

---

*Введение  
в эйнштейновские представления  
о пространстве и времени*

Как только мы переходим к областям, в которых нельзя пренебрегать временем, необходимым свету для распространения между различными точками, обыденные представления о пространстве и времени начинают сталкиваться с трудностями, разрешить которые невозможно в рамках этих ограниченных представлений. При рассмотрении теории Лоренца мы уже видели, например, что если разнести одинаковые часы, первоначально шедшие синхронно, на расстояние  $l_0$ , то их показания станут различаться на величину

$$\frac{l_0 v}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где  $v$  — скорость часов относительно гипотетического эфира. Но так как измерить эту скорость невозможно, мы никогда не сможем точно *узнать*, на сколько отклоняются в действительности от «истинного» синхронизма часы, показывающие в разных местах одно и то же время. В обыденной жизни такие отклонения, конечно, столь малы, что ими можно пренебречь, но если обратиться к прецизионным измерениям, их роль станет решающей.

Неопределенность понятия одновременности станет заметной даже на уровне простого опыта, если рассматривать очень большие расстояния. Возьмем, например, проблему теле- и радиосвязи, которая возникнет при достижении космонавтами Марса. Пусть некто на Земле спрашивает своего друга на Марсе, что у него происходит «в данный момент». Так как сигналам требуется время на то, чтобы пройти от Земли до Марса и об-

ратно, ответ придет не раньше, чем через 10 минут. Поэтому к моменту поступления ответа содержащаяся в нем информация будет относиться не к тому, что происходит «теперь», а к тому, что *происходило*, когда сигнал отправлялся с Марса. Значит, мы не сможем узнать, что происходит на Марсе «сейчас».

Возможно, вы захотели бы узнать, в какое время *произошло* по крайней мере данное событие. Для этого можно было бы посмотреть на часы космонавта, видимые на экране телевизора и совпадающие по своей конструкции с часами в вашей лаборатории. Пусть эти часы устроены так, что продолжают показывать верное время при ускорении в космическом корабле. Согласно теории Лоренца, показания их будут, однако, иными, чем показания часов на Земле, т. е. они рассинхронизируются по сравнению с земными часами на величину

$$\frac{l_0 v}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где  $l_0$  — расстояние до Марса, а  $v$  — скорость часов относительно эфира. Ввиду того что скорость  $v$  неизвестна, для нас будет неопределенным и «истинное» время свершения данного события на Марсе.

Мы все же могли бы попробовать ввести поправку на время свершения события на Марсе, основываясь не на телевизионном изображении часов в космическом корабле, а на непосредственном учете того промежутка времени, который требуется свету, чтобы дойти от Марса до нас. Но чтобы эта поправка была правильной, необходимо, согласно теории Лоренца, знать «истинное» расстояние  $l$  от Земли до Марса, равно как и «истинную» скорость  $v$  движения Земли *относительно* эфира. Тогда поправка будет равна

$$\Delta t = \frac{l}{c - v}.$$

Таким образом, мы снова сталкиваемся по существу с той же неопределенностью, что и прежде, пытаюсь выяснить точное время свершения событий на Марсе.

Теперь ясно, что наши обыденные представления об одновременности становятся все более неопределенными

по мере выхода за рамки тех областей, в которых они возникли. Как было показано в гл. 11, эти представления исходили из интуитивного убеждения, что все сосуществующее в данный момент, который мы воспринимаем нашими чувствами, действительно происходит в этот самый момент, «теперь». Но стоит лишь нам перейти к удаленным от нас событиям, происходящим, например, на Марсе, мы видим, что даже при использовании самых быстрых, доступных нам средств связи (радиоволн или световых сигналов) изучаемые события совершаются *не* в момент их наблюдения, например на экране телевизора. При этом чем дальше от нас совершается событие, тем раньше оно произошло. Хорошо известно, что свет, улавливаемый нашими телескопами, был испущен звездами тысячи миллионов лет назад. Поэтому, когда мы имеем в виду большие расстояния, сосуществование событий в наших чувственных восприятиях уже совсем не означает одновременности. Также и в случае коротких расстояний при использовании прецизионных измерений мы приходим в основном к тем же выводам: если все события отмечены нашим прибором как сосуществующие (например, присутствуют на одном и том же фотоснимке), то еще нельзя говорить об их одновременности.

