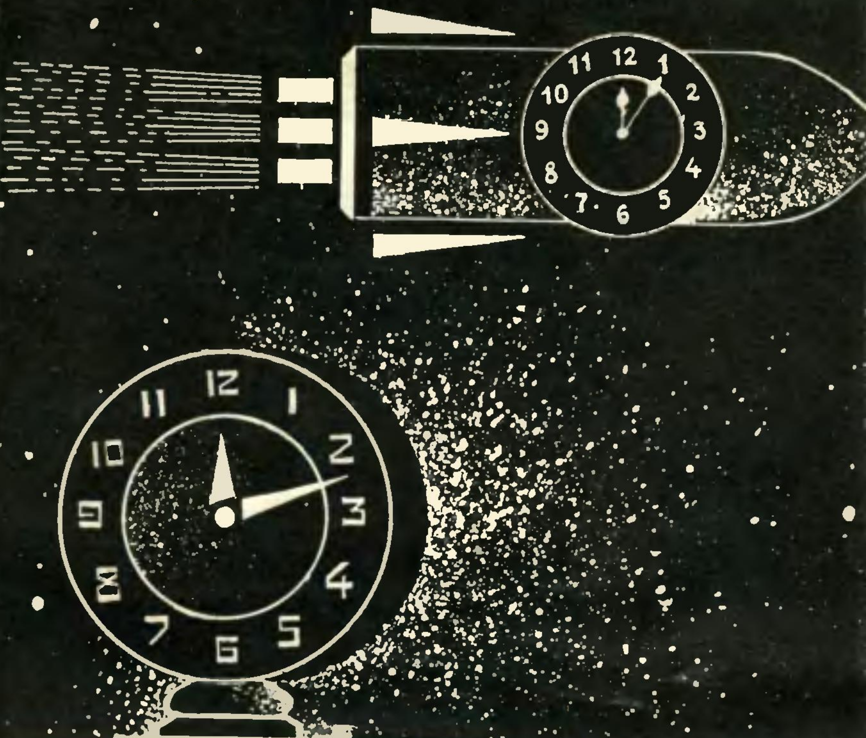


В. КУРГАНОВ

Введение в теорию относительности

V. KOURGANOFF
Professeur à la Sorbonne

INITIATION A LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
PARIS
1964

В. Курганов

Введение в теорию относительности

Перевод с французского В. Д. ЗАХАРОВА

Под редакцией И. В. МИЦКЕВИЧА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1968

УДК 530.12

Небольшая книга известного французского астрофизика В. Курганова посвящена изложению физических основ специальной теории относительности Эйнштейна. Она отличается глубоким проникновением в физическую суть рассматриваемых вопросов и умением автора изложить материал, не прибегая к «спасительным» формулам.

Книга рассчитана на всех, желающих познакомиться с основами одной из наиболее выдающихся теорий современной науки.

Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики

2-6-1

ВВЕДЕНИЕ

Огромное количество работ по теории относительности, опубликованных за последние пятьдесят лет, не смогли устранить ту серьезную «интеллектуальную болезнь», которой многие подвержены при знакомстве с некоторыми «парадоксами» теории Эйнштейна.

Однако эти так называемые «парадоксы» парадоксальны лишь с первого взгляда. Стоит лишь внимательно проанализировать физический смысл основных понятий, относящихся к пространству и времени,— и «болезнь» проходит. К сожалению, многие работы по теории относительности являются либо исключительно философскими, либо исключительно математическими. К тому же большая часть их дает представление только о следующих из теории выводах, более или менее искусно скрывая их объяснение.

Начало нашего изложения мы посвятим фундаментальным понятиям *расстояния, промежутка времени* и *скорости* в том виде, в каком мы представляем их себе в повседневной жизни. Нам нужно будет сначала четко понять их в рамках «классической» физики, прежде чем приступать к изучению их содержания в теории относительности. Развитие современных средств транспорта превратило каждого из нас в «физика», достаточно хорошо знакомого с этими понятиями на опыте. Однако наш жизненный опыт слишком обыден, и лишь глубокое осмысление его позволяет выявить те фундаментальные законы и основные принципы, которые необходимы для понимания теории Эйнштейна.

Перейдя затем к изложению теории относительности, мы будем постоянно пользоваться физическими рассуждениями, а не математическими расчетами. Нам кажется, что язык математики, столь ценный при поисках решения физических задач (благодаря свойственному ему автоматизму, экономии времени и общности рассуждений), может только повредить доходчивости объяснений. В самом деле, последовательность вычислений, как правило, диктуется соображениями математического порядка без прямой связи с физической сущностью проблемы. Кроме того, ясность изложения требует сочетания максимальной простоты и тесной связи с реальными фактами, отбора наиболее важных вопросов и доступного для всех описания экспериментов. И если можно иллюстрировать основные идеи подходящими примерами или наглядными схемами, то для чего замыкаться в абстрактных общностях или технических деталях! Поэтому наше изложение, оставаясь совершенно строгим, потребует от читателя лишь минимума познаний в математике, а вывод наиболее важных формул теории относительности будет дан в подстрочных примечаниях.

Зато кое-кому из читателей придется преодолевать свой снобизм, свое естественное и весьма распространенное стремление рассматривать каждое на первый взгляд простое понятие как банальное и потому не представляющее интереса. Им придется преодолевать дешевый соблазн рассматривать плоды многовековых наблюдений, экспериментов и научного анализа как нечто законченное и раз и навсегда данное.

Жизнь часто заманивает нас в подобную ловушку. Она вызывает у нас стремление рассматривать основные проблемы времени и пространства как нечто простое и порядком надоевшее: разве дорожные указатели и туристские карты не дают нам достаточного представления о расстояниях?.. Разве часы не дают нам представления о беге времени?.. Скорость мы привыкли узнавать по спидометру нашего автомобиля... И переезжая из одного города в другой, мы находим вполне естественным, что городские часы везде показывают то же самое время, что и наши наручные часы, если они исправны.

Но как только мы попытаемся уяснить смысл понятий точки пространства, момента и промежутка времени, скорости или одновременности, мы убеждаемся, что в действительности ни одно из них не является простым. К счастью, после внимательного анализа бóльшая часть трудностей исчезает, и мы обнаруживаем, что каждое из этих понятий является частью нового и очень стройного здания науки.

Серьезный читатель, который не будет просматривать книгу «по диагонали», а согласится методически обследовать с нами это здание от фундамента до крыши, вскоре обнаружит, что нет ничего более простого и более изящного, чем теория относительности, хотя для ее понимания приходится затратить немало усилий.

ЧАСТЬ I

Пространство и время в повседневной жизни

ГЛАВА 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК И ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

1. Понятие точки в пространстве

Для географа, физика или астронома исследование пространства начинается с изучения взаимного положения различных материальных объектов и с определения места различных явлений и событий на поверхности Земли.

Назовем *точкой в пространстве* всякую более или менее протяженную область, которая имеет точно определенное положение и внутренним строением которой в данном масштабе можно пренебречь. Так, в масштабе Европы Париж — точка, отличающаяся от другой подобной точки, скажем Страсбурга. В масштабе города, например Парижа, площадь Оперы и площадь Согласия представляют собой две различные точки. В масштабе улицы отдельной точкой является каждый дом.

Таким образом, место, которое занимает тело в пространстве, можно в определенном масштабе рассматривать как точку. Географические и туристские карты дают хороший пример этого понятия. Школьный атлас, где вся Европа умещается на одной странице, карта-путеводитель по Франции, план Парижа и т. д. изображают при помощи точек все менее и менее протяженные области и предметы: города, деревни, отдельные дома.

В астрономическом масштабе вся Земля или отдельные звезды иногда рассматриваются как точки. Мы часто говорим об обращении Земли (Земли-«точки») вокруг другой «точки» — Солнца. В масштабе Вселенной целые галактики (состоящие в свою очередь из миллиардов звезд) можно рассматривать как отдельные «материальные точки».

Представление различных частей поверхности Земли, всей Земли в целом, звезд и галактик точками в пространстве — не просто игра воображения, а зрительный образ, в котором физическое пространство представляется исследователю, изучающему Вселенную в том или ином масштабе, т. е. с той или иной степенью подробности.

Таким образом, изучение пространства начинается с определения положения находящихся в нем объектов и происходящих в пространстве событий. Оно означает также определение относительного положения точек в пространстве. Затем мы переходим к исследованию внутреннего строения материальных тел и областей, уже не рассматривая их как точки, а учитывая их размеры. Чтобы различать отдельные точки, можно пользоваться определенными материальными ориентирами, естественными или искусственными. Так, летчик легко узнает Париж, заметив Эйфелеву башню или увидев знакомые изгибы Сены. Во время прогулки можно узнать площадь Согласия по ее обелиску. Моряк судит о глубине моря в данном месте по установленному там бакену.

Но существуют вполне определенные точки, которые нельзя непосредственно зафиксировать при помощи того или иного материального ориентира. В случае гибели подводной лодки ни один материальный след (остатки кораблекрушения или масляное пятно на воде) не дает точного указания, в каком месте океана покоится погибшее судно. Все мы читали в детстве рассказы о сокровищах, спрятанных в точно определенном месте (например, в центре квадрата, образованного деревьями или стенами дома), но, конечно, не только не отмеченном чем-либо, а старательно замаскированном.

Как мы вскоре увидим, проблема определения положения в пространстве точек, не имеющих материальных ориентиров, представляет весьма специальный случай значительно более важной проблемы: определения положения точек, удаленных от нас на некоторое расстояние. Но прежде чем перейти к этому вопросу, следует уточнить понятие расстояния между двумя точками.

2. Понятие расстояния

В выбранном масштабе расстояние между двумя предметами или двумя точками пространства может быть пренебрежимо мало. Так, если в некотором масштабе площадь Согласия представляется точкой, то любые два события, происшедшие на этой площади, можно считать происшедшими в одной и той же точке пространства. Такие два события мы будем называть *пространственно-совпадающими*.

Предлагаем читателю запомнить этот термин, так как мы будем им пользоваться в «релятивистской» [1] части нашего изложения.

В общем случае две точки, положение которых в пространстве зафиксировано при помощи материальных ориентиров, находятся на определенном расстоянии друг от друга.

Отсчет числа шагов между двумя домами на одной и той же улице дает простейший, хотя и довольно грубый способ измерения расстояния между ними. Сущность этого способа — в повторении, точнее в определении того, сколько раз надо повторить одно и то же движение — шаг. Очевидно, этот способ можно сделать более точным и более объективным, если вместо шагов воспользоваться повторным приложением твердого стержня — деревянной или стальной линейки.

Однако если брать каждый раз стержни произвольной длины, то результаты измерений будет трудно сравнивать между собой. Поэтому условились использовать стандартные стержни одной и той же длины, называемые *эталонами длины*. С одного твердого стержня, выбранного раз и навсегда, можно снять «копии», снабженные дробными делениями, что позволит производить точные измерения в различных масштабах. Как известно, классический эталон длины, употребляемый как в научных измерениях, так и в обиходе, представляет собой платино-иридиевый стержень, называемый *эталоном метра*.

До сих пор мы не интересовались формой и строением протяженных предметов, представляя их себе отдельными

---

[1] «Релятивистский» — связанный с теорией относительности, от латинского слова relativ — относительный.— *Прим. ред.*

точками. Однако мы не можем, например, полностью пренебрегать очертаниями дороги. Если даже в первом приближении пренебречь ее шириной, то для практического определения ее длины нужно принимать во внимание повороты, спуски и подъемы. Следовательно, мы должны рассматривать дорогу или улицу по меньшей мере как «нить», свободно лежащую на поверхности Земли.

Представим себе тропинку, вьющуюся по горному пастбищу. Ясно, что расстояние между двумя ее точками, измеренное вдоль тропинки, интересующее нас на практике, не совпадает с геометрическим, которое можно измерить, соединив эти точки натянутой нитью (если тропинка пересекает ложбину) или проложив между ними прямолинейный туннель (если эти точки находятся на противоположных склонах горы). К счастью, в повседневной жизни длина пройденного пути определяется не геометрическим, а «практическим» расстоянием (даже при полетах на самолете) вследствие шарообразности Земли.

Конечно, «практическое» расстояние измерить гораздо легче, чем расстояние по прямой. Так, величину пути, пройденного автомобилем по дороге, с достаточной точностью указывает счетчик. Этот способ определения расстояния дает еще один пример метода повторного прикладывания предмета постоянной длины. В данном случае определяется произведение числа оборотов колеса автомобиля на длину (которая предполагается постоянной) окружности колеса с нормально накаченной шиной.

Разумеется, шина колеса не остается строго одинаковой: она изнашивается от трения, расширяется от нагревания или уменьшается в поперечнике, если из камеры выходит воздух. Но в пределах точности, необходимой водителю (его вполне устроят десятые доли процента), всеми этими обстоятельствами можно пренебречь, и если счетчик работает нормально, то на его показания вполне можно положиться.

Замечанием о работе автомобильных счетчиков мы никак не хотим заронить у читателя сомнение в их надежности. Цель этого замечания — навести читателя на мысль, что и сам эталон метра не гарантирован от изменений длины, которая зависит, например, от температуры. Тем не менее соблюдение ряда предосторожностей (поддержание постоянной температуры во время измерения, изготовление эталона метра из сплава платины и иридия, весьма мало подверженного тепловому расширению, и т. д.) позволяет сохранить его длину постоянной в пределах точности, необходимой для большинства научных исследований.

Для измерения *практических* расстояний в быту удобно пользоваться гибким метром из хромированной стали или клеенчатым сантиметром (например, для измерений, производимых портным, или для измерений длины окружности колеса, обхвата колонны и т. п.). В этом случае при определении расстояний в несколько метров нас вполне устраивает точность в пределах одного сантиметра.

3. Определение положения точек

Теперь мы можем вернуться к важной проблеме: найти точку, расположенную на определенном расстоянии от заданной точки в пространстве. Для начала предположим, что обе точки лежат на одной поверхности, например на земле, и что их можно зафиксировать при помощи материальных ориентиров.

Иначе говоря, речь идет о том, как зафиксировать путь или маршрут, позволяющий перейти из одной точки в другую. С этой задачей мы сталкиваемся, например, приехав впервые в Париж и желая попасть (без помощи такси, разумеется) с площади Согласия по адресу: проспект Оперы, дом № 35. Аналогичную задачу «решает» летчик, вылетающий из аэропорта Орли и берущий курс на Нью-Йорк. Эти два примера показывают, какие трудности ставит перед нами на первый взгляд столь простая задача — «движение к заданной цели».

Читатель может подметить, что, за немногими исключениями, пункт отправления и пункт назначения можно соединить друг с другом весьма разнообразными маршрутами. Наша задача состоит в том, чтобы выбрать по крайней мере один из них. Мы увидим, что даже в этом облегченном варианте проблема определения положения точек требует исследования не только исходного и конечного пунктов, но и всей местности.

Рассмотрим теперь несколько примеров определения положения точек (в порядке возрастающей трудности).

3.1. Как определять положение точек на поверхности, снабженной сеткой легко отождествимых линий

Классический пример такой сетки — пересекающиеся под разными углами улицы и проспекты города (рис. 1), к зданиям которого прикреплены таблички с названием

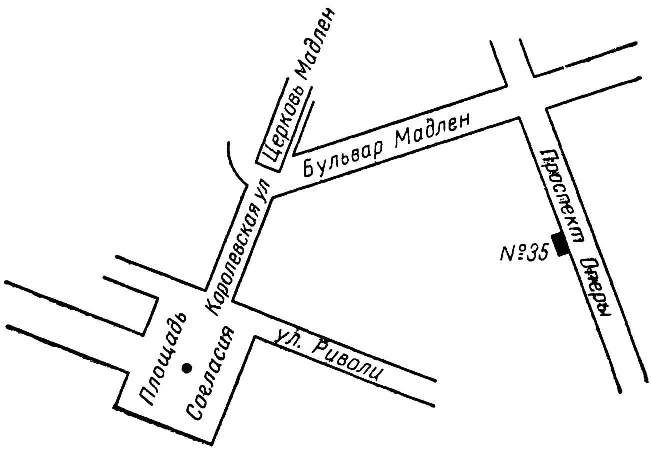


Рис. 1.

улицы и номера дома. От площади Согласия к дому № 35 на проспекте Оперы вы можете попасть, например, по следующему маршруту (вернее, одному из многочисленных маршрутов): пройдя по Королевской улице до пересечения с бульваром Мадлен, сверните на этот бульвар и дойдите до пересечения с проспектом Оперы; вновь повернув, идите по этому проспекту, и вы остановитесь перед домом № 35.

Рассмотрим теперь сеть покрывающих Францию дорог, где практически все дороги, и главные, и второстепенные, снабжены как указателями, позволяющими точно определить любую часть дороги между двумя пересечениями, так и «верстовыми столбами», которые играют роль материальных ориентиров, указывающих практическое расстояние между ними. Такая сетка позволяет без труда определить положение с точностью до одного километра (что достаточно при перемещениях между двумя городами), причем «верстовые столбы» играют такую же роль, какую играли номера домов на улицах города.

Однако, чтобы с точностью до нескольких метров определить положение автомобиля на дороге, этой сетки уже недостаточно, так как нам понадобится найти «практическое» расстояние от автомобиля до ближайшего к нему «верстового столба». Разберем этот случай в более общем виде.

3.2. Определение положения точек на поверхности, лишенной разграничительных линий, «дорожных знаков» и «верстовых столбов»

В стране, где слабо развит туризм, дорожные знаки — довольно редкое явление. Допустим, что дорожных указателей и «верстовых столбов» вообще нет. В этом случае при определении маршрута придется руководствоваться совершенно новым принципом — непрерывным определением «практического» расстояния и ориентацией по углу (например, измерением углов поворота при переходе с одной дороги на другую).

Пусть, например, нашлись злые шутники, которые сняли со всех домов, расположенных между площадью Согласия и проспектом Оперы, таблички с названием улицы и номерами домов. Тогда наш маршрут можно восстановить, зная углы поворота и расстояния; нам понадобится еще некоторый «базис», содержащий, кроме пункта отправления, по крайней мере еще один пункт, например площадь Мадлен (рис. 2) [1].

В самом деле, маршрут можно указать так: сначала пройти по улице, которая ведет от площади Согласия к церкви Мадлен (или пройти столько-то метров от площади Согласия в направлении церкви Мадлен); затем повернуть на 135° вправо, став лицом к бульвару; пройти по этому бульвару столько-то метров; снова повернуть вправо на 90° (став тем самым лицом к проспекту, кото-

---

[1] Читатель, наверное, уже обратил внимание на рисунки, поясняющие наши рассуждения в этой книге. По ним обязательно нужно проверять каждый шаг рассуждений, хотя, к сожалению, рисунки порой оказываются довольно далеко от относящегося к ним текста или на оборотной стороне листа. В этих случаях можно посоветовать снять копию рисунка на кальку.

рый и есть проспект Оперы) и пройти еще столько-то метров до искомого дома.

В этой процедуре важную роль играет «ось координат», проходящая через площадь Согласия и церковь Мадлен. Если бы не было этой оси, мы не могли бы указать, по отношению к чему мы должны были повернуть первый раз.

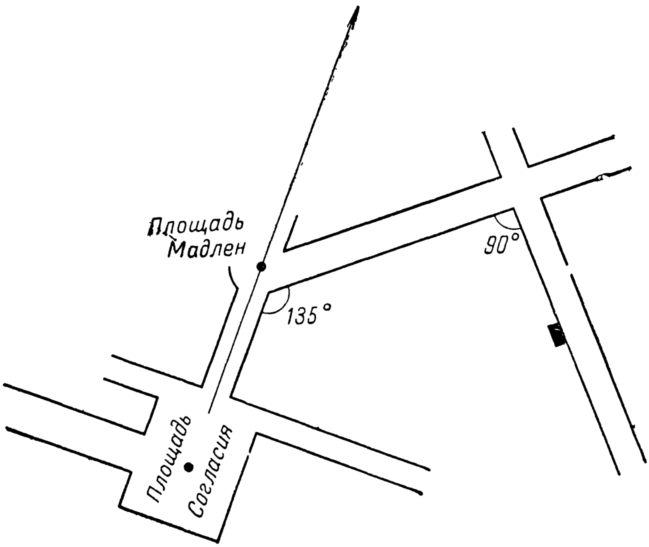


Рис. 2.

Мы решили задачу определения положения точки, не принадлежащей сетке линий, нанесенных на поверхность, и лишенной каких-либо материальных ориентиров (загадка «спрятанного сокровища»!). Значит, для решения этой задачи в общем случае достаточно указать: 1) связь этой точки с ближайшим отрезком сетки; 2) под каким углом надо выйти из определенной точки этого отрезка и на сколько метров (или шагов) удалиться в заданном направлении.

Однако на Земле не всегда можно найти такую сетку, которая могла бы служить системой ориентации. В пустыне или в открытом море возникает новая проблема, точнее две:

а) как «закрепить» заданное направление?

б) как измерить пройденное расстояние?

Решение первой задачи облегчается использованием компасов, гироскопов и радионавигационных устройств, позволяющих более или менее надежно сохранять выбранное направление. Однако точное и надежное решение задачи ориентации на море и в воздухе достигается только по наблюдениям движений небесных светил.

Изучение методов определения координат небесных тел увело бы нас слишком далеко от тех вопросов, которым посвящена эта книга. Поэтому в дальнейшем мы не будем рассматривать специальных астрономических методов измерения времени и пространства.

ГЛАВА 2

МОМЕНТЫ И ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА

4. Момент времени с точки зрения физики

Пусть мы находимся в заданной области на поверхности Земли (причем в некотором масштабе эту область можно считать точкой). Бóльшая часть явлений, наблюдаемых в данной точке, имеет более или менее четко выраженные начало и конец. История людей и вещей в данной точке отмечена событиями различного рода.

Для физика все то, что нарушает однообразие наблюдения, неизменность состояния, представляет местное событие, и каждое из этих событий определяет момент, или мгновение [1)].

Вот несколько местных событий, каждое из которых характеризуется определенным моментом времени: восход или заход Солнца, начало или конец грозы, рождение или смерть, прибытие или отход поезда и т. д.

Чтобы событие было действительно местным, его надо рассматривать не во всей общности, а только таким, каким его могут зафиксировать наблюдатели или приборы, находящиеся в данной точке пространства: восход Солнца в Париже; смерть человека в определенном доме; прибытие поезда на указанную станцию и т. д.

Мгновенность события, как и «точечность» области пространства, есть прежде всего вопрос масштаба и точности. Вот примеры моментов: взятие Бастилии в масштабе истории; рождение в масштабе человеческой жизни; отправление поезда в масштабе минуты; «шестой сигнал» для сверки часов в масштабе секунды; прием отраженного от цели радиолокационного импульса в масштабе миллисекунды и т. д.

Рассматривать событие в определенный момент — зна-

[1)] Мы говорим «момент», имея в виду «точку во времени», а не короткий промежуток времени, не тот «момент», о котором, например, говорят: «Подождите один момент».

чит временно отказаться различать отдельные детали, характеризующие развитие этого события во времени. Однако это не исключает возможности в дальнейшем анализировать событие более детально, более глубоко, разлагая его на множество различных «более мгновенных» событий.

Иерархия масштабов позволяет нам определить одно понятие, исключительно важное для теории относительности. В том масштабе, в котором отправление поезда можно рассматривать как мгновенное событие, два различных поезда могут отправиться с одного и того же вокзала (т. е. из одной и той же точки пространства в масштабе данной страны) в один и тот же момент времени.

Условимся в общем случае называть несколько событий, происходящих (в некотором заданном масштабе) в одной и той же точке пространства и в один и тот же момент времени, *локально-одновременными*. Будем также говорить, что они представляют собой *сложное событие*.

Как мы видим, понятие локальной одновременности углубляет понятие совпадения в пространстве: оно добавляет к совпадению географическому совпадение историческое. В масштабе всемирной истории и географии то, что происходило на площади Бастилии 14 июля 1789 г., — лишь одно-единственное событие, называемое взятием Бастилии. Аналогично, в масштабе одной радиостанции два сигнала, принятые одним и тем же приемным устройством в интервале времени, меньшем, чем так называемая разрешающая способность устройства, представляют два локально-одновременных события.

Отождествление моментов времени значительно труднее, чем определение местоположения. Чтобы зафиксировать момент времени, мы не располагаем материальными ориентирами, подобными тем, которыми пользуемся для определения положения точек в пространстве. Говорят, что время «течет», и это течение времени неощутимо.

Первая мысль, которая приходит в голову, — это фиксировать время интересующих нас событий, связывая их с другими достаточно широко известными историческими событиями или явлениями природы. Например, в некотором приближении можно зафиксировать момент рождения человека, сказав, что это событие произошло в Париже в день прибытия летчика Линдберга, совершившего первый перелет через Атлантику, или в день сильного землетрясения в Сан-Франциско.

Однако такой способ регистрации моментов времени неточен и ненадежен, так как зависит от случайного совпадения событий. Поэтому еще в глубокой древности люди стали «размечать время» посредством астрономических явлений. Эти явления позволяют построить *систему счета времени,* соответствующую астрономической хронологии. Такая система позволяет составить подробную и точную историю явлений природы и человеческой жизни, приписывая каждому событию определенную дату.

Но это еще не дает возможности установить физические законы, поскольку они связаны не с понятием момента, а с понятием промежутка времени.

5. Промежуток времени с точки зрения физики. Измерение промежутков времени

Всякий процесс, ограниченный во времени двумя местными событиями, характеризуется определенной продолжительностью, т. е. определяется некоторым промежутком времени. Хотя непосредственное психологическое восприятие промежутков времени нам хорошо знакомо, мы можем рассматривать его с двух разных точек зрения.

Если два пациента одновременно пришли на прием к зубному врачу и пациент А был принят врачом раньше, чем пациент Б, то этот последний может вполне объективно утверждать, что он пробыл в приемной дольше, чем пациент А. Наоборот, если вы попытаетесь, не глядя на часы, сравнить продолжительность своего собственного ожидания во время двух различных визитов к зубному врачу, то рискуете ошибиться, так как восприятие времени существенно зависит от степени страдания, которое причиняет зубная боль.

Нет ничего более неопределенного, чем психологическое восприятие длительности различных процессов, которые начинаются и кончаются неодновременно.

Чтобы точно и объективно измерять промежутки времени, необходимо построить прибор, в основу которого положен повторяющийся процесс (например, вращение, колебание, вибрация и т. п.) и который мог бы сохранить присущие ему свойства достаточно долго. Каждый цикл процесса, служащего для измерения времени, подобен повторному приложению эталона длины при измерении расстояний.

Это приводит нас к проблеме физических и механических эталонов промежутка времени, т. е. к задаче создания часов и других устройств для измерения времени.

6. Часы и физические эталоны промежутка времени

Чтобы точно определить продолжительность забега на 400 *м*, длительность проявления фотопленки или время, протекшее с момента посылки радиолокационного сигнала до его возвращения в приемное устройство, т. е. интервала времени между двумя местными событиями, используются часы, секундомеры, хронометры и другие устройства.

Первыми «приборами» для измерения времени, используемыми с древних времен, были водяные часы (клепсидры) и песочные часы. Длительность процесса определялась по количеству воды или мелкого песка, перетекающих из одного сосуда в другой.

Чтобы повысить точность измерения промежутков времени, ученые средневековья и Возрождения изобрели механические приспособления, до сих пор используемые в часах. В XV в. стала употребляться спиральная пружина, в XVII в. начали использовать маятник, а способ регулирования хода часов при помощи качающегося колесика и спирального «волоска», употребляемый в современных наручных часах, был изобретен в конце XVII в.

Современное хронометрическое устройство не обязательно механическое. Для отсчета времени можно использовать самовозбуждающиеся колебания мембраны (стальной пластины), периодически притягиваемой электромагнитом, который питается от электрической цепи, «включаемой» и «выключаемой» самими колебаниями мембраны. Еще точнее кварцевые часы. В них источником самовозбуждающихся колебаний является кристалл кварца, размеры которого меняются под действием электрического поля. В атомных часах используются колебания атомов в молекулах некоторых газов (например, аммиака), усиленные электронным устройством.

Современное хронометрическое устройство (часы) включает следующие необходимые элементы:

1) источник энергии, необходимый для обеспечения длительной работы;

2) приспособление для регулирования работы часов,

обеспечивающее непрерывную смену последовательных циклов постоянной длительности;

3) приспособление для настройки часов, позволяющее изменять продолжительность этих циклов;

4) счетчик циклов, необходимый для их автоматического счета при измерении достаточно больших промежутков времени.

В первых механических часах источником энергии был падающий груз (гиря), привязанный к металлической цепи. В более поздних часах двигателем служила тугая пружина (причем завод этой пружины аналогичен подъему гири). В современных хронометрических устройствах энергия запасается, как правило, в батареях и аккумуляторах. В некоторых марках часов в качестве источника энергии используются даже случайные движения руки (часы с автоматическим заводом).

Первым приспособлением, которое использовалось для точного регулирования работы часов, был маятник, изобретенный Галилеем и снабженный устройством, преобразующим колебания во вращательное движение колесного механизма. Некоторое время спустя Гюйгенс заменил маятник небольшим колесиком, которое возвращается в положение равновесия тонкой спиральной пружинкой [1] (не смешивайте с толстой пружиной механизма завода!). В современных наручных часах и хронометрах используется система регулирования, предложенная Гюйгенсом. Преимущество такой системы состоит в том, что она позволяет создавать часовые механизмы очень маленьких размеров. Кроме того, колебания колесика гораздо менее чувствительны к толчкам, испытываемым механизмом (движению рук, качке парохода и т. п.), чем колебания маятника.

Ход маятниковых часов регулируется путем изменения длины маятника. Обычные наручные часы можно настраивать путем изменения натяжения «волоска» балансира Гюйгенса. Изменение ритма колебаний камертона, которым пользуются музыканты, достигается путем перемещения груза вдоль колеблющегося стержня.

Счетчик — это система зубчатых колес, которая позволяет выразить число колебаний маятника или балансира

---

[1] Это устройство называют *балансиром,* что по-французски означает «маятник» — его предшественник в часах.— *Прим. ред.*

через смещение стрелок, указывающих часы, минуты и секунды на циферблате.

Теперь вернемся к нашей основной задаче: как обеспечить постоянство циклов регулирующего устройства? На первый взгляд эта задача кажется неразрешимой. Действительно, чтобы обеспечить постоянную длительность циклов, нужно было бы сохранить один из них для сравнения с последующими циклами, но течение времени неумолимо унесет его в прошлое. Кроме того, механизм нужно настроить при помощи другого эталона, т. е. по существу предполагается, что в нашем распоряжении есть некий неизменный эталон времени.

Однако из этого порочного круга легко выйти, заметив, что, несмотря на «вечный ход времени», проблема эталона времени аналогична проблеме эталона длины. Действительно, если можно допустить, что линейка, изготовленная из достаточно твердого материала, остается неизменной (в некотором приближении и при соблюдении некоторых предосторожностей), то почему бы не допустить, что некоторый механизм или прибор сохраняет все свои свойства при соблюдении соответствующих предосторожностей, уберегающих его от внешних воздействий и быстрого износа? Оставаясь неизменным, такое устройство будет сохранять все свои характеристики, в том числе период колебаний.

Если нельзя непосредственно сравнить два последовательных цикла одних и тех же часов, то можно использовать показания нескольких часов, которые расположены в непосредственной близости друг от друга и ход которых почти одинаков. Чтобы исключить систематические ошибки механизмов, мы предположим, что часы различаются принципом своего устройства и способом изготовления. Тогда для измерения промежутков времени можно использовать среднее из показаний всех этих часов.

Разумно предположить, что наиболее точными являются те часы, ход которых наименее отличается от среднего. Небольшое число хронометрических устройств, специально отобранных по такому принципу, позволяет контролировать гораздо менее дорогостоящие и более простые в употреблении часы.

ГЛАВА 3

ПОНЯТИЕ СКОРОСТИ И ОДНОВРЕМЕННОСТЬ НА РАССТОЯНИИ

7. Движение по замкнутому пути

В предыдущих главах мы рассматривали опыты и наблюдения, которые производятся при помощи приборов, неподвижно закрепленных в заданной точке пространства.

Однако в дальнейшем мы будем рассматривать движение, траектория которого проходит через фиксированные точки. Примеры такого движения — туристские путешествия, распространение света или радиоволн, прохождение Солнца над различными земными меридианами и т. п.

Поскольку до сих пор мы рассматривали только локальные (местные) свойства времени, начнем эту главу с изучения движения по замкнутому пути, при котором тело вновь возвращается в исходную точку. Например, замкнутым будет маршрут туриста, отправляющегося в путешествие из Парижа и вновь возвращающегося в Париж. Другой пример — распространение луча света, возвращающегося в исходную точку после отражения от неподвижного (относительно земли) зеркала.

В этих примерах конечный пункт совпадает с исходным, в результате чего «хронометрические устройства» (например, часы), расположенные в этом пункте, позволяют точно и объективно измерить интервал времени между началом и концом путешествия.

Субъективное психологическое восприятие продолжительности путешествия, очевидно, будет различным у разных туристов, причем оно может не совпадать для тех, кто находится в движении, и для тех, кто остается на месте. Это субъективное восприятие не представляет интереса для физика. В дальнейшем нас будет в основном интересовать то, что происходит с часами, перевозимыми туристами. Однако сейчас мы рассматриваем только неподвижные часы.

Как мы уже убедились в гл. 1, определение практического расстояния, пройденного путешественником или световым сигналом, не представляет трудностей. Длина пути, пройденного автомобилем, измеряется с удовлетворительной точностью счетчиком расстояний.

Если по показанию часов, установленных в пункте отправления, путешествие по замкнутому пути длится 10 *час* и если «практическое» пройденное расстояние оказывается равным 600 *км*, то можно ввести новое понятие, характеризующее движение, — скорость в километрах в час, говоря, что путешествие совершалось со средней скоростью 60 *км/час*.

