют одинаковые знаки при  $1 - \frac{v_0 u}{c^2} > 0$ , т.е. при

$$u < \frac{c^2}{v_0} \equiv u_0 \quad (5)$$

и противоположные знаки при

$$u > u_0. \quad (6)$$

Это означает, что если в системе отсчета  $K$  сигнал распространяется в том же направлении, в каком система отсчета  $K'$  движется относительно  $K$ , то при выполнении условия (5) направление хода времени одинаково в системах отсчета  $K$  и  $K'$ , а при выполнении условия (6) временной эволюции системы из прошлого в будущее в системе отсчета  $K$  отвечает попятное течение времени в системе отсчета  $K'$  — из будущего в прошлое. Если же направление распространения сигнала в системе отсчета  $K$  противоположно направлению движения системы отсчета  $K'$ , т.е.  $u < 0$ , то всегда выполняется условие  $1 - \frac{v_0 u}{c^2} > 0$  и поэтому направление хода времени в системах отсчета  $K$  и  $K'$  всегда одинаково.

Применительно к рассматриваемой здесь задаче о распространении сигнала из точки  $A$  в точку  $B$ , при  $u < u_0$  порядок следования событий во времени в системах отсчета  $K$  и  $K'$  одинаков: если событие  $A$  предшествует во времени событию  $B$  в системе отсчета  $K$ , т.е.  $t_A < t_B$ , то таков же порядок следования событий и в системе отсчета  $K'$ :  $t'_A < t'_B$ . Однако при  $u > u_0$  положение иное: если в системе отсчета  $K$  событие  $A$  предшествует событию  $B$ , то в системе отсчета  $K'$  событие  $A$  наступает позже события  $B$ .

Если скорость сигнала подчиняется условию (5), то, очевидно, каких-либо затруднений с интерпретацией причинно-следственной связи не возникает. Но при выполнении условия (6) возникает затруднение с точки зрения принципа причинности. Если в системе отсчета  $K$  событие  $B$  можно рассматривать как следствие события  $A$  в том смысле, что в точку  $B$  передается с помощью сигнала физическая информация из точки  $A$ , то в системе отсчета  $K'$  событие  $B$  предшествует событию  $A$  ( $t'_B < t'_A$ ) и при естественном течении времени (из прошлого через настоящее в будущее) событие  $B$  не может содержать информации о событии  $A$ , которое в системе отсчета  $K'$  наступает позже события  $B$ .

Итак, с точки зрения  $K'$ -наблюдателя (так мы называем исследователя, находящегося в системе отсчета  $K'$ ) сигнал, испущенный в точке  $A$  со скоростью, превышающей  $u_0$ , идет вспять во времени. Эйнштейну казалось [1], что это обстоятельство указывает на невозможность существования в природе сверхсветовых сигналов. Такой вывод, однако, не обоснован, так как он сделан в рамках кинематики, в то время как причинно-следственная связь между событиями — существенно динамический процесс. Его корректное описание может быть осуществлено только на основе уравнений динамики. Поэтому **особый интерес представляет рассмотрение динамики процесса распространения сигнала с момента испускания сигнала одной частицей до момента его прихода к другой частице.**

Следует подчеркнуть, что **динамическое описание причинно-следственной связи должно быть основано на принципе относительности**, согласно которому различные инерциальные системы отсчета физически эквивалентны между собой. Это значит, что происходящие в них физические процессы подчиняются одним и тем же динамическим законам. При этом, **в силу принципа относительности**, наблюдатели, находящиеся в различных системах отсчета, должны быть равноправными между собой и независимыми друг от друга. В частности, каждый наблюдатель, анализируя временную эволюцию физической системы относительно той системы отсчета, в которой он находится, использует свои собственные часы и учитывает, что эволюция идет вперед во времени, так что взаимодействие между физическими полями и частицами является запаздывающим (причина всегда предшествует следствию, которое она вызывает).

В связи с принципом относительности возникает следующий вопрос. Совпадают ли времена  $t$  и  $t'$ , входящие в преобразования Лоренца для пространственно-временных координат двух инерциальных систем отсчета —  $K$  и  $K'$ , с теми временами, которыми оперируют находящиеся в этих системах отсчета исследователи ( $K$ - и  $K'$ -наблюдатели), рассматривая временное развитие какой-либо физической системы?

Будучи, в силу принципа относительности, совершенно равноправными между собой и полностью независимыми друг от друга, каждый из этих наблюдателей рассматривает время в своей системе отсчета как некоторый параметр, который не зависит от пространственных коор-

динат. Такое время, связанное с инерциальной системой отсчета, будем называть **глобальным**. Это время определяет последовательность событий при эволюции физической системы в соответствии с уравнениями движения. С другой стороны, преобразования Лоренца имеют **локальный характер**: они связывают между собой время и пространственные координаты точечной частицы в одной инерциальной системе отсчета с аналогичными величинами в другой.

Таким образом, при описании временной эволюции физической системы речь идет о **глобальном времени, относящемся к фиксированной инерциальной системе отсчета** и не зависящем от пространственных координат частиц, из которых состоит рассматриваемая физическая система. **А в преобразования Лоренца входит локальное время, относящееся к точечной частице и зависящее от ее пространственных координат**. Поэтому естественно возникает следующий вопрос: как согласовать описание временной эволюции на основе глобального времени с преобразованиями Лоренца, которые связывают между собой пространственно-временные координаты отдельных точек в пространстве-времени?

Подчеркнем, что, описывая временную эволюцию реальной физической системы, исследователь имеет дело не с одной точечной частицей, а с совокупностью многих частиц, пространственно отделенных друг от друга. По этой причине, если  $K$ -наблюдатель рассматривает свою физическую систему в некоторый момент времени  $t$ , то это значит, что этот момент он приписывает каждой частице из рассматриваемой системы (величина  $t$  представляет собой момент глобального времени). Но тогда, если эти результаты преобразовать в систему отсчета  $K'$ , то в силу преобразований Лоренца в системе отсчета  $K'$  **каждая частица будет характеризоваться своим локальным временем, которое отличается, естественно, от глобального времени, с которым работает  $K'$ -наблюдатель** (как исследователь, равноправный с  $K$ -наблюдателем и независимый от него).

Очевидно, что в задаче о переносе сигнала из одной точки в другую нужно рассмотреть физическую систему, состоящую, как минимум, из трех частиц: (1) исходной частицы, испускающей сигнал, (2) частицы, переносящей сигнал, и (3) частицы, принимающей сигнал. Следовательно, при переходе в систему отсчета  $K'$  возникают три различных локальных времени соответственно трем частицам, участвующим в рассматриваемом процессе. **Вывод о том, что в системе отсчета  $K'$  сверхсветовой сигнал идет вспять во времени, относится, очевидно, к локальному времени сигнала и не имеет отношения к глобальному времени в системе отсчета  $K'$** . Ясно, что принцип причинности имеет смысл лишь по отношению к глобальному времени инерциальной системы отсчета. Попятный ход локального времени частицы ни в коем случае не означает нарушения принципа причинности. В отличие от глобального времени, локальное время частицы не имеет, по-видимому, глубокого физического содержания.