Еще серьезнее, чем эта неэквивалентность сосуществования и одновременности, описанная выше, тот факт, что не имеется, как мы уже видели, однозначного способа отнесения любого данного события к соответствующему строго определенному моменту в прошлом. Отсюда следует, что все наши интуитивные представления о настоящем, равно как о прошлом и о будущем, уже не стоят в простой связи с тем, что мы реально наблюдаем, воспринимаем, исследуем и измеряем.

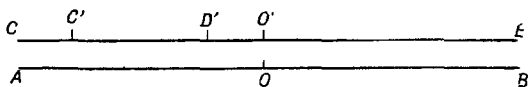
Итак, при попытке применить интуитивное представление о времени вне рамок тех областей, где оно собственно возникло, мы наткнулись на глубокую и принципиальную неоднозначность. Поэтому, как уже отмечалось, необходимо полностью пересмотреть наш образ мыслей и заново перестроить понятия. Вместо того, чтобы опираться на воображаемое понятие одновременности, установление которой требует знания того, что мы

не можем вообще узнать (нашей скорости движения относительно принципиально ненаблюдаемого эфира), начнем наш анализ по возможности с действительных фактов и поддающихся проверке гипотез. О каких фактах идет речь? Мы уже коснулись одной стороны этих фактов в гл. 10, отметив, что все наши реальные знания о пространственных и временной координатах действительных событий, по крайней мере в принципе, покоятся на наблюдаемых *взаимосвязях* между физическими явлениями и соответствующими измерительными приборами. Чтобы избежать неопределенности в наших основных представлениях о пространстве и времени, необходимо выразить содержание физических законов исключительно на языке таких взаимосвязей, а не в терминах эфира, обладающего принципиально не поддающимися исследованию свойствами.

Теперь мы подготовлены к анализу того, что в основном составляло исходный пункт рассуждений Эйнштейна. Он принял, что все равномерно движущиеся (неускоренные) наблюдатели, пользуясь реально измеряемыми координатами наподобие описанных выше, обнаружат одну и ту же величину скорости света независимо от своих собственных скоростей. При этом они должны пользоваться приборами одинаковой конструкции и придерживаться эквивалентных методов измерения относительно своей собственной лабораторной системы отсчета. (*Специальная теория относительности ограничивается рассмотрением взаимосвязей, имеющих место среди равномерно движущихся наблюдателей; чтобы перейти к ускоренно движущимся наблюдателям, следует обратиться к общей теории относительности, которая выходит за рамки нашего рассмотрения.*)

Эйнштейн рассматривал этот вывод не как следствие из теории Лоренца, а как *основное предположение* (гипотезу), с очевидностью поддающееся опытной проверке и уже на самом деле подтвержденное в ряде экспериментов к тому времени, когда Эйнштейн приступил к построению своей теории. С тех пор оно получило новые подтверждения во многих разнообразных опытах, причем ни один опыт не вступил с ним в противоречие.

Чтобы яснее понять, к каким последствиям приводит эта гипотеза в отношении физического понятия одновременности, Эйнштейн рассмотрел простой пример. Это — *мысленный* эксперимент в том смысле, что у нас, по крайней мере в настоящее время, нет приборов, чувствительность которых позволила бы осуществить его. *В принципе*, однако, этот эксперимент возможен, и преимущество его состоит в том, что он полностью раскрывает природу тех трудностей, к которым приводят старые представления при анализе одновременности двух удаленных событий.



Фиг. 8.