Аналогично, измеряя при помощи самых точных местных часов время путешествия радиосигнала «туда и обратно» на отрезке пути с точно определенной длиной, можно определить среднюю скорость распространения радиосигнала в условиях эксперимента. Как известно, в пустоте (а также с очень незначительным отличием в земной атмосфере) эта средняя скорость составляет приблизительно 300 000 *км/сек*.

7.1. Круговое движение. Частота

Простейший пример движения по замкнутому пути — круговое движение, т. е. движение вокруг заданной неподвижной точки. Ежедневно мы сталкиваемся с многочисленными примерами этого вида движения: вращение колес автомобилей, диска электропроигрывателя, подвижных частей швейной машины, пропеллеров, вентиляторов и т. д.

Снабдив вращающееся колесо или диск счетчиком оборотов (с зубчатой передачей, как в часах), можно ввести новое понятие средней частоты, определяющее скорость вращения. Средняя частота вращения выражается числом оборотов в секунду, в минуту или в час. Так, если диск делает 33 полных оборота за 1 минуту, то можно охарактеризовать скорость вращения, сказав, что его средняя частота равна 33 оборотам в минуту. Если вращение закрепленного в данном месте колеса не вполне периодично, то понятия *средней* частоты недостаточно для полного описания его движения. В этом случае каждая фаза вращения характеризуется и описывается самостоятельно.

При этом раскрывается важная роль, которую играет понятие масштаба в определении момента времени. Мы уже знаем, что каждый местный процесс в некотором масштабе времени можно рассматривать как мгновенный, тогда как с увеличением масштаба тот же процесс приобретает длительность. Следовательно, можно описывать вращение колеса в течение последовательных «моментов» времени продолжительностью в 1 *сек*, в 0,1 *сек* и т. д. Определяя соответствующее число оборотов, мы найдем частоту вращения в рассматриваемый «момент» времени.

Если для определения «мгновенной» частоты мы рассматриваем «моменты» времени продолжительностью 0,1 *сек*, то будем говорить, что мы взяли в качестве единицы времени 0,1 *сек*. Важно заметить, что, какова бы ни была эта единица, частоту всегда можно выразить в числе оборотов как в секунду, так в минуту и в час. Если, например, вращение настолько неравномерно, что в качестве единицы времени приходится выбирать промежуток времени порядка 1 *сек*, то можно сказать, что в момент времени 7 час. 33 мин. 37 сек. частота равнялась 45 оборотам в минуту, даже если было отмечено, что за промежуток времени между 36-й и 37-й секундами диск совершил лишь $^3/_4$ оборота.

7.2. Измеритель и стабилизатор частоты

Естественно, было очень важно создать автоматическое устройство, с которого непосредственно считывалась бы частота вращения колеса без вычисления количества оборотов за данный промежуток времени. Для этой цели был использован центробежный эффект вращения.

Хорошо известно, что все материальные тела при достаточно быстром вращении стремятся удалиться от оси вращения, если «механическая связь» не слишком упруга, а трение невелико.

Этот эффект можно продемонстрировать, заставив вращаться на месте в горизонтальном положении велосипедное колесо с тонкими и гладкими стальными спицами. Предположим, что вдоль спицы может скользить небольшой цилиндр, причем трение очень мало. Тогда малейшее вращение будет отбрасывать цилиндр, надетый на спицу, к ободу.

Из этого примера видно, что для создания автоматического измерителя частоты (тахометра) (рис. 3) к такому устройству необходимо прикрепить спиральную пружину, которая возвращала бы цилиндр к оси вращения. Равновесие между возвращающей силой пружины и центробежной силой удерживало бы его на определенном расстоянии от оси вращения, которое для данного прибора зависит только от мгновенной частоты вращения колеса.

Конечно, такое устройство неизбежно обладает некоторой инертностью; другими словами, оно способно реагировать лишь на достаточно грубые изменения мгновенной частоты, которые происходят к тому же за достаточно

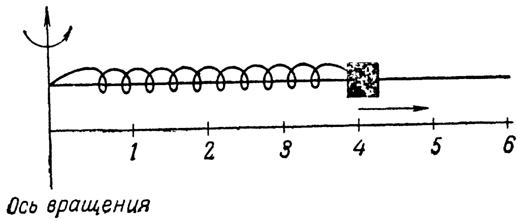


Рис. 3.

длительные промежутки времени. Прибор нужно отградуировать (нанести деления, указывающие частоту). Для этой цели необходимо несколько раз повернуть колесо с известной частотой и установить соответствие между положениями подвижной массы и значениями частоты, выраженной в числе оборотов колеса в секунду. Численные значения частоты можно проставить непосредственно на «спице».

Как мы уже отмечали, градуировка тахометра требует стабилизации скорости вращения колеса в течение интервала времени, который можно для данной задачи считать мгновенным. Стабилизация частоты вращения колеса осуществляется при помощи различных приспособлений, принцип действия которых основан на равновесии между торможением, возрастающим, как известно, с увеличением скорости вращения, и энергией мотора, приводящего колесо во вращение.

Пример такого стабилизирующего устройства — центробежный регулятор Фуко. Это прибор, в котором торможение осуществляется за счет сопротивления воздуха в результате трения «крылышек» о воздух. Если прикрепить такие «крылышки» к цилиндру, скользящему вдоль спицы, то торможение будет зависеть от площади поверхности «крылышек», их ориентации и скорости вращения в секунду. При увеличении скорости вращения колеса цилиндр, удерживаемый пружиной, стремится отклониться вследствие центробежного эффекта от оси вращения, и «крылышки», разворачиваясь шире, за секунду совершают все больше и больше оборотов по кругу увеличивающегося радиуса. В результате усиливается торможение и устанавливается скорость вращения, зависящая при данной поверхности «крылышек» от того, насколько последние раскрылись под действием центробежной силы.

Прибор такого типа и вообще всякое устройство с самоустанавливающейся частотой, очевидно, может играть роль стабилизатора хода часов; его можно непосредственно использовать как эталон времени.

7.3. Спидометр

В случае кругового движения (например, вращение колес автомобиля или поезда, вращение винта парохода, плывущего по поверхности спокойного озера) скорость вращения колес или винта можно измерить непосредственно при помощи тахометра. Но каждый оборот колеса или винта соответствует определенному «практическому» расстоянию, пройденному по суше или по воде. Следовательно, если проградуировать тахометр в километрах в час, то его можно использовать как указатель скорости (спидометр). Если его инертность достаточно мала, то он будет показывать значение мгновенной скорости.

Пользуясь спидометром, водитель (или следящий механизм) может выбрать определенную скорость и поддерживать ее на постоянном уровне с точностью до 1—2 *км/час*, попеременно то притормаживая, то ускоряя движение.

Разумеется, всегда есть опасность, что тахометр, проградуированный как спидометр при вращении колеса на месте, будет функционировать иначе, когда машина движется, даже если ее движение равномерно. Однако опыт показывает, что, как и в случае переноса часов, о котором мы уже упоминали и к которому скоро вернемся, движение автомобилей, поездов, самолетов и т. д., даже при учете поворотов, наклонов, бортовой и килевой качки, не нарушает нормальную работу спидометров — по крайней мере в том приближении, которое требуется в повседневной жизни. В этом легко убедиться, двигаясь по замкнутому кругу автодрома на автомобиле с точным спидометром. Если ваш автомобиль разовьет скорость 60 *км/час*, то по часам, установленным на старте, вы определите, что замкнутую дистанцию протяженностью 60 *км* вы прошли за 1 *час*.

Во время этого эксперимента вы убедитесь еще и в том, что ход лучших хронометров не зависит от того, движутся они или покоятся. Показания часов, неподвижно установленных на станции, в точности согласуются с показаниями движущихся часов (если только движущиеся часы не подвергаются слишком резким толчкам и вибрациям).

8. Продолжительность путешествия между двумя городами

Опыты по перевозке хронометров и спидометров, о которых только что шла речь, позволяют перейти от хронометрии местной (вернее, по замкнутому маршруту) к хронометрии, связанной с перемещениями между различными точками пространства. Такие маршруты в отличие от замкнутых мы будем называть *открытыми*.

Пусть требуется определить продолжительность переезда на автомобиле из Парижа в Орлеан. Зная, что расстояние между этими пунктами равно 100 *км* (это нетрудно проверить при помощи счетчика расстояния), мы можем (используя показания спидометра) добиться, чтобы скорость автомобиля была постоянной, скажем 50 *км/час*, и чтобы продолжительность путешествия выражалась целым числом часов. В результате, не прибегая к помощи какого-либо хронометрического устройства, мы будем знать, что путешествие из Парижа в Орлеан займет ровно 2 *час*. Такой метод определения продолжительности путешествия будем называть *основным*.

Точность основного метода определения промежутков времени можно контролировать при помощи часов. Захватив с собой в путешествие часы, мы можем убедиться. что путешествие длилось ровно 2 *час*. Впрочем, подобный контроль можно применить не только ко всему путешествию из Парижа в Орлеан, но и к каждому километру этого пути. Действительно, показания перевозимых нами часов должны быть в полном соответствии с показаниями как «верстовых столбов» (или счетчика расстояния), так и спидометра.

Метод определения продолжительности путешествия по открытому маршруту, выражающий время путешествия через скорость движения и пройденное расстояние, мы назвали основным потому, что он применим также к распространению света и радиосигналов, скорость которых можно определить по времени распространения по замкнутому пути. (Ведь волны не могут переносить с собой хронометров!)

При иллюстрации основного метода мы предполагали, что скорость движения по открытому маршруту постоянна. Однако совершенно очевидно, что тот же метод применим и к неравномерному движению, если только скорость известна в каждой точке пути.

9. Одновременность на расстоянии

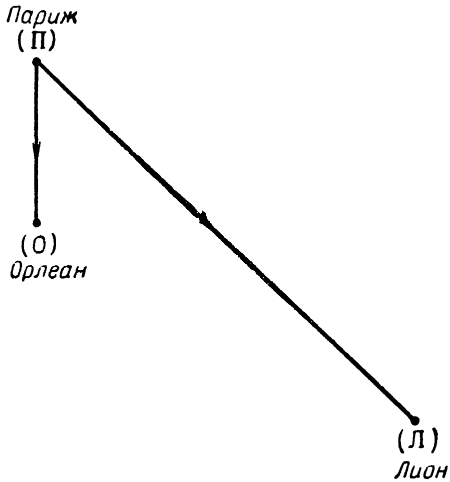
В разд. 4 мы ввели понятие локальной одновременности для событий, наблюдаемых в одной и той же точке и происходящих в один и тот же момент времени (в некотором масштабе). Пусть, например, в тот же момент времени, когда я выезжаю на автомобиле из Парижа в Орлеан, мой друг Жан вылетает на самолете из Парижа в Лион. В масштабе Франции эти два события, с точностью до минуты, являются локально одновременными. Но их можно также рассматривать как одно сложное событие. Поскольку это событие произошло в Париже, обозначим его П.

Пусть путешествие автомобиля из Парижа в Орлеан длится ровно 2 *час*. Для простоты предположим также, что перелет из Парижа в Лион тоже длится ровно 2 *час* (например, туристским самолетом, скорость которого невелика).

Очевидно, время полета самолета нельзя определить основным методом (если только не использовать специальные приборы, применяемые на самолетах). Однако в нашем примере это не играет роли, так как речь идет всего-навсего о двух видах транспорта, обладающих различной скоростью; вместо самолета можно было бы рассматривать автомобиль, скорость которого превышает скорость первого.

Обозначим событие, состоящее в прибытии автомобиля в Орлеан, через О, а событие, состоящее в прибытии самолета в Лион, — через Л. Тогда рис. 4 дает нам схематическое представление о соотношении рассматриваемых событий.

Возможность измерения продолжительности путешествий по открытым маршрутам (Париж — Орлеан и Париж — Лион) позволяет нам ввести новое, исключительно важное физическое понятие: *одновременности на расстоянии.*



Р и с. 4.

Будем говорить, что события О и Л, происшедшие в двух различных точках на поверхности Земли, являются одновременными, если они произошли с одинаковым запаздыванием во времени (в данном случае 1 *час*) по отношению к некоторому событию, называемому *опорным.*

В нашем случае опорным событием является сложное событие П, состоящее в локально-одновременном отправлении из Парижа автомобиля и самолета.

Равенство запаздываний во времени можно было бы заменить равенством возможных опережений во времени некоторого события. Для этого достаточно рассмотреть обратный случай, когда автомобиль из Орлеана и самолет из Лиона одновременно отправляются и одновременно прибывают в Париж.

Нетрудно обобщить определение одновременности на расстоянии на случай большего числа точек пространства. Добавим к двум одновременным событиям О и Л третье событие П′, происшедшее в Париже час спустя после события П — отправления наших путешественников. Тогда три события О, Л и П также будут называться одновременными.

Заметим, что определение одновременности по равенству запаздываний или опережений во времени относительно опорного события можно применить и к событиям, происходящим в одной и той же точке пространства. Поскольку понятие одновременности на расстоянии охватывает все возможные случаи, то нет необходимости рассматривать локальную одновременность как самостоятельное понятие.

Разумеется, равенство промежутков времени, необходимое для определения одновременности, в свою очередь можно установить многими различными способами. Важно только не оказаться при этом в порочном круге и не брать за основу метод, неявно опирающийся на понятие одновременности. Метод, который мы назвали основным, лишен этого недостатка, как и метод, состоящий в перевозке хронометра.

Наконец, заметим, что для определения продолжительности моего путешествия в Орлеан, так же как и путешествия Жана в Лион, нет необходимости сверять наши часы при отъезде из Парижа методом перевозки хронометра. Достаточно, чтобы наши часы имели одинаковый ход и, главное, сохраняли его в течение всего путешествия. Иными словами, измерение продолжительности путешествия имеет только хронометрический (а не хронологический) смысл, т. е. не зависит от момента отправления.

Г Л А В А 4

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЧАСОВ

10. Местная синхронизация часов

В примере, рассмотренном в конце предыдущего раздела, мы допускали, что часы наших путешественников, сохраняя одинаковый ход, могли и не показывать одно и то же время, если бы их сверили перед отправлением из Парижа. Этим мы хотели подчеркнуть, что в данном эксперименте определяющую роль играла хронометрическая сторона явления (измерение промежутков времени), тогда как хронологическая сторона (фиксация моментов времени) была чисто вспомогательной.

Однако мы знаем, что в повседневной жизни часы, имеющие один и тот же ход, весьма часто бывают подчинены одной и той же общей местной хронологии. Это значит, что двое таких часов, помещенных рядом, начиная с некоторого локально-одновременного события, показывают один и тот же час. Такие часы будем называть *локально-синхронизованными*. Примером их могут служить электрические часы на площадях и улицах Парижа.

Разумеется, не все часы, находящиеся в одном и том же месте и даже имеющие один и тот же ход, локально-синхронизованы. Они могут относиться к различным хронологическим системам. Это обстоятельство играет очень важную роль в теории относительности. Однако сейчас мы не останавливаемся на нем более глубоко, так как будем подробно рассматривать этот вопрос в релятивистской части нашего изложения.

11. Синхронизация часов, находящихся в разных точках пространства

Обратимся снова к двум путешественникам, одновременно отправляющимся из Парижа — один в Орлеан, другой в Лион. Пусть каждый имеет при себе часы с одинаковым ходом, локально-синхронизованные в Париже накануне отправления. Для определенности допустим, что часы обоих путешественников синхронизованы по городским часам Парижа. Наконец, допустим, что отправление путешественников из Парижа состоялось в 13 час. в данной хронологической системе.

По предположению путешествие по каждому из открытых маршрутов длилось только 2 *час*, т. е. автомобиль в Орлеан и самолет в Лион прибыли одновременно. Что касается часов наших путешественников, то те и другие показывают момент, на 2 *час* более поздний, т. е. 15 час. Находясь в различных точках пространства, они показывают одно и то же время в момент, когда происходит одно и то же событие. Часы, обладающие этим свойством, называются *синхронизованными.*

Каждый из наших путешественников отметит приятный для себя факт — городские часы Орлеана и Лиона показывают в момент его прыбития то же самое время, что и его собственные часы, т. е. 15 час. (Если бы они прибыли, скажем, в Москву или Нью-Йорк, то местные часы показывали бы более поздний или ранний час.) Они заключат, что люди, ответственные за работу городских часов Франции, смогли добиться того, что часы Орлеана и Лиона показывают одинаковое время.

Если рассматривать события, происходящие одновременно не в двух, а в нескольких городах Франции, то можно прийти к аналогичному выводу. Начиная с некоторых одновременных событий все городские нормально идущие часы Франции показывают одно и то же время, т. е. взаимно синхронизованы. Принято говорить, что совокупность всех таких часов образует *синхронизованную часовую сетку.* Синхронизация сетки городских часов значительно облегчает общественную жизнь страны и организацию сообщений. Она позволяет в любой момент знать точное время, контролировать ход наших личных часов; предвидеть, который час будут показывать часы в городах, через которые мы проезжаем, в зависимости от времени отправления и продолжительности переезда. Благодаря синхронизации часов мы вовремя являемся на свидание, не опаздываем на поезд и т. д.

Синхронизация часовой сетки имеет то существенное достоинство, что она позволяет измерять продолжительность путешествий по открытым маршрутам, не прибегая к методу перевозки часов или основному методу. Действительно, даже если вы забыли взять с собой часы, а скорость движения вам неизвестна или меняется неправильным образом, вы все же можете узнать продолжительность своего путешествия, определив разницу между временем прибытия и временем отправления по показаниям городских часов одной и той же синхронизованной сетки.

Но, чтобы не оказаться в порочном круге, не следует забывать, что для осуществления подобной синхронизации необходимо удостовериться в одновременности некоторых событий, а это означает в свою очередь возможность измерения продолжительности путешествий по открытым маршрутам основным методом. Вопрос этот приобретет особую ясность, когда мы перейдем к рассмотрению методов синхронизации часов, находящихся в различных точках пространства.

12. Синхронизация при помощи сигналов точного времени

Допустим, что оба наших путешественника, имеющие часы с одинаковым ходом, сверенные перед отправлением с городскими часами Парижа, по прибытии в Орлеан и Лион обнаружили, что все городские часы в этих городах показывают неточное время (например, из-за забастовки работников электросети). Тогда приездом этих путешественников можно будет воспользоваться для того, чтобы поставить по их часам все городские часы по парижскому времени. В некотором смысле это будет означать, что время «перенесено» из Парижа в Орлеан или Лион.

Время можно «перенести» из Парижа в Орлеан или Лион и не переводя часы, а заметив время отъезда и измерив продолжительность путешествия основным методом, т. е. двигаясь с точно известной постоянной скоростью и учтя пройденное «практическое» расстояние (указываемое счетчиком автомобиля). Если бы оба путешественника воспользовались одним и тем же видом транспорта, например автомобилем, то лионскому путешественнику понадобилось бы около 10 *час*, чтобы «перенести» время из Парижа в Лион (с часами или без них).

Рассмотренный нами пример весьма поучителен, так как он показывает, что синхронизацию часов нельзя произвести мгновенно. Однако если водителю автомобиля необходимо 10 *час* для того, чтобы «перенести» время из

Парижа в Лион, то в настоящее время мы имеем в своем распоряжении и другие средства, которые позволяют проверять часы гораздо быстрее и с более высокой точностью.

Действительно, как мы уже отмечали ранее, экспериментальные данные показывают, что свет или радиосигнал распространяются со скоростью около 300 000 *км/сек*, т. е. примерно 10^9 *км/час*. Нетрудно видеть, что такой сигнал покроет расстояние в 600 *км*, отделяющие Лион от Парижа, за малую долю секунды. Четвертый сигнал для сверки часов, передаваемый по парижскому радио в 13 час. 00 мин. 00 сек. [1], будет принят радиоприемниками Лиона спустя примерно 0,002 *сек*.

Если городские часы Лиона показывают в свою очередь время 13 час. 00 мин. 00 сек. в момент приема «сигнала», то их можно считать синхронизованными с часовой сетью Парижа с точностью 0,002 *сек*. Вообще сигнал, переданный по радио, позволяет синхронизовать между собой часы, находящиеся в любых точках земного шара (максимальное расстояние по большому кругу 20 000 *км*) менее чем за $^1/_{15}$ *сек*. Таким образом, пренебрегая временем распостранения радиосигнала (как это обычно и делается), мы допускаем ошибку меньше 0,1 *сек*.

Однако если известно расстояние между излучателем сигнала точного времени и приемником, то использование радио позволяет провести более тонкую и более точную синхронизацию. Так, для синхронизации часов, находящихся в Париже и в Ницце (расстояние 900 *км*), с точностью порядка 0,001 *сек* при помощи радиосигнала, испускаемого в Париже в 13 час. 00 мин. 00,00 сек., достаточно, чтобы в момент приема сигнала из Парижа точные хронометрические устройства в Ницце показывали время 13 час. 00 мин. 0,003 сек.

Разумеется, говоря об этой более тонкой синхронизации при помощи радиосигналов точного времени, мы неявно предполагали, что скорость распространения электромагнитных волн (света, радиоволн) в пустоте не зависит от направления распространения и остается постоянной.

---

[1] Сигналы точного времени, каждый час передаваемые московским радио, состоят из серии 6 сигналов, последний из которых передается точно в данный час 00 мин. 00 сек. московского времени.— *Прим. ред.*

В дальнейшем мы увидим, что это свойство электромагнитных волн, отнюдь не вытекающее из классической физики, представляет один из фундаментальных принципов специальной теории относительности.

Очевидно, что на космических расстояниях, интересующих астрономов (а теперь уже и неастрономов), время, необходимое для синхронизации часов, может исчисляться сутками и даже годами.

Ситуация, весьма аналогичная «переносу» парижского времени в Лион на автомобиле за 10 *час*!

ЧАСТЬ II

В поисках «истинной» скорости Земли в пространстве

ГЛАВА 5

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

13. Движение по отношению к подвижному ориентиру

Достижения науки и техники XX в. дают нам возможность наблюдать и использовать самые разнообразные движения. Каждому из нас приходилось ездить на поезде, автомобиле или велосипеде. Однако нам редко приходит в голову, что наблюдаемые движения можно использовать для изучения основных законов, которым подчиняются эти движения, а следовательно, для углубления представлений об окружающем нас мире.

Некоторые элементарные представления, которые мы теперь рассмотрим, позволяют правильно и научно истолковать «захватывающие» опыты механики, которые мы можем поставить, и дают богатый урожай важной научной информации.

Всякое систематическое изучение движения должно начинаться с определения понятий, позволяющих точнее описать наблюдения. Вот почему мы начали книгу с анализа понятий расстояния, промежутка времени и скорости. Мы уже знаем, как описывается траектория на поверхности Земли. Мы знаем также, каким образом введение синхронизованной часовой сетки позволяет осуществить универсальную (единую и всеобщую) фиксацию моментов времени в пределах целой области пространства.

Наиболее элементарно описание движения относительно фиксированного ориентира в плоской (следовательно, достаточно ограниченной) области поверхности Земли. Задача особенно упрощается, если не принимать во внимание внутреннюю структуру движущегося тела, а рассматривать его как материальную точку. Простейший пример такого движения — падение капли дождя в отсутствие ветра. Наблюдения показывают, что капля падает вертикально по прямой линии. Кроме того, сначала скорость движения капли возрастает, но в дальнейшем она довольно быстро стабилизируется и больше не увеличивается. Используя научную терминологию, можно сказать, что капля находится в состоянии равномерного прямолинейного движения по отношению к земле.

Конечно, прямолинейное движение не всегда будет равномерным, как в только что рассмотренном примере. Так, движение бомбы, сброшенной без начальной скорости с повисшего в воздухе вертолета, также является прямолинейным, однако скорость бомбы непрерывно растет по мере приближения к земле. Наоборот, скорость снаряда, выпущенного из пушки вертикально вверх, уменьшается по мере его подъема.

Другой вид движения, относительно простой для описания,— это круговое движение, с которым мы чаще всего сталкиваемся, наблюдая вращение колеса вокруг неподвижной оси. Типичные примеры такого движения — движение пылинок, прилипших к диску патефона, движение конца стрелки часов. В том и в другом случае мы имеем дело с круговым движением по отношению к неподвижному ориентиру, связанному с Землей.

Как и в случае прямолинейного движения, мгновенная скорость кругового движения будет либо постоянной (движение стрелки нормально идущих часов), либо переменной (начало движения диска патефона, перевод стрелки часов). Во всех этих случаях движущаяся точка *непрерывно меняет направление движения.* В достаточно малой окрестности каждой точки круговой траектории часть окружности, пройденная движущимся телом, совпадает с касательной к окружности в этой точке. Поэтому можно считать, что касательная представляет *мгновенное направление* движения тела (рис. 5).

Особенно удобно описывать такое движение, если каждую точку траектории движения снабдить стрелкой, длина которой пропорциональна величине мгновенной скорости движения, а направление совпадает с направлением касательной к траектории в данной точке. Эта стрелка, называемая *вектором скорости,* указывает одновременно и направление, и быстроту движения тела в рассматриваемой точке траектории. В случае равномерного кругового движения векторы скорости имеют одинаковую длину во всех точках. Круговое движение с возрастающей скоростью (начало вращения диска) описывается векторами скорости все большей длины (рис. 5, слева).

Если движение тела по отношению к Земле не прямолинейное и не круговое, а происходит по более сложной траектории, то и в этом случае его можно описать некоторой совокупностью векторов скорости. Пример подобного

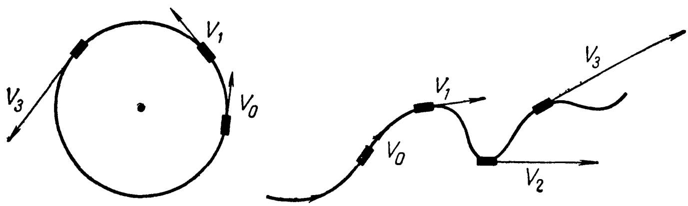


Рис. 5.

движения приведен на рис. 5 (справа), изображающем полет самолета по сложной траектории с непрерывно возрастающей скоростью.

Если отказаться от принятого нами соглашения рассматривать движущийся предмет как точечный, то описание его движения существенно усложнится. Однако оно будет еще достаточно простым в случае поступательного движения протяженных предметов (особенно средств передвижения), при котором каждая часть предмета остается параллельной самой себе. При таком движении все части движущегося предмета в каждый момент времени перемещаются в одном и том же направлении с одинаковой скоростью. Тогда движение в любой момент времени может описываться одним вектором скорости для всего предмета.

Важно отметить, что поступательное движение не обязательно совершается по прямой линии. Так, движение кабины, подвешенной к большому колесу, вращающемуся в вертикальной плоскости («чертово колесо»),— поступательное, хотя каждая точка кабины описывает круг (рис. 6). Не следует смешивать такое движение с другим относительно простым видом движения, которое совершает, например, танцовщик, двигаясь по кругу лицом к центру. Тогда за время прохождения полного круга он делает один поворот вокруг «своей оси» (рис. 7). Аналогичное «балетное па» исполняет Луна при своем вращении вокруг Земли.

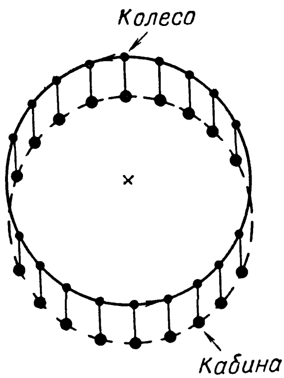


Рис. 6.

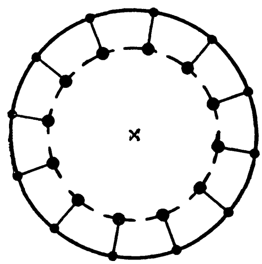


Рис. 7.

Примером равномерного прямолинейного поступательного движения служит поезд, идущий с постоянной скоростью по прямому пути без поворотов, подъемов и спусков. В дальнейшем мы будем для краткости называть такое движение «простым», где кавычки подчеркивают, что речь идет об этом частном случае движения.

До появления современных средств транспорта вряд ли у кого-нибудь возникал вопрос о том, по отношению к чему следует рассматривать движение. Считалось само собой разумеющимся, что система отсчета может состоять лишь из ориентиров, связанных с Землей. Лишь движение небесных светил подсказывало, что возможны и другие системы отсчета.

В наши дни мы сталкиваемся с огромным многообразием движений, в которых отчетливо проявляется относительность понятий «подвижный» и «неподвижный», а следовательно, и понятие «движение». Мы уже не можем приписывать привилегированное положение системе отсчета, связанной с Землей, а обнаруживаем, что часто представляет интерес описывать движение по отношению к другим ориентирам, движущимся относительно Земли.

Например, во время морского путешествия наше положение по отношению к различным частям корабля не менее существенно, чем по отношению к берегу моря. Важно знать, находится ли тот или иной пассажир «в покое» в своей каюте или «в движении», измеряя ее шагами; бродит ли он по кораблю или вывалился за борт. Важно также знать, приближается ли этот пассажир вместе с кораблем к берегу или удаляется от него.

Итак, мы имеем право изменить систему отсчета и рассматривать движение пассажира по отношению к кораблю, не интересуясь положением пассажира относительно других ориентиров. В частности, мы можем не рассматривать движение самого корабля по отношению к ориентирам на суше.

Однако чаще нас одновременно интересует движение пассажира как по отношению к кораблю, так и по отношению к берегу. В таком случае необходимо рассмотреть движение корабля по отношению к земле. Это особенно ощутимо, когда корабль отчаливает и мы прощаемся с провожающими, остающимися на берегу. Тогда наше положение относительно пристани не менее существенно, чем по отношению к кораблю, но зависит от положения корабля.

В классической физике связь между движениями по трем выделенным направлениям, а также изменение системы отсчета определяется простым правилом, называемым *векторным сложением скоростей.* Мы проиллюстрируем это правило на конкретном примере нашей «тройки» — пассажир, корабль, берег.

Для удобства условимся выражения типа «вектор скорости пассажира, движущегося в системе отсчета, связанной с берегом (или кораблем)» заменять более краткими: «вектор скорости пассажира по отношению к берегу (или кораблю)». Тогда правило формулируется следующим образом (рис. 8):

> Вектор скорости пассажира по отношению к берегу есть диагональ параллелограмма, построенного на векторе скорости пассажира по отношению к кораблю и векторе скорости корабля по отношению к берегу.

Если выражение «по отношению к...» обозначить косой черточкой, то правило принимает вид

$$\vec{V}_{\text{П/Б}} = \vec{V}_{\text{П/К}} + \vec{V}_{\text{К/Б}},$$

где П — пассажир, Б — берег, К — корабль, а знак «+» означает сложение векторов. Сумма векторов изображается диагональю параллелограмма, сторонами которого являются складываемые векторы, отложенные из одной точки.

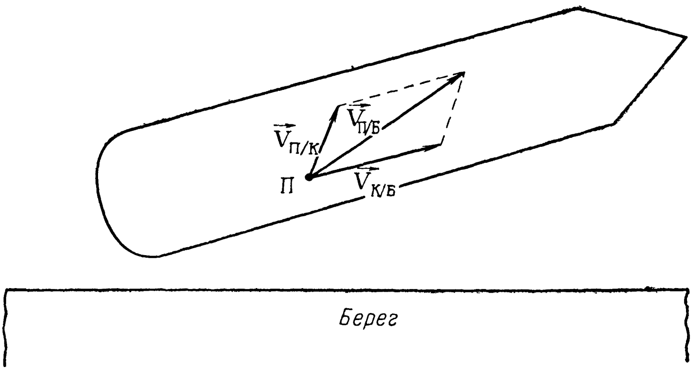


Рис. 8.

В том важном частном случае, когда пассажир движется по отношению к кораблю параллельно его курсу, т. е. в случае, когда векторы $\vec{V}_{\text{П/К}}$ и $\vec{V}_{\text{К/Б}}$ параллельны друг другу, правило параллелограмма сводится к следующему:

Вектор скорости $\vec{V}_{\text{П/Б}}$ имеет то же направление, что векторы $\vec{V}_{\text{П/К}}$ и $\vec{V}_{\text{К/Б}}$, и равен по абсолютной величине:

1) сумме численных значений скоростей $V_{\text{П/К}}$ и $V_{\text{К/Б}}$, если пассажир передвигается по отношению к кораблю в том же направлении, что и корабль по отношению к берегу, или

2) разности численных значений скоростей $V_{\text{П/К}}$ и $V_{\text{К/Б}}$, если пассажир по отношению к кораблю передвигается в направлении, противоположном перемещению корабля по отношению к берегу.

Сложение и вычитание скоростей можно наблюдать на примере (увы, ставшем классическим!) столкновения автомобилей. Если сталкиваются два автомобиля, движущиеся навстречу друг другу, то их скорости складываются. Если же сталкиваются автомобили, мчащиеся в одном и том же направлении (например, вследствие резкого торможения едущего впереди автомобиля), то их скорости вычитаются.

В этих примерах способ описания движения остается достаточно простым при изменении системы отсчета (корабль или берег). Однако так бывает далеко не всегда. Движение, которое в данной системе отсчета выглядит очень простым, в других системах отсчета может быть весьма сложным. В дальнейшем систему отсчета, в которой движение описывается наиболее просто, мы будем называть системой, «приспособленной» для описания этого движения.

Возьмем для примера муху, которая равномерно ползет вдоль минутной стрелки стенных часов. По отношению к стрелке часов муха движется равномерно и прямолинейно, т. е. максимально просто. Однако по отношению к циферблату часов (а следовательно, и по отношению к земле) муха описывает плоскую спираль вследствие кругового движения стрелки по отношению к циферблату часов. Значит, стрелка часов представляет систему отсчета, более «приспособленную» к описанию движения насекомого, чем циферблат, но в свою очередь циферблат представляет систему отсчета, более «приспособленную» для описания движения самой стрелки [1].

Этот пример ясно показывает также, что сложное движение мухи по отношению к циферблату можно разложить на два простых движения: движение мухи по стрелке и движение стрелки по циферблату. Это упрощение достигнуто введением промежуточного тела отсчета — стрелки. В более сложном случае, когда муха ползет по стрелке часов, установленных в каюте движущегося корабля, сложное движение мухи относительно земли можно разложить на простые движения, выбрав несколько подходящих промежуточных тел отсчета.