Отметим важное обстоятельство, которое ускользает из поля зрения при поверхностном рассмотрении проблемы: **решение задачи о движении сверхсветового сигнала, приведенное в [1] (см. (а), с. 157–158), не имеет отношения к передаче сигнала из одной точки пространства в другую. В [1] дано описание простого перемещения одной частицы (сигнала) в пространстве, т.е. рассмотрена чисто кинематическая задача**. Чтобы последовательно описать передачу сигнала в пространстве из одной точки в другую, нужно рассмотреть процесс, в котором сигнал испускается некоторой частицей в одной точке пространства-времени и затем, спустя некоторое время, принимается другой частицей в другой точке.

Приведенные выше качественные рассуждения подсказывают, в каком направлении нужно проводить исследование, чтобы прийти к окончательной разгадке парадокса с нарушением принципа причинности в случае сверхсветовых сигналов.

### **3. Вспомогательная задача**

Прежде чем перейти к описанию динамики переноса сигнала от источника к приемнику, рассмотрим вспомогательную задачу о движении физической системы в инерциальных системах отсчета  $K$  и  $K'$ . Основываясь на результатах предыдущего раздела, мы хотим сравнить два способа описания движения:

1. Каждый из исследователей, находящихся в системах отсчета  $K$  и  $K'$ , описывает движение физической системы независимо от другого, оперируя лишь теми величинами, которые от-

носятся к его собственной системе отсчета. Так, в качестве времени  $K$ -наблюдатель и  $K'$ -наблюдатель используют временные координаты  $t$  и  $t'$  тех галилеевых систем координат, которые связаны с системами отсчета  $K$  и  $K'$ , соответственно. Величины  $t$  и  $t'$  рассматриваются каждым из наблюдателей как независимые параметры, служащие для описания развития системы во времени.

2.  $K$ -наблюдатель, описав движение в системе отсчета  $K$ , затем совершает переход в систему отсчета  $K'$ , преобразовав в эту систему отсчета с помощью преобразований Лоренца все полученные им результаты. В результате получается описание движения в системе отсчета  $K'$  с точки зрения такого наблюдателя, которого будем называть **воображаемым  $K'$ -наблюдателем**, или  $\tilde{K}'$ -наблюдателем, в отличие от **реального  $K'$ -наблюдателя**, или просто  $K'$ -наблюдателя. Главная особенность поведения  $\tilde{K}'$ -наблюдателя состоит в том, что он оперирует лишь величинами, полученными в результате лоренц-преобразования величин, используемых  $K$ -наблюдателем. Следовательно,  $\tilde{K}'$ -наблюдатель и  $K'$ -наблюдатель отличаются друг от друга: различие между ними состоит в том, что все действия первого определяются  $K$ -наблюдателем, а действия второго не зависят от  $K$ -наблюдателя, причем второй располагает полной информацией о временной эволюции в системе отсчета  $K'$ , а первый не имеет такой информации. Аналогично  $K'$ -наблюдатель, преобразовав все свои результаты к системе отсчета  $K$ , получает описание с точки зрения **воображаемого  $K$ -наблюдателя**, или  $\tilde{K}$ -наблюдателя. Временные координаты, с которыми работают воображаемые наблюдатели, будем в дальнейшем отмечать знаком тильда (например,  $\tilde{t}, \tilde{t}'$ ).

Как будет видно из дальнейшего, точки зрения воображаемого и реального наблюдателей на поведение физической системы могут существенно отличаться друг от друга. Суть дела состоит в том, что имеется принципиальное различие между воображаемым и реальным наблюдателями, исследующими систему из многих частиц: теоретические построения, которые рассматривает воображаемый наблюдатель, невозможно воспроизвести на опыте, в отличие от реального наблюдателя.

Рассмотрим точечную частицу  $A$ , движущуюся в системе отсчета  $K$  по закону

$$x_A(t) = x_A + u_A(t - t_A), \quad (7)$$

$x_A(t)$  - координата частицы в момент времени  $t$ ,  $x_A$  - начальное значение координаты в момент  $t = t_A$ ,  $u_A = const$  - скорость частицы. Движение частицы можно описать с помощью 4-вектора  $(ct, x_A(t))$  с начальным значением  $(ct_A, x_A)$ . Соответствующий ему 4-вектор в системе отсчета  $K'$  обозначим через  $(ct', x'_A(t'))$ . Чтобы получить явные выражения для величин  $t'$  и  $x'_A(t')$ , воспользуемся преобразованиями Лоренца (2), в которых выполним замену величин  $t_n, t'_n, x_n, x'_n$  на  $t, t', x_A(t), x'_A(t')$ , соответственно. Исключая из полученных равенств переменную  $t$ , получаем:

$$x'_A(t') = x'_A + u'_A(t' - t'_A), \quad (8)$$

$$t' = \gamma \left[ \left( 1 - \frac{v_0 u_A}{c^2} \right) t - \frac{v_0}{c^2} (x_A - u_A t_A) \right], \quad (9)$$

где использованы обозначения:

$$u'_A = \frac{u_A - v_0}{1 - \frac{v_0 u_A}{c^2}}, \quad x'_A = \gamma(x_A - v_0 t_A), \quad t'_A = \gamma(t_A - \frac{v_0}{c^2} x_A). \quad (10)$$

Формула (8) дает закон движения частицы со скоростью  $u'_A$  в системе отсчета  $K'$  (ср. с формулой (7)), а величина  $t'$  (9) описывает время в этой системе. Если частица покоится в системе отсчета  $K$ , т.е.  $u_A = 0$ , то согласно (10)  $u'_A = -v_0$  и тогда выражение (8) примет вид:

$$x'_A(t') = x'_A - v_0(t' - t'_A). \quad (11)$$

Формула (9) связывает временные координаты частицы в системах отсчета  $K$  и  $K'$ , и

поэтому в (9) входят параметры, определяющие состояние частицы. Заметим, что каждый из наблюдателей  $K$  и  $K'$ , описывая развитие физической системы во времени, считает временную координату, относящуюся к его собственной системе отсчета, независимым параметром, характеризующим движение частицы в пространстве и не зависящим от пространственных координат частицы. Однако, переходя в другую систему отсчета в соответствии с преобразованиями Лоренца, наблюдатель сталкивается с тем, что время частицы в одной системе отсчета выражается через время и пространственные координаты в другой. Локальный характер связи между временными координатами становится особенно заметным в системах из многих частиц. Если в исходной системе отсчета наблюдатель может использовать единую временную координату, относящуюся ко всей физической системе (такое время мы называем **глобальным**), то в новой системе отсчета каждая частица характеризуется своей собственной временной координатой (**локальным временем**).