Рассмотрим поезд, движущийся по железнодорожной насыпи со скоростью  $v$ . Поместим в точку  $O$  у насыпи неподвижного наблюдателя, более или менее близкого к середине поезда. Другие два наблюдателя, обладающие хорошо синхронизованными часами, пусть располагаются в точках  $A$  и  $B$  (фиг. 8). Пусть  $A$  и  $B$  находятся на одном и том же расстоянии  $l$  от  $O$ , если проводить измерение линейками, покоящимися относительно насыпи. Пусть наблюдатели в точках  $A$  и  $B$  посылают световые вспышки, а наблюдатель в точке  $O$  принимает эти вспышки в один и тот же момент. Из факта одновременности прихода сигналов он с необходимостью заключает, что они были отправлены также одновременно. Момент посылки сигналов наблюдатель  $O$  определяет по времени, за которое свет доходит до него от  $A$  и  $B$ . Ввиду равенства этих двух расстояний и так как скорость света в обоих направлениях одинакова, из вычислений наблюдателя  $O$  следует, что вспышки произошли в один и тот же момент.

Поместим теперь на движущемся поезде наблюдателя  $O'$ . Допустим, что  $O'$  поровнялся с наблюдателем  $O$ , когда  $O$  принимал сигналы от  $A$  и  $B$ . Конечно, наблюдатель  $O'$  также одновременно увидит эти две

вспышки. Но и ему нужно вычислить, в какое время они были отправлены. Для этого с помощью своих линейек, движущихся вместе с поездом, он должен измерить расстояния до источников света. Ему будет удобнее сделать это, пользуясь услугами нескольких помощников, размещенных в разных частях поезда.

Пусть один из этих помощников оказался в точке  $A$ , когда оттуда был послан сигнал. Обозначим положение этого помощника на поезде точкой  $C$ . При своих измерениях этот первый помощник, отмечая положение точки  $A$  в момент посылки из нее сигнала, фиксирует на своей линейке положение точки  $C$ , мимо которой в этот момент проходит точка  $A$ . Затем световой сигнал распространяется от  $C$  до  $O'$ , или, что то же, от  $A$  до  $O$ ; на это он затрачивает некоторое время. Рассуждая об этом процессе с точки зрения наблюдателя на насыпи, мы видим, что в момент посылки сигнала главный наблюдатель на поезде, который позднее поровняется с точкой  $O$ , еще не мог достигнуть точки  $O'$ , а находился лишь в  $D'$ , левее  $O'$ , так что он в дальнейшем покроет расстояние  $D'O'$ , пока свет будет распространяться от  $A$  до  $O$ , или, что то же, от  $C$  до  $O'$ . В момент, когда наблюдатель на поезде попадает в  $O'$  и видит сигнал, точка  $C$  уже пройдет, согласно данным наблюдателя на насыпи, до точки  $C'$ , покрыв расстояние, равное  $D'O'$ . Так как наблюдатель на поезде  $O'$  рассматривает себя как покоящегося, он не должен при определении расстояния до источника световой вспышки принимать во внимание собственное движение. Поэтому найденное им расстояние  $C'O'$  меньше, чем расстояние  $AO$ , полученное наблюдателем на насыпи. Подобным же образом он найдет, что путь  $EO'$ , который свет проходит от  $E$  до  $O'$ , длиннее аналогичного пути  $BO$ , измеренного наблюдателем на насыпи.

Если бы при этом была справедлива механика Ньютона, то различия в измерении расстояния нашими двумя наблюдателями должны были «компенсироваться». Дело в том, что для наблюдателя на поезде скорость светового сигнала, идущего от  $C$ , была бы тогда занижена и равна  $c - v$ , а скорость сигнала от  $E$  — повышена и равна  $c + v$ . В результате он подсчитал бы, что

сигналы из  $S$  и  $E$  были отправлены в один и тот же момент в согласии с выводами наблюдателя на насыпи, чего и требует «здравый смысл».

На самом же деле скорость света должна быть одной и той же для всех наблюдателей, ибо, как мы уже видели, таков результат всех экспериментов. Поэтому наблюдатель на поезде будет отрицать одновременность посылки сигналов, так как свет, обладая одной и той же скоростью, должен был покрыть разные расстояния.