---

[1] Читатель заметит, что «относительно самой себя» стрелка покоится, а состояние покоя, конечно, является более простым случаем движения, чем, например, вращение стрелки относительно циферблата. Однако факт покоя тела относительно самого себя еще не несет никакой информации.— *Прим. ред.*

14. «Эффекты движения» и принцип Галилея

Итак, некоторые системы отсчета больше подходят для описания того или иного движения потому, что они лучше «приспособлены» для описания этого вида движения. И все-таки одна лишь «приспособленность» той или иной системы отсчета к описанию данного вида движения не может служить критерием для выбора преимущественных систем отсчета.

Сравним пассажира, который спит в каюте корабля, качающегося на волнах во время бури, и бездомного нищего, устроившегося на ночлег на пристани.

Заметим, что относительный покой можно рассматривать как наиболее простой вид движения — движение с нулевой скоростью[1]. Поэтому можно сказать, что корабль, качающийся на волнах, представляет собой систему отсчета, идеальным образом «приспособленную» для описания «движения» пассажира, спящего в каюте, а пристань — это система отсчета, идеально «приспособленная» для описания «движения» спящего на ней нищего.

Обобщая это замечание на другие подобные ощущения: толчки, которые мы испытываем во время движения в повозке; головокружение, которое мы ощущаем, качаясь на качелях, катаясь на карусели или быстро кружась на месте,— физики древности и средневековья пришли к следующим выводам:

1. Все тела разделяются на два класса: тела, истинно неподвижные, и тела, находящиеся в состоянии истинного движения.

2. Истинное движение сопровождается специфическими ощущениями, характерными для данного движения.

---

[1] В связи с этим можно напомнить следующую «задачу», которую (согласно Инфельду) Капица предложил Ландау: с какой скоростью должна бежать собака, к хвосту которой привязана сковорода, чтобы она не могла слышать грохот сковороды о мостовую?

[Проф. Л. Инфельд, ученик и сотрудник Эйнштейна,— крупнейший польский физик-теоретик; академик П. Л. Капица и академик Л. Д. Ландау — крупнейшие советские физики (Капица — экспериментатор, Ландау — теоретик). Ответ в этой задаче до смешного прост: собака должна сидеть на месте! — *Прим. ред.*].

Истинная неподвижность характеризуется отсутствием каких-либо ощущений.

3. Если покой по отношению к некоторой системе отсчета представляет собой истинную неподвижность (согласно выше установленному критерию), то эта система отсчета также истинно неподвижна (или находится в состоянии абсолютного покоя).

4. Если в данной системе отсчета тело находится в истинном движении, то при переходе к другой системе отсчета может возникнуть иллюзия неподвижности. Так, пассажир, спящий в своей каюте, казалось бы, может считать себя неподвижным по отношению к кораблю, находящемуся в состоянии истинного движения. Однако морская болезнь даст ему почувствовать иллюзорность его неподвижности и покажет, что на самом деле он движется.

5. Точно так же переход от одной системы отсчета к другой может создать иллюзию движения при истинной неподвижности. Нищий, сидящий на пристани и размышляющий о своем положении относительно корабля, установит, что движется по отношению к кораблю; однако он чувствует, что на самом деле он неподвижен.

6. Всякое движение, не являющееся истинным, или «абсолютным», представляет собой истинную, или «абсолютную», неподвижность. Иллюзия движения вызывается при этом выбором системы отсчета, которая находится в состоянии истинного движения, а не в состоянии «абсолютной» неподвижности.

Как мы только что указали, для ученых древности и средневековья истинный характер движения определялся специфическими ощущениями (головокружение, морская болезнь, ощущение качки и т. д.). Однако субъективный характер подобных индикаторов движения естественно вызывал у них потребность в некоторых более объективных механических эффектах, определяющих истинный характер движения.

Так, ученые тех времен полагали, что если бы Земля находилась в состоянии истинного движения, то все предметы, не прикрепленные к ее поверхности (например, пушечное ядро, выстреленное вертикально вверх, подброшенный камень, облака и т. п.), не участвовали бы в ее движении, т. е. отставали бы по отношению к ней, вместо того чтобы оставаться над тем местом, из которого они были выпущены. Иными словами, эти тела должны были бы участвовать в кажущемся общем для всех них движении, противоположном движению Земли.

Первые сторонники гелиоцентрической (с центром в Солнце.— *Ред.*) системы мира (ее создатель Коперник, Галилей и др.) еще полагали, что все тела разделяются на находящиеся в истинном движении и в истинном покое. Они утверждали, что при относительном движении Солнца, Земли, планет и звезд в состоянии истинного (абсолютного) покоя находится гелиоцентрическая система отсчета (Солнце плюс звезды), но не Земля. Для сторонников учения Коперника движение звезд и Солнца относительно купола обсерватории было иллюзией, вызванной истинным движением Земли.

Такая точка зрения была совершенно несовместима с прежними представлениями, согласно которым всякое истинное движение должно сопровождаться специфическими ощущениями или характерными механическими эффектами. По теории Коперника, человек, покоящийся относительно Земли (например, нищий, спящий на пристани), участвует в истинном движении (вращении) Земли вокруг своей оси, а также в истинном движении (обращении) Земли вокруг Солнца. Однако он не испытывает никаких специфических ощущений, хотя и вращается на «космической карусели». Из-за отсутствия ощущения движения и характерных механических эффектов противники учения Коперника делали вывод об истинной неподвижности Земли, хотя они и соглашались с тем, что гелиоцентрическая система отсчета лучше «приспособлена» к описанию движения планет, чем система отсчета, связанная с куполом обсерватории.

Однако система Коперника, созданная им в 1543 г., не была существенно проще системы Птолемея. Дело в том, что Коперник, разумеется, не знал двух первых законов Кеплера, открытых лишь в 1610 г., и, желая привести свою систему мира в согласие с наблюдениями, вынужден был усложнить свою гелиоцентрическую систему, чтобы представить наблюдаемое движение планет в виде комбинации равномерных движений по окружностям.

В начале XVII в. Галилей при помощи зрительной трубы открыл четыре спутника Юпитера. Аналогия между обращением этих спутников вокруг Юпитера и обращением планет вокруг Солнца произвела на него такое сильное впечатление, что он стал убежденным сторонником учения

Коперника. Правда, Галилей упустил из виду важный аргумент в его пользу, который мог бы существенно упростить эту систему, а именно законы Кеплера, открытые в то же время. Что касается «истинности» движения Земли, то Галилей попытался опровергнуть возражения противников системы Коперника, обратив внимание на то, что в противоположность точке зрения древних ученых ощущение движения отсутствует не только в случае покоя относительно Земли, но и в ряде случаев истинного движения.

В самом деле, для рассмотрения понятия относительности движения «в чистом виде» мы, до того как вывели на сцену Галилея, рассматривали движение пассажира, который спит в каюте корабля, раскачиваемого бурей. Но хорошо известно, что даже человек, очень чувствительный к морской болезни, может без труда перенести путешествие на корабле, если море достаточно спокойно и движение корабля можно рассматривать как «простое» по отношению к берегу. Чтобы оценить необыкновенную научную прозорливость Галилея, необходимо заметить, что равномерное прямолинейное движение, столь обычное для современных поездов и автомобилей, вовсе не было типичным для передвижений XVII в. Только гениальное обобщение наблюдений за движением кораблей в тихую погоду, когда нет заметной бортовой и килевой качки, дало возможность Галилею открыть следующий принцип:

> «Простое» движение тела не вызывает никакого специфического ощущения и никакого механического эффекта, которые позволили бы обнаружить его перемещение по отношению к земле.

Но предоставим слово самому Галилею:

«...Уединитесь с несколькими вашими друзьями в пустом помещении внутри корабля... Подвесьте на некоторой высоте маленькое ведерко, из которого вода стекает по одной капле в сосуд с узким горлышком, помещенный в точности под ведерком.

Пока корабль остается неподвижным, вы успеете заметить, что капли воды в точности попадают в сосуд и что для того, чтобы забросить некоторый предмет на заданное расстояние, вам нет необходимости кидать его в одном направлении с большей силой, чем в другом. Точно так же ваш прыжок с места в любом направлении «перенесет» вас на одно и то же расстояние независимо от направления прыжка. Отметьте все это про себя, хотя все это, очевидно, и не вызовет в вас никакого сомнения: ведь корабль остается в покое!

Теперь предположите, что корабль движется с какой угодно скоростью, однако равномерно и не подвергаясь ни бортовой, ни килевой качке. Ни в одном из перечисленных выше явлений вы не заметите никакого изменения. Иными словами, ни по одному из этих явлений вы не сможете установить, движется ли корабль или остается неподвижным.

Совершая прыжок, вы сместитесь по отношению к полу на то же самое расстояние, что и прежде. При этом, прыгая в направлении кормы корабля, вы не сместитесь на большее расстояние, чем прыгая по направлению его движения, хотя казалось бы, что, пока мы находимся в воздухе, при быстром движении корабля его пол должен сместиться в направлении, противоположном направлению прыжка. И чтобы перебросить какой-либо предмет вашему соседу, вам не придется прилагать большее усилие, если ваш сосед находится ближе к корме корабля, чем в противоположном случае. Капли, как и прежде, будут падать точно в горлышко сосуда, и ни одна из них за время падения не сместится по направлению к корме корабля, несмотря на то, что в течение этого времени корабль успевает пройти заметное расстояние вперед...

Несчетное число раз вы будете задавать себе вопрос: движетесь вы или стоите на месте? И, бессильные ответить на этот вопрос, вы будете воображать, что движетесь в том или ином направлении, тогда как действительное направление вашего движения может оказаться в точности противоположным.

Вот почему... я совершенно убежден, что так называемые опыты, имеющие целью доказательство неподвижности Земли в пространстве, лишены всякого значения и смысла» [1)].

Мы могли бы дополнить слова Галилея многочисленными примерами, взятыми из жизни, причем все они подтвердят правильность его выводов. Сколько раз мы убеждались на собственном опыте, что, находясь в поезде, мчащемся по прямому участку пути, автомобиле, едущем по гладкой дороге, или в самолете при спокойном полете, мы

[1)] Галилей, Диалог о двух главнейших системах мира, птоломеевой и коперниковой, М.—Л., 1948.—*Прим. ред.*

забываем, что перемещаемся по отношению к земным ориентирам, если перестаем их видеть (например, путешествуя ночью или в машине без окон). Внутри машины, совершающей равномерное прямолинейное движение по отношению к земле, все явления протекают так, как если бы машина покоилась относительно земли.

Заметим, что незнание этого явления становится причиной многочисленных дорожных происшествий. Действительно, водитель автомобиля, быстро мчащегося по прямому и достаточно гладкому пути, не в состоянии «чувствовать» быстроту своего движения. Если вокруг него нет достаточно близких ориентиров (таких, как дома или деревья) и если он не обращает внимания на спидометр, то может развить бешеную скорость. Всякое непредвиденное обстоятельство, малейшая случайность, вынуждающая внезапно изменить направление или скорость движения, может привести к трагическому исходу.

Иллюстрируя систему Коперника, Галилей уподобляет земных наблюдателей, неподвижных по отношению к Земле, пассажирам, покоящимся относительно корабля, совершающего «простое» движение по отношению к действительно неподвижному берегу; таким «берегом» для наблюдателей на Земле является, по Галилею, гелиоцентрическая система отсчета. В самом деле, по правилу векторного сложения скоростей сумма двух «простых» движений также будет «простым» движением. При «простом» движении корабля, описанном выше самим Галилеем, никто не заболевал морской болезнью и не наблюдалось никаких механических эффектов. Значит, механические эффекты и какие-либо специфические ощущения должны отсутствовать и при «простом» движении по отношению к гелиоцентрической системе отсчета.

Таким образом, Галилей уничтожает различие между покоем и равномерным прямолинейным движением по отношению к Земле; теперь их можно считать двумя «простыми» движениями по отношению к гелиоцентрической системе отсчета. Поскольку движение относительно гелиоцентрической системы отсчета «простое», оно обладает всеми свойствами, которые ранее приписывались только состоянию истинного покоя. Тогда принцип Галилея принимает более общую форму, и его можно выразить через движение относительно гелиоцентрической системы отсчета, а не относительно Земли.

Равномерное прямолинейное движение лаборатории по отношению к звездам не вызывает никакого ощущения движения и никак не влияет на ход механических экспериментов, поставленных в этой лаборатории.

Легко видеть, насколько эта формулировка более прогрессивна по сравнению с «законом», приписывающим отсутствие ощущения движения и механических эффектов только истинному покою, который, реализуясь в состоянии покоя относительно Земли, требовал «истинного покоя» и для нее самой.

Однако внимательный читатель, без сомнения, не мог не задать себе вопрос: применим ли на самом деле принцип Галилея к движению Земли в системе Коперника? Ведь в этой системе наша планета вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца, а это вовсе не похоже на «простое» движение по отношению к гелиоцентрической системе отсчета, особенно если вспомнить, что в соответствии с законами Кеплера планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам, причем скорость движения меняется в зависимости от расстояния от Солнца.

И все-таки Галилей прав. За то непродолжительное время, которое требуется для проведения большинства механических экспериментов, выполненных как самим Галилеем, так и его противниками, Земля не успевает заметно повернуться вокруг своей оси и проходит столь малую часть своей эллиптической орбиты, что ее движение с достаточной степенью точности можно считать «простым». Земля вращается вокруг своей оси слишком медленно, а ее обращение вокруг Солнца происходит по кругу слишком малой кривизны, чтобы привести к заметным центробежным эффектам. Хотя эти эффекты фактически имеют место, возникающая центробежная сила составляет лишь миллионные доли силы тяжести. Вот почему дома, люди и животные не разлетаются в воздухе как части огромного маховика, разрываемого центробежной силой. Это объясняет также, почему низкая точность измерений XVII в. не позволяла обнаружить центробежный эффект орбитального вращения Земли.

В 1850 г. французский физик Фуко наглядно продемонстрировал на опыте вращение Земли вокруг оси, наблюдая качание очень длинного маятника, подвешенного к куполу парижского Пантеона. Но успех этого механического эксперимента ничуть не опровергает принцип Галилея, так как речь идет о длительном эксперименте продолжительностью около десяти часов. Вот почему вращение Земли вокруг оси легко обнаружить, не прибегая к точным измерениям. В этом опыте Землю уже нельзя уподобить кораблю Галилея, и поэтому принцип Галилея здесь неприменим.

Лучшим доказательством того, что принцип Галилея с хорошей точностью объясняет бóльшую часть механических экспериментов, которые можно поставить в земной лаборатории, является само существование механики как науки. Мы никогда не смогли бы установить весьма простые законы механики из наблюдений и экспериментов, если бы вращение Земли вокруг оси и обращение ее вокруг Солнца резко отличались от «простого» движения относительно гелиоцентрической системы отсчета или если бы «простое» движение существенно влияло на результаты этих экспериментов.

Еще более ясное представление об этом мы получим, проанализировав, как Галилей и Ньютон смогли открыть наиболее фундаментальный закон механики, называемый законом инерции [1].

15. Силы и движение по Галилею

Сравнивая небесные движения звезд с земными движениями окружающих их предметов (камней, повозок и т. д.), древние наблюдатели были поражены вечным и как будто ничем не вызываемым движением небесных светил в противоположность случайному характеру «земных» движений, вызываемых чисто внешними причинами. Действительно, камень, стол, повозка, находящиеся в состоянии покоя и предоставленные самим себе, остаются в состоянии покоя, но если кому-либо удается привести их

[1] В трех следующих разделах мы попытаемся проследить эволюцию основных физических понятий, начиная от догалилеевских времен и кончая временем, предшествовавшим созданию теории относительности. При этом мы не будем задаваться целью строго разграничивать тот вклад, который внесли в эту эволюцию Галилей и Ньютон. Укажем лишь, что в историческом аспекте нельзя приписывать заслугу окончательного формулирования закона инерции исключительно Галилею, поскольку он считал естественным движение небесных тел по круговым орбитам.

в движение, толкнув, потянув или ударив по ним, т. е. воздействуя на них внешней движущей силой, то они не замедлят остановиться, когда прекратится действие движущей силы.

Конечно, повозка, оставленная на склоне горы, может «самопроизвольно» скатиться с нее, так же как камень, выпущенный из руки без начального толчка, тем не менее устремляется вниз. Верно также, что кусок железа «самопроизвольно» притягивается к магниту и что аналогичный эффект производит наэлектризованный стержень. Однако эти кажущиеся исключения никогда не приводили в замешательство физиков. Древние «объясняли» силу тяжести, приписывая телам «естественное стремление» занимать самое низшее из возможных положений. Что касается Ньютона, то он смог установить, что Земля обладает «притягательной силой», способной действовать на тело на расстоянии, без прямого с ним соприкосновения, возбуждая силу тяжести, направленную к центру Земли. Позднее он стал рассматривать эту притягательную силу как частное проявление всемирного тяготения масс, аналогичного притяжению магнита.

Теперь понятие притяжения на расстоянии понимается иначе, чем его формулировал Ньютон. Мы говорим, что массы способны создавать вокруг себя поле тяготения, т. е. присутствие масс так изменяет окружающее их пространство [1], что всякая другая масса, «погруженная» в это пространство, или, точнее, находящаяся на не слишком большом расстоянии от массы, создающей поле, испытывает действие *гравитационной силы,* подобной силе ньютоновского тяготения.

Особо заметим, что он соглашается рассматривать не только силы поля, действующие при непосредственном контакте, вызываемые тягой, давлением, ударом, но также и силы поля, проявляющиеся без контакта на расстоянии. Кроме того, современная микрофизика показала, что вещество состоит из электрически заряженных ядер и электронов и что силы взаимодействия сводятся к силам поля

[1] Мы не рассматриваем здесь вопроса о том, как присутствие тяготеющих масс видоизменяет структуру пространства — времени, что, как известно, является краеугольным камнем эйнштейновской теории тяготения (общей теории относительности). Мы ограничиваемся лишь понятием поля, известным, например, из классической теории электромагнетизма.

между этими частицами [в данном случае электромагнитного.— *Ред.*], т. е. между ядрами атомов.

Учитывая эти обстоятельства, можно сформулировать догалилеевскую точку зрения на поведение «земных» тел, сказав, что с точки зрения ученых древности «земные» тела обнаруживают «естественное стремление к неподвижности». Если тело, не подверженное действию движущих сил, находилось в покое, то оно будет оставаться и впредь в состоянии покоя; если же оно двигалось, его состояние движения не будет изменяться.

Примеры движения и покоя вагонов, столов, повозок ясно показывают, что когда мы говорим о покое или движении, то речь пока что идет только о покое или движении по отношению к системе отсчета, жестко связанной с Землей. Однако, если мы попытаемся распространить догалилеевскую теорию движения на механические опыты, которые ставятся внутри машин, совершающих «простое» движение по отношению к земле, мы сразу же столкнемся с рядом осложнений.

Вернемся к изящному и поучительному эксперименту с падением капли воды в трюме галилеевского корабля, предположив только, что сосуд с узким горлышком, о котором шла речь на стр. 48—49, находится у основания вертикальной мачты. Эксперимент приводит к выводу, что капля «следует» за мачтой независимо от того, покоится ли корабль или движется равномерно и прямолинейно относительно берега. Если в трюме неподвижного корабля капля падает по вертикали, то это означает, что она «стартует» без начальной скорости и испытывает действие только силы тяжести, направленной вертикально. В самом деле, действие ветра на каплю исключается, поскольку опыт производится в трюме; сопротивление же воздуха может только затормозить движение капли, но не может сообщить капле бокового толчка. Когда корабль совершает «простое» движение, падение капли по-прежнему «следует» за мачтой корабля. Таким образом, оторвавшись от ведерка, капля движется только под действием силы тяжести, которая всюду направлена перпендикулярно поверхности моря, т. е. параллельно мачте. Но поскольку капля падает вдоль мачты, которая перемещается относительно берега, ее траектория по отношению к земным ориентирам не будет вертикальной прямой — этот путь капли является параболой (рис. 9).

Мы видим, что к свободному падению, происходящему под действием силы тяжести, на этот раз добавляется горизонтальное смещение по отношению к земным ориентирам, ибо капля следует за кораблем и не отдаляется от мачты. Следовательно, горизонтальное движение нельзя объяснить никакой реальной силой, действующей на каплю (силой поля или силой, действующей при непосредственном контакте).

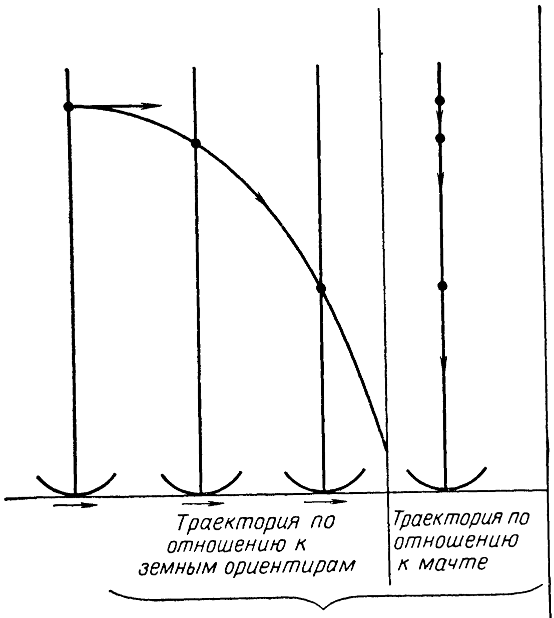


Рис. 9.

Эту горизонтальную скорость капли по отношению к берегу можно объяснить сохранением «горизонтального толчка», который корабль сообщает капле прежде, чем она успевает оторваться от ведерка. Причем существенно то, что это «увлечение» сохраняется полностью, поскольку, как замечает Галилей, капля не только не «запаздывает» по отношению к кораблю, но и продолжает следовать за ним в его движении, падая вдоль мачты!

Мы видим, что полное сохранение горизонтального увлечения находится в вопиющем противоречии со схоластической точкой зрения (увы, не совсем изжитой и до наших дней), согласно которой при отсутствии горизонтальной увлекающей силы капля в ходе ее падения должна была бы постепенно уменьшить свою скорость относительно земли до нуля. Отсюда становится ясно, как Галилей и Ньютон путем гениального анализа весьма простого эксперимента пришли к выводу о несостоятельности старой теории и о необходимости ее замены новой, согласно которой равномерное прямолинейное движение тела по отношению к Земле не поддерживается никакими силами; роль сил сводится только к изменению вектора скорости движущегося тела.

В состоянии покоя вектор скорости равен нулю; в состоянии движения вектор скорости имеет некоторое значение, отличное от нуля. При переходе из состояния покоя в состояние движения вектор скорости изменяется; вот почему для приведения тела в движение необходимо воздействие силы.

Но если тело движется и в некоторый момент вектор его скорости отличен от нуля (т. е. тело движется в определенном направлении с определенной скоростью), то начиная с этого момента устранение действующих сил не приводит его в состояние покоя. Наоборот, согласно Ньютону, тело будет двигаться неограниченно долго в прежнем направлении (т. е. вдоль касательной к траектории движения в той ее точке, где тело находилось в момент «выключения» сил) и с прежней скоростью (без «уменьшения» приобретенной скорости). Таким образом, когда силы перестают действовать, движение становится «простым», причем вектор скорости сохраняется по величине и направлению. Движение, происходящее в отсутствие сил (и потому не зависящее от них), называется *движением по инерции*, или *инерциальным*.

Если действие сил проявляется в виде ударов, то следует рассматривать вектор скорости движущегося тела непосредственно перед ударом и сразу после него. Момент времени непосредственно перед ударом удобно рассматривать как начало некоторого «бесконечно малого» интервала времени, а сразу после удара — как конец этого интервала. Если принять такое соглашение, то удар можно рассматривать как частный случай непрерывно действующих сил, поскольку изменение вектора скорости происходит не мгновенно, а занимает определенный промежуток времени.

К моменту, когда сила перестанет действовать, скорость тела возрастет, причем приращение вектора скорости пропорционально действующей силе и совпадает с ней по направлению. Таким образом, вектор скорости тела в конце интервала действия силы будет суммой (диагональю параллелограмма) *инерциальной компоненты* (вектор скорости в начале интервала) и *динамической компоненты* (от греческого слова «динамос» — «сила»). Для тела, которое покоилось, инерциальная компонента в начале движения равна нулю, а вектор скорости в конце «первого интервала» является чисто «динамическим». Опытному наблюдателю инерциальная компонента вектора скорости в большинстве движений относительно земных ориентиров буквально бросается в глаза. Мы знаем, что движущееся тело не останавливается мгновенно, когда на него перестает действовать сила. Так, товарный вагон, если подтолкнул локомотив, или велосипедист, который перестал крутить педали, продолжают двигаться, даже когда возможное влияние силы тяжести исключено вследствие того, что дорога совершенно горизонтальна.

Эти наблюдения подтверждают, что тела, движущиеся по отношению к Земле, стремятся сохранить состояние своего движения и продолжают двигаться по инерции. Однако в противоположность истолкованию опыта с падающей каплей воды и в кажущемся противоречии с точкой зрения Галилея и Ньютона они довольно быстро останавливаются, вместо того чтобы двигаться бесконечно долго. Движущийся вагон или велосипедист через некоторое время остановятся, если не поддерживать их движение горизонтально действующей силой. Но это противоречие легко устраняется, если обратить внимание на то, что действующие на тело силы могут не только способствовать движению, но и тормозить его. Так, движущийся вагон очень быстро остановится, если на его пути встретится возвышение или если он столкнется с другим вагоном, движущимся в противоположном направлении. Можно остановить поезд при трении его колес о колодки тормоза. Таким образом, наблюдаемое замедление движения тел, «предоставленных самим себе», легко объяснить скрытым вмешательством тормозящих сил (прежде всего сил трения).

Действительно, чем меньше сила трения, тем дольше тело сохраняет состояние движения. Вот почему в технике широко используются смазка, подшипники, обтекаемые формы и т. п., уменьшающие силы трения и сопротивления среды. В опыте с падающей каплей ни трение, ни сопротивление воздуха не могли изменить инерциальную компоненту *горизонтального* движения!

16. Старт, торможение и повороты

Когда древние ученые утверждали, что «истинные» движения должны сопровождаться характерными механическими эффектами и вызывать специфические ощущения (головокружение, морская болезнь и т. п.), они не совсем ошибались!

Действительно, пассажир, спящий в каюте корабля, или пассажир, размеренно шагающий по кораблю и, следовательно, совершающий «простое» движение по отношению к нему, рискуют заболеть морской болезнью, если корабль попал в шторм и сильно раскачивается. Верно также, что на этом раскачивающемся корабле плохо закрепленные предметы — тарелки, бутылки — рискуют «самопроизвольно» упасть.

Точно так же при резком трогании поезда с места чемоданы, плохо закрепленные на полках, окажутся отброшенными в направлении, противоположном направлению движения, вследствие «эффекта старта». Аналогично, когда автобус резко поворачивает на большой скорости, то багаж и люди, находящиеся в автобусе, будут отброшены к боковой стенке (центробежный эффект) столь же «самопроизвольно», как и в случае, когда поезд трогает с места.

Противники Галилея ошибались только в том, что смешивали особый случай движений, сопровождающихся резкими изменениями направления или скорости (или того и другого вместе), с движением вообще. Вследствие этого они не замечали, что эффекты «старта», «качки» и центробежные эффекты являются не «эффектами движения» вообще, а лишь результатом сложности движения по отношению к земле, тогда как «простое» движение не вызывает никаких подобных «эффектов». Это справедливо и по отношению к гелиоцентрической системе отсчета: всякое «сложное» движение по отношению к ней сопровождается особыми механическими явлениями.

Представления Галилея и Ньютона, изложенные в предыдущем параграфе, позволяют дать новое и замечательное по своей ясности объяснение эффектов «сложности» движения как проявления «неинерциальности» движения системы отсчета.

Пусть пассажир, покоящийся относительно движущегося поезда, внезапно отброшен в направлении движения поезда из-за резкого торможения состава. Если перед торможением движение поезда было равномерным и прямолинейным («простым»), то пассажир, сидевший в своем купе или стоявший в коридоре вагона (т. е. покоившийся относительно поезда), имел ту же скорость по отношению к земле, что и поезд. При торможении поезда не появляется никакой новой силы, действующей непосредственно на пассажира, и если поезд едет по горизонтальному пути, то сила тяжести также не оказывает на него влияния. Но, согласно Галилею, пассажир полностью сохраняет свое движение, свою скорость относительно земли. Когда поезд замедлит свое движение, пассажир сохранит инерциальную компоненту скорости и будет двигаться относительно земли быстрее, чем поезд. По отношению к поезду пассажир будет отброшен в сторону локомотива. Если поезд резко трогает с места, наблюдается обратный эффект: пассажир будет отброшен в противоположную сторону.

Центробежные эффекты, наблюдающиеся при поворотах, также объясняются инерциальной компонентой скорости относительно земли. Пассажир, покоящийся относительно поворачивающей машины, непрерывно меняет направление своего движения по отношению к земле. В каждый момент времени вектор его скорости направлен по касательной к кривой, которую описывают колеса машины на земле.

Значит, инерциальная составляющая скорости пассажира увлекает его по касательной к окружности, если его траектория относительно земли — круговая. Но смещение по касательной к окружности означает удаление от ее центра. Следовательно, движение по прямой линии относительно земли означает «убегание» по радиусу относительно машины, т. е. как раз центробежный эффект.

Существует весьма интересное сходство между некоторыми из явлений, которые мы рассмотрели, и действием тяготения (силы тяжести). В двух случаях наблюдалось движение, которое кажется «самопроизвольным», происходящим без участия каких-либо сил, непосредственно действующих на тело. В резко затормозившем поезде все происходит так, как если бы находящиеся внутри него предметы что-то внезапно потянуло в сторону локомотива или подтолкнула какая-то сила, такая же «нематериальная», как и сила, заставляющая падать камни и все тела по направлению к центру Земли! Во всяком случае, сходство действия центробежных сил и сил тяжести — всего лишь констатация известных фактов, особенно хорошо подтвердившаяся с тех пор, как мы увидели космонавтов, продемонстрировавших нам по телевидению явления в состоянии невесомости (карандаши и бумагу, свободно плавающие по кабине космического корабля). Состояние невесомости достигается точной компенсацией действия силы тяжести центробежной силой, вызванной быстрым обращением космического корабля вокруг Земли. Поэтому можно попытаться объяснить само тяготение на основе этой эквивалентности. Такая попытка была предпринята Эйнштейном в его *общей теории относительности.*

Но можно, не заходя слишком далеко, поступить здесь так же, как мы поступили с силой тяжести, и приписать поворачивающим, ускоряющимся или тормозящим машинам способность развивать при движении особого рода силы, называемые *силами инерции.* Можно также приписать силам инерции все эффекты, наблюдаемые в этих машинах при отсутствии «настоящих» сил. Однако не следует забывать, что силы инерции проявляются только в том случае, если рассматривать положение предметов относительно машины, совершающей «сложное» движение, а не относительно гелиоцентрической системы отсчета.

Таким образом, мы снова пришли к важнейшей задаче: как оценивать «качество» различных систем отсчета и какое движение является «истинным»?

17. Определение «хороших» систем отсчета при помощи закона инерции

Как мы уже отмечали, Коперник, Кеплер и Галилей, выступая против идеи об абсолютной неподвижности Земли в пространстве, тем не менее без колебаний приписывали свойство абсолютной неподвижности гелиоцентрической системе отсчета по существу, уклоняясь от ответа на вопрос, по отношению к чему эта система является неподвижной.

Однако Ньютон, развивая теорию Галилея, пришел к созданию более общей механики.

Механика Ньютона включает следующие принципы:

1) *закон инерции*, утверждающий, что движение тел, на которые не действуют силы, неизбежно должно быть «простым»;

2) ряд законов, описывающих характер влияния сил на движение тел; эти законы мы будем называть *законами механики* (из их числа по причинам, которые станут ясными из дальнейшего, мы исключим закон инерции).

Остается уточнить систему отсчета, по отношению к которой движение «простое» в отсутствие сил и к которой следует отнести движение, чтобы были справедливы законы механики. Конечно, следуя Галилею, можно было бы попытаться рассматривать движение по отношению к гелиоцентрической системе отсчета. Но Ньютон считал это неблагоразумным, так как, вообще говоря, не было исключено, что эта система в свою очередь находится в движении (и возможно, в «сложном» движении) по отношению к некоторой более первичной, основной системе отсчета. Эта предосторожность была действительно вполне разумной. Теперь нам хорошо известно, что Солнце и звезды нашей звездной системы — Галактики находятся в непрестанном движении по отношению к системе отсчета, образованной другими галактиками, и что эти внешние галактики принимают участие в расширении Вселенной, в результате которого они как бы «разбегаются» в разные стороны.

Опасаясь, что какого-либо конкретного, абсолютно неподвижного материального тела, способного служить системой отсчета для движений, о которых идет речь в его законах, вообще не может существовать, Ньютон придумал идеальную систему отсчета, которую он назвал *абсолютным пространством*, остающуюся неподвижной и неизменной и не имеющую по отношению к себе ничего более «внешнего».

В сочинениях самого Ньютона понятие «абсолютное пространство», фигурирующее в законе инерции, законах механики, встречается довольно редко, поэтому весьма трудно уточнить, как он его себе представлял. По-видимому, Ньютон и его последователи рассматривали пространство как некую полость в абсолютно твердом теле. Они полагали (а многие из наших читателей, возможно, придерживаются этой точки зрения и до сих пор), что пространство, прежде «занятое» телом, продолжает существовать как «пустое пространство» и после того, как тело покинет его; что тело может покинуть область пространства, которую оно занимает, причем само пространство будет продолжать существовать; что пространство как таковое не меняет своих свойств, какие бы материальные объекты оно ни содержало.

