30

«Парадокс» близнецов

На основании результатов предыдущей главы мы можем теперь проанализировать один известный кажущийся парадокс, к которому приводит теория относительности.

Возьмем двух «одинаковых» близнецов. Пусть один из них предпримет путешествие в космическом корабле, который может развивать скорость, близкую к скорости света, а другой останется на Земле. При возвращении путешествовавшего близнеца на Землю часы в его космическом корабле покажут, что прошел промежуток времени, равный

$$\Delta t_0 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \left(\frac{v(t)}{c}\right)^2}\, dt,$$

тогда как часы той же конструкции у близнеца, оставшегося на Земле, отметят, что прошел промежуток времени $t_2 - t_1 > \Delta t_0$. Мы видели, однако, раньше, что то же самое преобразование Лоренца, которое применяется к часам, должно быть применено и к ходу всех физических, химических, нервных, психологических и пр. процессов. Поэтому побывавший в путешествии близнец во всех отношениях прожил более короткий отрезок времени, чем тот, кто оставался на Земле[1]). При этом,

---

[1]) Дело обстоит не так просто. Здесь необходимо учесть техническую выполнимость, биологические особенности, правомерность перехода к неинерциальным системам, гравитационные эффекты. — *Прим. ред.*

если скорость космического корабля была близка к скорости света, такая разница времен может оказаться весьма значительной. Может, например, случиться так, что для остававшегося на Земле брата прошло 20 лет, а для путешествовавшего в космическом корабле — всего год или два.

Перед тем, как начать обсуждение смысла полученного вывода, отметим, что он не нарушает принципа относительности, утверждающего, что законы физики должны представлять собой соотношения одного и того же вида независимо от того, как движется система отсчета. Но мы (как указывалось в предыдущей главе) ограничиваемся здесь специальной теорией относительности, в которой законы физики инвариантны лишь для наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью. Очевидно, что выводы этой теории не могут равным образом применяться в системах отсчета обоих наблюдателей-близнецов, так как один из них подвергается ускорению, а другой — нет. По этой причине мы не имеем права менять наблюдателей местами и говорить, например, что наблюдатель в космическом корабле в равной мере обнаруживает, что его брат, остававшийся в лаборатории, меньше состарился. Напротив, поскольку мы остаемся в области применимости специальной теории относительности, то должны придавать инерциальной системе отсчета исключительную роль при выражении законов физики. Этим и объясняется тот факт, что при встрече два брата-наблюдателя, совершавшие неодинаковое движение, обнаружат, что для них прошли и разные промежутки времени.

Чтобы получить законы, имеющие одинаковый вид как в ускоренной, так и в неускоренной системах отсчета, необходимо перейти к общей теории относительности. Для этого следует, однако, ввести *гравитационное поле*. Как показал Эйнштейн, в ускоренной системе отсчета должны обнаруживаться новые эффекты, эквивалентные тем, которые вызываются гравитационным полем. Именно с точки зрения ускоренно движущегося наблюдателя можно сказать, что появляется эффективное дополнительное гравитационное поле, действующее на все его окружение — на звезды, планеты, Землю и т. д., — чем и объясняется их ускорение относительно космического корабля.

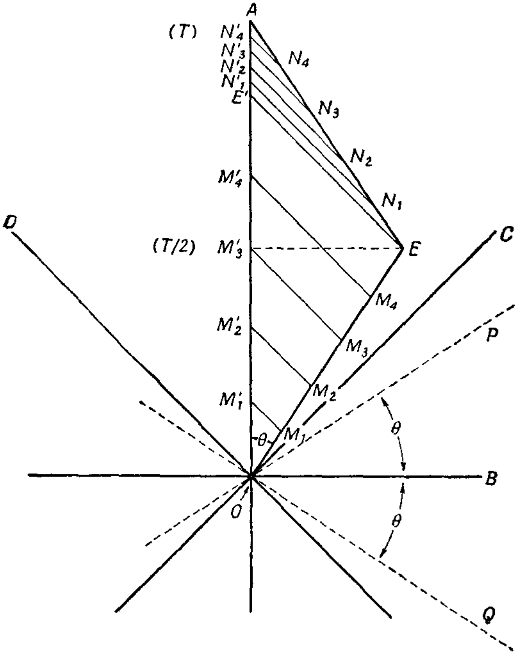
Согласно общей теории относительности, двое часов, расположенных в областях с разными значениями гравитационного потенциала, должны иметь разную скорость хода. Если наблюдатель в космическом корабле будет пользоваться теми же законами общей теории относительности, что и наблюдатель, оставшийся на Земле, но учтет другие значения гравитационного потенциала, соответствующие его собственной системе отсчета, то он предскажет расхождение хода часов у себя и на Земле. Как показывают дальнейшие расчеты, он придет к тем же выводам о различии истекшего времени, что и наблюдатель на Земле (для которого законы общей теории относительности сведутся к законам специальной теории относительности, так как он не испытывает ускорения). Поэтому разная скорость «старения» братьев-близнецов нисколько не противоречит принципу относительности, если только пользоваться общей теорией относительности, приложимой к ускоренным системам отсчета.

