

Об одновременности событий в специальной теории относительности

Мордовин Александр Александрович,
кандидат технических наук,
Военная академия г. Москва
mordovin.aa@yandex.ru
01.04.02

Аннотация. Проведен анализ физического смысла термина "событие" в релятивистской физике. Определены события ковариантные (незарегистрированные) и события редуцированные (зарегистрированные). Показано, что для полноты СТО преобразования Лоренца, в соответствии с которыми пересчитываются уравнения физики, должны быть дополнены преобразованиями Галилея для пересчета координат зарегистрированных событий.

Ключевые слова: относительность, одновременность, событие, ковариантность, редукция

On the Simultaneity of Events in the Special Theory of Relativity

Mordovin Alexander Aleksandrovich,
Ph. D., Military Academy, Moscow

Abstract. Is carried out the analysis of the physical sense of term "event" relativistic physics. Specific events covariant (not registered) an event reduced (registered). It shown that for the completeness the special theory of relativity conversions of Lorenz in accordance with which recount the equations of physics must be augmented by the conversions of Galileo for the conversion of the coordinates the registered events.

Key words: relativity, simultaneity, event, covariance, reduction

Уточняйте значение слов, и вы избавите
человечество от половины своих заблуждений.
Рене Декарт

Все авторы, излагающие основы СТО, отмечают фундаментальную роль относительности одновременности, присущие этой теории (см., например, [1–4]). Именно осознание относительности одновременности событий привело к пересмотру понятий пространства и времени — основополагающих понятий всего естествознания.

Но удивительным является тот факт, что само понятие "событие" не имеет четкого определения. Чаще всего под событием понимается геометрическая точка в четырехмерном пространстве Минковского, характеризуемая координатами (x, t) . Иногда событие

определяют как то, что происходит в некоторой пространственно-временной точке (x, t) . Первое определение чисто геометрическое; во втором — больше физики, но меньше определенности.

Может показаться, что вопрос трактовки понятия события является надуманным. Чтобы убедиться, что это не так, обратимся к электродинамике, из которой выросла теория относительности. Предположим, что в некоторой системе координат (назовем ее, условно, неподвижной) решена система уравнений Максвелла и определены значения напряженности электрического поля E и магнитно-

го поля H в каждой точке (x, t) этой ИСО. Является ли тот факт, что в точке (x, t) значения поля равны (E, H) событием? Полагая электромагнитное поле физической реальностью, на этот вопрос следует, видимо, дать положительный ответ.

Пересчитаем поле в другую инерциальную систему координат, движущуюся относительно исходной со скоростью v . В этой СК в точке (x', t') , связанной с точкой (x, t) преобразованиями Лоренца, электромагнитное поле будет иметь значение (E', H') , которое, естественно, не равно (E, H) . (Например, заряженное тело в неподвижной системе координат характеризуется только величиной E , в то время как в движущейся СК отличной от нуля будет и магнитное поле H). Поле (E', H') является такой же физической реальностью, как и (E, H) , поэтому его значение в точке (x', t') также является событием.

Теперь необходимо ответить на вопрос: событие (E, H) в точке (x, t) и событие (E', H') в точке (x', t') , связанные преобразованиями Лоренца, это разные события или это одно и то же событие, но с разными значениями наблюдаемых величин? В СТО утверждается, что если (x, t) координаты некоторого события, то именно это же событие в движущейся ИСО имеет координаты (x', t') . Следовательно, согласно этому утверждению, одно и то же событие в точке (x, t) характеризуется бесчисленным числом значений наблюдаемых величин.

Такая трактовка понятия события не может считаться удовлетворительной. Вот если бы поле (E', H') было в точности равно полю (E, H) , то тогда событие (E, H) в точке (x, t) и событие (E', H') в точке (x', t') можно было бы считать одним и тем же событием. Но поле (E, H) не является инвариантом по отношению к преобразованиям Лоренца, поэтому это разные события.

Так как уравнения электродинамики ковариантны относительно преобразований Лоренца, то и события (E, H) и (E', H') в точках (x, t) и (x', t') соответственно целесообразно назвать ковариантными событиями. (Но,

подчеркнем еще раз, это разные события.) События, ковариантные событию (E, H) в точке (x, t) , бесконечно много (по числу ИСО) и все они, в общем случае, различны (характеризуются различными значениями наблюдаемых.)

Именно для ковариантных событий справедлив принцип относительности одновременности и этот факт должен отражаться в формулировке принципа: "если два пространственно разнесенных события одновременны в некоторой инерциальной системе координат, то во всех других ИСО ковариантные им события одновременными быть не могут". В такой формулировке относительности одновременности не содержится ничего парадоксального.