Отсюда и вытекает понятие абсолютного пространства, которое Ньютону и его продолжателям представлялось как нечто пустое, абсолютно проницаемое и нематериальное, но совершенно недеформируемое и безразличное к положению содержащихся в нем объектов и направлению их движения. Наконец, и это особенно важно, абсолютное пространство, хотя и лишенное каких-либо материальных ориентиров вследствие его жесткости, можно было бы снабдить мысленными «ориентирами» и поэтому оно могло бы служить системой отсчета при рассмотрении движения.

Вполне вероятно, что для Ньютона понятие абсолютного пространства было тесно связано с идеей об универсальности евклидовой геометрии, воспринимавшейся как «наука о пространстве», не зависящем от физических свойств вещества и Вселенной. Теперь нам известно, что возможны и другие геометрии и что геометрию нельзя рассматривать совершенно независимо от физических законов, действующих во Вселенной.

Мы видим, что понятие абсолютного пространства — довольно туманное понятие, и удивительно, что его ввел такой глубокий мыслитель, как Ньютон, уделявший особое внимание тому, чтобы не использовать в своих трудах никаких величин, кроме заведомо наблюдаемых. Ведь трудно представить себе в качестве реально существующего нечто невидимое, не обладающее ни малейшей активностью и ни на что не воздействующее.

Вот почему ученые старались избавиться от понятия абсолютного пространства.

Исключение из механики понятия абсолютного пространства — одно из величайших достижений физики конца XIX в., которое предшествовало появлению теории относительности. Это исключение опирается на отделение закона инерции от других законов механики и основывается на том, что одна и та же система отсчета справедлива как для закона инерции, так и для других законов.

Чтобы это лучше понять, удобно отказаться от понятия «первичной системы отсчета» и удовлетвориться системами отсчета, отбираемыми по признаку инерциальности. Это означает, что при формулировании законов механики мы должны ограничиться рассмотрением движения по отношению только к инерциальным системам, т. е. к таким системам отсчета, по отношению к которым при отсутствии внешних действующих сил тело совершает «простое» движение. Поэтому закон инерции перестает быть законом и становится просто определением класса «хороших» систем отсчета, а именно тех, в которых необходимо рассматривать движение тел, чтобы оно подчинялось законам механики [1].

Иными словами, нет необходимости проверять, совершает ли поезд, равномерно движущийся по прямолинейному пути, «простое» движение по отношению к гипотетическому абсолютному пространству. Достаточно убедиться, что, стоя в вагоне этого поезда, вы будете неподвижны по отношению к окружающим вас предметам до тех пор, пока кто-либо не толкнет вас. А если вы будете играть там в биллиард, то можете не беспокоиться, что биллиардный шар после удара будет совершать относительно стола движение, отличное от «простого».

Система отсчета, связанная с этим поездом, будет инерциальной системой отсчета, и законы механики Галилея и Ньютона позволяют утверждать, что в этом поезде изменение вектора скорости будет пропорционально приложенной силе (за исключением сил инерции, появление которых невозможно при описании движения в инерциальных системах отсчета!).

Наоборот, в поезде, который тормозит, ускоряется или поворачивает, наблюдение явлений, описанных в предыдущем разделе, показывает, что этот поезд не может служить инерциальной системой отсчета и что движение в нем может быть «сложным» и при отсутствии внешних сил.

[1] В законе инерции нетривиален факт *универсальности* инерциальной системы отсчета: если система отсчета является инерциальной для одного тела, она инерциальна и для *любого другого*. Тем не менее этот закон можно слить воедино со вторым законом Ньютона, в котором явно учитываются силы.— *Прим. ред.*

В такой «неинерциальной лаборатории» законы механики уже неприменимы или применимы, лишь если добавить к истинным силам, действующим на движущееся тело, силы инерции, т. е. если учесть нарушение «инерциальности» системы отсчета, связанной с рассматриваемой «лабораторией».

Нетрудно убедиться, что упорядоченное, коллективное движение, в котором участвуют в среднем все звезды нашей Галактики, происходит с достаточно малым ускорением и берется на достаточно прямолинейном участке пути, так что в течение разумных промежутков времени (порядка нескольких месяцев или даже нескольких лет) можно пренебречь вращением Галактики и рассматривать гелиоцентрическую систему как инерциальную систему отсчета. Именно благодаря этому обстоятельству, более или менее случайному, Галилей и Ньютон смогли открыть законы механики, несмотря на непрерывное движение Солнца и звезд.

18. Невозможность определения «истинной» скорости Земли в пространстве при помощи механических опытов

В заключение анализа основных свойств движения и различных систем отсчета можно вкратце суммировать основные идеи на следующем классическом примере.

Пусть два поезда остановились в пустынной местности ночью на двух соседних путях. Допустим, что темнота не позволяет различить никаких земных ориентиров. Если один из поездов трогается, а другой продолжает стоять, то пассажиры каждого из этих поездов смогут видеть только освещенные вагоны другого поезда, перемещающиеся относительно них. Каждый из этих поездов представляет собой систему отсчета, идеально «приспособленную» для описания движения одного поезда относительно другого.

Пассажиры каждого из этих поездов с одинаковым основанием могут считать, что либо их поезд движется относительно другого, либо, наоборот, другой поезд движется относительно их поезда. Это характеризует *кинематическую относительность* (от греческого слова «кинема» — «движение»), если ограничиваться одним только описанием движения.

Однако если первый из поездов трогается достаточно резко, то его пассажиры вследствие «эффекта старта» смогут обнаружить, что именно их поезд пришел в движение относительно земных ориентиров. Иными словами, они смогут убедиться, что система отсчета, связанная с их поездом, не является инерциальной (в течение периода ускорения, когда наблюдаются явления, вызываемые силами инерции). Но те же самые пассажиры не смогут определить, покоится ли другой поезд по отношению к земле или совершает относительно земли «простое» движение. Иными словами, они не смогут определить, представляет ли другой поезд инерциальную систему отсчета.

Рассмотрим теперь несколько иной случай, когда пассажиры просыпаются ночью в поезде, движущемся равномерно и прямолинейно и обгоняющем другой поезд, неподвижно стоящий на рельсах. На этот раз, если не видно ничего, кроме другого поезда, то проснувшиеся пассажиры уже не смогут установить, что они движутся относительно него. Но в то же время они могут утверждать, что (с точки зрения теории Ньютона) совершают «простое» движение (или покоятся) по отношению к абсолютному пространству, либо что они (с современной точки зрения) движутся по инерции, либо, наконец, что система отсчета, связанная с их поездом, является инерциальной. Чтобы установить все это, им достаточно проверить, что в отсутствие внешних сил они чувствуют себя так, как будто находятся в состоянии покоя.

Но пассажиры другого поезда (неподвижного по отношению к железнодорожному пути) также испытывают «чувство покоя» (в отсутствие сил инерции), пока ничто их не толкает (в отсутствие сил). Они также смогут утверждать (из тех же соображений), что движутся по инерции и что их поезд представляет собой инерциальную систему отсчета.

Однако ни те, ни другие не имеют возможности определить ни величину, ни тем более направление скорости v их движения относительно воображаемого «абсолютного пространства». В самом деле, скорость v не влияет ни на какие явления внутри поезда; к тому же абсолютное пространство, допускающее введение только мысленных ориентиров, не содержит никакого конкретного материального ориентира, который позволял бы измерять пройденное относительно него расстояние.

Иначе говоря, из принципа Галилея следует, что, если даже неподвижное и недеформируемое абсолютное пространство существует, никакой механический эксперимент не даст возможности измерить скорость движения инерциальной системы по отношению к системе отсчета, связанной с этим пространством. Следовательно, принцип Галилея исключает возможность каким-либо образом изучить «абсолютное движение» инерциальной системы, совершающей равномерное прямолинейное движение по отношению к абсолютному пространству, даже если оно существует. Остается единственная возможность изучать движение инерциальных систем отсчета по отношению друг к другу (по крайней мере насколько это позволяют механические эксперименты).

Итак, согласно принципу Галилея, законы механики остаются одинаковыми во всех физических лабораториях, движущихся равномерно и прямолинейно относительно воображаемого абсолютного пространства, и невозможно определить «абсолютную» скорость этого движения из механических опытов.

В такой формулировке принцип Галилея очень часто и с полным основанием называют *специальным* или *частным принципом относительности* в механике. Принцип Галилея — это частный (специальный) принцип относительности, потому что в нем невозможность познать «абсолютное» движение сводится к непознаваемости поступательного равномерного и прямолинейного движения. Принцип Галилея — это принцип относительности в случае, когда имеется возможность определять только относительную скорость одних инерциальных систем отсчета относительно других.

По странному совпадению в то время, когда введение инерциальных систем отсчета «изгнало» абсолютное пространство из механики, понятие абсолютного пространства было введено в оптику и электричество, но не как «первичная система отсчета», а как «эфир», в котором распространяются свет и радиоволны. Следующая глава посвящена захватывающей истории «возрождения» абсолютного пространства и того тупика, в который оно завело.

ГЛАВА 6

ТУПИК ДОЭЙНШТЕЙНОВСКОЙ ФИЗИКИ

19. Волновая теория света и эфир

Изучение механических свойств Вселенной дало богатый урожай новых фактов и законов большой теоретической и практической значимости, хотя при этом физики столкнулись с рядом трудностей, которые мы описали, рассматривая первичную систему отсчета, образованную абсолютным пространством Ньютона. Впрочем, эти трудности, казалось, были преодолены благодаря введению понятия «инерциальной системы отсчета».

Однако развитие оптики и теории электричества вскоре привело к возникновению аналогичных трудностей, еще более серьезных и казавшихся непреодолимыми, особенно после того, как в конце XIX в. была открыта тесная связь между светом и тем, что мы теперь называем радиоволнами, или между *оптическими* и *электромагнитными явлениями.*

Хорошо известно, что сигналы радиопередатчика можно уловить приемными устройствами на огромных расстояниях. В настоящее время мы можем поддерживать радиосвязь с космическими кораблями, удаленными от Земли на расстояния во многие миллионы километров. Это взаимодействие между излучателем и приемником радиосигналов, на основе которого действуют радиотелеграф и радиотелефон, происходит без видимого участия какого-либо вещественного носителя.

Точно так же взаимодействие между небесными светилами как источниками света и нашим глазом или нашими телескопами как приемниками излучения осуществляется через десятки световых лет «пустоты», отделяющей нас от наиболее близких звезд [1], и сотни миллионов световых лет «пустоты», отделяющей нас от далеких галактик.

---

[1] Напомним, что ближайшая к нам звезда — Альфа из созвездия Центавра находится на расстоянии 4,3 световых года.— *Прим. ред.*

Акустическая «связь» между источниками звука (речь, пение, записанная на пленку музыка и т. д.) и соответствующими приемниками звуковых сигналов (ухо, микрофон, магнитофон и т. д.) осуществляется за счет распространения колебаний некоторой материальной среды (главным образом воздуха) и прекращается, если плотность этой материальной среды падает ниже определенной величины. Наоборот, связь по радио и при помощи световых сигналов не нарушается (и даже улучшается), если плотность среды стремится к плотности идеального вакуума.

О возможности распространения света в пустоте подозревали еще в середине XVII в. Именно этим руководствовался Ньютон, выдвинув гипотезу, согласно которой источники света излучают в пространство частицы (корпускулы), распространяющиеся по инерции подобно крошечным снарядам. Поглощение этих световых корпускул материей могло вызывать разогревание «приемника», а попадание их в глаз могло сопровождаться классическими «световыми ощущениями». Корпускулярная теория хорошо объясняла прямолинейное распространение лучей света и законы отражения их от гладких поверхностей (зеркал).

Однако эта теория была не в состоянии объяснить другие свойства света, и особенно преломление света, которое проявляется, например, в том, что палка, наполовину погруженная в воду, кажется переломленной пополам, или в том, что отполированное оптическое стекло (очки, линзы, бинокли) способно «собирать» свет в одну точку. Итак, явление преломления света проявляется, вообще говоря, в изменении направления его распространения и зависит не только от угла падения (как при отражении), но и от природы соприкасающихся сред (вода, воздух, стекло).

Однако Гюйгенс примерно тогда же (в середине XVII в.) показал, что можно объяснить как законы отражения, так и законы преломления света, если предположить, что всякий источник света, находящийся в однородной среде, порождает сферическую волну, распространяющуюся по всем направлениям от него со скоростью, зависящей от природы окружающей среды. Согласно этой теории, объясняющей тот простой факт, что источник света освещает все находящиеся вокруг него предметы, луч света — это частный случай распространения сферической волны по радиусу, соединяющему источник с приемником излучения.

Волновая теория света завоевывала благодаря ряду тонких экспериментов все больше и больше сторонников в течение XVIII и XIX вв. Эти эксперименты, во-первых, показали, что свет, подобно звуку, способен огибать препятствия (явление дифракции света). Во-вторых, они показали, что приборы типа «щелей Юнга», в которых два световых пучка, излучаемых одним и тем же источником, но проходящих через два соседних отверстия в экране, взаимодействуя друг с другом, дают картину регулярно чередующихся максимумов и минимумов освещенности (интерференционные полосы). Все это можно объяснить взаимодействием световых волн, но едва ли поддается объяснению в корпускулярной теории Ньютона.

Разумеется, волновая теория света в конце XIX в. имела лишь весьма отдаленное сходство с первоначальной теорией Гюйгенса. Открытие явлений дифракции и интерференции света, установление единой природы электромагнитных и световых явлений и развитие атомно-молекулярной теории вещества привели к гипотезе, что свет способен распространяться в пустоте и передаваться самой пустотой, а не атомами веществ, таких, как воздух, вода, стекло.

Однако эту пустоту нельзя было понимать как полное отсутствие вещества, так как ей приписывались колебательные свойства, которые проявляются в явлениях дифракции и интерференции. Роль атомов и молекул таких веществ, как воздух, вода или стекло, заключалась не в том, чтобы распространять световые колебания («материальная среда» в теории света Гюйгенса), а только в том, чтобы ослабить и замедлить их распространение в веществе, присутствующем всюду, даже в пустоте, и названном *эфиром*. Этот эфир был своего рода «материализацией» абсолютного пространства Ньютона.

На первый взгляд кажется странным, как можно было связать эфир, способный совершать колебательные движения, представляющие собой распространяющуюся волну, с в высшей степени неподвижным абсолютным пространством Ньютона. Но не следует забывать, что даже в таких материальных средах, как воздух, вода или сталь, распространение волн состоит в переносе колебательного процесса, в который вовлекаются элементы среды, все более и более удаленные от источника, причем каждый элемент колеблется «на месте», около некоторого среднего положения равновесия.

Например, для звуковых волн эта «неподвижность в процессе движения» проявляется в том, что распространение звука в воздухе не сопровождается движением самого воздуха (ветром). Каждый элемент воздуха, которого достиг фронт звуковой волны, совершает колебания относительно первоначального положения, передавая тот же тип движения элементам среды, более удаленным от источника, благодаря чему фронт волны распространяется все дальше и дальше.

Аналогично, если ударить по стальному рельсу, то он передаст колебания, хотя сам в целом не смещается при этом в направлении распространения колебаний. Этот пример также иллюстрирует «неподвижность в процессе движения». Но в случае звуковых колебаний частицы среды колеблются в направлении, параллельном направлению распространения волн, тогда как частицы рельса колеблются поперек направления распространения волн.

После многочисленных опытов было установлено, что световые колебания относятся к поперечным, как и колебания в твердых средах, например стали. Поэтому стали считать эфир твердым, т. е. еще больше приближающимся по свойствам к абсолютному пространству Ньютона. Но если абсолютное пространство в некотором смысле обладало только «математической» твердостью (т. е. допускало мысленные «ориентиры»), то эфир должен был обладать и «физической» твердостью, оставаясь тем не менее столь же проницаемым, как пустое пространство, в котором свободно движутся атомы и молекулы.

20. «Большая надежда» физики конца XIX в.

«Материализация» абсолютного пространства Ньютона при помощи понятия эфира породила у физиков конца XIX в. надежду осуществить необыкновенный эксперимент — измерить «абсолютную» скорость Земли относительно эфира, хотя эфир, как и абсолютное пространство, полностью лишен материальных ориентиров.

Конечно, давно было известно, что в силу принципа относительности Галилея механический эксперимент в отсутствие таких ориентиров не может ничего сказать о нашем состоянии движения. «Абсолютная» скорость Земли в пространстве не могла проявиться в каком бы то ни было частном «механическом явлении» (это касается, разумеется, каждого из «мгновенных» значений скорости Земли, а не изменений этой скорости, вызванных различного рода вращениями Земли).

Вместе с тем казалось, что свойство световых волн распространяться с одной и той же скоростью во всех направлениях в неподвижном океане эфира можно использовать в оптических экспериментах, чтобы определять «абсолютные» скорости, измерив скорости этих волн по отношению к земным ориентирам (относительные скорости).

Чтобы лучше понять суть метода, на который возлагали надежды физики, еще раз прибегнем к наглядному примеру и уподобим движение Земли в абсолютном пространстве движению поезда по железной дороге темной ночью, когда невозможно различить никаких ориентиров. Мы можем продолжить нашу аналогию, заменив распространение света в эфире распространением звука в неподвижной атмосфере, столь же «наглухо скрепленной» с железнодорожной линией, как эфир с абсолютным пространством.

Задача состоит в том, чтобы определить «абсолютную» скорость поезда по отношению к железнодорожному полотну без помощи связанных с ним ориентиров, ограничиваясь лишь измерением скорости звука относительно движущегося поезда.

Предположим для определенности, что наш поезд — это электричка (рис. 10) из 16 вагонов, длиной 20 *м* каждый, пронумерованных от 1 до 16. Допустим, что между 9-м и 10-м вагонами, т. е. не в середине поезда, а на расстоянии 9 «вагонов» от одного из концов К (конец) поезда и на расстоянии 7 «вагонов» от другого конца Н (начало), помещен источник волн О, испускающий одновременно кратковременные звуковой и световой сигналы (свисток и вспышку света). В нашем случае можно пренебречь продолжительностью распространения светового сигнала (вспышки) по сравнению с продолжительностью распространения звука.

Чтобы этот пример точно соответствовал реальному оптическому эксперименту, в котором исследуется «абсолютное» движение Земли в эфире, предположим, что пассажиры не знают, покоится ли их поезд или совершает «простое» движение по отношению к железнодорожному полотну. Кроме того, допустим, что они не знают «абсолютную» скорость звука, т. е. скорость его распространения в неподвижной атмосфере. Однако они могут выдвинуть разумную гипотезу, согласно которой скорость звука в неподвижной атмосфере не зависит от направления его распространения. Аналогичную гипотезу можно выдвинуть относительно распространения света в эфире. Назовем ее гипотезой И, или *гипотезой изотропии.*

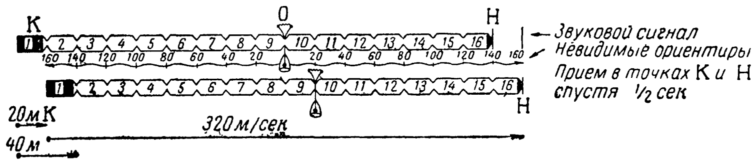


Рис. 10.

Пусть физики, находящиеся в поезде, установили, что звуковой сигнал приходит как в точку К, находящуюся на расстоянии 9 «вагонов» от источника звука, так и в точку Н на расстоянии 7 «вагонов» от источника на противоположном конце поезда ровно через полсекунды после вспышки, т. е., согласно нашей гипотезе, через полсекунды после одновременного испускания сигналов. (Слово «вагон» заключено в кавычки, так как мы рассматриваем вагон только как единицу длины, равную 20 *м.*)

Неравенство расстояний, пройденных в обе стороны за один и тот же промежуток времени, несовместимо с предположением о неподвижности поезда относительно железнодорожного пути. Поэтому физики, проводящие свой эксперимент в поезде, могут истолковать его только как доказательство движения поезда (притом «простого», поскольку не наблюдается никаких «механических эффектов») по отношению к железнодорожному полотну и к атмосфере. Не видя никаких ориентиров, они все же могут утверждать, что поезд движется в направлении точки Н, так что точка Н находится в начале, а точка К — в конце поезда.

Они смогут точно установить, что за полсекунды, отделяющие момент испускания звукового сигнала от момента его приема в точках Н и К, поезд успевает пройти расстояние точно в 1 «вагон». Действительно, этого времени как раз достаточно для того, чтобы точка К поезда переместилась на расстояние в 1 «вагон» навстречу звуковому сигналу, которому таким образом остается пройти только $(9-1)=8$ «вагонов» в атмосфере вне поезда. В то же время из-за перемещения точки Н сигнал, догоняющий поезд, согласно гипотезе изотропии, должен пробежать в атмосфере расстояние в $(7+1)=8$ «вагонов», т. е. точно такое же расстояние, что и сигнал, распространяющийся в противоположном направлении.

Таким образом, физики легко определят, что поезд движется относительно невидимого железнодорожного полотна со скоростью 2 «вагона» в секунду (40 *м/сек*), или 144 *км/час*, а звук распространяется в обоих направлениях с одной и той же «абсолютной» скоростью 16 «вагонов» в секунду (320 *м/сек*) относительно неподвижной атмосферы, также лишенной каких-либо видимых ориентиров.

Для упрощения расчетов мы рассмотрели опыт по распространению сигнала от излучателя к приемнику, которые находятся в различных точках поезда, вместо того чтобы рассматривать движение сигнала по замкнутому пути. Поэтому мы вынуждены были синхронизовать часы в разных точках при помощи вспышки света. Это не создает никаких неудобств при изучении распространения сравнительно медленных звуковых сигналов, но может сильно усложнить картину при изучении распространения световых сигналов.

Чтобы избежать этого, американский физик Майкельсон в 1881 г. поставил опыт, аналогичный по своей идее рассмотренному нами опыту со звуком, но отличающийся от него тем, что световой сигнал возвращался обратно к излучателю, так что исключалась необходимость синхронизации часов. Следующий раздел посвящен краткому описанию этого знаменитого опыта.

21. Опыт Майкельсона

Опыт Майкельсона иногда называют одним из краеугольных камней специальной теории относительности. Без сомнения, этот эксперимент позволил в значительной мере выйти из тупика, в который зашла классическая физика. Но он представляет не только исторический интерес. Несмотря на то что теперь мы располагаем гораздо более убедительными доказательствами справедливости теории Эйнштейна (например, нормальное функционирование ускорителей элементарных частиц, сконструированных на основании формул теории относительности), опыт Майкельсона, или, скорее, анализ главной идеи этого опыта, до сих пор обладает незаменимой познавательной ценностью.

Действительно, этот анализ дает более простой и непосредственный способ разрешения спорных вопросов и выявления точек соприкосновения в ряде смежных областей физики. В нем, как в фокусе увеличительного стекла, сосредоточиваются и все трудности понятия эфира, крепко-накрепко привязанного к абсолютному пространству, и изящное разрешение этих трудностей в гениальной теории Эйнштейна.

Чтобы сосредоточить внимание на сущности опыта, мы оставим в стороне устройство оптического прибора Майкельсона и рассмотрим один упрощенный пример. Тогда, нисколько не отходя от «структуры» этого опыта, мы сможем обсуждать его на языке, более понятном большинству наших читателей, чем те интерференционные методы, которыми в действительности воспользовался Майкельсон.

Вместо прибора Майкельсона, неподвижно связанного с Землей, удобнее рассматривать прямоугольную платформу, движущуюся по рельсам (рис. 11), причем длина этой платформы вдвое превышает ее ширину. Будем называть ее «поездом» и обозначать первой буквой слова «лаборатория» Л. Л′ означает, что наша платформа движется по отношению к рельсам.

Движение прибора Майкельсона вместе с Землей по отношению к эфиру, жестко связанному с неподвижным абсолютным пространством, в нашем упрощенном примере соответствует движению поезда Л′ по прямолинейному участку железной дороги (поскольку движение поезда должно быть «простым»). По обе стороны от дороги пусть имеются сколь угодно длинные перроны, на которых на одинаковом расстоянии друг от друга размещены ориентиры.

Хотя в большинстве наших рассуждений мы допускаем существование этих ориентиров, будем считать их невидимыми для наблюдателей, едущих в поезде Л′, потому что «настоящий» эфир, который изображают перроны, не обладает никакими ориентирами. Пусть расстояние между двумя соседними ориентирами равно $^1/_4$ длины нашего вагона, если он покоится по отношению к перрону. Этот интервал мы будем использовать в качестве единицы длины.

Световые сигналы, использованные в опыте Майкельсона, заменим радиосигналами, которые излучает передатчик, расположенный в точке o' — середине одной из длинных сторон прямоугольного вагона (см. рис. 11), причем

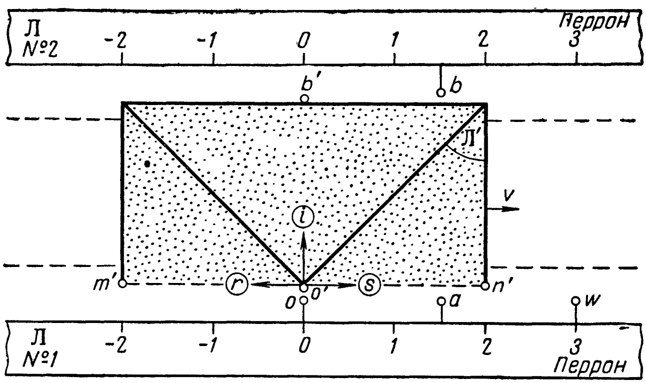


Рис. 11.

приемник находится в той же точке. Отражатели, подобные зеркалам, изменяют направление движения сигналов; мы расположим их в трех точках m', n' и b' поезда. Из них первые две точки находятся на разных концах той стороны вагона, середина которой помечена через o', а третья — в середине противоположной стороны.

Пусть в определенный момент времени передатчик, расположенный в точке o' (для простоты мы будем говорить: передатчик o'), излучает радиоимпульс, соответствующий световому сигналу в опыте Майкельсона. Если точка o' находится в этот момент против точки o перрона № 1, то мы примем эту точку за начало отсчета шкалы, связанной с перронами, которые образуют вместе с линией железной дороги систему отсчета Л, соответствующую в классической теории Ньютона абсолютному пространству.

В дальнейшем, излагая теорию Эйнштейна, мы столкнемся с совершенно иным истолкованием системы Л, однако пока не будем на нем останавливаться.

Чтобы чертеж был понятнее, мы оставили небольшой зазор между точками o и o', а также между точкой o и нулем шкалы. Однако на самом деле точка o' при движении платформы проходит точно через точку o. Излучение света из точки o' представляет собой событие, которое мы обозначим через (O) [1].

Конечно, передатчик излучает во всех направлениях, но только «лучи», проходящие через приемники m', b' и n', дают в нашем примере наблюдаемый эффект — три отдельных сигнала, которые мы будем обозначать через r, i и s соответственно.

Отражение сигнала r, или его мгновенное переизлучение зеркалом m', дает новый сигнал, который может уловить приемник, находящийся в точке o'. Этот отраженный сигнал, не рискуя перепутать обозначения, также можно обозначить через r. Точно так же сигналы i и s, отраженные от зеркал b' и n', дают сигналы (обозначаемые теми же буквами i и s), поступающие к приемному устройству в o'.

Опыт Майкельсона доказывает, что «световые лучи» r, i и s ведут себя по возвращении (после их сложения — интерференции) как волны, прошедшие в эфире одно и то же расстояние, так как они возвращаются в точку o' одновременно. Эту одновременность возврата сигналов r, i и s мы будем в честь Майкельсона называть свойством (M).

22. Идея опыта Майкельсона с точки зрения классической теории

Мы описали результаты опыта Майкельсона, прежде чем приступать к его теоретическому истолкованию. Однако в действительности все происходило наоборот. Взяв за образец звуковые явления и предположив, что свет распространяется в виде волн в неподвижном эфире, жестко

[1] Физическое *событие* — это единство *места* и *времени,* так что в качестве события (O) берется акт излучения сигнала из точки o' в тот момент, когда эта точка была совмещена с o.— *Прим. ред.*

связанном с абсолютным пространством, физики пытались заранее понять и теоретически предсказать результат опыта.

Но результаты реального опыта, произведенного Майкельсоном, совершенно противоречили предсказаниям этой теории, которую мы будем называть просто *классической теорией*. Чтобы объяснить свойство (M), физики предложили ряд других теорий, о которых мы будем говорить в следующем разделе. А сейчас мы остановимся на том, что́ предсказывала классическая теория.

Классическая теория предполагает, что сигнал, излученный источником o', вызывает колебания эфира в точке o, где источник находится в момент излучения. Таким образом, из точки o эфира (а не o') световая волна распространяется во всех направлениях (в частности, в виде сигналов r, i и s).

Если это так, то роль теории будет состоять в предсказании продолжительности путешествия сигналов туда и обратно с момента их общего выхода (О) из точки o до момента возвращения каждого из них в точку o', и требуется определить, имеет ли место экспериментально установленное свойство (M), т. е. одновременность возвращения всех трех сигналов.

Для простоты предположим, что скорость v поезда Л′ относительно системы Л, связанной с железной дорогой, равна $^3/_5$ скорости света (или радиоволн) c, взятой по отношению к этой системе отсчета, т. е. по отношению к неподвижному эфиру.

Это была бы фантастическая скорость порядка 650 миллионов *км/час*. Но не следует забывать, что мы рассматриваем лишь сильно упрощенный пример, а выбор такой огромной скорости позволяет лучше выявить «эффекты», которые предсказывает теория.

Конечно, физики, разрабатывавшие теорию опыта Майкельсона, не знали «истинной» величины скорости Земли, в нашем примере — поезда, по отношению к абсолютному пространству. Напомним, что цель опыта как раз и заключалась в определении этой скорости.

Но орбитальное движение Земли вокруг Солнца происходит со скоростью около 30 *км/сек* в системе отсчета, связанной со звездами. Оставаясь все время в плоскости орбиты, вектор скорости Земли каждые полгода меняет свое направление на противоположное.

Плоскость, в которой в нашем приборе Л' распространяются сигналы, можно расположить тремя разными способами, выбрав эти положения перпендикулярными относительно друг друга. Таким образом, при любом состоянии движения (в случае Земли в любой точке орбиты) можно провести три независимых измерения. Очевидно, что хотя бы в какой-то месяц года абсолютная скорость нашего прибора в указанной только что плоскости окажется наверняка не менее 30 *км/сек.*

Но тот анализ, который мы проделаем ниже, покажет, что уже в случае скорости 30 *км/сек* классическая теория предсказывает эффекты, вполне доступные для наблюдения с помощью экспериментальной техники, имевшейся в распоряжении Майкельсона.

Возвращаясь к нашему примеру, заметим, что промежутки времени удобнее выражать в часах, а не в секундах. Так, легче отсчитать два часа, чем две секунды, прошедшие после некоторого начального события. Поэтому будем считать, что сигнал проходит нашу единицу длины за 1 *час* в системе отсчета Л, связанной с железной дорогой, которая играет роль эфира.

Таким образом, наш поезд имеет не только фантастически огромную скорость, но и фантастическую длину — около 4 млрд. *км.* Однако это не умаляет общности наших рассуждений, которые остаются справедливыми и вполне строгими в применении к коротким и медленно движущимся поездам.

Итак, мы пришли теперь к задаче на сложение скоростей. Зная абсолютные скорости поезда ($v={}^3/_5$) и сигналов ($c=1$), требуется определить скорости сигналов по отношению к поезду. Так как эти относительные скорости и определяют длительность распространения сигналов по отношению к поезду, то от них зависит выполнение свойства (M).

Однако вместо того, чтобы применять правило векторного сложения скоростей, с помощью которого можно быстро найти ответ, мы обсудим само распространение сигналов и само движение поезда. Это позволит нам психологически лучше подготовиться к необходимости отказа от старого правила сложения скоростей в теории Эйнштейна.

Рассмотрим сначала распространение сигналов s и r. Очевидно, что на железнодорожной линии Л существование какой бы то ни было синхронизованной часовой сети не только невозможно, но и ненужно, потому что железнодорожная линия Л изображает эфир. Если все же предположить, что железная дорога снабжена синхронизованными часами, то это может облегчить промежуточные рассуждения и сравнение окончательных результатов. Итак,

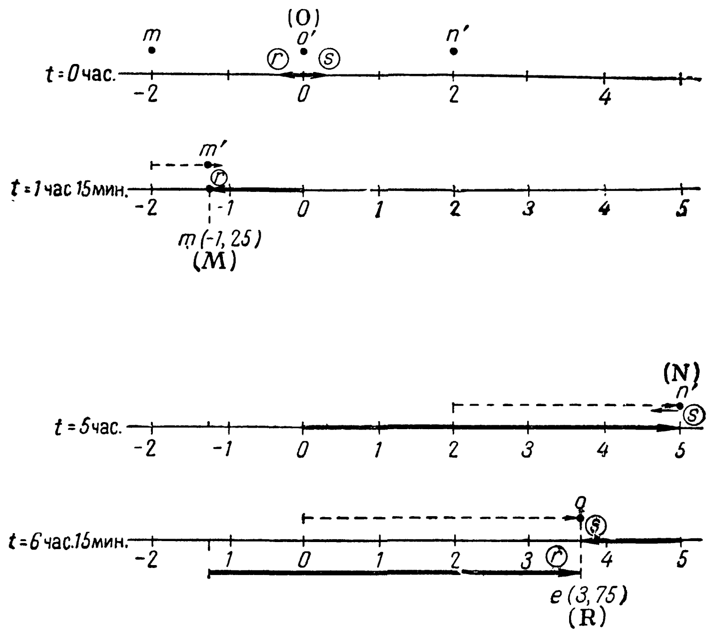


Рис. 12.

допустим, что железнодорожный путь снабжен синхронизованной часовой сетью (как мы уже предположили, вдоль этого пути существует шкала расстояний). Пусть при этом испускание (O) сигналов r, i и s происходит в момент $t=0$ час, по «хронологии» этой сети.

На рис. 12 (который удобно рассматривать в последовательности сверху вниз) мы изобразили соответственные положения приемников-излучателей m', o' и n' и ход сигналов r и s в следующие моменты времени: $t=0$ час; $1\ ^1/_4$ час.; 5 час. и $6\ ^1/_4$ час.