Почему же эффект неодинакового старения братьев-близнецов кажется парадоксальным для большей части людей, когда они впервые о нем слышат? Главная причина этого — в привычном образе мыслей, когда мы непроизвольно считаем все, одновременно присутствующее в нашем восприятии, случившимся в одно и то же время, именуемое «теперь». Так, глядя на звезды в ночном небе, мы не можем удержаться от представления, будто весь этот небосвод существует «теперь», одновременно с актом нашего восприятия. В результате мы уже почти совершенно естественно приходим к мысли, что при выходе ракеты в космос можно продолжать следить за ней непосредственно и вообще сохранять с ней мгновенную связь, сравнивая каждое происходящее на ней событие (скажем, ход часов) с соответствующим событием, имеющим место в то же самое время у нас. Для возвратившейся ракеты должно пройти, казалось бы, то же самое время, что и для нас, как это реально имеет место для всех привычных нам систем (хотя последние, конечно, движутся со скоростями, гораздо меньшими по сравнению со скоростью света).

Но мы, конечно, уже отлично знаем, что все, наблюдаемое на ночном небе, в действительности происходит не в тот же самый момент, когда мы это воспринимаем, — напротив, все это давным-давно прошло и миновало (мы видим, например, далекие туманности такими, какими они были сотни миллионов лет или более назад). Более того, мы определяем, *когда* на самом деле произошло то, что мы видим, с помощью соотношения $\Delta t = r/c$, т. е. учитываем время, потребовавшееся свету, чтобы дойти до нас. Но, как это выяснилось в предыдущих главах, величина такой поправки будет различной для разных наблюдателей в зависимости от того, с какими скоростями они движутся. В результате теряет смысл и привычное для нас отнесение каждого события к одному какому-то однозначно определенному времени. Если же для удаленных событий не имеется однозначно определенного времени их появления, которое было бы одним и тем же при всех методах его измерения, то уже нет оснований и для предположения, будто при удалении друг от друга двух наблюдателей и их последующей встрече пережитый ими отрезок времени одинаков.

Чтобы отчетливее увидеть, в чем состоит трудность, с которой сталкиваются наши интуитивные представления об одновременности, посмотрим, что в действительности случилось бы, если бы каждый наблюдатель систематически посылал другому световые или радиосигналы (например, один раз в секунду), измеряя время по собственным часам. Тогда каждый наблюдатель мог бы «увидеть», как течет время у другого, так что, вероятно, смог бы проверить, как это каждый из них может прожить «в одно и то же время» разные отрезки времени.

Начнем это обсуждение с того, что увидит наблюдатель, оставшийся в своей лаборатории. Для простоты предположим, что космический корабль сначала ускоряется до скорости v за такой короткий промежуток времени, что ускорение можно считать практически мгновенным. Пусть этот космический корабль улетает от лаборатории с постоянной скоростью v в направлении оси z и летит так в течение времени $T/2$, если его измерять по часам в лабораторной системе отсчета. По истечении этого времени вновь включаются двигатели и придают кораблю обратную скорость $-v$. Путешествие продолжается еще в течение промежутка времени



Фиг. 19.

$T/2$, пока космический корабль не вернется на Землю и не будет здесь быстро заторможен, приняв скорость, равную скорости движения Земли. (Предположение о мгновенном изменении скорости не изменяет сути задачи и выводов[1].) Мировая линия космического ко-

[1]) Можно утверждать, что такое предположение определенно меняет «суть задачи» и «выводы», влияя на интеграл, определяющий Δt_0. — *Прим. ред.*

рабля изображена на диаграмме Минковского (фиг. 19) как OEA. Периодически посылаемые движущимся наблюдателем световые сигналы обозначены отрезками M_1M_1', N_1N_1' и т. д.

