
*Проблема причинности
и наибольшая скорость
распространения сигналов
в теории относительности*

В предыдущей главе мы видели, что в случае двух событий, каждое из которых лежит вне светового конуса с вершиной в другом событии, разные наблюдатели, вообще говоря, не придут к согласию при определении, какое из событий произошло раньше, какое позднее. На первый взгляд могло бы показаться, что эта неопределенность может вызывать затруднения в установлении причинности. Ведь это трюизм, что если A есть причина B , то A должно произойти либо раньше, чем B , либо одновременно с B . Событие, которое ожидается завтра, не может быть причиной того, что уже случилось сегодня. Мы говорим так на том основании, что под причиной события B мы понимаем одно из условий A , которое, уже будучи в наличии и в действии, вызывает появление B . Так, горящий сейчас огонь может вызвать взрыв каких-то взрывчатых веществ сейчас, но огонь, который будет гореть завтра, такого взрыва сейчас вызвать не может.

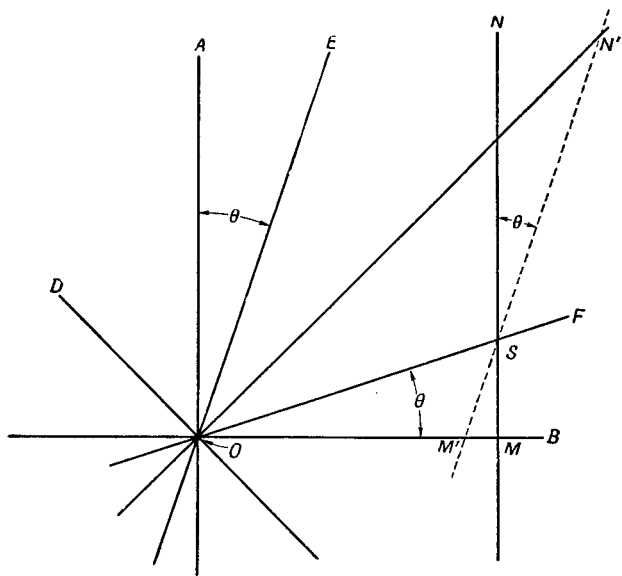
Кажется ясным, что если было бы можно изменить порядок прошлого, настоящего и будущего совершенно произвольным образом, то получился бы нелепый результат как в физике, так и в повседневной жизни. Допустим, например, что один наблюдатель видит, как за горением какого-нибудь топлива *следует* нагревание воды, а для другого наблюдателя сначала нагревается вода, а уж топливо загорается позднее. Или пусть один наблюдатель сначала проголодался и затем утолил свой голод едой, а другой наблюдатель был сыт, потом поел и тут же стал голодным. Можно было бы сколь угодно долго продолжать эти примеры, из которых отчетливо

следует, что мы не смогли бы понять мир, если бы мы могли произвольно изменять последовательность событий во времени. Поэтому необходимо проверить, не приведет ли к нелепостям в отношении проблемы причины и следствия релятивистская неопределенность упорядоченности во времени событий, лежащих вне светового конуса некоторого наблюдателя.

Отвечая на этот вопрос, мы напомним сначала, что, как это уже говорилось в гл. 14, никакой объект не может двигаться, а воздействие, сила и пр. передаваться каким-либо иным способом со скоростью, большей, чем скорость света c . Тогда легко видеть, что пока это условие выполняется, релятивистская неопределенность упорядоченности событий во времени не вносит путаницы в проблему причинности. Так, если событие A должно быть причиной другого события B , то между ними должно иметь место некоторое физическое взаимодействие или контакт. (Если же такой физической связи вообще нет, то одно событие не может быть причиной или следствием другого.) Однако если такое физическое воздействие распространяется со скоростью, не превышающей световую, то любые два причинно связанные друг с другом события, как было показано в предыдущей главе, имеют единственный и однозначный порядок следования во времени. Иными словами, если событие A предшествует своему следствию B по данным одного наблюдателя, то такая же взаимосвязь будет иметь место и для всех других наблюдателей. Поэтому порядок причины и следствия инвариантен, так что никакой путаницы в этом порядке не возникнет, когда разные наблюдатели рассматривают (каждый в своей системе отсчета) одну и ту же систему событий.