Действительно, пусть в системе отсчета  $K$  имеются две частицы,  $A$  и  $B$ , которые движутся согласно уравнениям

$$\begin{aligned} x_A(t) &= x_A + u_A(t - t_A), \\ x_B(t) &= x_B + u_B(t - t_B). \end{aligned} \quad (12)$$

Временная координата  $t$ , входящая в уравнения (12), представляет собой **глобальное время** рассматриваемой системы двух частиц. Но если перейти в систему отсчета  $K'$ , используя преобразования Лоренца, то каждая частица будет характеризоваться **локальным временем**, которое обозначим через  $t'_n$ ,  $n = A, B$ . В силу (9), локальное время выражается формулой

$$t'_n = \Gamma \left[ \left( 1 - \frac{v_0 u_n}{c^2} \right) t - \frac{v_0}{c^2} (x_n - u_n t_n) \right], \quad n = A, B. \quad (13)$$

Вводя обозначения:  $t'_n|_{t=t_n} = t'_n$ ,  $t'_n = \Gamma(t_n - \frac{v_0}{c^2} x_n)$ , получаем соотношение

$$t'_n - t'_n = \Gamma \left( 1 - \frac{v_0 u_n}{c^2} \right) (t - t_n). \quad (14)$$

Из (13) и (14) вытекает следующая формула, связывающая локальные времена частиц  $A$  и  $B$ :

$$t'_B - t'_B = (t'_A - t'_A) \frac{\beta_B}{\beta_A} - \beta_B (t_B - t_A), \quad \beta_n = \Gamma \left( 1 - \frac{v_0 u_n}{c^2} \right), \quad n = A, B. \quad (15)$$

Перейдя из системы отсчета  $K$  в систему отсчета  $K'$ , мы получаем следующие законы движения частиц  $A$  и  $B$  (ср. с формулами (12) и (8)):

$$\begin{aligned} x'_A(t'_A) &= x'_A + u'_A(t'_A - t'_A), \\ x'_B(t'_B) &= x'_B + u'_B(t'_B - t'_B). \end{aligned} \quad (16)$$

В случае одной частицы временную координату  $t'$  (см. формулы (8) и (9)) можно считать (при определенных условиях, см. ниже) глобальным временем в системе отсчета  $K'$ . Она входит в уравнение (8), которое по форме совпадает с уравнением (7). В случае же двух частиц уравнения движения (12) в системе отсчета  $K$  существенно отличаются от уравнений движения (16) в системе отсчета  $K'$ . Отличие состоит в том, что частицы в системе отсчета  $K'$  характеризуются различными локальными временами  $t'_A$  и  $t'_B$  (см. формулы (13) и (15), в то время как в системе отсчета  $K$  они характеризуются единым глобальным временем  $t$ .

Возвращаясь к движению одной частицы, естественно думать, что временную координату  $t'$  можно принять за глобальное время в системе отсчета  $K'$  лишь при условии  $u_A < u_0$  (см. равенства (5) и (9)), при выполнении которого ход времени в обеих системах отсчета,  $K$  и  $K'$ , будет одинаковым. Если же выполняется обратное неравенство,  $u_A > u_0$ , то, очевидно, системы отсчета  $K$  и  $K'$  не будут физически эквивалентными друг другу.

Как видим, в случае одной частицы способы описания движения, о которых говорилось в начале данного раздела, не отличаются друг от друга (с указанной выше оговоркой). Однако в случае системы двух и большего числа частиц между указанными способами описания имеется



существенное различие:  $K'$ -наблюдатель оперирует единым глобальным временем  $t'$ , в то время как с точки зрения  $\tilde{K}'$ -наблюдателя каждая частица имеет свое локальное время  $\tilde{t}'_n$  ( $n$  - номер частицы), связь которого с глобальным временем  $t'$  не определена.

#### 4. Перенос сверхсветового сигнала

Вернемся к задаче, предварительное рассмотрение которой дано в разделе 2.

В системе отсчета  $K$  покоятся частицы  $A$  и  $B$  в точках с координатами  $x_A$  и  $x_B$  ( $x_B > x_A$ ) и в момент времени  $t = t_A$  из точки  $A$  посылается в сторону точки  $B$  сигнал, движущийся со скоростью  $u$ ,  $u > c$ , по закону

$$x(t) = x_A + u(t - t_A). \quad (17)$$

Сигнал достигает точки  $B$  в момент времени  $t = t_B$ , определяемый равенством

$$x(t) = x_B, \quad (18)$$

из которого находим  $t_B$  — момент прихода сигнала в точку  $B$ :

$$t = t_A + \frac{x_B - x_A}{u} \equiv t_B. \quad (19)$$

Из требования, чтобы причина (испускание сигнала в точке  $A$  в момент  $t_A$ ) предшествовала следствию (приход сигнала в точку  $B$  в момент  $t_B$ ), т.е. из неравенства  $t_A < t_B$ , получаем условие

$$u > 0. \quad (20)$$

Выше описаны действия экспериментатора, находящегося в системе отсчета  $K$  ( $K$ -наблюдателя), который ставит опыт по передаче сигнала из точки  $A$  в точку  $B$ .  $K$ -наблюдатель считает, что время  $t$  течет, как и должно быть, из настоящего в будущее и по мере возрастания параметра  $t$  в интервале  $(t_A, t_B)$  сигнал приближается к точке  $B$ .

Теперь преобразуем эти результаты в систему отсчета  $K'$ . **Полученные таким способом результаты будут соответствовать точке зрения воображаемого экспериментатора, которого мы условились называть  $\tilde{K}'$ -наблюдателем.**

Согласно результатам предыдущего раздела, 4-векторам  $(ct, x_A)$ ,  $(ct, x_B)$  и  $(ct, x(t))$ , описывающим движение, соответственно, частицы  $A$ , частицы  $B$  и сигнала в системе отсчета  $K$ , отвечают в системе отсчета  $K'$  4-векторы  $(ct'_A, x'_A(\tilde{t}'_A))$ ,  $(ct'_B, x'_B(\tilde{t}'_B))$  и  $(ct', x'(\tilde{t}'))$ . Здесь  $\tilde{t}'_A$ ,  $\tilde{t}'_B$  и  $\tilde{t}'$  — локальные времена в системе отсчета  $K'$ , относящиеся, соответственно, к частице  $A$ , частице  $B$  и сигналу. В силу преобразований Лоренца эти временные координаты связаны с глобальным временем  $t$  в системе отсчета  $K$  равенствами (ср. с формулами (13))

$$\begin{aligned} \tilde{t}'_n &= \gamma \left( t - \frac{v_0}{c^2} x_n \right) = t'_n + \gamma (t - t_n), \quad n = A, B, \\ \tilde{t}' &= \gamma \left( t - \frac{v_0}{c^2} x(t) \right) = t'_A + \gamma \left( 1 - \frac{v_0 u}{c^2} \right) (t - t_A). \end{aligned} \quad (21)$$

Законы движения частиц и сигнала в системе отсчета  $K'$  с точки зрения  $\tilde{K}'$ -наблюдателя таковы (см. соотношения (11) и (16)):

$$\begin{aligned} x'_n(\tilde{t}'_n) &= x'_n - v_0(\tilde{t}'_n - t'_n), \quad n = A, B, \\ x'(\tilde{t}') &= x'_A + u(\tilde{t}' - t'_A). \end{aligned} \quad (22)$$

В соотношениях (21) и (22) величины  $x'_n$ ,  $t'_n$  и  $u$  определены формулами (2) и (4).