Действительно, легко проверить, что именно в эти моменты времени последовательно происходят следующие события:

(O) — излучение сигналов,
(M) — прибытие сигнала r в m',
(N) — прибытие сигнала s в n',
(R) — одновременное возвращение сигналов r и s в o'.

Пунктирные стрелки указывают пути, пройденные поездом со скоростью $v={}^3/_5$; жирные стрелки указывают пути, пройденные сигналами, скорость которых равна одному делению шкалы в час.

Сначала обратим внимание на положение точек и сигналов в момент $t=0$ час. (верхняя часть рис. 12). Поскольку расстояние $o'n'$ «по построению» равно 2, то *кажется очевидным*, что начиная с момента, в который произошло событие (O), точка n' перемещается от своего первоначального положения, отмеченного на шкале как 2, вправо. Точка m' находится в этот начальный момент против деления шкалы — 2.

К моменту $t=1^1/_4$ час. точка m', двигаясь со скоростью $^3/_5$, переместится на расстояние $^3/_5 \cdot {}^5/_4={}^3/_4$. Сигнал r пройдет за это время расстояние $^5/_4$, так что сигнал r и точка m' встретятся в точке m с координатой — 1,25 по шкале. (Соответствующие положения точек o' и n' и сигнала s не указаны, так как они не имеют отношения к этому рассуждению.) Маленькая стрелка, выходящая из m' и направленная вправо, напоминает, что событие (M) сопровождается отражением (или переизлучением) сигнала r вправо.

К моменту $t=5$ час., т. е. спустя 5 *час* после события (O), приемник n' сигнала, двигаясь от начального положения $(+2)$, успеет пройти 3 единицы шкалы и будет находиться в точке $(+5)$. Здесь он встретит сигнал s, который, двигаясь из точки o со скоростью $c=1$, пройдет расстояние в 5 единиц. Эту встречу мы назовем событием (N). (Соответствующие положения других движущихся точек и сигналов на рисунке не указаны.) Маленькая стрелка, выходящая из n' влево, напоминает, что событие (N) сопровождается отражением (переизлучением) сигнала s влево.

К моменту $t=6^1/_4$ час. точка o' пройдет расстояние $(^{25}/_4)\cdot(^3/_5)=3^3/_4$ и будет находиться в точке e $(+3{,}75)$; но сигнал s прибудет в эту точку, пройдя расстояние $1^1/_4$ единицы влево после отражения от точки 5, где он находился за $1^1/_4$ *час* до этого. Сигнал r за 5 *час*, разделяющих моменты времени $1\,^1/_4$ и $6\,^1/_4$ час., пройдет точно 5 делений от точки ($-1^1/_4$) до точки e ($+3^3/_4$). Таким образом, сигналы s и r прибудут в точку o' одновременно. Их одновременное прибытие мы обозначим как событие (R). В этом пункте классическая теория представляется соответствующей опыту Майкельсона.

Заметим, что при распространении сигналов влево (сигнала r между $t=0$ и $1\,^1/_4$ час. или сигнала s между $t=5$ и $6^1/_4$ час.) их скорость по отношению к поезду равна $^8/_5$ c, тогда как при распространении сигналов вправо их скорость по отношению к поезду равна $^2/_5$ c. Чтобы убедиться в этом, достаточно поделить в каждом случае расстояние в 2 единицы, пройденное сигналом относительно поезда, на соответствующий промежуток времени. Этот результат можно было бы получить и непосредственно по правилу векторного сложения скоростей.

Подведем итоги.

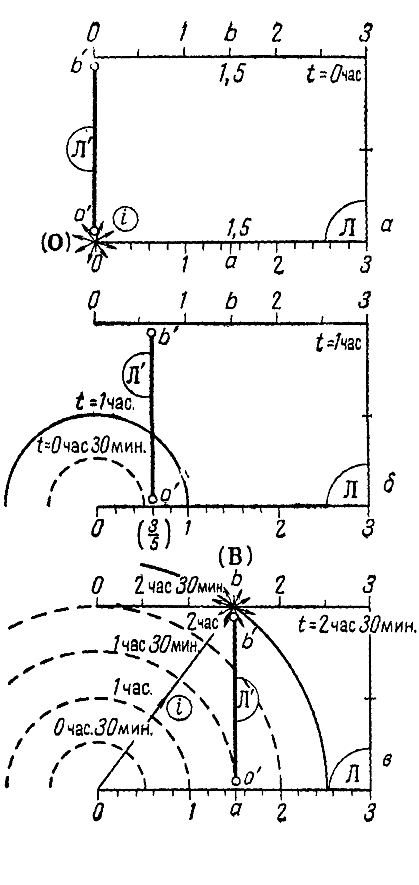
Возвращение сигналов r и s в точку o' — это два одновременных события, происходящих в одной и той же точке e железнодорожной линии (и, конечно, в одной и той же точке o' поезда). Оно представляет собой «сложное событие» (R), происшедшее в момент времени $t=6^1/_4$ час. в точке ($+3^3/_4$) железнодорожной линии по часовой сети, связанной с линией. Чтобы убедиться в этой одновременности в поезде, нет никакой необходимости пользоваться часами.

Рассмотрим теперь распространение сигнала i, отраженного зеркалом b' (рис. 13).

На рис. 13 поезд Л′ представлен в виде «стержня» $o'b'$, на одном из концов которого находится приемник-излучатель o', а на другом — отражатель b'. Кроме того, оба перрона соединены друг с другом «перекладиной», перпендикулярной им обоим и проходящей через точку шкалы 3. Это сделано для того, чтобы лучше показать их принадлежность к одной системе отсчета Л.

Рис. 13,*а* напоминает, что событие (O) состоит в выходе сферической волны из точки o перрона № 1 (или эфира, по классической теории). Часть этой волны, которая некоторое время спустя после выхода достигает отражателя b', и образует сигнал i.

Рис. 13, *б* соответствует моменту $t=1$ час. [положение спустя час после события (O)]. Стержень $o'b'$, который, по



0 1 b 2 3
b′
1,5
t = 0час
Л′
o′
i
(O)
1,5
Л
а
0 1 а 2 3
0₁
b₁
3
1
b
2
2
2,5
0 1 а 2 3
г
0 1 b 2 3
b′
t =1час
Л′
t =1час.
t=0час 30мин.
o′
Л
б
0 (3/5) 1 2 3
(B)
0 2 час 30мин. b 2 3
2час
t = 2час 30мин.
b′
1час 30мин.
1час.
i
Л′
0час.30мин.
o′
Л
в
0 1 а 2 3
д
0 1 b 2 3
t=5час b′
0час 30мин.
1час.
i
Л′
1час.30мин.
2час.
(W)
o′
w
0 1 2 3
2час 30мин.

Рис. 13.

предположению, движется со скоростью $^3/_5$ единицы длины в час ($^3/_5\ c$) находится в этот момент против деления $^3/_5$ шкалы перрона, а фронт волны, распространяющейся со скоростью c, образует в этот момент (в плоскости железнодорожного полотна) окружность с радиусом, равным 1 делению, с центром в o (пунктиром изображено положение фронта волны в момент $t=0$ час. 30 мин.). Волна еще не успела достичь зеркала b', поэтому не известно, какая ее часть образует сигнал i.

Рис. 13, *в* (внизу слева) представляет положение спустя $^5/_2$ *час* после события (O), т. е. в момент времени $t=2$ час. 30 мин. В этот момент стержень $o'b'$ занимает положение ab против деления $(+1{,}5)$ шкалы перрона: $(^3/_5)\cdot(^5/_2)=1{,}5$, а фронт волны (в плоскости железнодорожного полотна) образует окружность с центром o и радиусом 2,5, так как ее скорость равна 1. Тогда, как легко проверить графически, окружность с центром 0 и радиусом 2,5 проходит через точку b $(+1{,}5)$ перрона № 2.

Это свойство легко проверить и по-другому, применив теорему Пифагора к прямоугольному треугольнику, образованному «перекладиной» oo_1, перроном № 2 и радиусом ob_1 фронта волны (рис. 13, *г*). Для этого треугольника

$$(o_1\,b_1)^2 = (2{,}5)^2 - (2{,}0)^2 = 6{,}25 - 4{,}00 = 2{,}25 = (1{,}5)^2.$$

Итак, длина отрезка o_1b_1 равна 1,5 и точка b_1 совпадает с точкой b $(+1{,}5)$.

Мы видим, что приемник сигнала b' и волна *одновременно* проходят через одну и ту же точку b $(+1{,}5)$ перрона № 2. Иными словами, рис. 13, *в* изображает прибытие сигнала в точку, где расположен отражатель b' поезда [событие (B)], причем сигнал прибывает в эту точку в момент времени $t=2$ час. 30 мин.

На рис. 13, *д* представлена картина опыта спустя 2 час. 30 мин. после события (B). Сигнал i, отраженный зеркалом b', в момент времени $t=2$ час. 30 мин., выходит из точки b эфира, причем событие (B) для отраженного луча играет роль события (O) для падающего луча. На рис. 13, *д* показано возвращение сигнала i к приемнику, расположенному в точке o' в момент $t=5$ час., когда стержень $o'b'$ находится против деления 3 шкалы перрона и когда радиус волнового фронта, исходящего из b, равен 2,5.

Итак, в момент $t=5$ час. приемник сигнала o' находится в точке w $(+3)$ перрона № 1, куда в этот же момент возвращается сигнал i. Событие, состоящее в возвращении сигнала i к приемнику o', будем обозначать (W).

Мы видим, что по классической теории событие (W) происходит в момент $t=5$ час, по часам, связанным с железной дорогой, в точке w $(+3)$ перрона № 1.

Подытожим вкратце результаты нашего анализа.

Возвращение (R) сигналов r и s (рис. 12′—13′), отраженных зеркалами m' и n' и распространяющихся параллельно направлению движения поезда, происходит в

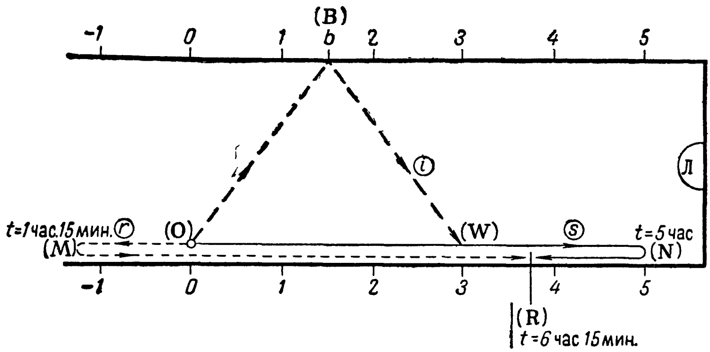


Рис. 12′—13′.

момент $t=6$ час. 15 мин. в точке e $(+3{,}75)$ перрона № 1; в то же время возвращение (W) сигнала i, отраженного зеркалом b *перпендикулярно* направлению движения поезда, происходит в момент $t=5$ час. в точке w $(+3)$.

Это означает, что возвращение (R) сигналов r и s происходит на $1^1/_4$ *час* позже, чем возвращение (W) сигнала i. За промежуток времени между возвращением (W) сигнала i и общим возвращением (R) сигналов r и s приемник o' проходит расстояние $^3/_4$ единицы от точки w до точки e. Это вытекает из понятия «абсолютного» движения поезда, который, двигаясь со скоростью $^3/_5$ c, должен пройти расстояние $^3/_4$ единицы за $^5/_4$ *час*. Кроме того, пути, пройденные сигналами r (или s) и i в эфире Л, различны. На рис. 12′—13′, мы видим, что для луча r (или s) этот путь равен $1{,}25+5=6{,}25$, а для луча i 5 единицам. Это также согласуется с тем, что мы знаем о скорости движения волны в эфире, где пройденный волной путь выражается числом единиц, равным числу часов, затраченных на него.

Классическая теория, как мы только что убедились, приводит к выводу, противоречащему свойству (M), установленному экспериментально: вместо одновременного возвращения всех трех сигналов классическая теория предсказывает, что сигналы r и s совместно возвращаются позже, чем сигнал i.

Сравним этот отрицательный результат опыта с результатом, который предсказала бы теория, если предположить, что поезд Л′ неподвижен по отношению к перрону Л. Поскольку зеркала m', b' и n' находятся на одинаковом расстоянии от излучателя-приемника, помещенного в точке o', то в этом случае время распространения туда и обратно всех трех сигналов одинаково, т. е. выполнялось бы свойство (M).

Таким образом, в эксперименте Майкельсона с точки зрения классической теории все происходит так, как если бы приборы были истинно неподвижны по отношению к абсолютному пространству и по отношению к эфиру, жестко связанному с ним. Но если бы эта ситуация и выполнялась в точности для одного эксперимента из серии опытов Майкельсона, для других экспериментов это было бы не так, потому что Земля совершает движение по своей орбите, а экспериментаторы каждый раз по-новому поворачивают свою установку.

Заметим (см. рис. 13), что в системе отсчета Л′, связанной с поездом, траектория сигнала i, распространяющегося непосредственно от точки o' к точке b', есть прямая $o'b'$, перпендикулярная к железнодорожной линии. В системе же отсчета Л, связанной с железной дорогой, траектория сигнала i (прямая ob) *наклонена* к ней. Это кажущееся изменение направления светового луча, вызванное движением приемника сигнала и конечной величиной скорости света, было открыто в 1727 г. английским астрономом Брадлеем и носит название *аберрации света*. Это явление можно использовать для приближенного определения скорости света в гелиоцентрической системе отсчета.

Отметим также, что скорость сигнала i по отношению к поезду при распространении как «туда», так и «обратно» одинакова и равна по абсолютной величине $^4/_5\ c$, так как сигнал проходит в поезде расстояние 2 единицы, равное длине стержня $o'b'$, за $^5/_2$ *час*. Эта относительная скорость не совпадает с найденными ранее значениями для относительных скоростей сигналов r и s при движении туда и обратно. Следовательно, распространение света в поезде происходит *анизотропно.*

Подведем итоги.

В конце XIX в. имелось достаточно оснований считать, что по крайней мере при одном из серии опытов Майкельсона и при многочисленных механических экспериментах Земля Л′ действительно совершает «простое» движение по отношению к эфиру и по отношению к абсолютному пространству.

Но если в механике, согласно принципу Галилея, лаборатория, связанная с Землей, могла совершать «простое движение» и казаться покоящейся, то в оптике, согласно классической теории, лаборатория Майкельсона не могла, находясь в состоянии «простого» движения, казаться покоящейся: движение этой лаборатории по отношению к эфиру должно было проявляться в неодновременности возвращения сигналов i и r (или s).

Приведя к открытию свойства (M) и тем самым оказавшись в противоречии с предсказаниями классической теории, опыт Майкельсона разочаровал многих физиков конца XIX в. и заставил их обратиться к поискам нового теоретического объяснения фактов распространения световых сигналов, иного, чем в классической теории, от которой нам предстоит сейчас отказаться.

23. В окончательном тупике

Пытаясь объяснить загадочное свойство (M), сначала предполагали, что световые сигналы, рассматриваемые в опыте Майкельсона, возможно, распространяются в эфире, увлекаемом лабораторией Л′ и, следовательно, неподвижном по отношению к этой лаборатории (как это происходит, например, со звуковыми волнами, если производить опыт в герметически закрытом вагоне движущегося поезда).

Если бы это было так, т. е. если бы световые волны распространялись в какой-то среде, заполняющей поезд Л′, а не во «внешнем» неподвижном эфире, то, очевидно, пробег сигналов i, r и s в эфире, увлекаемом поездом, был бы одинаковым, чем и объяснялось бы свойство (M).

Но гипотеза увлекаемого эфира неверна не только потому, что прибор Майкельсона не был защищен какой-либо «эфиронепроницаемой» броней, подобно герметически закрытому вагону, но и потому, что эта гипотеза противоречила одному важному свойству света. Мы расскажем о нем читателю, используя уже описанную схему опыта Майкельсона, хотя речь идет о наблюдениях, не связанных непосредственно с этим опытом.

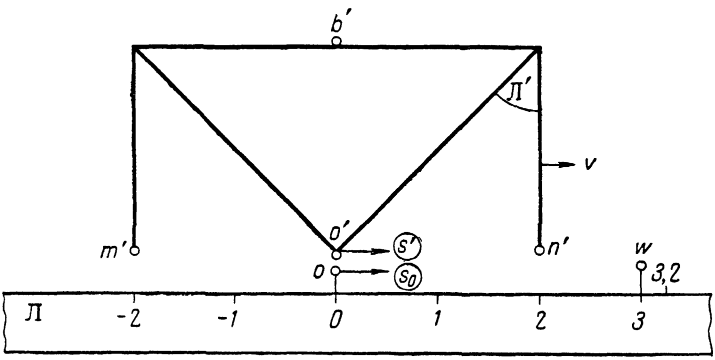


Рис. 14.

Рассмотрим (рис. 14) два сигнала, аналогичных сигналу s и излучаемых одновременно (в момент прохождения точки o' и поезда против некоторой точки o перрона): сигнал s', излучаемый источником в движущемся поезде, и сигнал s_0, излучаемый другим источником, неподвижным относительно железной дороги.

Различные наблюдения и опыты (в частности, изучение двойных звёзд) показывают, что оба сигнала s' и s_0 одновременно достигают приемного устройства n', движущегося вместе с поездом, иными словами, распространяются «колесо в колесо», как один сигнал, несмотря на относительное движение их источников. Назовем это свойством единственности светового сигнала и обозначим его как (E).

Это свойство легко объяснить, если рассматривать свет как колебания «внешнего» абсолютно неподвижного эфира (поскольку сигналы s' и s_0 распространяются в обоих случаях в этом неподвижном эфире из точки o). Тогда очевидно, что это свойство света находится в противоречии с понятием эфира, увлекаемого поездом.

Действительно, «внутренний» сигнал s', если он распространяется со стандартной скоростью в эфире, переносимом поездом, должен был бы опережать сигнал s_0, который распространяется во «внешнем» эфире, не принимающем участия в движении поезда.

Таким образом, спустя некоторое время (скажем, два часа), сигнал s' достиг бы приемного устройства n', расположенного в поезде на расстоянии в 2 единицы от o'. Но тогда это приемное устройство, двигаясь со скоростью $^3/_5\ c$, опережало бы на 1,2 единицы сигнал s_0 в момент, когда сигнал s_0 достиг бы точки $(+2)$ перрона, против которой находилось приемное устройство n' в момент выхода сигналов.

Исключив возможность полного увлечения эфира приборами в опыте Майкельсона, некоторые физики намеревались вернуться к корпускулярной теории света, согласно которой колебания, вызывающие волновые явления (дифракцию, интерференцию), сосредоточены в материальных «снарядах» — частицах.

Эти «снаряды» могли бы распространяться в идеальном вакууме, что давало сразу два преимущества: избавляло от сбивающего с толку понятия эфира, одновременно идеально твердого и идеально проницаемого, и сводило свойство (M) к проявлению принципа относительности Галилея.

Действительно, если бы свет представлял собой не колебания эфира, а распространение материальных частиц — «снарядов», то распространение света стало бы задачей механики, т. е. свойство (M) потеряло бы тот исключительный характер, который ему приписывает классическая теория.

К сожалению, помимо тех многочисленных трудностей, с которыми столкнулась даже надлежащим образом исправленная корпускулярная теория света, эта теория в рамках доэйнштейновской физики оказалась несовместимой со свойством (E), как и гипотеза о распространении света в эфире, увлекаемом приборами.

В самом деле, обратимся снова к рис. 14 и будем предполагать, что сигналы s' и s_0 — это два «снаряда», один из которых выпущен из некоторого источника, связанного с поездом, со скоростью c' по отношению к поезду, а другой — из источника, связанного с полотном железной дороги, со скоростью c по отношению к ней. Согласно принципу Галилея, скорость c' должна быть численно равна c, поскольку все явления в поезде происходят относительно поезда точно так же, как на Земле они происходят относительно Земли.

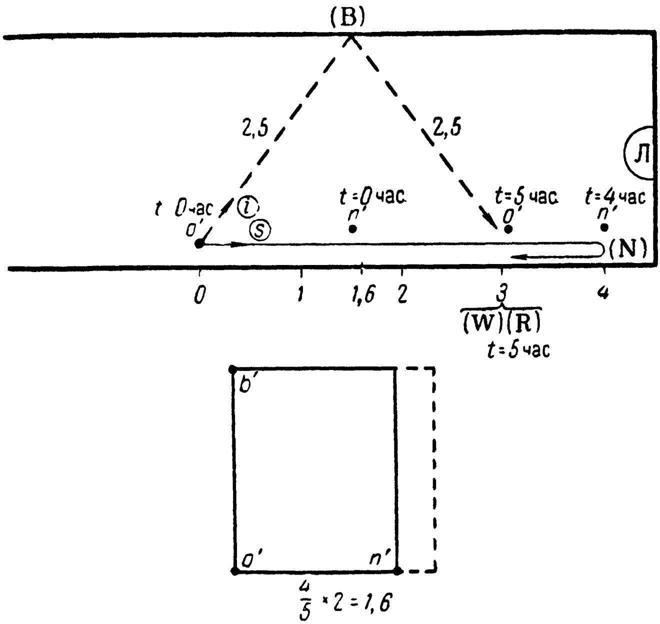
Иными словами, если в течение часа сигнал s_0 проходит расстояние, равное единице по отношению к железной дороге, то сигнал s' за тот же промежуток времени проходит расстояние, равное единице по отношению к поезду. Тогда, если через два часа сигнал s' достигнет приемного устройства n', расположенного на расстоянии в 2 единицы от излучателя o', в этот же момент $t=2$ час. сигнал достигнет точки 2 железнодорожного полотна. Но за эти 2 *час* приемное устройство n' пройдет расстояние 1,2 единицы от своего начального положения и достигнет деления 3,2. Таким образом, за 2 *час* сигнал s' опередит сигнал s_0 на 1,2 единицы.

Этот пример ясно показывает, что требуемое корпускулярной теорией света равенство скорости c' сигнала s', излученного в Л′, по отношению к системе отсчета Л и скорости c сигнала s_0, излученного в Л, по отношению к системе отсчета Л, переходит, согласно классическому правилу сложения скоростей, в неравенство скоростей $(c'+v)$ сигнала s' по отношению к железнодорожному полотну Л и c сигнала s_0 по отношению к той же системе отсчета Л, что совершенно несовместимо со свойством (E).

Последняя попытка теоретического объяснения свойства (M) в рамках классической теории [совместимая со свойством (E)] была предпринята Фитцджеральдом и развита Лоренцем. Эта попытка основана на введении в классическую теорию дополнительной гипотезы.

Согласно гипотезе Фитцджеральда — Лоренца, поезд Л′, или, точнее, «рамка» $m'o'n'b'$, при движении *укорачивается* в направлении $m'n'$ (не изменяясь в направлении $o'b'$), причем величина такого сокращения зависит только от абсолютной скорости v движения рамки и численно равна отношению расстояния $o'b'o'$, пройденного сигналом i в Л′, к расстоянию obw, пройденному сигналом i в Л, т. е. $^4/_5$ для скорости $v={}^3/_5$.

Легко проверить (рис. 15), что для такой укороченной рамки приемное устройство n' в момент $t=0$ час. находится в точке $(+1{,}6)$ перрона, а в момент $t=4$ час. достигает точки $(+4)$. В момент $t=4$ час. оно встречается с сигналом s, прошедшим расстояние в 4 единицы за 4 *час.*



Р и с. 15.

Таким образом, в момент $t=4$ час. в точке 4 сигнал s достигает зеркала n', которое отражает его в обратном направлении. Спустя еще час (в момент $t=5$ час.) сигнал достигает точки w $(+3)$, в которой в тот же момент оказывается точка o' поезда. По этой гипотезе возвращение сигнала s в точку o' поезда, т. е. как событие (R), так и событие (W) (возвращение сигнала i), происходят в момент $t=5$ час. в точке w $(+3)$.

Гипотеза Фитцджеральда — Лоренца позволила объяснить свойство (M) в опыте Майкельсона.

Но, к сожалению, эта последняя гипотеза так же неприемлема, как и другие классические теории. В самом деле, сокращение рамки должно было бы зависеть не только от абсолютной скорости поезда, но и от вещества, из которого она состоит (ведь тела сжимаются и при охлаждении). И поэтому нужно было бы предположить какое-то «чудесное» совпадение между отношением, в котором сокращается рамка, и ее физико-химическими свойствами.

Выводы.

1. Классическая теория (теория распространения света во «внешнем» абсолютно неподвижном эфире), совместимая со свойством (E), не может дать удовлетворительного объяснения свойства (M).

2. Теория эфира, увлекаемого приборами, излучающими и принимающими световые сигналы, хотя и позволяет объяснить свойство (M), но не совместима со свойством (E).

3. Корпускулярная теория света, рассматривающая распространение света как механическое движение частиц в пустоте, позволяет объяснить свойство (M), но не совместима со свойством (E).

4. Теория Фитцджеральда — Лоренца, основанная на гипотезе об абсолютном сокращении размеров материальной рамки в направлении ее движения (без увлечения внешнего эфира), совместима как со свойством (M), так и со свойством (E), но неприемлема ввиду своего слишком искусственного характера.

Итак, на рубеже XX в. казалось, что физика зашла в полный тупик.

Именно в это время 26-летний немецкий инженер Альберт Эйнштейн развил систему совершенно революционных взглядов, которая, примирив свойства (M) и (E), оказалась удивительно плодотворной.

ЧАСТЬ III

Пространство — время Эйнштейна и его «парадоксы»

ГЛАВА 7

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

24. Введение

К 1900 г. рассеялись последние сомнения в том, что никакая разумная гипотеза о физическом механизме распространения света не может одновременно объяснить как результаты эксперимента Майкельсона [свойство (M)], так и единственность сигнала, излученного в один и тот же момент времени из одной точки пространства двумя источниками, находящимися в относительном движении [свойство (E)].

Теория, созданная в 1905 г. Эйнштейном и призванная вывести физику из этого тупика, представляет собой результат весьма тонкой и логически стройной работы мысли. Чтобы дать о ней первое представление, мы изберем следующий путь.

Вспомним (см. разд. 23), что два в корне различных предположения о физическом механизме распространения света — свет как волна в эфире, увлекаемом приборами, и свет как поток крошечных «снарядов» — корпускул в пустоте — могли успешно объяснить свойство (M), но были отвергнуты только потому, что не позволяли объяснить свойство (E).

Почему обе столь различные гипотезы о природе света приводят к одному и тому же свойству (M)? Потому, что они отражают следующее фундаментальное свойство света, более общее, чем свойство (M), которое мы назовем в честь Эйнштейна свойством ($Э$):

> Всякий электромагнитный сигнал (свет или радиоволны), который излучен или принят приборами, неподвижными относительно лаборатории Л′, и распространяется в пустоте, имеет по отношению к Л′ скорость:
>
> 1) не зависящую от направления и интенсивности сигнала;
>
> 2) не зависящую от относительной скорости лаборатории Л′ по отношению к другой инерциальной лаборатории Л (и, следовательно, не зависящую от возможной абсолютной скорости лаборатории Л).

При нашем выборе единиц «универсальная» скорость световых сигналов равна $c=c'=1$.

Чтобы понять исключительно глубокий смысл свойства ($Э$), нужно вспомнить, что классическая теория (изложенная в разд. 22) дает для скоростей сигналов s, i и r по отношению к поезду Л′ значения, соответственно равные $^2/_5$, $^4/_5$ и $^8/_5$, причем скорости этих сигналов зависят еще и от величины $^3/_5$, принятой нами в качестве «абсолютной» скорости поезда!

Первая существенно новая идея Эйнштейна состояла в том, что гораздо более важно приписать свету свойство ($Э$), чем делать какие-либо предположения о физическом механизме распространения света.

Итак, Эйнштейн временно отказывается от какой-либо гипотезы о сущности природы света. Он удовлетворяется гипотезой, согласно которой свету присуще свойство ($Э$), не пытаясь выяснить, как и почему свет может обладать этим свойством [1].

Такая позиция ученого не только вполне законна, но и следует лучшим традициям научного исследования. Как известно, Ньютон поступил точно так же, когда открыл общее свойство взаимодействия масс — закон всемирного тяготения. Сформулировав этот закон, он не пытался

---

[1] Такой путь говорит вовсе не об ограниченности нашего понимания природы света (хотя, конечно, всякое понимание ограниченно!), а о том, что это и есть самая простейшая, элементарная истина о природе света.— *Прим. ред.*

выяснить, «как» и «почему» тела могут притягиваться на расстоянии [1].

Однако свойство (Э) еще не позволяло полностью разрешить проблему. Действительно, как мы видели в разд. 23, свет обладает также свойством (E), причем все рассмотренные физические механизмы распространения света (увлекаемый эфир, корпускулы), приводящие к свойству (Э), несовместимы со свойством (E). Таким образом, невозможно приписать свету сразу и свойство (Э), которое предлагает Эйнштейн, и свойство (E), которое вытекает из наблюдений.

Проанализируем это более подробно. Для этого рассмотрим вместо сигналов s' и s_0, описанных нами в разд. 23, сигналы i' и i_0, излученные в момент $t=0$ час. и отраженные в точке b', но выходящие соответственно из точек o' и o.

Поскольку поезд движется со скоростью $v={}^3/_5$, точка b' поезда (рис. 16) придет в точку b с координатой $(+1{,}5)$ в момент $t=2$ час. 30 мин. Вследствие свойства (Э) $(c=1)$ и теоремы Пифагора, согласно которой расстояние ob равно 2,5, сигнал i_0 придет в точку b в 2 час. 30 мин. Следовательно, если обозначить через (B_0) событие, состоящее в прохождении сигнала i_0 через b' (т. е. встречу сигнала i_0 и зеркала b' в точке b), то мы не погрешим против истины, сказав, что событие (B_0) произошло в момент $t=2$ час. 30 мин.

Поскольку мы еще не уверены в том, что наша теория совместима со свойством (E), необходимо по-разному обозначить события, соответствующие прохождениям сигналов i_0 и i' через b'. Прохождение первого из этих сигналов через b' мы только что обозначили через (B_0); событие же,

[1] В самом деле, «объяснить» какое-то явление — это значит свести его к уже «известным», а говоря по совести, просто к привычным фактам (законам, явлениям и т. д.). Но если бы мы всегда пытались применять такой подход к *принципиально новым* явлениям (а материальный мир, как мы считаем, *качественно* неисчерпаем, и в нем всегда есть явления, в принципе несводимые к уже известным), то мы не пришли бы ни к чему, кроме искусственных схем и недоразумений. В науке всегда следует быть готовым столкнуться с фактами новой внутренней природы, и для понимания этих фактов следует прежде всего, после должной проверки, *принять* их и *освоиться* с ними (привыкнуть к ним). Плодотворность такого подхода подтверждается всей историей науки.— *Прим. ред.*

состоящее в прохождении сигнала i' через b', обозначим пока (B′).

Расстояние $o'b'$, как мы помним, равно 2 единицам. Если свойство (Э) имеет место, то скорость c' сигнала i' в поезде равна c. Отсюда следует, что время путешествия сигнала i' между точками o' и b' в поезде равно 2 *час*. Иными словами, интервал времени между событиями (O) и (B′) в поезде равен 2 *час*.

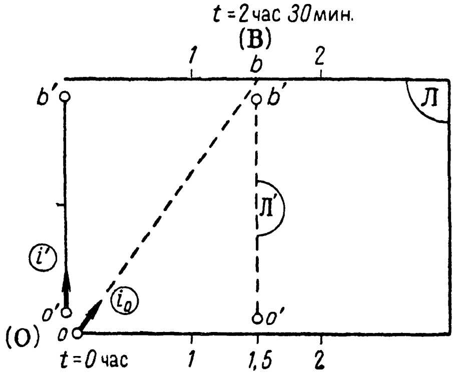


Рис. 16.

Но так как событие (B_0) происходит в момент $t=2$ час. 30 мин., то это означает, что при наблюдении с перрона интервал времени между событиями (O) и (B_0) равен 2 *час* 30 *мин*.

Таким образом, событие (B_0) происходит на полчаса позднее, чем событие (B′). Однако это противоречит свойству (E), согласно которому сигналы i_0 и i' можно рассматривать как один сигнал i.

25. Относительность промежутков времени

Вот здесь-то и «вступает в бой» вторая революционная идея Эйнштейна.

Мы определили, заявляет он представителям «классической» физики, что промежуток времени между событиями (O) и (B′), измеренный в поезде, равен 2 *час*, а между событиями (O) и (B_0), измеренный на полотне железной дороги, 2 *час* 30 *мин*. На этом основании *вы* сделали вывод о том, что прохождение сигнала i_0 через b' происходит на полчаса позже, чем прохождение сигнала i' через b', и что это служит доказательством «разделения» сигналов i_0 и i', противоречащего свойству (E).

Но ваш вывод основан на неявно введенном предположении *об абсолютном характере хода времени.* Вы рассуждаете так, как если бы относительное движение систем отсчета не оказывало никакого влияния на промежуток времени между двумя событиями, например (O) и (B′). Точнее, вы совершенно произвольно приравниваете 2 *час*, протекшие между событиями (O) и (B′) в *поезде,* к 2 *час* между этими же событиями на перроне. Точно так же вы произвольно приравниваете и 2 *час* 30 *мин*, разделяющие события (O) и (B_0) на перроне, к 2 *час* 30 *мин* между этими событиями в поезде. Именно поэтому в обоих случаях вы находите, что сигналы i_0 и i' разделены во времени.

Однако, продолжает Эйнштейн, уж если говорить о надежности постулатов, то нет ничего менее очевидного и менее надежного, чем этот ваш неявный постулат. Напротив, гораздо естественнее предположить, что промежутки времени между двумя событиями в поезде отличаются от времени, протекшего между ними на полотне железной дороги, если только поезд движется по отношению к железнодорожному полотну.