Здесь мы вступаем в резкое противоречие с прежними взглядами, так как разные наблюдатели уже не согласны друг с другом относительно одновременности удаленных друг от друга событий. Все же следует подчеркнуть, что установление одновременности удаленных событий опирается лишь на *косвенные рассуждения*, на результаты вычислений, дающих поправку на время, необходимое световому или радиосигналу для преодоления пути от точки посылки сигнала до места его приема. Таким образом, одновременность перестала быть *непосредственным фактом*, соответствующим восприятию явлений в один и тот же момент времени. Теперь мы видим, что она в значительной мере зависит от чисто *практических способов* учета времени распространения сигналов. Эта методика сама по себе представляется естественной и неизбежной с точки зрения «здравого смысла», но она дает однозначные результаты, совпадающие для всех наблюдателей лишь в тех условиях, когда галилеев закон сложения скоростей является хорошим приближением. Если же скорость света нельзя считать практически бесконечно большой, то ясно, что результаты, полученные экспериментальным путем, должны будут зависеть от скорости движения аппаратуры наблюдателя.

Из проведенного обсуждения явствует, что одновременность — *не абсолютная* характеристика явлений, которая не зависит от состояния движения измерительных приборов. Одновременность следует рассматривать лишь *относительно* наблюдателя в том смысле, что разные наблюдатели, производя одинаковые наблюдения с помощью одинаково построенных приборов, но движущиеся с различными скоростями, обнаружат разные совокупности одновременных событий.

Если бы была возможность передавать из точки в точку сигналы мгновенно, то не потребовалось бы вводить поправок на время их распространения, и мы не пришли бы к описанной выше относительности одновременности. Но мы не знаем сигнала, который распространялся бы быстрее света. Более того, как увидим в дальнейшем, теория относительности утверждает, что *подобных сигналов вообще не может быть*. Само предположение о возможности такого сигнала приводит к противоречию с теорией относительности. Значит, по крайней мере насколько нам известно и поскольку мы говорим о существующих физических теориях, при вычислении времени удаленных событий всегда необходимо вводить стандартным образом поправку на время, необходимое световым сигналам для распространения между удаленными точками, учитывая также тот факт, что все наблюдатели получают в результате измерения одну и ту же величину скорости света. При этих условиях относительность одновременности следует с неизбежной необходимостью. Достаточно согласиться с тем, что одновременность существует лишь относительно наблюдателя (в указанном выше смысле), и мы должны будем также признать, что относительны и измерения длин и интервалов времени. Чтобы доказать это утверждение для случая длины, возвратимся к истории с двумя наблюдателями, один из которых неподвижен относительно железнодорожной насыпи, а другой движется вместе с поездом. Предположим, что наблюдатель на насыпи протянул измерительную рулетку от  $A$  до  $B$  и установил в  $A$  и  $B$  часы, синхронизованные с помощью световых сигналов по правилу

$$t' = t - \frac{l}{c}.$$

Наблюдатель на поезде действует точно так же в своей движущейся системе отсчета, протягивая свою рулетку и расставляя часы, синхронизованные световыми сигналами, но уже по правилам

$$t_0^A = t_0 - \frac{l_0^A}{c} \quad \text{и} \quad t_0^B = t_0 - \frac{l_0^B}{c},$$



где  $l_0^A$  и  $l_0^B$  — соответственно расстояния от  $O$  до  $A$  и от  $O$  до  $B$ , измеренные по рулетке, движущейся вместе с поездом.

Если линейка не движется относительно наблюдателя, тот может измерять ее длину независимо от измерения времени, т. е. может рассматривать один конец линейки  $A$  «сейчас», а другой конец  $B$  — «чуть позже», и результат от этого не изменится. Если же линейка движется мимо наблюдателя, то тому приходится определять ее длину как расстояние между концами линейки, взятыми *в один и тот же момент*. (Ведь если бы наблюдатель на насыпи определил положение «хвоста» поезда в один момент, а его «головы» — часом позже, он заявил бы, что длина поезда составляет 100 км или более того, — вывод явно нелепый.)