Согласно (22), с точки зрения  $\tilde{K}'$ -наблюдателя рассматриваемая задача характеризуется тремя локальными временными координатами —  $\tilde{t}'_A$ ,  $\tilde{t}'_B$  и  $\tilde{t}'$ , зависимость которых от времени  $t$  в системе отсчета  $K$  дается формулами (21). Проанализируем эту зависимость в интервале  $(t_A, t_B)$ , отвечающем процессу распространения сигнала с момента испускания в точке  $A$  до момента приема в точке  $B$ .

Из равенств (21) видно, что в момент испускания сигнала в точке  $A$ , т.е. при  $t = t_A$ ,

$$\hat{t}'_A = \hat{t}' = t'_A, \quad \hat{t}'_B = t'_A - \frac{u}{u_0} D,$$

а в момент прихода сигнала в точку  $B$ , т.е. при  $t = t_B$ ,

$$\hat{t}'_A = t'_A + D, \quad \hat{t}'_B = \hat{t}' = t'_A + \left(1 - \frac{u}{u_0}\right) D,$$

где  $u_0 = \frac{c^2}{v_0}$ ,  $D = \gamma(t_B - t_A)$ . Из последних соотношений и равенств (21) следует, что

$$\hat{t}'_B - \hat{t}'_A = -\frac{u}{u_0} D < 0,$$

т.е. для произвольного момента времени  $t$  локальное время частицы  $B$ , принимающей сигнал, находится в прошлом по отношению к локальному времени частицы  $A$ , испустившей сигнал. При этом локальные времена частиц  $A$  и  $B$  являются возрастающими функциями  $t$ , а локальное время сигнала является возрастающей функцией  $t$  при  $u < u_0$ , убывающей функцией  $t$  при  $u > u_0$  и остается постоянным при  $u = u_0$ .

Отметим равенство

$$t'_B - t'_A = \gamma(t_B - t_A) \left(1 - \frac{v_0 u}{c^2}\right) = \left(1 - \frac{u}{u_0}\right) D, \quad (23)$$

которое следует из (2) и совпадает с первым из равенств (3). Физический смысл величин, входящих в левую часть этого равенства, таков:  $t'_A$  — локальное время частицы  $A$  в момент испускания ею сигнала,  $t'_B$  — локальное время частицы  $B$  в момент прихода к ней сигнала в системе отсчета  $K'$ . Согласно (23)  $t'_B < t'_A$  при  $u > u_0$ , если  $t_B > t_A$ . Отсюда не следует, однако, что в системе отсчета  $K'$  нарушается принцип причинности. Последнее имело бы место лишь в том случае, если бы величины  $t'_A$  и  $t'_B$  были моментами глобального времени в системе отсчета  $K'$ . Но в рассматриваемой здесь задаче, полученной в результате перехода из системы отсчета  $K$  с глобальным временем  $t$  в систему отсчета  $K'$ , глобальное время, относящееся к системе отсчета  $K'$ , не определено. Следует подчеркнуть, что моменты  $t'_A$  и  $t'_B$  отвечают моментам, соответственно,  $t_A$  и  $t_B$  глобального времени  $t$  в системе отсчета  $K$ , которые, как и должно быть, подчиняются условию причинности  $t_B > t_A$ .

Отметим, что при фиксированном значении глобального времени в какой-либо системе отсчета локальное время частицы в другой системе отсчета может изменяться в широком диапазоне. Так, из формулы  $t' = \gamma\left(t - \frac{v_0}{c^2}x\right)$ , где  $t$  — глобальное время в системе отсчета  $K$ , видно, что локальное время  $t'$  существенно зависит от координаты частицы  $x$ :  $t' \rightarrow \pm\infty$  при  $x \rightarrow \mp\infty$ . Если частица движется по закону  $x = ut$ , где  $u = \text{const} > 0$ , то при  $u > u_0$  обычный ход глобального времени  $t$  в системе отсчета  $K$  (из прошлого в будущее) сопровождается течением вспять локального времени частицы в системе отсчета  $K'$ . Как разъяснялось выше, **это обстоятельство не означает нарушения принципа причинности и указывает лишь на неэквивалентность систем отсчета  $K$  и  $K'$  с физической точки зрения.**

Для полноты картины остается рассмотреть задачу о переносе сигнала из одной точки в другую в системе отсчета  $K'$  с точки зрения  $K'$ -наблюдателя, т.е. исследователя, находящегося в этой системе отсчета и использующего временную координату  $t'$  в качестве глобального времени. В этой системе отсчета законы движения частиц  $A$  и  $B$  и сигнала имеют вид (ср. с уравнениями движения (22)):

$$\begin{aligned} x'_n(t') &= x'_n - v_0(t' - t'_n), \quad n = A, B, \\ x'(t') &= x'_A + u'(t' - t'_A), \end{aligned} \quad (24)$$

где  $u'$  - скорость сигнала в системе отсчета  $K'$ .

В момент времени  $t' = t'_A$  из точки  $A$  посылается сигнал, который достигает точки  $B$  в момент  $t'$ , определяемый равенством (ср. с равенством (18))

$$x(t') = x'_B(t').$$

Решение последнего уравнения дает:

$$t' = t'_A + \frac{x'_B(t') - x'_A(t')}{u' + v_0} = \hat{t}'_B. \quad (25)$$

Числитель дроби, входящей в (25), представляет собой расстояние между частицами  $A$  и  $B$  в системе отсчета  $K'$ . Это выражение с помощью преобразований Лоренца можно привести к виду:

$$x'_B(t') - x'_A(t') = x'_B - x'_A + v_0(t'_B - t'_A) = \gamma^{-1}(x_B - x_A).$$

Последняя формула описывает лоренцево сокращение длины стержня, движущегося со скоростью  $v_0$  относительно системы отсчета  $K$  (величина  $x_B - x_A$  является собственной длиной стержня). Из требования, чтобы причина предшествовала следствию, т.е. из условия  $t'_A < \hat{t}'_B$ , вытекает неравенство (ср. с (20)):

$$u' + v_0 > 0, \quad (26)$$

смысл которого состоит в том, что при выполнении противоположного неравенства сигнал, испущенный частицей  $A$ , будет удаляться от частицы  $B$ .