Напротив, если бы какое-то воздействие могло распространяться со скоростью, большей скорости света, то представления о последовательности причины и следствия полностью бы перепутались. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим такой крайний случай, когда считается, что физические воздействия могут распространяться с бесконечно большими скоростями, так что два удаленных друг от друга наблюдателя могут мгновенно связаться друг с другом. Изобразим одного из

них, Ω_1 , мировой линией OA (фиг. 17), а другого, Ω_3 , движущегося с той же скоростью, мировой линией MN . Согласно нашей гипотезе, наблюдатель Ω_1 в момент времени, соответствующий событию O , может вступить мгновенно в физический контакт с другим наблюдателем Ω_3



Фиг. 17.

в момент времени, соответствующий событию M . Пусть эти наблюдатели, например, используют такой контакт для посылки сигналов друг другу.

Если бы при этом не учитывался принцип относительности и постоянство величины скорости света, наша гипотеза не привела бы к логическим внутренним противоречиям. Действительно, она просто соответствует представлениям «здравого смысла» о том, будто все, что мы видим в данный момент, находится в мгновенном контакте с нами, и все это произошло в одно и то же время, которое мы называем «теперь».

Перейдем, однако, к рассмотрению дальнейших следствий из принципа относительности, развитого Эйнштейном, который гласит, что законы физики имеют один и тот же вид для *всех* наблюдателей и что для всех наблюдателей скорость света имеет одну и ту же величину. Как мы уже знаем, отсюда следует, что два наблюдателя, движущиеся относительно друг друга, не придут к согласию в вопросе о том, какую систему событий считать одновременной. Так, наблюдатель Ω_2 , описываемый мировой линией OE , будет считать одновременными событию O все события, лежащие на прямой OF , тогда как наблюдатель Ω_1 (мировая линия OA) считает одновременными события, лежащие на линии OB . Однако, согласно принципу относительности, все общие законы природы, выполняющиеся в системе отсчета Ω_1 , выполняются и в системе отсчета Ω_2 . Поэтому если предположить, что наблюдатель Ω_1 может установить контакт с событием M , которое одновременно с O в *его* системе отсчета, то движущийся относительно него наблюдатель Ω_2 может находиться в контакте с событием S , одновременным с O в системе отсчета *этого второго* наблюдателя.

Перейдем теперь к наблюдателю Ω_3 с мировой линией MN . В момент времени, соответствовавший событию S , его мировая линия пересекалась с мировой линией наблюдателя Ω_4 (мировая линия $M'N'$), движущегося с той же скоростью, что и наблюдатель Ω_2 . Находясь в одной и той же точке S , но двигаясь с разными скоростями, оба наблюдателя могут, очевидно, установить друг с другом действительно мгновенную связь, так что для распространения сигнала между ними не требуется никакого времени (или пренебрежимо малое). Поэтому, согласно принципу относительности, у наблюдателя Ω_4 будет такая же возможность мгновенно связаться с наблюдателем Ω_2 в точке O (эта точка и точка S одновременны в *его* системе отсчета), как и наблюдателю Ω_1 мгновенно сигнализировать Ω_3 , находящемуся в точке M . Тогда наблюдатель Ω_2 смог бы послать сигнал наблюдателю Ω_1 в точку O , а Ω_1 смог бы передать сигнал наблюдателю Ω_3 в точку M (которая одновременна с O в системе отсчета наблюдателей Ω_1 и Ω_3).

По такой цепочке сигналов было бы можно связаться из точки S с точкой M , и наоборот. Но ведь точка M находится в *прошлом* по отношению к S . Итак, точка S могла бы связаться с ее собственным прошлым — точкой M , например сообщить своему прошлому, что совершится в будущем. Узнав об этих предстоящих событиях, наблюдатель в M мог бы изменить свои намерения и поступить по-другому, так что его будущее в точке S стало бы иным, чем его будущее «я» ему предсказывало. Например, прежнее «я» могло бы предпринять что-нибудь такое, в результате чего станет в будущем невозможной посылка сигнала. Так мы приходим к внутреннему логическому противоречию.

Обобщая приведенное выше рассуждение, легко показать, что такое же противоречие возникнет, если допустить возможность передачи физических воздействий с любой скоростью, большей, чем скорость света.

