

## К вопросу об одновременности событий в физике

Григорий Бугаенко<sup>1</sup>    Walter Wegner<sup>2</sup>

Специальная теория относительности установила такую универсальную связь пространства и времени, в силу которой они объединены в одну единую форму существования материи-пространство-время. Пространство и время суть относительные стороны единого "абсолютного" пространства-времени. Длина и промежуток времени (длительность процесса) относительны, их числовое значение различно в различных системах отсчета. Пространственно-временной интервал абсолютен, независим от системы отсчета; его числовое значение во всех инерциальных системах рассматриваемого класса одно и то же.

Объединяя пространство и время, теория относительности вместе с тем не устраняет их различия. Геометрия четырехмерного пространства-времени не является евклидовой, она псевдоевклидова (сигнатура  $+ - - -$ , а не  $++++$ ). Этот факт является следствием глубокого различия между временной и пространственной координатами события.

В отличие от классической механики, в релятивистской механике разноместные события, одновременные в некоторой инерциальной системе отсчета, оказываются не одновременными в другой движущейся системе отсчета, так как длительность процесса относительна. Короче, одновременность разноместных событий относительна.

Относительность одновременности тесно связана с причинной связью событий.

Рассмотрим связь принципа причинности с одновременностью событий и их чередованием во времени.

По отношению к некоторому событию  $A$ , которое происходит в определенном месте в некоторый момент, теория относительности делит все остальные события, происходящие как в этом, так и в других местах, на прошедшие и будущие. События прошедшие - те, которые могут (хотя бы принципиально) повлиять на  $A$ , но на которые  $A$  влиять не может; события будущие - те, на которые  $A$  влиять может, но которые сами на  $A$  влиять не могут. Такое же причинное понимание прошедшего и будущего свойственно и классической физике. Расхождение между теорией относительности и классической физикой связано с понятием "одновременно". Правда, одновременность одноместных событий теория относительности и классическая физика трактуют одинаково (как относящуюся к любой ИСО). Однако в отношении одновременности разноместных событий теория относительности и классическая физика расходятся.

Классическая физика исходит из существования бесконечно большой скорости распространения сигналов. В соответствии с этим принимается, что разноместные события, одновременные в какой-либо одной системе отсчета, являются таковыми и в любой другой, движущейся относительно первой.

В теории относительности картина иная. Теория относительности исходит из существования конечной предельной скорости распространения материальных физических процессов. Поэтому событие, которое произошло в точке  $A$  в момент  $t$ , может влиять на событие в точке  $B$  на расстоянии  $l$  от  $A$ , только начиная с момента  $t + l/c$ , где  $c$  - предельная скорость. События, которые произошли в точке  $B$  до момента  $t - l/c$  могут влиять на  $A$ . Следовательно, в точке  $B$  находящейся от места, где произошло событие  $A$ , на расстоянии  $l$ , прошедшие события отделены от будущих по отношению к событию  $A$  интервалом времени, длительность которого равна  $2l/c$ . Все события, которые происходят в точке  $B$  в интервале времени  $(t - l/c, t + l/c)$ , в принципе не могут иметь причинной связи с событием  $A$ , которое произошло в момент  $t$  в точке  $A$ , удаленной от  $B$  на  $l$ . Поэтому к любому событию в точке  $B$  из указанного интервала понятие "раньше" и позже (по отношению к событию  $A$ ) просто неприменимо. Мы выяснили, какие события в точке  $B$  произошли раньше и какие позже относительно события  $A$ . Возникает вопрос, какое событие произошло в точке  $B$  одновременно с событием  $A$ ? Ведь природа не дает однозначного

ответа: существует в точке  $B$  целый временной интервал, отделяющий прошедшее от будущего-интервал от  $t - l/c$  до  $t + l/c$ . Центральной точкой этого временного интервала является точка  $t$ . Именно ее Эйнштейн и выбрал. Следовательно, событию, которое произошло в точке  $A$  в момент  $t$ , соответствует одновременное ему событие в точке  $B$ , и произошло оно в точке  $B$  в момент  $t$ . Эйнштейн обосновал свой вывод соображениями симметрии.

После выбора точки одновременности все события в  $B$ , происшедшие в полуинтервале времени  $(t - l/c, t)$  формально получают статус более ранних по отношению к событию  $A$ . Так же, все события в точке  $B$ , происшедшие во втором полуинтервале  $(t, t + l/c)$ , автоматически получают статус более поздних по отношению к  $A$ . Однако, поскольку событие в точке  $B$  из временного интервала  $(t - l/c, t + l/c)$  в принципе невозможно причинно связать с события в точке  $A$   $t$ -момент наступления события в точке  $A$ , то понятия "раньше-позже" для событий  $A$  и  $B$  из этого интервала относительны, тогда как для событий  $A$  и  $B$  вне его-абсолютны.

Оказывается, всегда можно подобрать скорость  $v$  подщижној системы так, что относительный порядок событий "раньше-позже" будет изменен на обратный.

В самом деле, пусть в основной инерциальной системе отсчета произошли одно вслед за другим два события: первое в момент времени нуль в начале координат, а второе в момент  $t > 0$  в точке  $A(x = l, y = 0, z = 0)$ . Из преобразования Лоренца для времени следует, что в системе отсчета, которая движется со скоростью  $v$  в направлении оси  $x$  относительно основной системы, эти события произошли: первое-в момент времени также равный нулю, а второе- в момент

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Как видим, момент  $t'$  может быть не только положительным (это означает, что в движущейся системе отсчета второе событие происходит позже), но и отрицательным. Последнее имеет место, если выполняется условие  $t < \frac{v}{c^2}l$  и означает, что в движущейся системе отсчета второе событие происходит раньше первого, хотя в основной системе отсчета первое событие было раньше второго. Таким образом, возможной оказывается перестановка чередования событий во времени вследствие выбора системы



отсчета (подбора величины  $v$ ).