Если в неравенство (26) подставить выражение для  $u'$  (4), т.е. перейти в систему отсчета  $K$ , то получается условие

$$\frac{1}{\gamma^2} \frac{u}{1 - \frac{v_0 u}{c^2}} > 0,$$

из которого, казалось бы, вытекает следующее ограничение на скорость сигнала в системе отсчета  $K$ :  $u < u_0$ . Однако такое заключение ошибочно, поскольку  $K'$ -наблюдатель, преобразовав полученные им результаты в систему отсчета  $K$ , пришел бы к задаче, в которой глобальное время не определено и вместо глобального времени имеются локальные времена частиц, участвующих в процессе. Такая задача качественно отличается от той, которую имеет перед собой реальный  $K$ -наблюдатель, работающий с глобальным временем в своей собственной системе отсчета (как мы видели, единственное ограничение на скорость сигнала в системе отсчета  $K$  дается неравенством (20)).

Результаты нашего анализа проблемы позволяют заключить, что не возникает каких-либо затруднений с передачей сверхсветового сигнала из одной точки в другую. **Кажущийся парадокс с нарушением принципа причинности** возникает в том случае, если результаты, полученные экспериментатором по передаче сверхсветового сигнала в какой-либо инерциальной системе отсчета, преобразовать в другую инерциальную систему отсчета, движущуюся относительно первой. В преобразованной указанным способом задаче каждая частица характеризуется своим локальным временем, и **локальное время сверхсветового сигнала может, действительно, течь вспять. Но это не означает нарушения принципа причинности**, так как последний формулируется не на языке локальных времен частиц, составляющих физическую систему, а на языке глобального времени, описывающего эволюцию всей системы.

## 5. Явление относительности физических процессов

Полученные в данной работе результаты позволяют более глубоко понять физическое содержание явления относительности квантовых процессов, предсказанного нами в 1976 г. [18]. Воспроизведем некоторые из результатов работы [18].

Как известно [20], уравнения квантовой электродинамики релятивистски инвариантны, т.е. сохраняют свою форму при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую. Конкретно, если полевые операторы электронного поля  $\Psi(x)$  и 4-потенциала электромагнитно-

го поля  $A(x)$  в представлении Гейзенберга являются решениями системы уравнений Максвелла–Дирака в инерциальной системе отсчета  $K$ , то операторы

$$\mathbb{L}\mathbb{C}(x) \equiv \tilde{\mathbb{H}}(x'), \quad \mathbb{L}A(x) \equiv \tilde{A}'(x') \quad (27)$$

удовлетворяют уравнениям квантовой электродинамики в системе отсчета  $K'$ , связанной с  $K$  преобразованием Лоренца  $L$  (оператор  $\mathbb{L}$  в (27) определен равенствами  $\mathbb{L}^{-1}\mathbb{L}^m\mathbb{L} = (L\mathbb{L})^m$ ,  $Lx = x'$ ,  $\mathbb{L}^m$  – матрицы Дирака,  $x$  и  $x'$  — 4-радиусы-векторы точки в пространстве-времени в системах отсчета  $K$  и  $K'$ ). Релятивистская инвариантность системы уравнений Максвелла–Дирака представляет собой математическую формулировку принципа относительности в квантовой электродинамике.

Операторы  $\mathbb{C}(x)$  и  $A(x)$  связаны с операторами  $\mathbb{C}_0(x)$  и  $A_0(x)$  полей свободных, не взаимодействующих частиц с помощью оператора эволюции  $S(t)$ :

$$\mathbb{C}(x) = S^+(t)\mathbb{C}_0(x)S(t), \quad A(x) = S^+(t)A_0(x)S(t). \quad (28)$$

После выполнения процедуры перенормировки массы и заряда электрона операторы  $\mathbb{C}_0(x)$  и  $A_0(x)$  описывают поля реальных, физических частиц. Взаимодействие электронного и электромагнитного полей предполагается включающимся и выключающимся адиабатически медленно, т.е. гамильтониан взаимодействия пропорционален величине  $e^{-e|t|}$  ( $e \rightarrow +0$ ). Операторы  $S(t)$ ,  $\mathbb{C}(x)$  и  $A(x)$  удовлетворяют начальным условиям

$$S(t) \rightarrow 1, \quad \mathbb{C}(x) \rightarrow \mathbb{C}_0(x), \quad A(x) \rightarrow A_0(x) \text{ при } t \rightarrow -\infty, \quad et \rightarrow -\infty. \quad (29)$$

Операторы поля  $\mathbb{C}(x)$  и  $A(x)$  имеют следующий физический смысл: они описывают поведение взаимодействующих полей в системе отсчета  $K$  с точки зрения исследователя, находящегося в  $K$  ( $K$  – наблюдателя).

Естественно поставить следующий вопрос: описывают ли полевые операторы  $\tilde{\mathbb{H}}(x')$  и  $\tilde{A}'(x')$ , определенные соотношениями (27) и (28), поведение взаимодействующих полей в системе отсчета  $K'$  с точки зрения  $K'$ -наблюдателя? Очевидно, что последний, описывая динамику независимо от  $K$ -наблюдателя, использует полевые операторы

$$\mathbb{H}'(x') = S'^+(t')\mathbb{H}_0(x')S'(t'), \quad A'(x') = S'^+(t')A'_0(x')S'(t'), \quad (30)$$

удовлетворяющие начальному условию

$$\mathbb{H}'(x') \rightarrow \mathbb{H}_0(x'), \quad A'(x') \rightarrow A'_0(x') \text{ при } t' \rightarrow -\infty, \quad et' \rightarrow -\infty, \quad (31)$$

причем

$$S'(t') \rightarrow 1 \text{ при } t' \rightarrow -\infty, \quad et' \rightarrow -\infty. \quad (32)$$

Величины со штрихом в (30)-(32) имеют для  $K'$ -наблюдателя тот же смысл, что и величины без штриха в (28) и (29) для  $K$ -наблюдателя. Поэтому поставленный вопрос можно сформулировать иначе: выполняются ли тождества

$$\tilde{\mathbb{H}}(x') \equiv \mathbb{H}'(x'), \quad \tilde{A}'(x') \equiv A'(x') ? \quad (33)$$

В стандартной формулировке квантовой электродинамики считается само собой разумеющимся, что величины  $\tilde{\mathbb{H}}(x')$  и  $\tilde{A}'(x')$  должны совпадать с величинами  $\mathbb{H}'(x')$  и  $A'(x')$ , соответственно, и поэтому вопрос о различии между ними не ставится.