Это последнее предположение, добавляет он, тем более правдоподобно, что расстояние между двумя данными событиями на полотне железной дороги отличается от расстояния между этими же событиями в движущемся поезде. Так, например, расстояние между событиями (O) и (W) (излучение и возвращение сигнала i) в поезде равно нулю (события происходят в одной и той же точке o'), а на перроне 3 единицам [так как событие (O) происходит в точке o, а событие (W) — в точке с координатой $(+3)$]. Почему промежутки времени должны быть более абсолютны, чем расстояния? Почему относительный характер «интервалов» в пространстве не должен сопровождаться относительным же характером интервалов времени между двумя данными событиями?

Таким образом, кажущаяся несовместимость свойств $(Э)$ и (E) не сбила Эйнштейна с толку, и он отнес ее на счет «классического» постулата об абсолютном характере промежутков времени; отвергнув же этот постулат, он принял в качестве одного из основных принципов своей теории одновременное выполнение свойств (*Э*) и (*E*).

Иначе говоря, вместо того, чтобы совершенно голословно утверждать, будто промежуток времени между событиями (O) и (B′) или событиями (O) и (B_0) одинаков в поезде и на перроне, Эйнштейн предположил, что сигналы i' и i_0 распространяются как один сигнал i и что, следовательно, события (B′) и (B_0) совпадают и представляют собой единое событие (B), состоящее в прибытии единого сигнала i в точку b' поезда.

Отождествление событий (B′) и (B_0) автоматически привело Эйнштейна к допущению, что интервал времени между событиями (O) и (B) равен 2 *час* в поезде и 2 *час* 30 *мин* на перроне. Отвергнув классический постулат об абсолютном характере промежутков времени, уже нельзя считать подобное заключение абсурдным и неприемлемым.

Вывод

Теория Эйнштейна не ставит своей целью раскрытие физической природы света, а лишь приписывает ему ряд определенных свойств, вытекающих из эксперимента:

1) свойство (*Э*);
2) свойство (*E*).

Кроме того, эта теория отвергает «классическое» представление об абсолютном характере промежутков времени, — представление, которое с точки зрения этой теории всего лишь предрассудок.

К этому определению теории Эйнштейна следует добавить еще одно замечание, неявно содержащееся в наших предыдущих рассуждениях.

Теория Эйнштейна сохраняет за светом, точнее за всеми электромагнитными колебаниями, роль основного «хронологического агента». Иными словами, она принимает за «стандартный» интервал, или эталон времени, тот промежуток времени, который требуется световому сигналу, чтобы пройти некоторый выбранный раз и навсегда путь в пространстве.

Следовательно, теория Эйнштейна связывает эталон времени с эталоном длины. Поскольку в силу свойства (*Э*) скорость «туда» всегда равна скорости «обратно», то за эталон времени можно принять время, за которое световой сигнал проходит туда и обратно расстояние, равное эталону длины. Выбранный таким образом эталон времени называется *эталоном Эйнштейна — Ланжевена.*

Совокупность принципов теории Эйнштейна приводит к следующим двум более или менее очевидным выводам:

1. *Теория Эйнштейна позволяет объяснить опыт Майкельсона.*

Это не должно вызвать удивления, поскольку свойство (*Э*) было введено в теорию в качестве одного из основных ее постулатов для объяснения этого эксперимента.

Действительно, поскольку в поезде $o'm'=o'b'=o'n'$ и $c'=1$ во всех направлениях, то продолжительность всех трех путешествий сигналов туда и обратно на участках пути $o'm'=2$, $o'b'=2$ и $o'n'=2$ в поезде будет одинакова и равна 4 *час.* Следовательно, сигналы r, i и s одновременно возвратятся в точку o', и не требуется различать события (R) (возвращение сигналов r и s) и (W) (возвращение сигнала i). Возвращение всех трех сигналов будет локально-одновременным и образует одно сложное событие.

Но именно это и вытекает из опыта Майкельсона.

2. *Из теории Эйнштейна следует, что нужно синхронизовать отдельно все часы* (Ч′) *поезда и все часы* (Ч) *железной дороги.*

Совокупность часов (Ч′) поезда образует часовую сеть, отмечающую время t' в поезде, а совокупность часов (Ч) железной дороги — часовую сеть, показывающую время t на перроне.

Если синхронизировать по отдельности все часы (Ч′) и все часы (Ч), то возникает «опасность», что из-за неравенства продолжительностей распространения сигналов в поезде и на перроне одному и тому же событию в двух разных часовых сетках будут соответствовать две различные «даты» t' и t. Это несоответствие сохранится и в том случае, если одновременно пустить в ход (например, в 0 час.) главные часы (Ч′) и (Ч), расположенные в точках o' и o в момент их встречи (O).

Мы увидим, что это опасение вполне оправданно, но тем не менее оно не приводит ни к каким противоречиям, так что его нужно считать не «опасением», а совершенно естественным фактом.

Прежде всего не следует упускать из виду, что в теории Эйнштейна перрон Л уже не будет ни эфиром, ни абсолютным пространством классической теории. Это вполне материальная система — самый настоящий перрон,— от которой требуется только, чтобы она была инерциальной и совершала «простое» движение по отношению к поезду Л′. Каждую из этих двух материальных систем отсчета можно было бы снабдить шкалой с делениями, а на каждом из делений поместить часы.

К тому же нужно обратить внимание на тот факт, к которому мы возвратимся позднее, а именно что теория в том ее виде, который был пока нами изложен, еще ничего не говорит о скорости хода часов (Ч′) и (Ч). На этих часах должно быть просто поставлено то время, которое было «сообщено» каждым из них при помощи световых сигналов.

В качестве первой иллюстрации применения постулатов Эйнштейна мы вновь проанализируем распространение сигнала i между его излучением (O) и возвращением (W) в точку o', после того как он отразился в b',

Поскольку скорость света в системе отсчета Л, связанной с перроном, равна 1 как в теории Эйнштейна, так и в классической теории, обе теории одинаково описывают распространение сигнала i в системе Л, а следовательно, указывают одинаковое место и время возвращения этого сигнала [событие (W)]. Поэтому нет нужды повторять уже приведенные рассуждения, и мы просто приведем результат, полученный в разд. 22.

	Место события в системе Л	Время события
Событие (W): возвращение сигнала i в точку o'	$w(+3)$	$t = 5$ час

В теории Эйнштейна в силу свойства (*Э*) скорость света в поезде также равна 1. Поэтому можно сразу вычислить продолжительность путешествия сигнала i из точки o' в точку b' и обратно в системе отсчета поезда Л′. Пройденный сигналом путь равен 4 единицам, так что продолжительность распространения сигнала в системе поезда равна 4 *час*.

Таким образом, часы (Ч′), помещенные в точке o', в момент прибытия (W) сигнала i нужно выверить так, чтобы они показывали время $t'=4$ час. даже если по каким-либо причинам (например, плохо отрегулированный ход часов или неверно поставленное первоначально время) они показывали другой час. Значит, часы (Ч′), расположенные в точке o', будут синхронизованы при помощи сигнала i с часовой сеткой поезда. Иными словами, согласно теории Эйнштейна:

	Место события в системе Л′	Время события
Событие (W): возвращение сигнала i в точку o'	o'	$t' = 4$ час

(Во всех классических теориях время t' определялось по $t=5$ час., так как постулировалась абсолютность времени: $t'=t=5$ час.!)

Заметим, что некоторые авторы проводят следующую (ложную) параллель между теорией Эйнштейна и классическими теориями. В классических теориях *постулируется*, что промежуток времени между двумя заданными событиями не зависит от относительного движения лабораторий, в которых происходит измерение, тогда как в теории Эйнштейна *постулируется*, что скорость света по отношению к любой лаборатории, образующей инерциальную систему отсчета, не зависит от относительного движения лабораторий: $c=c'=1$. По мнению этих авторов, Эйнштейн тем самым «возводит в абсолют» постоянство скорости света, так же как классическая физика возводит в абсолют величину интервалов времени. Однако такое понимание теории Эйнштейна неверно. Эйнштейн вводит гипотезу инвариантности скорости света «под давлением» опыта Майкельсона. Классический же постулат об абсолютном характере времени есть всего лишь априорное [1] предположение, противоречащее свойству (E), установленному из наблюдений.

[1] Априорное — от «a priori» (*лат.*), взятый без доказательства (как логического, так и опытного).— *Прим. ред.*

26. Обобщение принципа Галилея. Свойство взаимности

Заметим теперь, что главное подтверждение правильности теории относительности, помимо прямой экспериментальной проверки, состоит в том, что эта теория в определенном смысле является продолжением и обобщением принципа относительности Галилея. Как мы уже знаем, согласно этому принципу, никакой опыт в механике не позволяет провести различие между двумя поездами Л′, движущимися по инерции с различными «абсолютными» скоростями, и что с точки зрения механики в этих поездах все происходит так, как если бы оба они покоились по отношению к абсолютному пространству.

Таким образом, никакой механический эксперимент не позволяет обнаружить «абсолютное» движение поезда Л′, — движение, которое, впрочем, нельзя наблюдать непосредственно, так как пустота лишена каких бы то ни было ориентиров. Относительное движение различных поездов Л′ (одного по отношению к другому) нельзя обнаружить «внутри» любого из этих поездов, но зато его можно обнаружить и изучить по непосредственно наблюдаемым ориентирам, принадлежащим другому поезду.

Вот почему принцип Галилея получил название *принципа относительности* (частного или специального, — чтобы подчеркнуть, что он справедлив только для инерциального движения лаборатории Л′).

Однако с точки зрения «классической теории» факты распространения света в противоположность результатам механических экспериментов должны быть весьма чувствительными к быстрым «абсолютным» движениям лаборатории Л′.

Как мы выяснили на примере случая, рассмотренного в разд. 22, в классической теории скорость света относительно поезда должна принимать различные значения — $^2/_5$, $^4/_5$ и $^8/_5$ в зависимости от направления распространения сигналов, тогда как относительно платформы она должна быть в этой теории одинаковой во всех направлениях [1].

---

[1] В общем случае, согласно классической теории, при «абсолютной» скорости поезда v относительная скорость c' продольных сигналов должна быть равна $c \pm v$, а «поперечных» (таких, как сигнал i) — квадратному корню из величины $(c^2 - v^2)$ (если использовать поезд в качестве системы отсчета).

В противоположность механическим экспериментам оптические опыты, казалось, не должны быть «безразличными» к «абсолютному» движению лаборатории. Можно было бы определить «абсолютную» скорость лаборатории, измерив относительную скорость света по отношению к данной лаборатории. Таким образом, создавалось впечатление, что специальный принцип относительности применим не ко всем физическим явлениям, а лишь к явлениям механическим (!).

Однако в теории Эйнштейна благодаря постулированию свойства (*Э*) положение в корне меняется. В самом деле, согласно этому свойству, скорость света относительно лаборатории не зависит от какой-то «абсолютной» скорости света и имеет одну и ту же величину $c=1$, какой бы ни была «абсолютная» скорость лаборатории. Поэтому если относительное движение поездов можно обнаружить по наблюдению внешних ориентиров, которыми обильно снабжено любое материальное тело, то «абсолютное» инерциальное движение по отношению к пустоте или к эфиру, лишенным таких ориентиров, совершенно ненаблюдаемо.

Постулировав, что свет обладает свойством (*Э*), Эйнштейн распространил область применимости принципа Галилея на оптические явления и тем самым обобщил специальный принцип относительности на совокупность всех физических явлений.

Обобщенный таким образом принцип относительности гласит, что движение по инерции любой конкретной лаборатории не проявляется в каких бы то ни было физических явлениях, которые позволили бы определить, движется ли она относительно другой лаборатории. Ничто не позволяет определить скорость той или иной лаборатории по отношению к возможному абсолютному пространству. Но этот принцип никоим образом не запрещает определения движения лабораторий по отношению друг к другу по наблюдениям материальных ориентиров.

Говоря о таком относительном движении, всегда можно считать, что та из двух лабораторий, относительно которой мы описываем движение, находится в состоянии «покоя» (относительного). Принцип относительности можно выразить и так: в любой лаборатории, совершающей «простое» движение по отношению к некоторой инерциальной лаборатории, принятой за покоящуюся, все происходит так, как если бы движущаяся лаборатория сама находилась в состоянии покоя; иначе говоря, в обеих лабораториях все физические явления протекают одинаково.

Теорию Эйнштейна часто называют *специальной* (или *частной*) *теорией относительности*, но это не совсем подходящее название, потому что в основе теории лежит несколько принципов [свойство (*Э*), свойство (*E*), относительный характер времени и т. д.]. Эти принципы не сводятся к одному принципу относительности. Принцип относительности можно получить из принципа Галилея, «облагораживая» его «прививкой» эйнштейновских идей, но теорию Эйнштейна нельзя получить как простое обобщение принципа Галилея.

Невозможность приписать инерциальным лабораториям, находящимся в относительном движении, какие-то «абсолютные» скорости приводит к представлению о полной взаимности между любыми двумя такими лабораториями, например поездом и железнодорожным полотном.

Смысл этого утверждения станет яснее в последующих главах. А пока мы лишь заметим, что взаимность относительного движения любых двух лабораторий требует численного равенства относительных скоростей этих лабораторий, какой бы ни была скорость той лаборатории, которую мы приняли за систему отсчета. Вообще взаимность систем отсчета Л и Л′ означает, что движение системы Л относительно системы Л′ следует тем же правилам, что и движение системы Л′ относительно Л.

27. Собственное время длительности процессов

Изучая синхронизацию часов, расположенных соответственно в поезде и на платформе, мы обнаружили в конце разд. 25, что по теории Эйнштейна время прохождения сигнала i по замкнутому пути (туда и обратно) в поезде равно 4 *час*, тогда как время прохождения соответствующей точки o' по незамкнутому маршруту в системе отсчета, связанной с платформой, равно 5 *час*.

Теперь рассмотрим не распространение сигналов, таких, как сигнал i, выходящий из точки o' и возвращающийся в эту же точку, а некоторый физический, химический или биологический процесс, происходящий в точке o', например сгорание некоторого количества горючей смеси в дизельном моторе поезда (для определенности будем предполагать, что он находится в точке o').

Пусть начало этого процесса совпадает с моментом излучения (О) сигнала i в точке o', а конец — с моментом возвращения (W) сигнала i в точку o'. Тогда можно было бы пытаться судить о продолжительности такого процесса по тем или иным его количественным проявлениям (например, по количеству сгоревшей смеси). Однако благоразумнее определить продолжительность процесса, измерив продолжительность распространения сигналов между событиями (О) и (W).

Продолжительность того или иного процесса, протекающего в некоторой фиксированной точке o' данной инерциальной лаборатории Л$'$, определенная при помощи сигналов света, выходящих из точки o' и возвращающихся в эту же точку, называется *собственным временем* длительности этого процесса.

Как мы видим, это определение содержит два важных элемента: во-первых, процесс должен происходить в определенной точке данной инерциальной лаборатории и, во-вторых, световым сигналам отводится исключительная привилегия выступать в роли «часов». Конечно, можно судить о собственном времени и по количеству израсходованного горючего, если только установлено на опыте, что одному и тому же собственному времени, определенному при помощи световых сигналов, соответствует всегда одно и то же количество сгоревшей смеси. Однако расход горючего — всего лишь вспомогательное мерило собственного времени, потому что этот процесс может быть неравномерным, как и любой другой. Достаточно вспомнить, например, как неравномерно возрастает вес животного в зависимости от его возраста.

Таким образом, мы можем утверждать, что собственное время всякого процесса, протекающего в точке o' между событиями (О) и (W), равно по определению 4 *час.* А поскольку часы (Ч$'$), расположенные в точке o', также проверяются по излучению и приему световых сигналов, то о собственном времени данного процесса можно судить по показаниям часов, расположенных в o'. Если, например, событие (О) происходит в 0 час., а событие (W) — в 4 час. по показаниям этих часов, то собственное время всякого процесса, протекающего в точке o' между этими событиями, равно 4 *час.* Однако очевидно, что часы играют здесь совершенно вспомогательную роль: они как бы напоминают нам результаты, полученные по наблюдениям испускания и приема световых сигналов.

Для наблюдателей, находящихся в поезде, процесс, протекающий в o', происходит в фиксированной неподвижной точке, тогда как наблюдателю, который расположился на платформе, представляется, что этот процесс происходит в точке (моторе поезда), совершающей «простое» движение по незамкнутому маршруту между точкой o и точкой w с координатой $(+3)$ по шкале перрона. Иными словами, для наблюдателей, неподвижных относительно железнодорожного полотна, речь идет о сгорании определенного количества горючего в движущемся поезде.

Если наблюдатели на платформе для определения продолжительности этого процесса используют тот же прием, что и наблюдатели в поезде, т. е. измеряют время распространения световых сигналов в своей системе отсчета, то они должны приписать данному процессу между событиями (O) и (W) продолжительность 5 *час,* так как сигналу i требуется 5 *час* для того, чтобы пройти со скоростью $c=1$ по железнодорожному полотну путь $(ob+bw)$, равный 5 единицам.

Наблюдатели на платформе, естественно, получат тот же результат и по часам (Ч), синхронизованным при помощи световых сигналов, или основным методом, описанным в разд. 8, используя для этой цели сам поезд, проходящий со скоростью $v={}^{3}/_{5}$ путь ow, равный 3 единицам, за 5 *час.* Наш поезд можно использовать для определения продолжительности процесса потому, что он движется по прямолинейному пути с постоянной скоростью.

Таким образом, согласно теории Эйнштейна, совершенно объективные измерения продолжительности одного и того же процесса, протекающего в точке o', могут привести к двум различным результатам в зависимости от того, производится ли измерение в лаборатории Л$'$, с которой связана точка o', или в лаборатории Л, совершающей «простое» движение по отношению к Л$'$.

Собственное время, полученное как результат измерений в лаборатории, связанной с точкой o', зависит только от природы самого процесса, тогда как продолжительность этого процесса в движущейся относительно этой лаборатории системе отсчета зависит как от природы процесса, так и от относительной скорости v используемой системы отсчета.

Действительно, если скорость относительного движения лабораторий равна $v = 3/5$, то отношение продолжительностей рассматриваемого процесса равно $4/5$. Используя рассуждения разд. 25, можно показать в общем виде, что для любого значения v скорости относительного движения и при любых размерах поезда Л′ отношение С собственного времени к «несобственному» равно квадратному корню из величины

$$1 - \frac{v^2}{c^2}$$

и, следовательно, зависит от скорости v [1].

Физики, производящие свои наблюдения на платформе, если они знают теорию Эйнштейна, всегда могут найти путем измерения «несобственной» продолжительности (5 *час*) также собственное время (4 *час*) этого процесса, потому что они могут измерить относительную скорость $v = 3/5$ движения лабораторий Л и Л′ и вычислить соответствующее отношение $С = 4/5$.

Некоторые авторы (в том числе и сам Эйнштейн) вместо выражения «несобственное время процесса» употребляли короткий термин «длительность» или просто «время». Эта «упрощенная» терминология вполне законна, но может тем не менее вызвать некоторые недоразумения. Действительно, выражение «длительность процесса», где слово «длительность» употребляется без всякого эпитета, может возродить старое и неверное представление о том,

---

[1] Для вывода этого соотношения можно воспользоваться рис. 13. С учетом всех обозначений этого рисунка можно записать такой ряд очевидных соотношений:

$$С = \frac{t'_{ow}}{t_{ow}} = \frac{2t'_{ob}}{2t_{ob}} = \frac{t'_{ob}}{t_{ob}} = \frac{(\overline{o'b'})/c}{(\overline{ob})/c} = \frac{(\overline{o'b'})}{(\overline{ob})},$$

$$С^2 = \frac{(\overline{o'b'})^2}{(\overline{ob})^2} = \frac{(\overline{ob})^2 - (\overline{oa})^2}{(\overline{ob})^2},$$

$$С^2 = 1 - \left(\frac{\overline{oa}}{\overline{ob}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{v \cdot t_{ob}}{c \cdot t_{ob}}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

будто каждый процесс характеризуется единым для всех наблюдателей внутренне ему присущим временем протекания, тогда как речь идет о величине, которая зависит как от собственного времени процесса (собственной длительности), так и от относительной скорости v лаборатории Л′.

Иногда говорят, что отношение собственного и «несобственного» времени процесса выражает так называемое *замедление хода времени,* вызванное относительным движением лабораторий. Однако если термин «замедление», понимаемый как некоторое *растяжение, удлинение,* сам по себе и приемлем, то этого нельзя уже сказать о сочетании его с термином «время». Дело в том, что такое сочетание внушает неверную мысль о каком-то цельном объекте, который подвергается удлинению (подобно металлической линейке, если ее нагревать). Поэтому термин «замедление времени» следует отбросить как ложно утверждающий, будто время самостоятельно и не зависит ни от каких конкретных процессов, хотя на самом деле понятие «длительность» не имело бы никакого смысла, если бы во Вселенной вообще не происходило событий!

Конечно, имеет место полная взаимность (в описанном выше смысле) между собственным временем процесса, происходящего в поезде, и «несобственным» временем, измеряемым наблюдателем на платформе; эта взаимность проявляется, если поезд и платформу поменять местами. Так, вместо того, чтобы рассматривать процесс, происходящий в точке o' поезда, мы можем обратиться к процессу, который «привязан» к точке o железнодорожного пути — например, говорить о сгорании определенного количества угля в печке на «станции 0». Тогда благодаря полному равноправию лабораторий Л и Л′ мы можем перефразировать сказанное для o' и написать:

$$\frac{\text{Собственное время процесса, происходящего в точке } o' \text{ системы Л}}{\text{«Несобственное» время этого же процесса, измеренное в Л}'} = \mathrm{C},$$

где величина C должна быть к тому же равна квадратному корню из $[1-(v^2/c^2)]$, так как квадрат скорости поезда по отношению к железнодорожному полотну и квадрат ско-

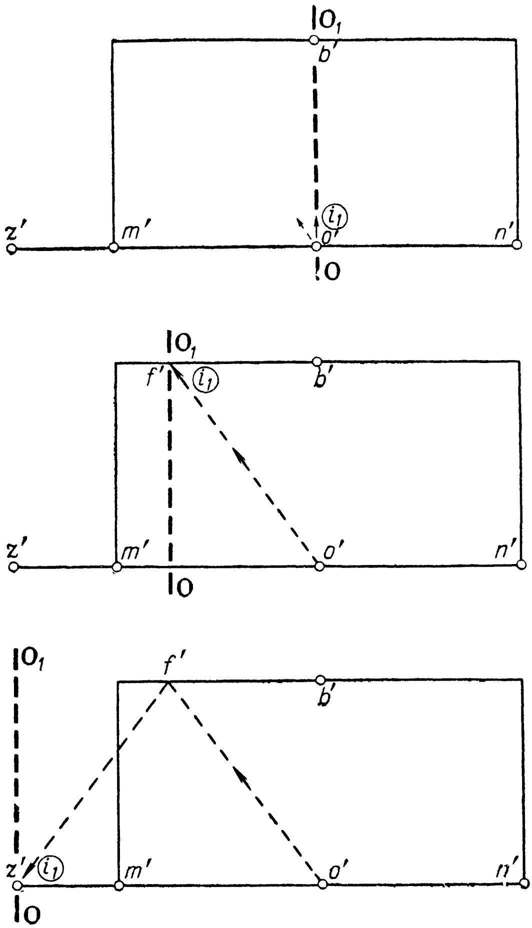


Рис. 17.

рости железнодорожного полотна по отношению к поезду выражаются одной и той же величиной v^2.

На рис. 17 показано распространение светового сигнала i_1, который выходит из точки О и возвращается в эту же точку после путешествия туда и обратно поперек железнодорожного пути. Вагон Л′ представлен на рис. 17 в виде добавочного отрезка $m'z'$, который оказывается необходимым потому, что возвращение (Z) сигнала i_1 происходит по левую сторону от $o'm'$ в трех единицах от o'. Конечно, отношение расстояния, пройденного сигналом i_1 на железнодорожном полотне, к расстоянию, пройденному в поезде, также равно $^4/_5$. Продолжительность путешествия сигнала i_1 туда и обратно на перроне, равная 4 *час*, представляет собственное время любого процесса, лишь бы он происходил в точке О железнодорожного полотна и был ограничен во времени событиями (О) и (Z).

28. Так называемое «отставание движущихся часов»

Понятие «ход часов» вытекает из сравнения промежутка времени, отсчитанного часами (например, число полных оборотов минутной стрелки) с заданной длительностью эталонов времени.

Так, ход часов (Ч′), помещенных в точку o' поезда, можно контролировать при помощи сигналов, выходящих из o' и возвращающихся обратно, после того как они пройдут определенный участок пути $o'b'o'$ в поезде. Можно считать, что часы (Ч′) идут правильно только в том случае, если за время распространения сигнала туда и обратно, которое длится, скажем, 4 *час* по часовой сетке, связанной с поездом, минутная стрелка часов сделает ровно 4 полных оборота. В противном случае мы говорим, что наши часы спешат или отстают.

Часы ($Ч_o$) и ($Ч_w$), расположенные в точках o и w железнодорожного полотна, можно синхронизировать при помощи одного и того же сигнала i, так как мы знаем, что этому сигналу требуется 5 *час*, чтобы пройти путь $(ob+bw)$ на платформе между точками o и w или событиями (О) и (W). Следовательно, часы синхронизированы правильно, если часы ($Ч_o$) показывают 0 час. в момент отправления (О) сигнала i, а часы ($Ч_w$) показывают 5 час. в момент прибытия сигнала i в точку w. Но это еще ничего не говорит о ходе часов ($Ч_o$) и ($Ч_w$).

Мы не можем контролировать хода часов на платформе при помощи сигнала типа i, потому что сигнал этого типа никогда не возвращается в ту точку железнодорожного полотна, через которую он уже прошел.

Однако ничто не мешает контролировать ход часов ($Ч_o$) на платформе при помощи сигнала i_1, вышедшего из точки O и отраженного зеркалом, находящимся на перроне № 2 в точке O_1 как раз напротив точки O (см. рис. 17). Путешествие сигнала i_1 туда и обратно определяет собственное время 4 *час* по часовой сетке железнодорожного полотна и позволяет проверить ход часов ($Ч_o$).

Таким образом, наблюдатели в поезде могут проверять свои часы и стандартизировать их ход, не обращая внимания на часы на платформе, и наоборот.

Допустим теперь, что наблюдатели в поезде и на платформе успешно синхронизировали независимо друг от друга каждый свою часовую сетку (в момент $t_0 = t'_0 = 0$ час.) и независимо стандартизировали ход своих часов. Так как эти операции каждая группа наблюдателей делала независимо от другой, то наблюдатели на платформе будут уверены, что в часовой сетке платформы все часы идут правильно, но они не могут быть уверены заранее, что в часовой сетке поезда часы отрегулированы таким же образом. (И наоборот, то же касается наблюдателей в поезде.)

Как ни странно, синхронизация часовой сетки (Ч) платформы не позволяет устанавливать ход часов ($Ч_o$) и ($Ч_w$) на железнодорожном полотне, однако по этой сетке можно установить ход часов (Ч′) поезда, расположенных в o', по измерениям, производимым наблюдателями на платформе.

Действительно, если часовая сеть железнодорожного полотна синхронизирована правильно, то наблюдатели на платформе могут определить продолжительность путешествия часов (Ч′) между их прохождениями (O) через точку o в момент $t = 0$ час. и (W) через точку w (+3) в момент $t = 5$ час. Вычислив разность моментов указанных событий в часовой сетке железнодорожного полотна по показаниям часов ($Ч_o$) и ($Ч_w$), наблюдатели определят, что в данной часовой сетке путешествие часов (Ч′) между событиями (O) и (W) продлится 5 *час*.

Установив это, наблюдатели придут к одному из двух возможных выводов в зависимости от того, знают они или не знают теорию Эйнштейна. Разберем оба эти случая по отдельности.

1. *Наблюдатели знают теорию Эйнштейна.* Тогда наблюдатели на платформе скажут: «За 5 *час* по нашей часовой сетке часы (Ч′) прошли расстояние от деления 0 до деления 3 шкалы платформы. Их скорость равна $^3/_5\,c$. При такой скорости $C={}^4/_5$. Следовательно, если промежуток времени между событиями (O) и (W) для явления, происходящего в o', на платформе равен 5 *час*, то в поезде он равен всего 4 *час*.

Установив затем, что часы (Ч′) показывали 0 час. при прохождении через точку o и 4 час. при прохождении через точку w $(+3)$, они сделают вывод, что часы (Ч′) идут правильно.

2. *Наблюдатели не знают теории Эйнштейна.* Тогда наблюдатели на платформе скажут: «Мы не замечаем никаких проявлений движения нашей лаборатории (ни оптических, ни электромагнитных). Значит, наша лаборатория находится в абсолютном покое (по отношению к абсолютному пространству Ньютона или по отношению к эфиру). Кроме того, продолжительность наблюдаемого явления — также величина абсолютная, не зависящая от движения лаборатории. Следовательно, промежуток времени между событиями (O) и (W), равный 5 *час* на железнодорожном полотне, равен 5 *час* и в поезде, несмотря на то, что он движется.

Установив затем, что часы (Ч′) показывают 0 час. при прохождении через точку o и только 4 час. при прохождении через точку w $(+3)$, наши наблюдатели попытались бы сделать один из следующих выводов:

1) либо наблюдатели в поезде плохо отрегулировали ход своих часов (Ч′),

2) либо, если ход часов отрегулирован правильно, часы (Ч′) систематически отстают из-за абсолютного движения поезда.

Именно это неправильное истолкование релятивистских эффектов движения приводит к тому, что некоторые авторы говорят об отставании движущихся часов или о том, что движущиеся часы идут медленнее, чем покоящиеся. Если понимать это утверждение буквально, то можно прийти к неверному выводу, что с движущимися часами происходит нечто подобное материальному сокращению Фитцджеральда — Лоренца. Но не следует забывать, что принцип относительности утверждает как раз противоположное, а именно что движение по инерции не вызывает никаких наблюдаемых эффектов [1].

29. Прохождение космических лучей через земную атмосферу

Рассмотрим какое-нибудь физическое явление, происходящее в точке o' движущегося поезда, ограниченное во времени событиями (O) и (W). Для краткости будем говорить, что речь идет о процессе (O) — (W).

Какой бы теории мы ни придерживались — классической или эйнштейновской, из самого определения скорости следует, что расстояние ow, пройденное точкой o' поезда в системе отсчета Л за время, протекшее между событиями (O) и (W), равно произведению $v \cdot t_{ow}$.

Здесь v — скорость поезда, а t_{ow} — время по часовой сетке платформы, прошедшее между моментами, когда точка o' поезда проходила через точки o и w железнодорожного полотна. Значит, если скорость v равна $^3/_5$ c, а промежуток времени $t_{ow}=5$ *час*, то расстояние ow, пройденное точкой o' относительно железнодорожного полотна, равно 3 единицам.

Но если в классической теории продолжительность t_{ow} данного явления в системе отсчета платформы и его же продолжительность t'_{ow} в системе отсчета поезда считаются одинаковыми, то, как мы уже знаем, в теории Эйнштейна *собственное время* явления в системе отсчета поезда и «несобственное» время в системе отсчета платформы существенно отличаются друг от друга.

Так, для скорости поезда $v={}^3/_5$, что соответствует значению $C={}^4/_5$, промежуток «несобственного» времени $t_{ow}=$

---

[1] На наш взгляд, автор здесь усложняет вопрос. Говоря о замедлении хода часов и о сокращении движущихся предметов в направлении их движения, физики-релятивисты (т. е. все физики, которые идут в ногу со временем, в том числе и автор этой книги) имеют в виду следующее. Производя измерения в системе отсчета, относительно которой объект (например, часы) движется, мы обнаруживаем *наблюдаемые эффекты* замедления хода часов и т. д.; принцип относительности утверждает только, что эти эффекты отсутствуют в системе отсчета, относительно которой объект покоится. Можно сказать, что проф. Курганов использует несколько более узкое понятие «наблюдаемого эффекта», чем это обычно принято.— *Прим. ред.*

$=5$ *час* будет соответствовать промежутку собственного времени, получающемуся умножением t_{ow} на C:

$$\text{Собственное время} = t'_{ow} = 5 \cdot \frac{4}{5} = 4 \text{ час}.$$

Обратно, если известно, что явление (O) — (W) имеет место в точке o' поезда и его собственная длительность равна 4 *час*, то, умножив собственное время на коэффициент замедления A, обратный C легко найти, что

$$t_{ow} = \mathrm{A} \cdot t'_{ow} = 4 \cdot \frac{5}{4} = 5 \text{ час}.$$

Условимся называть расстояние ow в «несобственной» системе Л «несобственным» расстоянием. Тогда наши результаты можно сформулировать так:

1) в любой из теорий (как классической, так и эйнштейновской)

«Несобственное» расстояние $= v \times$ («Несобственное» время);

2) в теории Эйнштейна

«Несобственное» расстояние $= \mathrm{A} \cdot v \times$ (Собственное время).

Таким образом, в теории Эйнштейна данному собственному времени в системе отсчета, связанной с платформой, соответствует путь, который уже нельзя просто считать произведением скорости на собственное время, как в классической теории,— это произведение нужно еще домножить на коэффициент A, который зависит от скорости v и быстро возрастает, когда v приближается к скорости света.

В таблице приведены значения коэффициента A при различных скоростях v, наблюдаемых в природе и в различных технических устройствах.

Характер движения	v в % от c	Коэффициент A
Скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца	0,01	1,0000000005
Движение электронов в радиолампе	1,00	1,0005
Космические лучи (мю-мезоны)	99,5	10
Электрон в синхротроне на 1 млрд. электронвольт	99,99999	2000

Значит, за одно и то же собственное время, например 4 *час*, расстояние, пройденное объектами в системе отсчета Л с различными скоростями v, все более и более приближающимися к единице (что в нашей системе единиц соответствует скорости света), изменяется от 40 единиц длины для космических лучей (мю-мезонов) до 8000 единиц длины для электронов в ускорителе элементарных частиц мощностью в миллиард электронвольт (вместо 4 единиц длины, которые дает классическая теория).