Первоначально наблюдатель в лаборатории (мировая линия OA) будет принимать сигналы в точках M_1', M_2', M_3' и т. д., расположенных реже, чем соответствующие точки на мировой линии ракеты вследствие эффекта Допплера [*релятивистская* формула (17.12)][1]. Если τ_0 — период для часов на космическом корабле, по которому задается частота сигналов, то регистрируемое в лаборатории время τ_1 между соседними сигналами равно (так как $\theta=0$)

$$\tau_1 = \tau_0 \frac{\nu_0}{\nu_1} = \tau_0 \frac{1+(v/c)}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \tag{30.1}$$

Позднее же, когда после мировой точки E космический корабль приобрел скорость, обратную исходной, он стал приближаться к лаборатории, и сигналы, посланные с него после E, стали приходить чаще:

$$\tau_2 = \tau_0 \frac{\nu_0}{\nu_2} = \tau_0 \frac{1-(v/c)}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \tag{30.2}$$

Так как скорость удаления космического корабля от лаборатории равна скорости его приближения к ней, то очевидно, что на своем обратном пути корабль отправит то же число сигналов $N/2$, какое он отправил при своем удалении (N — число сигналов, посланных в течение всего путешествия).

Чтобы принять все эти сигналы, наблюдателю в лаборатории понадобилось бы время, равное

$$\frac{N}{2} \frac{\tau_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left(1 + \frac{v}{c} + 1 - \frac{v}{c}\right) = \frac{N\tau_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \tag{30.3}$$

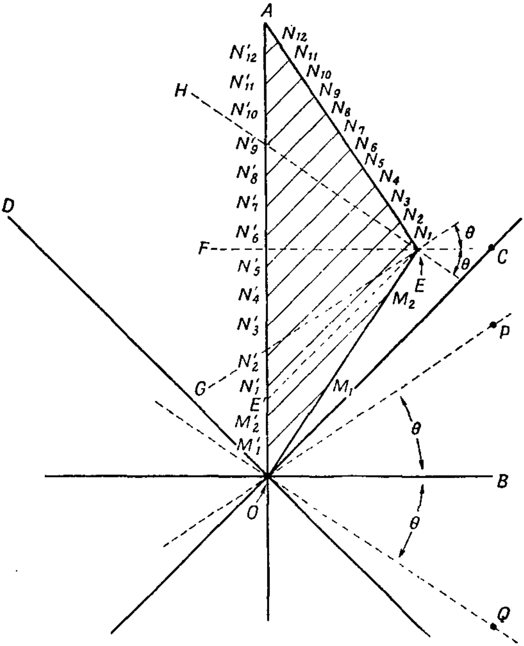
Отсюда, как и следовало ожидать, видно, что период, за который в лаборатории были приняты все сигналы, превышает тот период $N\tau_0$, за который они были отправлены с точки зрения наблюдателя, путешествующего на космическом корабле.

[1]) Те же выводы можно было бы получить, пользуясь методом коэффициента k, развитым в гл. 26.

Здесь важно заметить, что наблюдатель, остававшийся в лаборатории, не имеет возможности *непосредственно* узнать, как течет время у наблюдателя на ракете, так как поступающие к нему сигналы искажены эффектом Доплера. Иначе говоря, в лабораторной системе отсчета непосредственному наблюдению поддается сначала набор сигналов, поступающих редко, а затем другой набор сигналов, поступающих часто (если бы, например, можно было непосредственно наблюдать самого путешествующего наблюдателя, то казалось бы, что его жизненные процессы были сначала замедлены, а затем ускорены). Наблюдатель в лаборатории может учесть «поправку» на удаление ракеты или ее приближение лишь путем *вычислений*. При этих вычислениях он принимает скорость света равной c. Но ведь, как мы видели, скорость света равна c для всех наблюдателей, так что наблюдатели, движущиеся с разными скоростями, будут учитывать и разные поправки. Поэтому брат-близнец, остающийся в лаборатории, считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных OB, тогда как его брат на ракете сначала считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных OP, пока он не достигает поворотной точки E, а затем он считает одновременными наборы событий на прямых, параллельных OQ. Поэтому, когда брат, летящий на ракете, переходит из точки M_3 в точку M_4, он фиксирует другой промежуток времени, в течение которого это происходит, чем его брат в лаборатории, так как один из них принимает за нулевой момент наклонную линию OP, а другой — горизонтальную линию OB. После того, как ракета претерпела в точке E ускорение, брат-путешественник принимает за нулевой момент уже другую наклонную линию OQ. Отсюда видно, что есть все основания для того, чтобы часы обоих братьев отметили разную величину прошедших отрезков времени с того момента, как братья расстались друг с другом, и до момента их последующей встречи.