В работе [18], на конкретном примере рассеяния электрона во внешнем поле электромагнитной волны, было впервые показано, что в силу относительности времени в различных инерциальных системах отсчета соотношения (33) не выполняются. Согласно [18,19], при исследовании квантовых процессов рассеяния возникает **одно обстоятельство весьма деликатного свойства**, которое может ускользнуть из поля зрения при поверхностном рассмотрении. Речь идет о том, что время течет по-разному в различных инерциальных системах отсчета, так что время  $t$ , которым оперирует  $K$ -наблюдатель, не совпадает с временем  $t'$ , с которым работает  $K'$ -наблюдатель. По этой причине **квантовый процесс рассеяния взаимодействующих полей в системе отсчета  $K$ , т.е. процесс, в котором взаимодействие между полями вклю-**

чается во времени  $t$  и затем отключается, не является процессом рассеяния с точки зрения наблюдателя, находящегося в любой другой инерциальной системе отсчета, движущейся относительно  $K$  (в этой второй системе отсчета взаимодействие включается и отключается по часам, идущим иначе, чем в системе отсчета  $K$ ).

Поэтому результаты экспериментов по рассеянию, полученные независимо в двух инерциальных системах отсчета находящимися в них наблюдателями и пересчитанные с помощью преобразований Лоренца в какую-нибудь одну систему отсчета, окажутся, вообще говоря, различными (при одинаковых начальных состояниях в рассматриваемых процессах). Как показано в [18],  $\tilde{\psi}^- \psi \sim \nu_0 I$ , где  $\psi$  и  $\tilde{\psi}$  — зарегистрированные детектором, находящимся в системе отсчета  $K$ , частоты фотонов, испущенных электроном, покоящимся относительно  $K$ , в двух экспериментах по рассеянию, один из которых проводится в  $K$ , а другой — независимо в системе отсчета, движущейся относительно  $K$  со скоростью  $\nu_0$  ( $I$  - интенсивность электромагнитной волны, в поле которой происходит рассеяние электрона).

По результатам экспериментов по рассеянию частиц, проведенных, независимо друг от друга, двумя экспериментаторами, находящимися в движущихся друг относительно друга инерциальных системах отсчета, можно, очевидно, определить скорость относительного движения этих систем отсчета. С этой целью указанные экспериментаторы должны поставить в своих системах отсчета однотипные эксперименты, и затем одному из них достаточно зарегистрировать частоты частиц, рассеянных в обеих системах отсчета. Сопоставление этих частот позволяет, в принципе, определить скорость относительного движения систем отсчета, в которых проводились эксперименты по рассеянию (подробнее об этом см. [18, 19]).

Ввиду принципиальной важности результатов [18], остановимся на них подробнее. Система взаимодействующих электронного и электромагнитного полей описывается операторами  $\Psi(x), A(x)$  (28) и  $\Psi(x'), A'(x')$  (30) с точки зрения  $K$ - и  $K'$ -наблюдателей. Операторы  $\Psi_0(x)$  и  $A_0(x)$  в (28) можно представить в виде обычных разложений по полному набору волновых функций, например,

$$\Psi_0(x) = \sum_i [a_i \psi_i^{(+)}(x) + b_i^+ \psi_i^{(-)}(x)]. \quad (34)$$

Здесь  $a_i$  и  $b_i^+$  - операторы уничтожения электрона и рождения позитрона в состоянии  $i$ ;  $\psi_i^{(\pm)}(x)$  - волновые функции свободной частицы; операторы  $a_i$  и  $b_i$  удовлетворяют обычным перестановочным соотношениям и равенствам:  $a_i |0\rangle = b_i |0\rangle = 0$ ,  $|0\rangle$  - вакуумный кет-вектор. Аналогичным образом могут быть записаны и операторы  $\Psi_0'(x')$  и  $A_0'(x')$ , которые имеют для  $K'$ -наблюдателя тот же смысл, что и операторы  $\Psi_0(x)$  и  $A_0(x)$  для  $K$ -наблюдателя. Например,

$$\Psi_0'(x') = \sum_i [a_i' \psi_i'^{(+)}(x') + b_i'^+ \psi_i'^{(-)}(x')], \quad (35)$$

где смысл обозначений очевиден, причем  $a_i' |0'\rangle = b_i'^+ |0'\rangle = 0$ ,  $|0'\rangle$  - вакуумный кет-вектор в системе отсчета  $K'$ .

В качестве полного набора волновых функций  $\psi_i'^{(\pm)}(x')$  можно использовать в (35) функции

$$\psi_i'^{(\pm)}(x') = L \psi_i^{(\pm)}(x),$$

где  $x' = Lx$ ,  $L = L(L)$  — матрица лоренцева преобразования, связывающая между собой волновые функции электрона в системах отсчета  $K$  и  $K'$ . Тогда равенство

$$\Psi_0'(x') = L \Psi_0(x)$$

дает:

$$a_i' = a_i, \quad b_i'^+ = b_i. \quad (36)$$

Как разъясняется в [18], если внешнее электромагнитное поле изменяет энергетический спектр электрона, то равенство

$$\tilde{\Psi}(x') = \text{ЛЩ}(x)$$

не выполняется тождественно при всех значениях  $x$  и поэтому  $a'_i \neq a_i$ ,  $b'_i \neq b_i$ . Последние неравенства и приводят к различию в точках зрения  $K$  - и  $K'$  -наблюдателей на характер квантового процесса в фиксированной системе отсчета, т.е. к явлению относительности квантового процесса.

Объяснение эффекта относительности квантовых процессов, приведенное выше, неполно и имеет частный характер. Результаты, изложенные в разделах 2-4 данной работы, указывают на то, что **явление относительности физических процессов имеет универсальный характер**: оно возникает не только в квантовых, но и в классических системах, состоящих более, чем из одной частицы. **Происхождение этого эффекта обусловлено различием между глобальным временем**, относящимся к инерциальной системе отсчета, в которой исследователь описывает временную эволюцию физической системы, **и локальными временами частиц**, входящих в рассматриваемую физическую систему, которые появляются при переходе из исходной системы отсчета в какую-либо другую, движущуюся относительно первой равномерно и прямолинейно.

Соотношения (33) не выполняются тождественно при всех значениях  $x'$  по той простой причине, что время  $t'$ , входящее в левые части этих соотношений, отличается от времени  $t$ , входящего в правые части. **Время  $t'$ , стоящее слева, — это локальное время** в системе отсчета  $K'$ , относящееся к элементарному событию, отвечающему пространственно-временной точке  $x$  в системе отсчета  $K$ . **А время  $t$ , стоящее справа, — это глобальное время** в системе отсчета  $K'$ . **Различие между глобальным временем одной инерциальной системы отсчета и локальным временем частиц в любой другой инерциальной системе отсчета имеет фундаментальный характер.** Именно это различие и является причиной возникновения эффекта относительности физических процессов.