Мю-мезоны космических лучей самопроизвольно распадаются на электрон и нейтральную частицу. Среднее «время жизни» почти покоящихся мю-мезонов — около двух миллионных долей секунды. Эту величину определяют, затормозив мезоны в толще металла и измерив время, которое прошло с момента попадания мезона в металл до момента его распада. Это и есть, очевидно, среднее собственное время жизни мезона.

При скорости, равной 99,5% скорости света, т. е. $v = 298\,000$ *км/сек*, коэффициент A достигает величины порядка 10. С точки зрения дорелятивистской физики за собственное время 0,000002 *сек* мезон должен пройти расстояние около 600 *м*.

Однако, согласно теории относительности, расстояние, которое успеет пройти мезон до распада, составляет 6000 *м*. Эта величина надежно подтверждается наблюдениями космических лучей, тогда как величина пробега в 600 *м*, которую дает классическая теория, никак не позволила бы мезону достичь земной поверхности, не распавшись.

ГЛАВА 8

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ И «СОКРАЩЕНИЕ» РАЗМЕРОВ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ

30. Объяснение результатов опыта Майкельсона в теории Эйнштейна

Анализ с позиций теории Эйнштейна процесса распространения «поперечного» сигнала i уже привел нас к выводу об относительности промежутков времени в случае «пространственно-совпадающих» событий или явлений, происходящих в инерциальных лабораториях.

Если мы, исходя из тех же предположений и в свете того, что нам уже известно о распространении сигнала i, рассмотрим теперь распространение «продольных» сигналов r и s, то придем к выводу об относительности другого важного понятия — *одновременности на расстоянии.* Мы увидим, как логическое развитие идей, изложенных в предыдущей главе, с неизбежностью заставляет сделать вывод, что два события, происходящие на некотором расстоянии друг от друга и одновременные в некоторой инерциальной «лаборатории», например Л′, вообще говоря, не будут одновременными в лаборатории Л, и наоборот.

Сравнивая затем *расстояния* между точками, в которых происходят эти события, в системах отсчета Л′ и Л, мы получим одно из самых «парадоксальных» следствий теории Эйнштейна, а именно что расстояние в свою очередь относительно и обладает различными значениями в системах отсчета Л′ и Л.

Однако, прежде чем рассматривать, как распространяются сигналы r и s, следует уточнить некоторые определения.

Мы знаем, что одним из основных постулатов, положенных Эйнштейном в основу своей теории, было свойство (E), согласно которому световой сигнал, посланный источником, помещенным в точке o' движущегося поезда, в момент прохождения (O) точки o' через o, и световой сигнал, излученный в тот же момент источником, расположенным в точке o платформы, распространяются так, как если бы они были излучены одним и тем же источником. Представим себе, что источником света, излученного в одной из точек o или o' (безразлично какой), была электрическая искра или молния, проскочившая между точками o' и o в момент их встречи.

Оказывается, что особенно просто определить сигналы r и s и основные события, связанные с их распространением, если рассмотреть картину, наблюдаемую в поезде Л′.

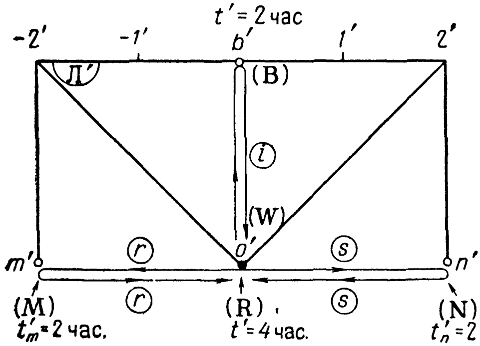


Рис. 18.

Тогда сигнал r — это свет вспышки (O), отраженный от зеркала m', которое расположено в поезде на расстоянии 2 единиц от точки o'. Эту точку мы будем обозначать как m' (—2′), где штрих у цифры 2 означает, что речь идет о делениях, нанесенных на самом поезде, а не на платформе. Знак минус означает здесь, что точка m' находится слева от o'. Событие, состоящее в отражении сигнала r от зеркала m', будем обозначать как (M). Событие, состоящее в возвращении сигнала r в точку o', будем обозначать как (R).

Итак, о распространении сигнала r в поезде Л′ мы знаем следующее (рис. 18):

	Место в системе Л′	Момент времени t'
Событие (M): отражение r от m'	m'(—2′)	2 час
Событие (R): возвращение r в o'	o'	4 час

Точно так же можно убедиться, что сигнал s — это отраженный свет вспышки (O) от зеркала n' $(+2')$. Событие, состоящее в отражении сигнала s от зеркала n', мы будем называть событием (N). Сигнал s возвращается в o', пройдя расстояние в 4 единицы в поезде, в момент $t'=4$ час., и его возвращение совпадает по времени с возвращением (R) сигнала r, поэтому нет необходимости обозначать его новой буквой.

Необходимые нам данные о распространении сигнала s в поезде можно представить в виде следующей таблицы (см. рис. 18):

	Место в системе Л′	Момент времени t'
Событие (N): отражение s от n'	$n'(+2')$	2 час.
Событие (R): возвращение s в o'	o'	4 час.

Сходные результаты мы уже получили ранее для «поперечного» сигнала:

	Место в системе Л′	Момент времени t'
Событие (B): отражение i от b'	b'	2 час
Событие (W): возвращение i в o'	o'	4 час

Отсюда следует, что возвращение (R) сигналов r и s в o' в момент $t'=4$ час. совпадает по времени с возвращением (W) сигнала i в o'. Таким образом, события (R) и (W) фактически образуют *одно сложное событие* (RW), как этого и требует результат эксперимента Майкельсона.

Однако мы уже знаем (см. стр. 100), что для события (W) (возвращение сигнала i в o') место и время в системе отсчета Л железнодорожного полотна определяются следующей таблицей:

	Место в системе Л	Момент времени t
Событие (W): возвращение i в o'	$w\,(+3)$	5 час

Таким образом, мы приходим к новому, весьма существенному результату. В самом деле, так как события (R) и (W) образуют единое сложное событие (RW), то место и время события (R) в системе отсчета Л совпадает с местом и временем события (W), а именно:

	Место в системе Л	Момент времени t
Событие (R): возвращение r и s в o'	$w\,(+3)$	5 час

Как мы видим, этот результат теории Эйнштейна, который мы назовем «фундаментальным результатом», в корне отличается от того, что дает классическая волновая теория, согласно которой (см. стр. 80) событие (R) должно происходить не в точке $(+3)$ в момент $t=5$ час., а в точке $(+3{,}75)$ в момент $t=6$ час. 15 мин. по часовой сети, связанной с железнодорожной линией.

Первое интересное следствие «фундаментального результата» состоит в том, что он позволяет легко определить время и место событий (M) и (N) в системе отсчета Л, тогда как в теории Эйнштейна до сих пор мы могли их определить только в системе поезда.

Действительно, рассмотрим сигнал s (рис. 19). Согласно «фундаментальному результату», по часовой сети платформы должно пройти 5 *час* между излучением этого сигнала из точки o и его прибытием в точку w $(+3)$, расположенную в 3 единицах длины от o. Но поскольку в силу свойства (*Э*) скорость сигнала s по отношению к платформе равна 1, за 5 *час* он пройдет расстояние в 5 единиц. Однако, очевидно, в системе отсчета платформы «разомкнутый» путь, пройденный сигналом s, должен складываться из перемещения на 4 единицы вправо и 1 единицу влево. Хотя путешествие этого сигнала по такому «незамкнутому витку» покроет длину в 5 единиц, сам сигнал переместится лишь из точки o в точку w, т. е. на расстояние всего 3 единицы.

Двигаясь по такому витку, луч меняет направление движения на противоположное в точке $(+4)$, которую мы обозначим [1] $n(+4)$. Этот поворот есть не что иное, как событие (N) — отражение луча s от зеркала n'. Так как, с другой стороны, сигнал s выходит из точки o в $t=0$ час.,

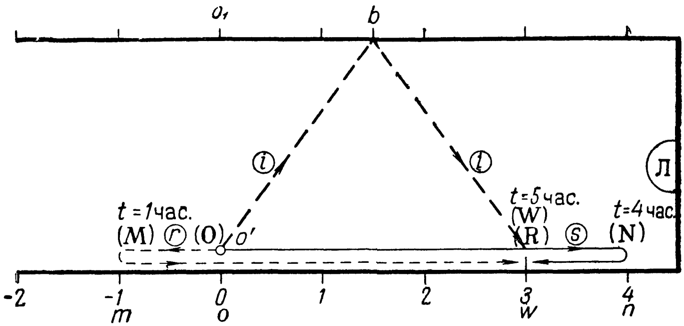


Рис. 19.

а его скорость равна 1, то он прибывает в точку $n(+4)$ в момент $t=4$ час. Итак, мы приходим к следующим результатам относительно места и времени события (N) в системе отсчета Л:

	Место в системе Л	Момент времени t
Событие (N): отражение s от n'	$n(+4)$	4 час

Если повторить эти рассуждения для сигнала r, то мы найдем, что между его излучением в o и прибытием в w в системе Л он также проходит путь в 5 единиц, но его

---

[1] Напомним, что в классической теории точка, в которой луч менял направление движения, соответствовала делению $(+5)$ железнодорожного пути и, следовательно, была обозначена как $n(+5)$. Таким образом, в наших обозначениях буква n означает не одно и то же место на платформе, а расположение события (N), свое для каждой принятой за основу теории.

путь складывается из перемещения сначала на 1 единицу влево, а затем на 4 единицы вправо. «Точка поворота» траектории этого сигнала имеет координату (—1), которую мы обозначим $m(-1)$. Именно в этой точке происходит событие (M) — отражение луча r от зеркала m'. Поскольку расстояние в 1 единицу луч проходит за 1 *час*, то событие (M) должно состояться в момент $t=1$ час. Сведем данные о сигнале r в следующую таблицу:

	Место в системе Л	Момент времени t
Событие (M): отражение r от m'	$m(-1)$	1 час

Результаты, приведенные в трех последних таблицах о месте и времени t событий (R), (M) и (N) в системе отсчета Л, исключительно важны, так как сравнение их с данными о месте и времени этих же событий в системе отсчета Л′ раскрывает основные релятивистские свойства пространства — времени.

31. Относительность одновременности на расстоянии

Прежде всего соберем в единую таблицу наиболее важные результаты, следующие из теории Эйнштейна, которые мы получили в предыдущем разделе.

Система отсчета	(M) r в m'	(N) s в n'	Промежуток времени между (M) и (N)	Расстояние между (M) и (N)	(W) — возвращение i и (R) — возвращение r и s
Л′	$t'_m =$ $= 2$ час.	$t'_n =$ $= 2$ час.	0 *час* (одновременны)	$m'n' =$ $= 4$ ед.	Локально-одновременны в o' ($t' =$ $= 4$ час.)
Л	$t_m =$ $= 1$ час	$t_n =$ $= 4$ час.	3 *час* (не одновременны)	$mn =$ $= 5$ ед.	Локально-одновременны в w ($t =$ $= 5$ час.)

Поскольку часовые сети t и t' синхронизованы (независимо друг от друга), равенство t'_m и t'_n означает, что события (M) и (N) являются одновременными в поезде Л′. Напротив, в системе Л событие (N) происходит спустя 3 *час* после события (M), т. е. эти события неодновременны на железнодорожном пути Л.

Таким образом, мы приходим к выводу, что, согласно теории Эйнштейна, *одновременность на расстоянии* есть нечто относительное, зависящее от выбора системы отсчета. Интервал времени между двумя событиями может быть равен нулю, если рассматривать их с точки зрения собственных интервалов времени поезда; вместе с тем интервал времени между теми же событиями с точки зрения собственных интервалов времени железнодорожного пути может отличаться от нуля (здесь он равен 3 *час*!).

Но не следует упускать из виду, что по теории Эйнштейна относительна лишь *одновременность на расстоянии;* локальная же (местная) одновременность сложных событий [таких, как события (W) и (R) — (WR)] не зависит от выбора системы отсчета. Если эти события локально-одновременны в поезде, поскольку они происходят в одной и той же точке o' в один и тот же момент времени $t=4$ час., то они будут также локально-одновременны и на платформе (в точке w в момент $t=5$ час.).

Следовательно, возвращаясь к понятию одновременности на расстоянии, мы можем заключить, что, согласно теории Эйнштейна, два события [например (M) и (N)], происходящие в один и тот же момент времени в некоторой системе отсчета (например, в системе Л′ поезда), вообще говоря, происходят не одновременно в другой инерциальной системе отсчета (скажем, в системе Л железнодорожного пути).

Один из главных «парадоксов» теории относительности состоит именно в том, что об одних и тех же событиях (M) и (N) можно сказать, что они «одновременны» и что они «не одновременны», в зависимости от того, рассматриваем ли мы их в часовой сетке t' поезда или в часовой сетке t железнодорожного пути.

Иными словами, такие обиходные выражения, как «в то время, как...», «в тот момент, когда...» и т. д., выражающие одновременность двух событий и в равной мере употребительные как для описания локально-одновременных, так и одновременных на расстоянии событий, во втором случае совершенно лишены смысла, если не уточнено, в какой системе отсчета (часовой сетке) данные события одновременны.

Таким образом, мы имеем право говорить: «В поезде Л′ событие (M) происходит в тот же момент времени, что и событие (N)», но ни в коем случае нельзя сказать вообще: «Событие (M) происходит в тот же момент времени, что и событие (N)».

Теория Эйнштейна не ограничивается лишь предсказанием факта «нарушения одновременности» в системе отсчета железнодорожного пути для событий, происходящих на некотором расстоянии друг от друга и одновременных в системе отсчета поезда. Она показывает, что промежуток времени, разделяющий события (M) и (N) в системе отсчета Л железнодорожного пути («нарушение одновременности»), пропорционален расстоянию (mn) между событиями (M) и (N) в системе отсчета Л. Эта разница во времени пренебрежимо мала для событий, происшедших очень близко друг от друга, но может стать весьма значительной для событий, разделенных большим расстоянием. Эта разница во времени также зависит и от скорости v относительного движения систем Л′ и Л.

В общем случае для произвольной скорости v и произвольных размеров поезда (не конкретизируя этих величин) легко получить [1] соотношение между величиной «нарушения одновременности» t_{mn} пары событий (M) и (N) и расстоянием (mn) между ними в системе Л:

$$\boxed{t_{mn} = \frac{v \cdot (mn)}{c^2}}$$

[1] Действительно, для этого достаточно выписать следующие соотношения, очевидные из физических или геометрических соображений (см. рис. 19):

$$t_{mn} = t_{on} - t_{om} = \frac{on}{c} - \frac{om}{c} = \frac{on - om}{c} = \frac{on - nw}{c} = \frac{ow}{c} =$$

$$= \frac{v \cdot t_{ow}}{c} = \frac{v\,(t_{on} + t_{nw})}{c} = \frac{v\,(t_{on} + t_{om})}{c} =$$

$$= \frac{v\left(\frac{on}{c} + \frac{om}{c}\right)}{c} = \frac{v\,(on + om)}{c^2} = \frac{v \cdot (mn)}{c^2}.$$

Если $v = {}^3/_5$ $(c = 1)$, а $(mn) = 5$, то эта общая формула дает $t_{mn} = 3$ час. Она показывает, что «дефект одновременности» пропорционален как скорости v, так и расстоянию (mn).

Неодновременность событий (M) и (N) в системе отсчета Л можно рассматривать как «временно́й аналог» несовпадения в этой системе отсчета Л тех точек пространства, в которых происходят события (O) и (W), «пространственно-совпадающие» в системе отсчета Л′. Промежуток времени между событиями (M) и (N), равный нулю в системе отсчета Л′, становится равным 3 *час* в системе отсчета Л.

Наконец, само собой разумеется, что все эти свойства в силу равноправия систем отсчета Л и Л′ характеризуются взаимностью и в равной степени относятся к событиям, одновременным на железнодорожном пути, но не одновременным в поезде. В дальнейшем нам еще встретятся примеры таких событий.

32. Релятивистское сокращение длин

Напомним, что событие (O), состоящее в посылке сигналов r, i и s приемником-излучателем o' поезда, и событие (W), состоящее в возвращении «поперечного» сигнала i в точку o', происходят в одной и той же точке поезда, однако эти события происходят не в одной и той же точке железнодорожного пути. Эта *относительность «пространственного совпадения»* событий представляет собой явление чисто классическое, и теория Эйнштейна ничего нового к нему не добавляет.

В самом деле, выводы теории Эйнштейна в данном случае совпадают с классическими, согласно которым расстояние между событиями (O) и (W) на платформе — это путь, пройденный поездом со скоростью ${}^3/_5$ за 5 *час* — срок, отделяющий момент излучения сигнала i от момента его возвращения (по часовой сети платформы). Следовательно, достаточно умножить скорость $v = {}^3/_5$ на интервал времени $t_{ow} = 5$ *час* между рассматриваемыми событиями, чтобы получить расстояние ow, равное 3 единицам.

Если относительность пространственного совпадения событий не кажется нам парадоксальной, то лишь потому, что благодаря современным быстроходным средствам транспорта мы привыкли к этому эффекту относительного движения и изменения системы отсчета. И мы не видим ничего из ряда вон выходящего в том, что, оставаясь в одной и той же «точке» движущегося поезда, мы в то же время в течение нескольких часов путешествия успеваем побывать в различных «точках» железнодорожного полотна, отделенных друг от друга расстояниями в сотни километров.

Вывод

Если расстояние между событиями (O) и (W) в поезде равно нулю, т. е. если эти события происходят в точке o', связанной с поездом (движущимся со скоростью v по отношению к железнодорожному полотну), и если интервал времени между событиями (O) и (W) в системе Л платформы равен t_{ow}, то расстояние между событиями (O) и (W) на железнодорожном полотне равно $v \cdot t_{ow}$.

Мы видели, что как в классической теории, так и в теории Эйнштейна расстояние между двумя событиями (O) и (W) может отличаться в поезде и на платформе (нуль в первом случае и 3 единицы во втором). Это объясняется тем, что в течение 5 *час*, разделяющих события (O) и (W), поезд движется по отношению к платформе. Поэтому мы не находим ничего необычного в том, что пассажир может находиться в одной и той же точке поезда, но в разных точках железнодорожного полотна, и без колебаний объясняем относительность пространственного совпадения событий (O) и (W) неодновременностью этих событий.

Рассмотрим теперь случай, в некотором смысле обратный, а именно события (M) и (N), одновременные в системе отсчета Л поезда, но разделенные в этой системе отсчета некоторым расстоянием $m'n'=4$. В этом случае мы уже не сможем ограничиться простым «перенесением» результатов классической теории в теорию Эйнштейна.

Действительно, согласно классической теории (а также «здравому смыслу»), два события, происходящие одновременно в поезде, должны быть одновременными и на платформе. Но поскольку они происходят в один и тот же момент времени, поезд «не успевает» между этими событиями пройти какое-либо расстояние по отношению к железнодорожному полотну. Значит, из абсолютного характера одновременности следует неизменность расстояния между данными одновременными событиями при переходе от поезда к железнодорожному полотну.

Поэтому с классической точки зрения, если двое рабочих, находящихся в различных точках движущегося поезда (один на ступеньке в точке m', а другой на ступеньке в точке n'), в один и тот же момент времени $t'=2$ час. делают две отметки m и n на железнодорожном полотне, то расстояние mn между этими отметками на железнодорожном полотне должно быть равно расстоянию $m'n'$ между самими рабочими в поезде, а именно 4 единицам.

Заметим, что рассуждение подобного типа нам уже случалось применять ранее (стр. 80) при изложении классической теории опыта Майкельсона. Мы допустили, что в момент $t=0$ час., т. е. одновременно с событием (O), зеркало n' находилось против деления (+2), а зеркало m' — против деления (—2) платформы.

Однако если мы вернемся к таблице на стр. 120, то увидим, что, согласно теории Эйнштейна, расстояние между событиями (M) и (N) на платформе равно не 4 единицам, как в поезде, а 5!

Таким образом, теория Эйнштейна обнаруживает «симметрию» в относительности промежутков времени между пространственно-совпадающими, но неодновременными событиями, такими, как (O) и (W), и в относительности расстояний между одновременными, но пространственно-несовпадающими событиями, такими, как (M) и (N).

Эта относительность — «релятивизация» расстояния между событиями, одновременными в какой-либо лаборатории (в данном случае в поезде), не вызывает у нас особенного удивления. Мы уже знаем, что в другой лаборатории те же самые события *не будут одновременными,* так как в теории Эйнштейна само понятие одновременности относительно. Так, события (M) и (N), хотя и одновременные в поезде, происходят в разные моменты времени ($t_m=1$ час. и $t_n=4$ час.) при наблюдении с платформы. Поэтому, несмотря на одновременность событий (M) и (N) в системе отсчета поезда, нельзя сказать, что между этими событиями поезд «не успел» продвинуться на некоторое расстояние по отношению к железнодорожному полотну.

Однако читатель уже должен ощутить «приступ релятивистской болезни» и спросить: почему же поезд смог пройти некоторое расстояние по отношению к железнодорожному полотну, а железнодорожное полотно осталось как бы неподвижным относительно поезда? Скоро мы увидим, что это лишь кажущееся затруднение. Но прежде чем объяснять этот парадокс, познакомимся с некоторыми свойствами *релятивистского сокращения длин.* (Этим термином называют явление, состоящее в том, что расстояние между событиями, такими, как (M) и (N), равное 5 единицам на железнодорожном пути, «сжимается» до 4 единиц в поезде, т. е. в лаборатории, где они одновременны.)

Если мы назовем систему отсчета, в которой интервал времени между рассматриваемыми событиями равен нулю, т. е. систему типа Л′ для событий (M) и (N), «системой одновременности», то мы можем представить релятивистское сокращение следующим отношением:

$$\boxed{\mathrm{C} = \frac{\text{Расстояние между двумя событиями в «системе одновременности»}}{\text{Расстояние между теми же событиями в другой системе}}}$$

(где С — первая буква слова «сокращение»).

Для $v = {}^3/_5$ $(c=1)$ релятивистское сокращение составляет

$$\mathrm{C} = \frac{m'n'}{mn} = \frac{4}{5}.$$

Применяя теорию Эйнштейна к случаю произвольной скорости v и произвольному расстоянию $m'n'$ и повторяя те же рассуждения, получим

$$\boxed{\mathrm{C} = \frac{\text{Расстояние в «системе одновременности»}}{\text{Расстояние в другой инерциальной системе}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Классическая теория и «здравый смысл» принимают без доказательства, что $\mathrm{C} = 1$ во всех случаях.

Вы, вероятно, уже заметили, что в нашем случае $(v = {}^3/_5)$ релятивистское сокращение расстояний происходит в точно таком же отношении, в каком связаны между собой собственное и «несобственное» времена процесса. Это совпадение сохраняется и в общем случае: «релятивистское сокращение» расстояний и «отставание движущихся часов» происходят в одном и том же отношении

$$C = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Конечно, «релятивистское сокращение» — это *взаимное* свойство. Сокращение наблюдается не только тогда, когда «системой одновременности» служит поезд Л′, но когда рассматриваемые события происходят одновременно на платформе.

Таким образом, если мы обозначим через (M_0) прохождение зеркала m' через определенную точку m_0 железнодорожного полотна в момент $t=0$ час. по часовой сетке железнодорожного полотна, а через (N_0) — прохождение зеркала n' через некоторую другую точку n_0 железнодорожного полотна в «тот же момент» $t=0$ час., то эти два события будут одновременными с событием (O) в системе Л и одновременными между собой в этой же системе.

Теперь в «системе одновременности» расстояние между событиями (M_0) и (N_0) будет равно m_0n_0 (расстояние по железнодорожному пути); что же касается расстояния между ними в «другой системе», то оно будет выражаться величиной $m'n'$ (равной, по определению, 4 единицам). Тогда релятивистское сокращение равно

$$\frac{m_0n_0}{m'n'} = \frac{m_0n_0}{4} = \frac{4}{5},$$

откуда $m_0n_0 = 3{,}2$.

Сопоставляя по отдельности события (M_0) и (N_0) с событием (O), получаем то же самое:

$$\frac{om_0}{o'm'} = \frac{om_0}{2} = \frac{4}{5}$$

и

$$\frac{on_0}{o'n'} = \frac{on_0}{2} = \frac{4}{5},$$

откуда

$$om_0 = 1{,}6,$$

$$on_0 = 1{,}6.$$

Ради удобства мы ввели термин «релятивистское сокращение длин». Но слово «сокращение» имеет оттенок, который может внушить совершенно неправильное истолкование этого термина.

Так, стержень при нагревании расширяется, а при охлаждении сжимается. Ничего подобного не происходит (с точки зрения теории Эйнштейна) ни с поездом, ни с платформой при их относительном движении. «Релятивистское сокращение длин» скорее напоминает *эффект перспективы,* когда два человека смотрят друг на друга не в «фас», а немного сбоку. Тогда каждый из них кажется другому «тоньше», чем в действительности. Впрочем, вместо того чтобы использовать расплывчатые аналогии, мы лучше углубим наш анализ и рассмотрим возникшие затруднения непосредственно; это мы сделаем в разд. 34—36. Но сначала нужно разрешить вопрос, который в основном является вопросом терминологии: что́ следует понимать под «длиной движущегося материального отрезка».

33. Собственная длина и так называемое «сокращение движущихся материальных тел»

До сих пор мы рассматривали только расстояния между событиями. Однако релятивистские эффекты станут значительно понятнее, если их рассмотреть в применении к *длинам материальных отрезков* (стержней, эталонов длины и т. п.).

При этом нам следует быть очень осторожными, потому что всякое употребление старых слов в новом смысле постоянно связано с риском возвращения к старым идеям.

Как измерять длину стержня? Если наблюдатель находится в лаборатории, относительно которой стержень покоится, то можно измерить его длину, приложив к нему эталон длины, неподвижный относительно этой лаборатории. Для определенности будем предполагать, что измеряемый стержень — это железнодорожный рельс, расположенный между делениями (—1) и (+4).

Физики на железнодорожном пути могут измерить длину рельса непосредственно и найдут, что она равна 5 единицам, ибо таково расстояние между концами $m(-1)$ и $n(+4)$ этого рельса в системе отсчета железнодорожного пути. Будем говорить, что это *собственная длина* стержня (рельса). Слово «собственный» означает, что длина измерена непосредственно в лаборатории, относительно которой стержень покоится.

Значит, собственная длина стержня mn, полученная наложением на стержень эталона длины в лаборатории, расположенной на платформе, есть величина, характерная для этого материального стержня, и не зависит от инерциального движения платформы по отношению к поезду.

Но физик, лаборатория которого движется вместе с поездом по отношению к платформе, очевидно, не может измерить длину стержня mn, лежащего на железнодорожном полотне, наложением эталона длины. Ему придется придумать другой способ измерения.

Если этот физик знаком с теорией Эйнштейна, то он сможет использовать для этой цели полученное в разд. 32 соотношение между «расстоянием в системе одновременности» и «расстоянием в другой системе». Для этого достаточно сфотографировать в один и тот же момент времени $t'=2$ час. по часовой сетке поезда прохождение точки платформы m против точки $m'(-2')$ поезда и прохождение точки n железнодорожного полотна против точки $n'(+2)$ поезда. Эти прохождения, как мы знаем, соответствуют событиям (M) и (N).

Тогда, непосредственно измерив расстояние между точками m' и n' поезда и получив, что $m'n'=4$ единицам, а также вычислив $C=4/5$ для данной скорости $v=3/5$ относительного движения лабораторий, физик, едущий в поезде, найдет из соотношения

$$\frac{m'n'}{mn}=C=\frac{4}{5},$$

что $mn=5$.

Как мы видим, в силу такого метода расстояние $m'n'$ в «системе одновременности» (поезде), не являющейся «собственной» системой рельса, все же представляет с точностью до множителя C собственную длину mn стержня. Естественно рассматривать это расстояние как некий «полуфабрикат длины» или «несобственную» длину стержня mn.

По этому определению можно в общем случае написать соотношение

«Полуфабрикат длины» = «Несобственная» длина =

= C · (Собственная длина).

Это соотношение напоминает нам связь между собственным и «несобственным» временем явления, происходящего в некоторой инерциальной лаборатории. Но соотношение между собственным и «несобственным» временем имеет вид

$$«\text{Несобственное» время} = \frac{1}{C} \cdot (\text{Собственное время}),$$

т. е. когда мы переходим к «несобственным» величинам, то «замедлению» собственного времени соответствует «сокращение» собственной длины.

Некоторые авторы, в том числе и Эйнштейн, на основе понятия «релятивистского сокращения» предлагали обобщить понятие длины, определив «длину» стержня не как *собственную длину,* получаемую при непосредственном измерении с помощью эталона длины, а как «несобственную» длину, получаемую описанным выше методом. Тогда любой стержень имел бы столько же «длин», сколько систем отсчета, в которых определяется его длина.

Однако такое обобщение, само по себе совершенно законное, содержит весьма существенную методическую ошибку. Действительно, такое обобщение совершенно затушевывает «старый» смысл понятия длины (как собственной длины, получаемой непосредственным наложением эталона длины).

Если принять это обобщенное понятие длины и говорить, что «движущийся» стержень короче, чем «покоящийся», то неискушенный или недостаточно внимательный читатель, воспринимающий данное утверждение вне связи с предыдущим изложением, может подумать, будто со стержнем что-то происходит из-за того, что он движется, так что стержень укорачивается, как растянутая пружина, которую вдруг отпустили. Иными словами, такой читатель возродит устаревшую гипотезу Фитцджеральда — Лоренца.

На самом деле это утверждение означает лишь, что «несобственная» длина стержня, измеренная путем «одновременной фиксации точек», меньше, чем его собственная длина.

Можно было бы попытаться дать результату таких измерений название «видимой длины» по аналогии с тем значением слова «видимый», в котором оно употребляется в астрономии (величина, полученная из наблюдений, которую следует исправить в соответствии с теорией). Но тогда нас подстерегает другая опасность — слово «видимый» будет пониматься в смысле «кажущийся», как оно обычно и употребляется в повседневной речи.

Некоторые авторы считают, что можно избежать путаницы, если называть «несобственную» длину «релятивистской» длиной. Этот термин допускает возможность обобщения понятия длины и с этой точки зрения представляет определенное преимущество. Но термин «релятивистская длина» грозит другой ошибкой. Может сложиться впечатление, что в этом понятии уже учтена релятивистская поправка к «несобственной» длине, т. е. учтен множитель С, тогда как речь идет только о «полуфабрикате», т. е. неисправленном значении.

До сих пор все наши рассуждения относились к рельсу, неподвижному относительно платформы. Но из свойств взаимности очевидно, что все сказанное о «собственной» и «несобственной» длине можно отнести также к стержню, неподвижному относительно поезда и расположенному вдоль него.

Предположим для определенности, что концы стержня совпадают с точками $m'(-2')$ и $n'(+2')$ поезда, т. е. собственная длина равна 4 единицам.

Как измерить «несобственную» длину стержня $m'n'$ из лаборатории, расположенной на железнодорожном пути?

Физик, находящийся в этой лаборатории, может поручить своим помощникам, размещенным вдоль железнодорожного пути, отметить моменты прохождения обоих концов m' и n' стержня перед каждым из них. Естественно, помощники будут пользоваться синхронизированной часовой сеткой t железнодорожного пути. Положение каждого помощника вдоль пути также будет известно: можно предположить, например, что каждый из них находится в точке, отмеченной «целым» делением шкалы, связанной с железной дорогой.

Небольшое усложнение связано с тем, что в заданный момент по часовой сетке t, например в $t=0$ час., точки m' и n' поезда могут не оказаться против целых делений шкалы платформы. Но, отмечая моменты прохождения точек n' и m' поезда против целых делений шкалы железнодорожного полотна, можно составить следующую таблицу:

«Целые» деления железнодорожного пути	Моменты прохождения точки n'	Моменты прохождения точки m'
—1		1 час. 00 мин.
0		2 » 40 »
+1		4 » 20 »
+2	0 час. 40 мин.	6 » 00 »
+3	2 » 20 »	
+4	4 » 00 »	

Мы сразу же находим, что точки n' и m' проходят расстояние между двумя соседними делениями за время 1 *час* 40 *мин*, т. е. за 100 *мин*. Значит, из наблюдений можно заключить, что скорость поезда относительно платформы составляет 0,1 единицы за 10 *мин*, или 0,6 единиц в час, т. е. она совпадает с принятой нами ранее скоростью $v = {}^3/_5$.

Затем, исходя из этой таблицы, физики на платформе легко могут составить другую таблицу, дающую положения точек n' и m' поезда в «целые» моменты времени по часовой сети платформы:

«Целые» моменты времени в системе t	Положение n' на железнодорожном пути	Положение m' на железнодорожном пути	Расстояние вдоль пути
0 час. 00 мин.	+1,6 (n_0)	—1,6 (m_0)	3,2
1 » 00 »	+2,2	—1,0	3,2
2 » 00 »	+2,8	—0,4	3,2
3 » 00 »	+3,4	+0,2	3,2
4 » 00 »	+4,0	+0,8	3,2

Мы видим, что, выбирая произвольную пару событий, одновременных на платформе, например события (M_0) и (N_0), которые произошли в момент $t=0$ час., физики найдут расстояние m_0n_0 равным 3,2 единицы. Применяя общую формулу

«Несобственная» длина = C·(Собственная длина) к «несобственной» длине стержня $m'n'$, движущегося вместе с поездом, и определив множитель C по формуле

$$C^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

(для скорости $v=0{,}6={}^3/_5$ и $c=1$ это дает $C={}^4/_5$), они получат правильное значение собственной длины стержня $m'n'=4$ единицам.

Таким образом для стержня, движущегося по инерции в направлении своей длины, единственной «длиной», с которой могут примириться физики различных лабораторий, находящихся в относительном инерциальном движении, единственной объективной длиной является собственная длина, которую получают делением «несобственной» длины на C, если собственную длину нельзя измерить непосредственно.

Напомним еще раз, что было бы ошибкой считать, будто движение по инерции вызывает какие-то изменения в самом движущемся стержне. Тем, кто еще не сумел полностью преодолеть это ошибочное мнение и склонен считать, что движущиеся тела укорачиваются, мы напомним, что простой заменой системы отсчета можно изменить скорость тела v, но невероятно, чтобы тело изменило длину и «осознало» это изменение!