Мы видим, что если мы принимаем теорию относительности Эйнштейна, то она приводит к абсурдности предположения о том, что передача каких бы то ни было физических воздействий может осуществляться с помощью сигналов, распространяющихся со скоростью, большей скорости света. Другими словами, либо мы должны считать, что невозможно распространение физического воздействия со скоростью, большей скорости света, либо должны отказаться от эйнштейновской формулировки принципа относительности. Но именно эта формулировка принципа относительности до сих пор подтверждалась фактами. К тому же, как мы уже знаем, никто и никогда не наблюдал передачи физических воздействий со скоростью, большей чем скорость света (так, например, материальные объекты не могут быть ускорены и до скорости света, так как на это требовалось бы затратить бесконечно большое количество энергии; неизвестны и такие поля, которые переносили бы воздействие со скоростями, большими чем скорость света). Конечно, теория Эйнштейна, как и все другие теории, может быть в принципе опровергнута при распространении опыта за границы ее применимости. Но пока мы остаемся в области, где эта теория справедлива (а пока все известные эксперименты находятся внутри нее!),

физические воздействия, распространяющиеся со скоростью, большей скорости света, невозможны.

По отношению к данному событию O любое другое событие P , как мы уже видели, оказывается находящимся в одной из трех специфических областей пространства-времени, которые инвариантным образом отличаются друг от друга (см. фиг. 16). Если это второе событие находится внутри светового конуса или лежит на нем, то оно является прошлым или будущим относительно события O . Так как это расположение не зависит от выбора системы отсчета, можно сказать, что оно в известном смысле «абсолютно» (по крайней мере в области применимости теории Эйнштейна). «Передний» световой конус с вершиной в точке O , включающий все события, лежащие внутри него, нужно тогда называть «абсолютным будущим» по отношению к событию O . Соответствующий «задний» световой конус вместе со всеми лежащими внутри него событиями называется «абсолютным прошлым» O . Область вне этих световых конусов можно называть «абсолютно безразличной» для O ¹⁾, так как эта область вообще не может непосредственно взаимодействовать с событием O и поэтому в сущности безразлична для него. Так, наблюдая далекую звезду, мы **вступаем** в контакт лишь с тем, чем эта звезда когда-то давно *была*. Предположение, что эта звезда *существует* и «теперь», — лишь правдоподобно и основано только на наших общих знаниях о свойствах звезд. В действительности же мы *не знаем*, существует ли эта звезда «теперь». Например, она уже могла взорваться, и *позднее* мы (или другие наблюдатели) обнаружим этот взрыв. Однако то, что происходит со звездой именно «теперь», относится к абсолютно безразличной относительно нас области, с которой «теперь» мы принципиально не можем вступить в контакт. (Позже нас будет изображать ведь другая точка нашей миро-

¹⁾ В английском подлиннике: «absolute elsewhere», что в буквальном переводе означает «абсолютное где-нибудь»; переводчик не решился вводить такой термин и предложил другой (хотя, может быть, и не лучший): «абсолютно безразличная область». — *Прим. перев.*

вой линии, не совпадающая с той, которая изображает нас теперь.)

Когда два события лежат друг для друга в «абсолютно безразличной» области, так что они не могут иметь физический контакт, то все равно, считать ли одно из них более ранним или более поздним. Их порядок во времени чисто условен в том смысле, что его можно выбирать так, как это нам удобно, лишь бы это делалось последовательным образом. Как мы уже видели, движущиеся с разными скоростями наблюдатели, которые вычисляют поправку для времени Δt из тех соображений, что свету это время требуется, чтобы пройти расстояние r (формула $\Delta t = r/c$), по-разному определяют принадлежность событий (по отношению к некоторому событию, происшедшему в непосредственной окрестности наблюдателя) к прошлому, будущему, либо обнаруживают их одновременность. Однако пока отсутствует физический контакт, являющийся основой причинных взаимосвязей между событиями, несущественно, как мы будем упорядочивать эти события во времени. Напротив, как здесь было показано, если такой причинный контакт возможен, порядок следования событий оказывается однозначным, так что преобразования Лоренца никогда не приведут к нарушению последовательности причины и следствия.