Уточним физический смысл полевых операторов  $\tilde{\Psi}(x')$  и  $\tilde{A}(x')$ , определенных формулами (27).

Будучи формально решениями динамических уравнений в системе отсчета  $K'$ , эти величины не описывают, однако, временную эволюцию физических полей (электронного и электромагнитного) в системе отсчета  $K'$ , поскольку момент времени  $t'$ , входящий в (27), является локальным временем, относящимся к элементарному событию  $x'$  в системе отсчета  $K'$ , а не глобальным временем этой системы отсчета. Действительно, если время  $t$ , рассматриваемое как глобальное время в системе отсчета  $K$ , изменяется в некотором интервале  $(t_0, t_1)$ , то величины  $\Psi(x)$  и  $A(x)$  описывают временную эволюцию физических полей в системе отсчета  $K$  с точки зрения  $K$ -наблюдателя. Но момент локального времени  $t'$  может принимать произвольное значение в интервале  $(-\infty, +\infty)$ , определяемое выбором пространственных координат точки  $x$  в системе отсчета  $K$ . Следовательно, **величины  $\tilde{\Psi}(x')$  и  $\tilde{A}(x')$  характеризуют состояние полей в точке  $x'$ , но не дают информации о развитии полей во времени с точки зрения  $K'$ -наблюдателя (т.е. с точки зрения наблюдателя, описывающего временную последовательность событий на языке глобального времени).** Можно сказать, что величины  $\tilde{\Psi}(x')$  и  $\tilde{A}(x')$  дают описание полей с точки зрения  $\tilde{K}'$ -наблюдателя (см. раздел 3), который, не имея в своем распоряжении однозначно определенного глобального времени, оперирует локальными временами элементарных событий в системе отсчета  $K'$  (число этих времен несчетно).

С другой стороны, ничто не мешает принять время  $t'$ , входящее в правые части равенств (27), в качестве глобального времени в системе отсчета  $K'$ . Тогда операторы  $\tilde{\Psi}(x')$  и  $\tilde{A}(x')$  будут описывать временную эволюцию физических полей в системе отсчета  $K'$ , а время  $t$  будет играть роль локального времени в системе отсчета  $K$  и, следовательно, операторы  $\Psi(x)$  и  $A(x)$  перестанут описывать временную эволюцию полей в системе отсчета  $K$ .

Следует отметить важный момент, касающийся принципа относительности. В литера-

туре принцип относительности формулируется следующим образом (см., напр., [21]): уравнения движения сохраняют свою форму в различных инерциальных системах отсчета. **Существенно, что под уравнением движения здесь нужно понимать уравнение движения для одночастичной системы.** Действительно, как видно из результатов раздела 3, уравнения движения системы из двух частиц имеют разную форму в системе отсчета с глобальным временем и в любой другой системе отсчета, связанной с первой преобразованиями Лоренца, хотя уравнения движения для каждой частицы в отдельности лоренц-инвариантны.

На первый взгляд, это утверждение противоречит тому факту, что уравнения квантовой электродинамики релятивистски инварианты, хотя они описывают не одну частицу, а взаимодействующие поля — электронное и электромагнитное. Противоречия здесь нет по той причине, что в систему уравнений Максвелла-Дирака входит 4-радиус-вектор только одной пространственно-временной точки, т.е. по форме эта система уравнений имеет одночастичный характер. Именно потому, что уравнения квантовой электродинамики описывают поведение не одной частицы, а взаимодействующих полей, электродинамические процессы, происходящие с участием нескольких частиц, должны иметь относительный характер в том смысле, какой разъясняется в данной работе.

## **6. Выводы**

Как отмечалось в разделе 2, возможность попятного хода времени при движении сверхсветовой частицы Эйнштейн рассматривал как бесспорное указание на то, что в природе не может быть сверхсветовых сигналов. На основании анализа проблемы, проведенного в данной работе и в наших предыдущих работах, можно с уверенностью утверждать, что Эйнштейн заблуждался в отношении сверхсветовых сигналов. В связи с этим возникает вопрос: какова физическая сущность того явления, которое ошибочно связывалось с невозможностью сверхсветовой коммуникации?

На наш взгляд, **главное в рассматриваемой проблеме состоит в том, что имеется существенное различие между глобальным временем инерциальной системы отсчета, в которой находится наблюдатель, описывающий поведение физической системы, и локальным временем частиц, которое входит в преобразования Лоренца.** Представление о существовании светового барьера возникло в результате отождествления глобального времени с локальным, которое может быть справедливым только для одночастичной задачи и заведомо теряет смысл в случае многочастичных задач. Именно **из-за отождествления глобального времени с локальным** долгие годы сохранялась **иллюзия** относительно существования ограничения на величину скорости передачи информации, обусловленного принципом причинности.

Сформулируем основные выводы, следующие из представленного в работе анализа проблемы сверхсветовой коммуникации.

Анализ простой динамической модели причинно-следственной связи между двумя событиями убеждает в том, что в случае сверхсветовых сигналов не возникает каких-либо затруднений с принципом причинности. Имеющиеся в литературе доводы против существования сверхсветовых сигналов ошибочны, так как они основаны на неправомерном отождествлении глобального времени с локальным.

Разъясняется физическая сущность явления относительности физических процессов и отмечается его универсальный характер. Уточняется физическое содержание принципа относительности. Подчеркивается, что, используя явление относительности физических процессов, по результатам экспериментов по рассеянию частиц, проведенных в двух инерциальных системах отсчета, можно в принципе определить скорость относительного движения систем отсчета, в которых проводились эксперименты. Поскольку **локальные времена  $t$  и  $t'$** , входящие в преобразования Лоренца, связывающие между собой инерциальные системы отсчета  $K$  и  $K'$ , совпадают с **глобальными временами**, входящими в уравнения движения физической системы в этих системах отсчета, лишь в случае одночастичной системы либо системы, уравнения движения которой по форме сводятся к уравнениям движения одной частицы, то принцип относительности имеет физический смысл только для одночастичных систем либо для систем, сводящихся к одночастичным в указанном выше смысле.

Как справедливо отмечал Дирак [22] (см. с. 66), **развитие физики происходит в результате больших скачков на фоне постепенной и непрерывной эволюции**, в ходе которой стандартными методами разрабатываются идеи, возникшие вследствие скачков. **Большие скачки сводятся к преодолению предрассудков**, которые могут существовать довольно долго, и приводят к **новому представлению о Природе**.