Допустим теперь, что помощники наблюдателя  $O$  в точках  $A$  и  $B$  отправляют сигналы в одно и то же время, измеренное по их часам (они неподвижны относительно насыпи), и это происходит как раз в тот момент, когда противоположные концы поезда проходят соответственно мимо  $A$  и  $B$ . Аналогично предположим, что движущиеся наблюдатели в точках  $A'$  и  $B'$  на концах поезда посылают сигналы, когда их часы показывают одно и то же время. Из нашего анализа понятия одновременности следует, что наблюдатели на насыпи заключат (на основании своих вычислений), что сигналы, одновременные для наблюдателей на поезде, посланы в разное время. Наоборот, наблюдатели на поезде посредством вычислений обнаружат, что сигналы, одновременные для наблюдателей на насыпи, посланы в разное время.

Предположим, что сигналы, одновременные для наблюдателей на поезде, с точки зрения наблюдателей на насыпи расходятся по времени на  $\delta t$ . За этот срок поезд проходит расстояние  $v\delta t$ . Отсюда наблюдатели на насыпи заключат, что их коллеги на поезде измеряют вовсе не «истинную» длину поезда, а добавляют к ней тот сдвиг, который происходит при движении поезда за время  $\delta t$ . Не удивительно поэтому, что их результаты будут другими. Аналогично и наблюдатели на поезде решат, что их коллеги на насыпи измеряют не «истинную» длину поезда, следовательно, и их не удивит различие

результатов наблюдений. Проанализировав выводы обеих групп наблюдателей, мы заметим, однако, нечто большее, а именно, что ввиду различия в определении этими наблюдателями одновременности появляется и различие в определении ими длины одного и того же предмета. Другими словами, хотя каждый наблюдатель в своей собственной системе отсчета продельывает одни и те же операции, пользуясь одинаково сконструированными приборами, разные группы наблюдателей фактически имеют в виду *разные совокупности событий*, когда говорят о длине одного и того же предмета.

Подобная же проблема возникает и при измерении отрезков времени. Чтобы это увидеть, мы вновь рассмотрим наш пример, в котором «голова» поезда проходит мимо точки  $A$ , а его «хвост» — мимо точки  $B$  в одно и то же время по часам, помещенным в этих точках и синхронизованным с часами в  $O$ . Это обстоятельство могут, например, фиксировать помощники наблюдателя  $O$ , находящиеся в точках  $A$  и  $B$ . Возьмем теперь часы на поезде, показывающие время  $t'_1$ , когда его «голова» проходит через точку  $A$ , и время  $t'_2$ , когда она проходит через  $B$ . Наблюдатель, находящийся на поезде, скажет тогда, что головному концу поезда потребовалось время

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1,$$

чтобы пройти от  $A$  до  $B$ . С другой стороны, наблюдатели на насыпи воспользуются для измерения этого времени своими часами, помещенными в точках  $A$  и  $B$  и синхронизованными соответствующим образом. Если через  $t_A$  обозначить время, когда наблюдатель в точке  $A$  отметил, что с ним поровнялась «голова» поезда, а через  $t_B$  — момент, в который другой наблюдатель на насыпи отметил прохождение «головы» поезда мимо  $B$ , то эти наблюдатели придут к выводу, что искомый отрезок времени равен  $\Delta t = t_B - t_A$ . Однако, как мы видели, для наблюдателей на поезде часы, находящиеся в точках  $A$  и  $B$ , идут *не синхронно*, и они скажут, что наблюдатели на насыпи в действительности измеряют не «истинное» время, которое затрачивает поезд, чтобы пройти от  $A$  до  $B$ . С теми же основаниями наблюдатели на насыпи скажут о своих коллегах на поезде, что те также не

по правилам измеряют «истинное» время. Но, как и при измерении длины, ясно, что использование движущихся часов приводит к необходимости учета относительности одновременности, и поэтому определение промежутков времени также должно носить *условный практический* характер. В результате отрезки времени не обладают абсолютным смыслом, а зависят от скорости движения тех приборов, которыми измеряется время.

Итак, мы увидели, что существует тесная взаимосвязь между определениями *одновременности, длины и промежутка времени*, а тот факт, что все наблюдатели при измерениях получают одно и то же значение скорости света, показывает, что все эти три понятия следует считать не абсолютными, а имеющими смысл лишь по отношению к конкретным системам отсчета.