И все же, такая перестановка совершенно не нарушает принцип причинности. Действительно, из необходимого условия  $t < \frac{v}{c^2}l$  следует, что  $ct < \frac{v}{c}l$ , а отсюда, поскольку  $\frac{v}{c} < 1$  - что  $ct < l$ . Полученный вывод  $ct < l$  означает, что даже сигнал с максимально возможной скоростью распространения не успевает пройти расстояние  $l$  от начала координат до точки  $A$ , как в этой точке уже происходит второе событие. А это и означает, что события в точках  $O$  и  $A$  причинно не связаны.

Итак, только для событий, которые причинно не связаны, т.е. принципиально не могут быть связаны из-за отсутствия в природе сигналов со скоростью распространения превышающей скорость света в вакууме, возможны перестановки чередования событий во времени. Но это ни в какой мере не затрагивает принцип причинности, т.к. изменить временное чередование событий, для которых понятия "раньше-позже" являются абсолютными, невозможно.

Заметим, что при фиксированной скорости  $v$  подвижной системы, те моменты  $t$ , для которых  $t' < 0$  (т.е. когда возможна перестановка чередования раньше-позже), заполняют только часть интервала  $l/c$ , равную  $v/c \cdot l/c$  (часть, а не весь интервал, т.к.  $v/c < 1$ ). Однако, увеличивая  $v$ ,  $v \rightarrow c$ , можно охватить и весь интервал  $l/c$ .

Завершим тему рассмотрением светового конуса, дополняя традиционное формально-геометрическое его представление еще и физической картиной. Пусть в точке  $A$  - начале координат системы  $Axyz$  - в начальный момент времени произошло некоторое событие, которое обозначим той же буквой  $A$ . К моменту  $t$  граница области воздействия (принципиального воздействия) события  $A$  образует в реальном трехмерном пространстве  $Axyz$  раздувающуюся сферу радиуса  $ct$  с центром в начале координат  $A$ . В другой движущейся в реальном пространстве инерциальной системе отсчета  $A'x'y'z'$  заключение аналогично: граница области воздействия - сфера радиуса  $ct'$ , но с центром в движущемся начале  $A'$ .

Более полная, хотя и формально-геометрическая интерпретация (с включением воздействия и на событие  $A$ ) проводится в воображаемом четырехмерном пространстве с прямоугольными координатами  $ct, x, y, z$ . Уравнение  $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$  изображающее в реальном трехмерном пространстве сферу, в четырехмерном пространстве является уравнением кругового конуса с вершиной в начале координат; осью конуса является ось времени. Тангенс угла раствора (между осью конуса и образующей) равен

1 - когда  $c = 1$  - предельной скорости распространения воздействия. Этот конус называется световым. Следовательно, неподвижный конус в воображаемом четырехмерном пространстве Минковского (или раздувающаяся сфера в реальном трехмерном) ограничивают "область воздействия события  $A$ ", которое произошло в момент  $t = 0$  в начале координат  $A$ . При переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, движущейся в трехмерном пространстве, имеем новую сферу с новым центром, движущимся относительно первого, тогда как в четырехмерном "мире" такому переходу соответствует простой поворот осей, при неизменном положении светового конуса, простирающегося в двух направлениях - в направлении  $t > 0$  и  $t < 0$ .

Любой точке внутри светового конуса (той области, где проходит ось времени) соответствует событие, которое либо произойдет позже (та часть конуса, где  $t > 0$ ), либо уже произошло раньше (если  $t < 0$ ) события  $A$ . Никаким выбором системы отсчета изменить этот порядок чередования "раньше-позже" нельзя. Область внутри конуса называется при  $t > 0$  областью абсолютно будущего, а при  $t < 0$  - областью абсолютно прошедшего. Событие  $A$  может быть причинно связано (хотя бы в принципе) с событием, изображаемым любой точкой, лежащей внутри конуса или на его поверхности. При этом точки, принадлежащие области абсолютно прошедшего светового конуса, могут быть лишь причиной события  $A$ , изображаемого вершиной конуса, тогда как точки абсолютно будущего светового конуса, могут быть лишь следствием события  $A$ . Точкам вне светового конуса (в трехмерном реальном пространстве - вне раздувающейся световой сферы) соответствуют события, которые принципиально не могут иметь причинной связи с событием  $A$ . Существуют системы отсчета, в которых данное событие из области вне светового конуса наступает раньше или позже события  $A$ , т.е. для событий вне светового конуса перестановка чередования перестановка чередования во времени (по отношению к событию  $A$ ) возможна.

## Литература

- [1] В.С. Сорокин, Законы сохранения движения и мера движения в фи

зике; УФН, т. ЛИШ, вып 2, июнь 1956

Черкасский пединститут<sup>1</sup>  
Черкассы 257000  
ул. К. Маркса 24

Instytut Matematyki WSP<sup>2</sup>  
ul. Chodkiewicza 30  
85-064 Bydgoszcz, POLAND

*Received before 16.05.1989*