Таким образом, в СТО под событием фактически понимается решение уравнений физики, которое, естественно, обладает предсказательной силой. Так, если решение уравнений Максвелла в неподвижной СК предсказывает значение (E, H) в точке (x, t) , то для того, чтобы в этом убедиться, необходимо измерительный прибор разместить в точке x неподвижно и снять его отсчет в момент времени t . Для регистрации же значения (E', H') в движущейся ИСО прибор следует поместить в точку x' (обязательно неподвижно в этой ИСО) и снять значение наблюдаемой в момент t' .

Естественно, что прибор неподвижный в одной ИСО будет движущимся в другой. Или, другими словами, ни один физический прибор не может быть неподвижным в разных системах отсчета одновременно. Следовательно, из всех ковариантных событий в некоторой пространственно-временной точке зарегистрировано может быть только одно, соответствующее той ИСО, в которой регистрирующее устройство покоится. В этом случае значения наблюдаемых в этой точке, соответствующие другим ИСО, измеренными уже быть не могут.

Здесь напрашивается аналогия с явлением редукции в квантовой физике, когда состояние квантовой системы до измерения эволю-

ционирует унитарно (обратимо). В результате же измерения состояние квантовой частицы необратимо разрушается, и частица скачком (неунитарно) переходит в новое состояние, соответствующее измеренному значению наблюдаемой. Аналогично и в релятивистской физике — до измерения можно унитарно переходить от значений, наблюдаемых в одной системе координат, к их значениям в другой ИСО (преобразования Лоренца обратимы). В результате же измерения происходит редукция к тем значениям наблюдаемых, которые соответствуют той ИСО, в которой измерительный прибор покоится. При этом поле в окрестности точки измерения, вследствие частичного поглощения и дифракции на измерительном приборе, необратимо разрушается.

В силу отмеченного выше, под реальным (редуцированным) событием, или просто событием в общеупотребительном смысле этого слова, целесообразно понимать реакцию регистрирующего устройства на то или иное значение наблюдаемой величины, т. е. факт и результат измерения. Та система отсчета, в которой регистрирующее устройство покоится, становится выделенной, так как фиксируется именно то значение наблюдаемой, которое она имеет в этой ИСО. Следовательно, реальное событие характеризуется не только полученным значением наблюдаемой, но и той системой координат, в которой выполнено измерение.

Для пересчета координат зарегистрированных событий постулаты СТО и преобразования Лоренца не годятся хотя бы потому, что не позволяют осуществить этот пересчет однозначным образом. Действительно, пусть источник света находится в начале координат движущейся ИСО, а фотодетектор расположен в точке x_d неподвижной СК. В момент времени, когда начала координат совпадают ($x = x' = 0$ и $t = t' = 0$), источник излучает короткий импульс света в сторону детектора. Предположим, что диаграмма направленности источника настолько узкая, что детектор импульс света поглощает полностью. Время

детектирования в ИСО, в которой детектор неподвижен, равно $t_d = x_d/c$. Отклик детектора (поглощение импульса света) является реальным событием, которое имеет координаты (x_d, t_d) .

За время t_d источник света переместится на расстояние $x_s = vt_d$. В соответствии с преобразованиями Лоренца, часы в месте расположения источника в момент детектирования покажут время $t'_s = t_d\sqrt{1-\beta^2}$ ($\beta = v/c$). Это означает, что по этим часам промежуток времени от момента излучения $t' = 0$ до момента детектирования равен $t'_d = t'_s = t_d\sqrt{1-\beta^2}$. За это время в движущейся ИСО импульс света пройдет путь $x'_d = ct'_d$ и в точке x'_d исчезнет. Вследствие этого координаты события детектирования (x_d, t_d) в движущейся СК равны

$$(x'_d = ct'_d; t'_d = t_d\sqrt{1-\beta^2}). \quad (1)$$

Однако координаты отклика фотодетектора в движущейся ИСО можно определить непосредственно при помощи преобразований Лоренца без использования уравнения движения импульса света. Подставляя в формулы Лоренца координаты события (x_d, t_d) , получим их значения в движущейся ИСО

$$(x'_d = ct'_d; t'_d = t_d(1-\beta)/\sqrt{1-\beta^2}). \quad (2)$$

Видно, что (1) и (2) не совпадают, несмотря на то, что оба выражения получены на основе постулатов СТО.

Очевидно, что если теория полна и самосогласованна, то различные способы расчета координат одного и того же события в рамках этой теории не должны приводить к разным результатам. Приведенный пример свидетельствует о неполноте СТО.