Новая сторона той же проблемы откроется, если рассмотреть, как воспринимает наблюдатель на ракете световые сигналы, которые посылает ему регулярно наблюдатель из лаборатории (фиг. 20). Вследствие эффекта

Допплера импульсы, отправленные между точками O и E', будут приняты на космическом корабле с растянутыми промежутками между ними в моменты между O и E. Импульсы же, посланные между E' и A, будут приняты в учащенном темпе.



Фиг. 20.

Непосредственно перед тем как приобрести в точке E ускорение, наблюдатель в космическом корабле будет считать одновременными с E все события, лежащие на прямой EG, параллельной OP. Сразу же после того, как установилась новая скорость, он станет считать одновременными с E все события, лежащие на новой прямой EH, параллельной теперь OQ. Мы видим, что временнáя координата, приписываемая данному событию, претерпевает неожиданный скачок в момент ускорения, после которого (точка E) такому событию, как, например, N'_4, приписывается меньшая величина временной координаты, чем до ускорения; это изменение соответствует расстоянию между точками пересечения линии AO с линиями EH и EG. Именно благодаря такому скачку временной координаты, которую мы приписываем событиям, появляется возможность передать от наблюдателя в лаборатории наблюдателю в ракете большее число сигналов, чем каким-либо другим путем, хотя оба наблюдателя пользуются часами одной и той же конструкции. Так как этот скачок имеет место лишь в системе отсчета, связанной с космическим кораблем, но его нет в лабораторной системе отсчета, то ясно, что положение наших двух наблюдателей несимметрично.

Если бы наблюдатель в ракете мог видеть наблюдателя в лаборатории, то ему показалось бы, что жизненные процессы последнего сначала замедлились, а затем ускорились, но по прошествии всего времени своего полета он обнаружил бы, что преобладало ускоренное протекание этих процессов, а не замедленное. Поэтому его не удивит открытие, что он встретит своего брата-близнеца, прожившим более длительный срок, чем он сам.

Таким образом, мы не обнаруживаем ничего по-настоящему парадоксального в том выводе из теории относительности, что ускоренные часы отметят меньший промежуток времени при прохождении между двумя точками, чем неускоренные часы (также между теми же точками). Возможность этого проистекает из того факта, что в теории относительности время не абсолютно, в нем нет универсального момента «теперь», который был бы одинаковым для всех сосуществующих наблюдателей. Понятие времени оказалось гораздо тоньше, и оно может быть неодинаково в разных системах отсчета. Могут сосуществовать разнообразные времена, регистрируемые часами или с помощью каких-либо физических процессов.

Физическое время стало во многих отношениях проявлять качества, которые мы замечали за временем в своем непосредственном восприятии. Например, мы знаем, что один и тот же (по данным наших физических часов) промежуток времени может нам представляться долгим или быстротечным, вечностью или просто мигом в зависимости от того, сколько событий совершилось в течение него. (В § 3 приложения мы подробнее остановимся на проблеме восприятия времени.) Пока еще не была развита теория относительности, казалось, что физическое или хронологическое время не имеет ничего общего с относительностью и не зависит от условий (абсолютно). Теперь нам ясно, что такое представление происходило от того, что исследовалась лишь ограниченная область малых скоростей. Как только эта область расширилась и включила в себя скорости, по величине сравнимые со скоростью света *c*, мы столкнулись с фактом зависимости хронологического времени от условий опыта, что не столь уж мало схоже с тем, что мы ощущаем в непосредственных восприятиях. Другими словами, все виды времени, включая хронологическое время и субъективно ощущаемое время, — это способы упорядочения реальных событий и измерения относительной длительности процессов. Представление о том, что якобы существует одно-единственное универсальное упорядочение и мера длительности — время, — это всего лишь привычный способ мышления, основывающийся на ограниченной области, в которой действует механика Ньютона. В этой области такое представление справедливо, однако при распространении за ее пределы оно становится несостоятельным. Возможно, что при дальнейшем расширении области применения понятия времени нам придется изменить и обогатить еще больше наши представления о времени (и о пространстве). Мы должны быть готовы даже к их коренному изменению, при котором самые обычные релятивистские представления окажутся предельными случаями или приближениями новых будущих представлений.