Одним из таких предрассудков было представление о существовании светового барьера, возникшее на основании специальной теории относительности. Теперь, когда поняты истоки и причины заблуждения в отношении сверхсветовых сигналов, вскрыты механизмы, способствовавшие длительному сохранению его в сознании людей, и осознана истинная роль сверхсветовых сигналов в природе, устраняются препятствия, долгое время сдерживавшие развитие фундаментальной теоретической физики, и открываются широкие перспективы создания качественно новых средств и систем коммуникации, которые по своим физическим характеристикам намного превзойдут существующие ныне [4]. Открывается широкое поле деятельности в той области естествознания, которая в течение многих десятилетий не воспринималась всерьез, — в области энергоинформационного обмена в природе [23-26].

Автор благодарит В.П. Прокофьева за интерес к работе, просмотр рукописи статьи и замечания, учет которых способствовал уточнению физического содержания работы.

### Л и т е р а т у р а :

1. (а) Эйнштейн А. *Принцип относительности и его следствия в современной физике*. Собрание научных трудов, т.1. — М.: Наука, 1965. — С. 138 — 164; (b) Einstein A. Principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne. Arch. sci. phys. Natur., ser. 4, 1910, **29**, 5-28, 125-144.
2. Oleinik V.P. *The Problem of Electron and Superluminal Signals*. (Contemporary Fundamental Physics) (Nova Science Publishers, Inc., Huntington, New York, 2001).
3. Олейник В.П. *Проблема сверхсветовой коммуникации: сверхсветовые сигналы в электромагнитном поле и их физический носитель*. Физика сознания и жизни, космология и астрофизика, №1, с.21-42, 2003.
4. Олейник В.П. *Световой барьер и сверхсветовая передача информации. Накануне революции в системах коммуникации*. Физика сознания и жизни, космология и астрофизика, №2, с.20-40, 2005.
5. Козырев Н.А. *Астрономическое доказательство реальности четырехмерной геометрии Минковского*. Проявление космических факторов на Земле и звездах. Серия: Проблемы исследования Вселенной. — М.-Л., 1980. — вып.9. — С. 85 — 93.
6. Козырев Н.А. *Избранные труды*. — Л.: Изд. ЛГУ, 1991.
7. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. *О дистанционном воздействии звезд на резистор*. ДАН СССР. — 1990. — т.314, №2. — С. 352 — 355.
8. Лаврентьев М.М., Гусев В.А., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. *О регистрации истинного положения Солнца*. ДАН СССР. — 1990. — т.315, №2. — С. 368 — 370.
9. Акимов А.Е., Ковальчук Г.У., Медведев В.П., Олейник В.К., Пугач А.Ф. *Предварительные результаты астрономических наблюдений неба по методике Н.А. Козырева*. — АН Украины, Главная астрономическая обсерватория. Препринт ГАО-92-5Р, 1992. — 16 с.
10. Арепьев Ю.Д. *Скорость света: от нуля до бесконечности*. ИТ сборник: Правовое, нормативное и метрологическое обеспечение системы защиты информации в Украине, #6 (Киев, 2003), с.120-132.
11. Anisovich K.V. The Relativistic Superluminal Signal Carrying Information. *Problems of High Energy Physics and Field Theory (Proceeding of the XIV workshop)* (Nauka, Moscow, 1992) p.57-64.
12. Barut A.O. and Chandola H.C. Localized Tachyonic Wavelet Solutions of the Wave Equation. *Phys. Lett.*, **A180**, p.5-8 (1993); Barut A.O. Localized Rotating Wavelets with Half Integer Spin. *Phys. Lett.*, **A189**, p.277-281 (1994).
13. Donnelly R. and Ziolkowski R.W. Designing Localized Waves. *Proc. R. Soc. London*, **A460**, p.541-565 (1993).
14. Recami E. On Localized 'X-shaped' Superluminal Solutions to Maxwell Equations. *Physica*, **A252**, p.586 (1998).
15. Zamboni Rached M. and Recami E. A Set of New Localized Superluminal Solutions to the Maxwell Equations. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **27**, # 2, p.187-216 (2002).
16. Kadomtsev V. B. Dynamics and Information. *Physics-Uspokhi*, **37** (5), p.425-500 (1994).



17. Олейник В.П. *Информационное поле и сверхсветовая коммуникация*. Доклады VIII Международного научного конгресса «Биоинформационные и энергоинформационные технологии в производственной, в социальной и в духовной сферах», т.2, Москва-Барнаул, 2005, с.84-91.
18. Олейник В.П. *Влияние коллективных возбуждений на характер квантовых процессов рассеяния во внешнем электромагнитном поле*. Квантовая электроника, 1978, вып..15, с. 88-97.
19. Олейник В.П., Белоусов И.В. *Проблемы квантовой электродинамики вакуума, диспергирующих сред и сильных полей*. Кишинев, Штиинца, 1983.
20. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. *Введение в теорию квантованных полей*. М., Наука, 1976.
21. Логунов А.А. *Лекции по теории относительности и гравитации*. Современный анализ проблемы. М., Наука, 1987.
22. Дирак П.А.М. *Воспоминания о необычайной эпохе*. М., Наука, 1990.
23. Дульнев Г.Н. *В поисках нового мира*. С.-Пб., Весь, 2004.
24. Госьков П.И. *Некомпьютерные информационные технологии начала XXI века (ч.1)*. Биоэнергоинформационные и энергоинформационные технологии. Т.1. Барнаул. Изд. АлтайГТУ, 2002, с.3-27.
25. Бахишев Г., Орлов И., Лазаренко С. *Защита от пси- и технотронных полевых воздействий*. Донецк, Изд. Апекс, 2004.
26. Швевс Г.И. *Прорыв в прошлое*. Кн..1. Одесса, Маяк, 1998.

*Статья поступила в редакцию 11.09.2005 г.*

*Oleinik V. P.*

**Superluminal signals,  
cause-consequence relation, and the relativity phenomenon of physical processes.**

**Delusion of the century: sources, essence, overcoming**

Till now in the literature there was no consistent analysis, based on dynamic model of the causal relation between events caused by superluminal signals. The purpose of the paper is to remove this gap in our knowledge, which contributed to the preservation of prejudices regarding superluminal signals. With a simple dynamic model, describing the cause-consequence relation between two events, it is shown that in case of superluminal signals there are no problems with causality principle. The arguments against the existence of superluminal signals, available in the literature, are erroneous because they are based on the identification of different quantities — global time and local time. The physical essence of the relativity phenomenon of physical processes is explained and its universal character is noted. The physical contents of relativity principle is specified. The results of the paper, together with results of previous researches, allow one to assert that **the sources and reasons of the error regarding superluminal signals are now understood, the mechanisms of its preservation for a long time in consciousness of people are elucidated, and the true role of superluminal signals in nature is revealed**. Thereby the obstacles to the investigations in the field of superluminal communication are removed and the inviting prospects of creating the qualitatively new communication systems are opened.

*Keywords:* superluminal communication, information field, own field, cause-consequence connection, dynamic model, global and local time, selfaction.