Не вызывает сомнений, что уравнения Максвелла не меняют своего вида при преобразованиях Лоренца. Это строго доказано

в работах французского математика А. Пуанкаре [5]. Преобразования Лоренца означают, что если в точке (x, t) поле равно (E, H) , то в движущейся ИСО ковариантные значения (E', H') поле принимает не в той же точке $x' = x - vt$, а в точке с измененным масштабом $x' = (x - vt)/\sqrt{1 - \beta^2}$; и не в тот же момент времени $t' = t$, а в момент времени, смещенный на величину $t' = (t - xv/c^2)/\sqrt{1 - \beta^2}$.

Однако если в точке x в момент времени t неподвижной СК зарегистрировано событие (например, поглощение импульса света покоящемся в точке x_d детектором в момент времени t_d), то пространственная координата этого события (именно этого, а не ковариантного ему события) в движущейся ИСО есть координата регистрирующего устройства $x' = x - vt$ в момент измерения (для события детектирования $x'_d = x_d - vt_d$).

В штрихованной системе координат регистрирующее устройство перемещается со скоростью $-v$. Уравнение движения прибора в этой ИСО имеет вид:

$$x' = x'(0) - vt,$$

где $x'(0) = x$ (для детектора имеем $x'_d = x_d - vt'_d$, где $x'_d(0) = x_d$).

Приравнивая два последних равенства, получим $t' = t(t'_d = t_d)$. Отсюда следует, что координаты реальных (регистрируемых) событий пересчитываются по формулам Галилея: $x' = x - vt$, $t' = t$ (x и t — координаты регистрирующего прибора в момент измерения).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в специальной теории относительности преобразования Лоренца, в соответствии с которыми пересчитываются уравнения физики, необходимо дополнить преобразованиями Галилея, в соответствии с которыми необходимо пересчитывать координаты регистрируемых событий.

С таким дополнением специальная теория относительности становится полной, самосогласованной и непротиворечивой теорией. При этом сохраняется требование реляти-

вистской ковариантности уравнений физики, что является главным результатом теории, и в то же время разрешаются все парадоксы СТО (точнее, они с таким дополнением просто отсутствуют).

В частности, соотношение $t' = t$ для редуцированных событий отражает тот факт, что время течет одинаково во всех инерциальных системах координат. Проблем с синхронизацией часов не возникает: для этих целей могут использоваться любые сигналы, скорость распространения которых в данной ИСО известна из экспериментов. Конечно, более предпочтительными являются сигналы оптические вследствие их высокой скорости распространения и постоянства скорости света в различных инерциальных системах отсчета. При этом "рассинхронизации" часов различных ИСО не происходит.

Роль и значение относительности одновременности в СТО несколько преувеличены: она (относительность одновременности) справедлива только для ковариантных, фактически потенциальных, незарегистрированных событий. Одновременность же зарегистрированных событий, в отличие от событий ковариантных, является абсолютной. События, одновременно зарегистрированные в различных точках некоторой ИСО, во всех других инерциальных системах отсчета будут наблюдаться в тех же самых точках и в тот же момент времени. Вследствие этого нет оснований для пересмотра ньютоновской концепции пространства и времени. Однако для анализа релятивистской ковариантности уравнений физики и их решения, четырехмерное пространство Минковского является весьма удобным и полезным инструментом.

Очевидно, что абсолютной является также и последовательность зарегистрированных в некоторой ИСО событий. Так, если в некоторой системе координат в точке x_1 зарегистрировано событие в момент времени t_1 , а в точке x_2 , спустя некоторое время, зафиксировано другое событие в момент времени t_2 ($t_2 \geq t_1$), то во всех других ИСО наблюдатели "увидят" эти

события в те же моменты времени и в той же последовательности. При этом если первое событие является причиной второго, то причинно-следственная связь между этими событиями сохраняется во всех ИСО, даже если взаимодействие между событиями осуществляется со сколь угодно большой скоростью. Следовательно, нарушений принципа причинности при сверхсветовых взаимодействиях не происходит. Отсутствует и "парадокс" близнецов.

В заключении отметим, что более чем за вековую историю СТО, накопилось огромное число публикаций, посвященных обсуждению парадоксальных следствий тео-

рии относительности. Вполне вероятно, что, следуя совету Декарта, приведенному в эпиграфе, многих недоразумений удалось бы избежать.

Список литературы

1. *Эйнштейн А.* Принстонские лекции. М.-Ижевск, 2002. 220 с.
2. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Вып.1, 2. М.: Мир, 1976, 439 с.
3. *Тоннела М.* Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: ИЛ, 1962. 483 с.
4. *Угаров В.* Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977. 383 с.
5. *Тяпкин А.* Принцип относительности: Сборник. М.: Атомиздат, 1973. 332 с.