34. Представление относительного движения при помощи мгновенных фотографических снимков, произведенных из различных точек в один и тот же момент по заданной часовой сетке

Для изображения взаимного положения двух тел, находящихся в относительном покое (например, до́ма и некоторого участка поверхности Земли), мы, как правило, наносим на карту или чертеж рисунки этих тел или их контуров в некотором масштабе, одинаковом для обоих тел. Так мы поступаем, например, составляя план города. Если каждый метр территории города изображать 1 *мм* на его плане, то в таком же масштабе (т. е. в масштабе 1 : 1000) должен быть представлен и каждый метр длины домов, которые наносятся на этот план.

Изображение взаимного положения двух тел, находящихся в относительном движении, например поезда Л′ и железнодорожного пути Л, — более трудная задача, так как их взаимное положение непрерывно меняется.

Первое, что сразу приходит в голову, это отснять фильм, каждый кадр которого фиксирует мгновенное положение «движущегося» предмета (самолета, автомобиля, поезда, лошади, людей и т. п.) относительно тел, служащих системой отсчета (равнин, лесов, гор, кораблей и т. п.).

Конечно, ни один фотоснимок нельзя сделать мгновенно. Каждый снимок производится с определенной «выдержкой» и потому неизбежно будет слегка «размыт», даже если эта выдержка составляет только 1/100 или 1/1000 *сек*. Но если не обращать внимания на эту «размытость», практически неощутимую (иначе кинематография вообще была бы невозможна), то можно сказать, что классическая физика позволяет без всяких затруднений получить последовательность «мгновенных» изображений достаточно медленных относительных движений. На каждом из этих изображений пейзаж (задний план) и движущиеся объекты соответственно уменьшены или увеличены в одной и той же пропорции и, следовательно, представлены в одном и том же масштабе.

Однако задача усложняется, когда относительное движение происходит очень быстро (со скоростью, близкой к скорости света), особенно если один из движущихся объектов, скажем наш поезд Л′, очень длинный, так что световому сигналу требуется несколько часов, чтобы от концов поезда дойти до его середины.

Очевидно, что в этом случае каждое мгновенное изображение можно получить, только объединив, «смонтировав» несколько отдельных изображений, полученных одновременно за достаточно короткий промежуток времени несколькими фотографами, размещенными вдоль железнодорожного полотна. Если при этом один из них фотографирует первый вагон, другой — последний, третий — середину поезда и т. п., то совокупность одновременно полученных снимков, конечно, превосходит «поле зрения» любого отдельного фотоаппарата.

Согласно классической теории: 1) монтаж отдельных мгновенных снимков, сделанных в некоторый момент по часовой сетке поезда, полностью эквивалентен «монтажу» снимков, сделанных в некоторый момент по часовой сетке платформы; 2) каждый такой монтаж дает изображение поезда и железнодорожного полотна, уменьшенных в одном и том же отношении.

Напротив, из теории Эйнштейна[1)] следует, что при больших скоростях относительность одновременности ведет к «релятивистскому сокращению», откуда в свою очередь вытекает ряд следствий, на первый взгляд парадоксальных:

1. Монтаж мгновенных снимков, полученных в некоторый момент времени по часовой сетке поезда [мы обозначим его через (S')], и монтаж мгновенных снимков, полученных в некоторый момент времени по часовой сетке железнодорожного полотна [обозначим его через (S)], совершенно различны!

2. На каждом из этих монтажей поезд и железнодорожное полотно будут изображены в различных масштабах!

Как легко видеть из рис. 20, верхняя часть которого — это монтаж (S') мгновенных снимков, полученных в момент $t'=2$ час. по часовой сетке поезда, а нижняя — «монтаж» (S) мгновенных снимков, отснятых в момент $t=0$ час. по часовой сетке железнодорожного полотна, отношение масштабов на обоих снимках одинаково и равно коэффициенту C (т. е. $^4/_5$ при $v={}^3/_5$).

Масштабы на монтаже (S') определяются тем, что мы уже знаем о событиях (M) и (N). Поскольку эти события происходят одновременно в поезде в момент времени $t'=2$ час., можно предположить, что они были использованы в качестве сигналов для начала фотографи-

[1)] Здесь, как и в некоторых других местах книги, у читателя может возникнуть впечатление, что теория Эйнштейна сравнивается с классической ньютоновской теорией, как с чем-то равноправным. В действительности это совсем не так. Классическая теория уже давно пришла в противоречие с фактами, и, когда мы говорим о выводах из нее, полезно формулировать их так: «если бы была верна классическая теория, то имело бы место то-то и то-то». Напротив, теория Эйнштейна во всех деталях подтверждается на опыте, и ссылки на выводы из нее было бы уместно сопровождать словами: «в действительности верна теория Эйнштейна, из которой следует то-то и то-то». Сравнение теорий показывает всю глубину различия между ними при больших скоростях движения; вместе с тем теория Ньютона продолжает быть верной при малых скоростях, и как раз тогда она оказывается следствием, предельным случаем теории Эйнштейна. Теория Эйнштейна — универсальный аппарат для описания, объяснения и предсказания физических фактов на современном этапе развития науки и техники.— *Прим. ред.*

рования: первое — для фотографирования железнодорожного полотна из точки m' поезда, второе — для фотографирования его из точки n' поезда. Деление (-1) полотна будет совпадать с точкой $m'(-2')$ поезда, а деление $(+4)$ полотна — с точкой n' $(+2)$ поезда.

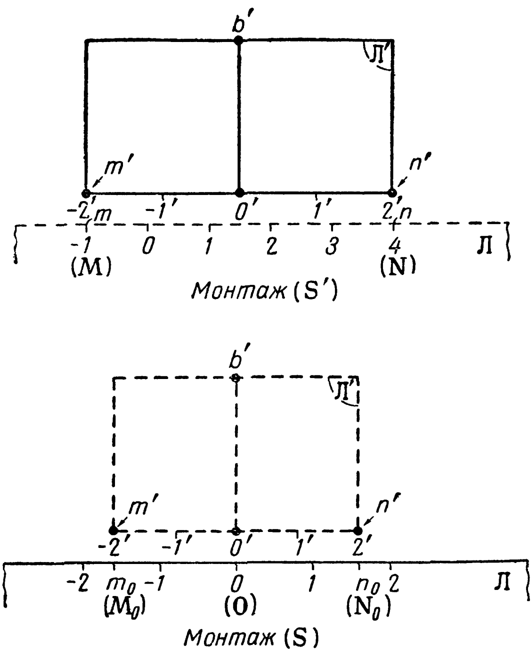


Рис. 20.

Таким образом, если каждое деление поезда представлено отрезком определенной длины, то каждое деление полотна будет отрезком, длина которого меньше в $C = {}^4/_5$ раза. Если бы такой фильм смотрел зритель, который не знает теории Эйнштейна, то он предположил бы, что либо платформа разделена на более мелкие деления, чем поезд, либо (если он сумел убедиться в совпадении делений, когда поезд покоился), что платформа укоротилась из-за относительного движения по отношению к поезду.

Но другой «учебный фильм», соответствующий монтажу (S), показал бы ему несостоятельность этих классических объяснений релятивистского сокращения. Зритель убедился бы, что это же относительное движение можно рассматривать в иной системе отсчета, чем его «система одновременности» (т. е. система отсчета поезда), и тогда единица длины станет короче в отношении $^4/_5$ по сравнению с «системой одновременности». Знающий человек объяснил бы ему, что все эти «парадоксальные» явления совершенно нормальны и вызваны релятивистскими свойствами пространства — времени.

ГЛАВА 9

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ДИАГРАММЫ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

35. Изображение движения на пространственно-временной диаграмме

Монтажи (S) и (S′), изображенные на рис. 20,— это лишь один кадр из фильмов, описывающих относительное движение рассматриваемых «лабораторий». Монтаж (S) соответствует моменту $t=0$ час. часовой сетки железнодорожного полотна, а монтаж (S′) — моменту $t'=2$ час. часовой сетки поезда.

Для более полного описания картины относительного движения нам придется отснять настоящий фильм, т. е. последовательность монтажей (S), соответствующих различным моментам времени, достаточно близким друг к другу в часовой сети железнодорожной линии, и последовательность монтажей (S′) в различные моменты времени по часовой сетке поезда [1)].

На предыдущих рисунках мы пренебрегали высотой поезда, изображая вагоны и железную дорогу так, как если бы они были видны сверху. Но можно пренебречь и шириной поезда, поскольку, как мы уже знаем, «релятивистские эффекты» сказываются только на «продольных» размерах тел, т. е. лишь в направлении их относительного движения.

[1)] Автор ради простоты пренебрегает здесь тем обстоятельством, что фотокамеры, производящие съемку в часовой сетке поезда, должны двигаться вместе с поездом (и наоборот). Однако снимки, сделанные в одном и том же месте двумя разными камерами, движущимися друг относительно друга, будут отличаться друг от друга, согласно теории Эйнштейна. Автор оговаривает при этом то обстоятельство, что поле зрения каждой отдельной фотокамеры достаточно мало, но читатель должен иметь в виду, что указанные различия между двумя такими снимками исчезают, лишь если поле зрения отдельной камеры сведется к одной точке. Одним словом, анализ процедуры съемки системой синхронизованных фотокамер не столь прост, как это могло бы показаться с первого взгляда.— *Прим. ред.*

Предположим, что все окружающие поезд предметы погружены в темноту, а освещается только один рельс железнодорожного пути при помощи флуоресцентной трубки, укрепленной в нижней части поезда и расположенной параллельно рельсу. Тогда в фильме движение поезда будет изображаться светящимся следом, скользящим по отношению к ориентирам, связанным с освещаемым рельсом. В таком фильме поезд и железнодорожное полотно имеют лишь одно измерение — длину.

В обычном фильме (незамедленном и неускоренном) впечатление изменения взаимного положения тел, находящихся в относительном движении, достигается путем просмотра киноленты, движущейся с определенной скоростью, равной частоте кадров при съемке. Легко добиться, чтобы интервалы времени между изображениями, последовательно появляющимися на экране, были в точности равны интервалам времени между отдельными мгновенными монтажами.

Изображая поезд в виде светящегося следа, параллельного рельсу, можно получить достаточно простой фильм, в котором движение киноленты, описывающее относительное движение, нетрудно заменить другим, более удобным приемом. Вполне достаточно, чтобы неподвижное изображение получалось объединением нескольких последовательных кадров одной и той же ленты, наложенных друг на друга с небольшим сдвигом, одинаковым для всех изображений в направлении развертывания фильма.

Предположим для определенности, что поезд и железнодорожное полотно изображены в виде горизонтальных светящихся черточек, тогда как кинолента движется в вертикальном направлении. На неподвижном изображении, полученном при наложении кадров, интервалы времени будут определяться расстояниями по вертикали между различными мгновенными изображениями поезда и железнодорожного полотна (рис. 21).

Таким образом, промежутки времени будут представлены по вертикали в масштабе, который зависит как от вертикального смещения, так и от интервала времени между двумя последовательными изображениями. Так, на монтаже (S) последовательные изображения железнодорожного полотна будут следовать друг за другом по вертикали, сдвиг вдоль которой определяется временем t данного изображения. Значит, на данной киноленте железнодорожное полотно будет неподвижным (по отношению к экрану) и только поезд будет казаться движущимся.

Фильм можно значительно упростить, если из совокупности монтажей (S) убрать все снимки железнодорожного полотна, кроме, например, того, что соответствует моменту $t=0$ час. или другому целому числу часов сети t. Изображения железнодорожного полотна, соответствующие

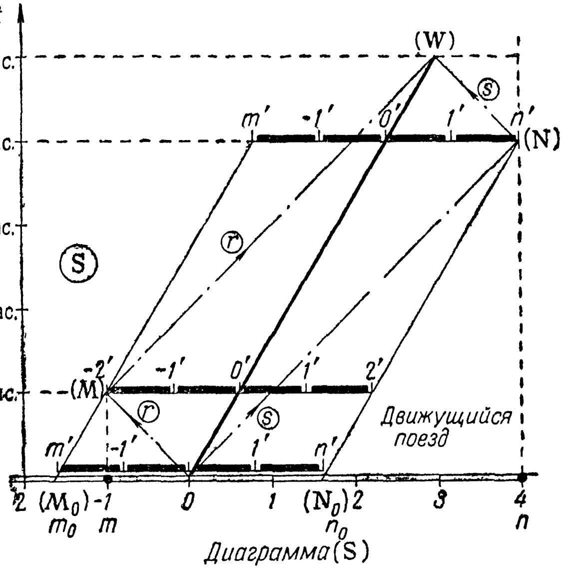


Рис. 21.

другим моментам t, легко восстановить по рисунку или мысленно, смещая его единственное изображение параллельно самому себе вплоть до выбранного момента t.

На монтажах (S) точно так же можно оставить лишь несколько изображений самого поезда (представленных на рис. 21 толстыми черными штрихами). Вместо исключенных промежуточных изображений поезда достаточно иметь совокупность определенных положений некоторых выделенных точек поезда, таких, как точки m', o' или n'.

Соединяя друг с другом последовательные изображения одной и той же точки поезда, например точки m', мы убедимся, что «простое» движение этой точки будет изображаться в виде прямой, наклоненной вправо [1]. Очевидно, такие прямые, изображающие относительное движение точек m', o' или n', будут параллельны между собой, причем их одинаковый наклон к горизонтали будет характеризовать одинаковую скорость этих точек, равную скорости движения поезда по отношению к железнодорожному полотну.

Будем называть такое упрощенное изображение *диаграммой* (S), если оно соответствует совокупности монтажей (S), и *диаграммой* (S′) для совокупности монтажей (S′).

Любая заданная точка диаграммы (S) соответствует определенному положению на железнодорожном полотне и определенному моменту времени по часовой сетке t. На рис. 21 мы находим, например, что точка (N) соответствует событию, происшедшему в точке n $(+4)$ железнодорожного полотна в момент $t=4$ час. по его часовой сетке t. Если, кроме того, эта точка находится на одной из прямых, изображающих относительное движение некоторой выделенной точки поезда, то диаграмма (S) укажет вместе с тем и расположение соответствующего события в поезде. Так, сразу же видно, что событие (N) происходит в точке n' $(+2')$ поезда. Однако по диаграмме (S) нельзя непосредственно определить момент t', в который это событие произошло по часовой сети поезда.

Соответственно на диаграмме (S′) (рис. 21′) показано лишь одно («основное») изображение поезда, а расстояния по вертикали соответствуют интервалам времени в системе t'. Она может содержать два или три изображения железнодорожного полотна и несколько наклонных прямых линий, изображающих «простое» движение двух или трех выделенных точек железнодорожного полотна относительно поезда. Значит, эта диаграмма непосредственно дает положение в поезде различных событий в момент t'. Кроме того, по этой диаграмме можно непосредственно опре-

---

[1] Это не «движение» в обычном смысле, точно так же как истинное движение киноартиста, очевидно, происходит поперек кадра, а не по диагонали всей киноленты, на которой засняты кадры с этим его движением. Когда мы вводим на диаграмме Минковского в качестве одной из осей ось времени, то «мировые линии» предметов имеют смысл не траекторий этих предметов в пространстве, а сопоставления положений предметов в пространстве и соответствующих моментов времени. Предмет вовсе не движется по своей «мировой линии», его движение происходит по проекции этой линии на обычное 3-мерное пространство.— *Прим. ред.*

делить положение относительно железнодорожного полотна событий типа (M) или (N), происходящих в тех его точках, «простое» движение которых относительно поезда изображено на диаграмме прямыми линиями. Диаграмма (S′) создает иллюзию движения железнодорожного полотна и неподвижности поезда.

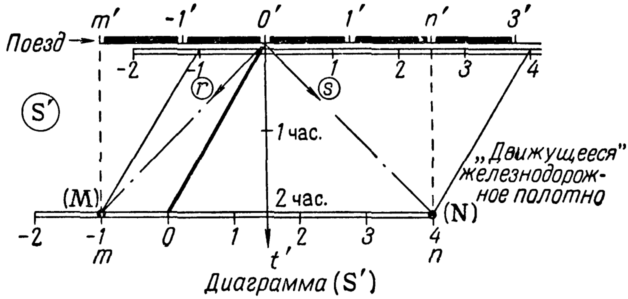


Рис. 21′.

«Продвинутый» читатель не спутает диаграммы (S) и (S′) с диаграммами, при помощи которых иногда графически изображают расписание поездов железной дороги. Эти классические диаграммы не учитывают различия между часовыми сетками t' поезда и t железнодорожного полотна. Кроме того (и это еще важнее), в классических диаграммах не учитывается «релятивистское сокращение» расстояний.

Между тем на каждой киноленте, составленной из отдельных мгновенных монтажей, релятивистские эффекты, описанные в конце предыдущего параграфа, весьма важны. На диаграмме (S) изображение поезда в любой момент времени t будет «укороченным» в пропорции C : 1, тогда как на диаграмме (S′) такому же сокращению в той же пропорции C : 1 в любой момент времени t' подвержено каждое изображение железнодорожного полотна.

Релятивистские пространственно-временные диаграммы становятся особенно поучительными, если на них изобразить траектории «продольных» световых сигналов, скажем r и s. При нашем выборе единиц длины и времени на диаграмме (S) достаточно изобразить интервал времени в 1 *час* отрезком той же длины, какой изображается единица расстояния на железной дороге. Тогда траектории этих

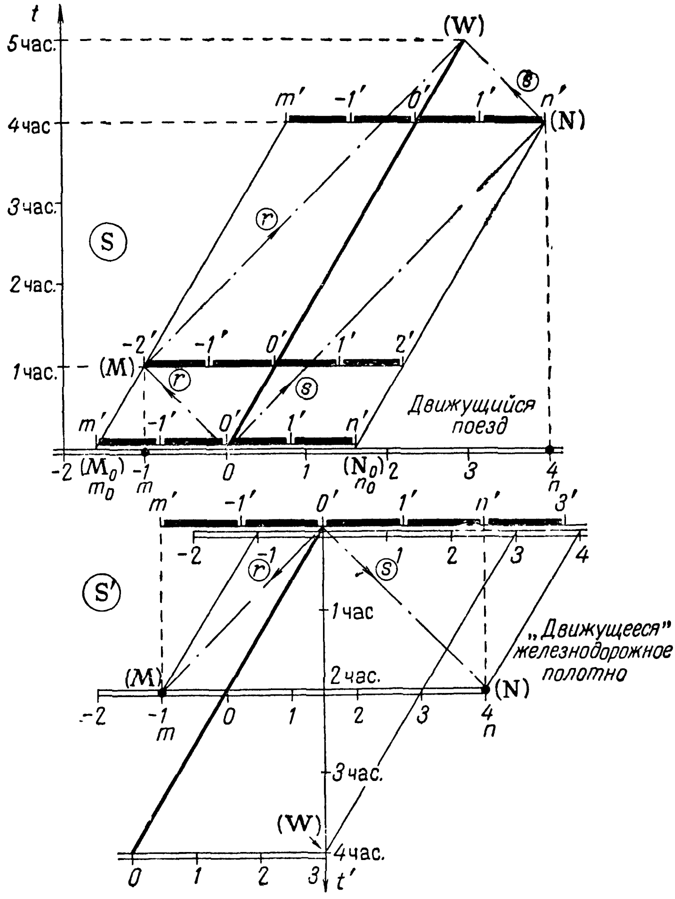


Рис. 22.

сигналов изобразятся в виде прямых, наклоненных к горизонтальной оси под углом 45°.

Условимся на диаграмме (S′) единицу расстояния в поезде и единичный интервал времени t' также изображать отрезками одной и той же длины. Тогда на диаграмме (S′) траектории этих световых сигналов в силу свойства (*Э*) также будут изображены в виде прямых, наклоненных под углом 45° к горизонтальной оси.

Читатели могут найти эти траектории на диаграммах (S) и (S′), которые мы для удобства воспроизвели совместно на рис. 22.

А. Основные определения

1. Определение события (O): прохождение точки o' через точку o соответственно в моменты $t'=0$ час. и $t=0$ час. по часовой сетке поезда и платформы; излучение сигналов r и s. *Определение события* (W): возвращение сигналов r и s в o'.

2. Определение событий (M) и (N): приход сигнала r в точку $m'(-2)$, а сигнала s — в точку $n'(+2)$.

3. Определение событий (M_0) и (N_0): прохождение точек m' и n' поезда через некоторые фиксированные точки железнодорожного полотна в момент $t=0$ час. по часовой сетке железнодорожного полотна. Эти события представлены только на диаграмме (S).

Б. Основные релятивистские свойства

1. *Одновременность* событий (M) и (N) в поезде (один и тот же момент $t'=2$ час.) и *неодновременность* этих событий на железнодорожном полотне (моменты $t_m=1$ час. и $t_n=4$ час.). Это свойство иллюстрирует относительность одновременности.

2. *Относительность интервалов времени.* Промежуток времени между событиями (O) и (W) равен 5 *час* по часовой сети t железнодорожного полотна и 4 *час* по часовой сети t' поезда.

3. *Свойство взаимности релятивистского сокращения.* Пространственные характеристики событий (M), (N) в системах (S) и (S′) и (W) связаны между собой одним и тем же коэффициентом $C={}^4/_5$.

36. Природа и сущность понятия «релятивистское сокращение длин»

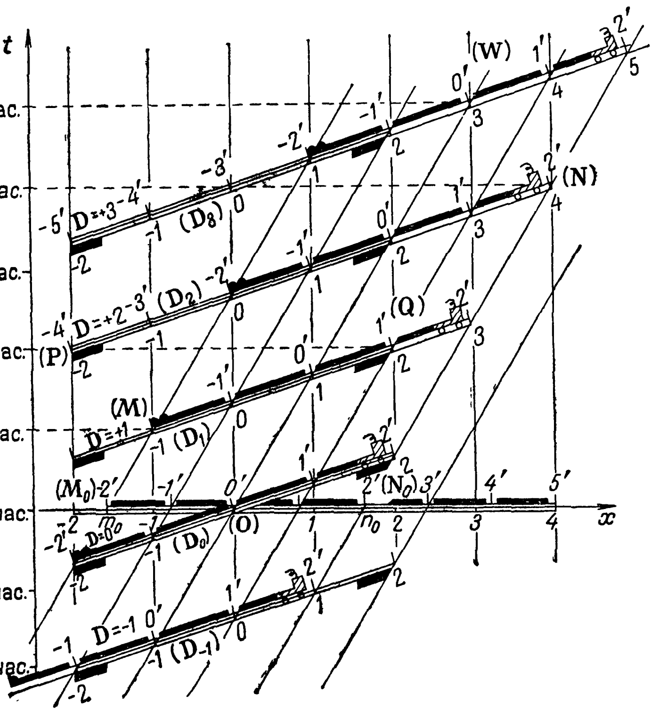
Вспомним, что монтаж (S) получается объединением изображений отдельных частей поезда (и соответствующих участков железной дороги), отснятых несколькими фотокамерами в один и тот же момент t по часовой сети железнодорожного пути. И наоборот, монтаж (S′) получается как совокупность «одновременных в поезде» изображений железнодорожного пути (и самого поезда).

Рассмотрим для определенности монтаж (S), соответствующий моменту $t=0$ час. На нем точка o (нулевое деление) железнодорожного полотна совпадает с точкой o' (нулевым делением) поезда. Но релятивистское сокращение проявится тогда в том, что деление $(+1)$ железнодорожного пути и «одноименное» деление $(+1')$ поезда не совпадают. При этом, как видно из рис. 22, расстояние между делениями $(+2;\ +2')$, $(+3;\ +3')$, $(+4;\ +4')$ будет возрастать по мере того, как мы удаляемся от общей точки $(0;\ 0')$.

Таким образом, вместо того чтобы объединять отдельные изображения системы поезд — железнодорожный путь, взятые в определенный момент t или в определенный момент t', можно объединить изображения, на которых деления с одним и тем же номером (назовем их «одноименными») совпадают. Нас не будет тогда заботить момент t или t', в который происходит такое совпадение. Так мы получим монтаж, который обозначим через (D_0).

Использование диаграммы (S) или (S′) значительно облегчает отбор фотографий, предназначенных для монтажа (D_0). Действительно, на рис. 23, представляющем диаграмму (S), видно, что для этого достаточно сначала начертить вертикальные прямые (тонкие линии), изображающие «линии движения» «целых» делений железной дороги, а затем наклонные прямые (также тонкие линии), изображающие «линии движения» «целых» делений поезда.

Отбирая пересечения прямых, изображающих относительное движение одноименных делений поезда и железнодорожного полотна, мы получим координаты точек, в которых происходит наложение этих одноименных делений; $(-2;\ -2')$; $(-1;\ -1')$; $(0;\ 0')$; $(+1;\ +1')$; $(+2;\ +2')$ и т. д. Соединяя между собой эти точки, мы получаем монтаж (D_0). Этот монтаж дает нам возможность непосредственно определять по диаграмме моменты t, в которые наблюдается это положение (естественно, все эти моменты будут различны). На рис. 23 такие события «выстроены в ряд» на прямой (D_0), обозначенной $D=0$.



Р и с. 23.

Тот факт, что моменты t наложения одинаковых делений различаются, ясно показывает, что релятивистское сокращение есть не что иное, как «пространственное» проявление различия между часовыми сетками поезда и платформы.

Смысл понятия «релятивистское сокращение» станет еще более ясным, если, не ограничиваясь монтажом (D_0), мы рассмотрим аналогичные, но несколько более общие «монтажи», в которых будем комбинировать отдельные изображения, соответствующие заданному смещению D всех пар одинаковых делений. В результате мы получим, например, монтаж (D_1), на котором деление (+1) совпадает с делением (0′); (+2) совпадает с (+1′); (+3) — с (+2′) и т. д. Затем мы будем иметь монтаж (D_2), на котором деление (+2) совпадает с (0′); (+3) — с (+1′) и т. д. Чтобы лучше выделить эти смещения, мы несколько раз изобразили на рисунке железнодорожный путь между делениями (—2; +2) и поезд с паровозом и багажным вагоном.

Итак, можно заключить, что совпадение делений (—2; —4′), обозначенное через (P), и совпадение делений (+2; +1′), обозначенное через (Q), — это события, одновременные на железнодорожном полотне и происходящие в момент $t=2$ час. Но событие (Q) принадлежит монтажу (D_1), а событие (P) — монтажу (D_2).

Так как события, одновременные на железнодорожном пути, например (P) и (Q), не соответствуют одному и тому же смещению одноименных делений, то расстояние между ними на железнодорожном пути, равное 4 единицам, с необходимостью должно отличаться от расстояния, разделяющего их в поезде, а именно от 5 единиц. Следовательно, мы получаем, что отношение C расстояния в «системе одновременности» к расстоянию в «другой системе» равно $^4/_5$.

В свою очередь, события (M) и (N), о которых мы знаем, что они одновременны в поезде, также принадлежат соответственно «монтажам» (D_1) и (D_2) и здесь также различны смещения одноименных делений. Но вследствие свойства *взаимности* расстояние между ними в поезде равно 4 единицам [расстояние между делениями (—2′) и (+2′) шкалы поезда], а на железнодорожном пути—5 делениям [расстояние между делениями (+4) и (—1) шкалы железнодорожного пути]. И мы получаем то же отношение $C={}^4/_5$ между расстоянием в «системе одновременности» и расстоянием в «другой системе».

Таким образом, уже на диаграмме (S) проявляется взаимность релятивистского сокращения, которому подвергаются как поезд, так и железная дорога. Кроме того, мы ясно видим, что это сокращение ни в малейшей степени не является «материальным». Мы могли бы проанализировать таким же способом диаграмму (S′) и

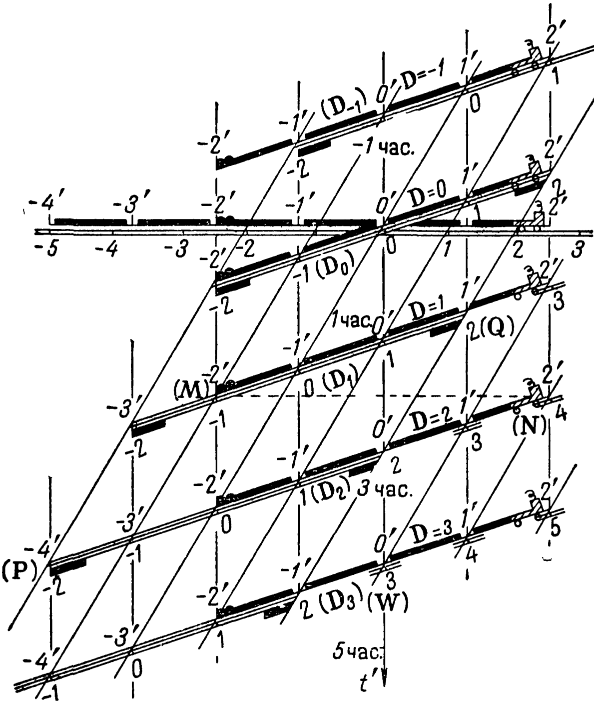


Рис. 24.

пришли бы к тем же выводам. Мы предлагаем читателю разобраться в этом самостоятельно по диаграмме (S′), соответствующей различным монтажам (D) (рис. 24).

37. Относительность порядка следования событий

Вспомним, что событие (O) — излучение световых сигналов i, r и s — определяет общее нулевое деление шкалы и нулевой отсчет времени как в системе Л′ поезда, так и в системе Л железной дороги. Вспомним также, что событие (W) состоит в одновременном возвращении этих сигналов в точку o' поезда, причем между событиями (O) и (W) сигналы проходят в поезде расстояние в 4 единицы. Соберем известные нам данные о событиях (O) и (W) в следующей таблице:

	Место в системе Л	Момент t	Место в системе Л$'$	Момент t'
(O)	o	$t_o = 0$ час.	o'	$t'_o = 0$ час.
(W)	$w\,(+3)$	$t_w = 5$ час.	o'	$t'_w = 4$ час.

Мы видим, что события (O) и (W) в поезде Л$'$ являются *пространственно-совпадающими.* Порядок следования этих событий в поезде и на платформе один и тот же: событие (W) происходит *после* события (O).

Если бы скорость v поезда по отношению к железной дороге была не $^3/_5$ или если бы промежуток времени t'_w между событиями (O) и (W) в поезде отличался от 4 *час*, то момент времени t_w, в который событие (W) произошло на платформе, изменился бы, но все равно это событие произошло бы позднее, чем событие (O). Таким образом, мы можем сделать следующий вывод: *порядок следования событий, пространственно-совпадающих в заданной инерциальной системе отсчета, не изменяется при переходе к другой системе отсчета.*

Рассмотрим два произвольных события (O) и (W), на которые наложено только одно ограничение — они являются пространственно-совпадающими в поезде Л$'$, движущемся со скоростью v по отношению к железнодорожному полотну Л. Пусть T'_{ow} — длительность процесса (O) — (W) в системе Л$'$, т. е. его *собственное время.* Взяв для обозначения длительности заглавную букву, мы хотим подчеркнуть, что речь идет о величине, не зависящей от состояния движения поезда; штрих же при ней означает, что интервал времени измерен в системе t'. Тогда приведенную выше таблицу нужно заменить следующей:

	Место в системе Л	Момент t	Место в системе Л$'$	Момент t'
(O)	o	$t_o = 0$ час.	o'	$t'_o = 0$ час.
(W)	$w = v \cdot t_w$	$t_w = T'_{ow}/C$	o'	$t'_w = T'_{ow}$

В этой таблице равенство $w = v \cdot t_w$ указывает, что координата точки w получается умножением v на t_w, тогда как С — коэффициент релятивистского сокращения,

$$C^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

При изменении v от нуля до предельного значения $v = c$ коэффициент С изменяется от 1 до 0. Время t_w, как мы знаем, всегда больше собственного времени T'_{ow}, даже если скорость v отрицательна, т. е. если поезд Л′ изменяет направление своего движения относительно железной дороги. Значит, порядок следования событий (О) и (W) один и тот же как в поезде, так и на железнодорожном полотне независимо от направления движения поезда и от численного значения относительной скорости v.

Мы определили события (О) и (W) как пространственно-совпадающие в поезде Л′, сказав, что мы знаем, что это действительно так. Физики, лаборатория которых находится в поезде Л′, смогут установить это непосредственно из наблюдений. Но физики, лаборатория которых расположена на платформе, наблюдают лишь событие (О) в точке o в момент $t = 0$ час. и другое событие (W) в точке $w(+3)$ в момент. $t = 5$ час. Как же им на основании этих наблюдений установить, существует ли такая система отсчета Л′ (такой «поезд»), в которой эти события являются пространственно-совпадающими, и найти соответствующее собственное время?

В описанном здесь конкретном примере на этот вопрос можно сразу дать утвердительный ответ. Для этого физикам системы Л достаточно разделить расстояние $d_{ow} = 3$ между событиями (О) и (W) на $t_{ow} = 5$ *час* и определить тем самым, что скорость $v = {}^3/_5$. Полученную скорость $v = {}^3/_5$ они могут приписать «поезду» Л′, в котором события (О) и (W) являются пространственно-совпадающими. Эта скорость соответствует множителю $C = {}^4/_5$. Значит, чтобы получить собственное время T'_{ow}, надо умножить «несобственное» время, равное 5 *час*, на $C = {}^4/_5$, т. е. $T'_{ow} = 4$ *час.*

В самом общем случае достаточно, чтобы частное от деления расстояния ow на промежуток времени t_{ow} в системе отсчета, связанной с железной дорогой, было *меньше с*, и тогда это частное можно считать скоростью поезда, в котором (О) и (W) суть пространственно-совпадающие события. А чтобы такое истолкование было возможно, *рас-*

стояние между рассматриваемыми событиями в некоторой системе отсчета Л должно быть меньше, чем расстояние, которое проходит свет в этой системе отсчета за промежуток времени t_{ow}.

На диаграмме (S) точка, изображающая событие (W), которое происходит позднее события (O), находится внутри «конуса», образуемого прямыми, изображающими на

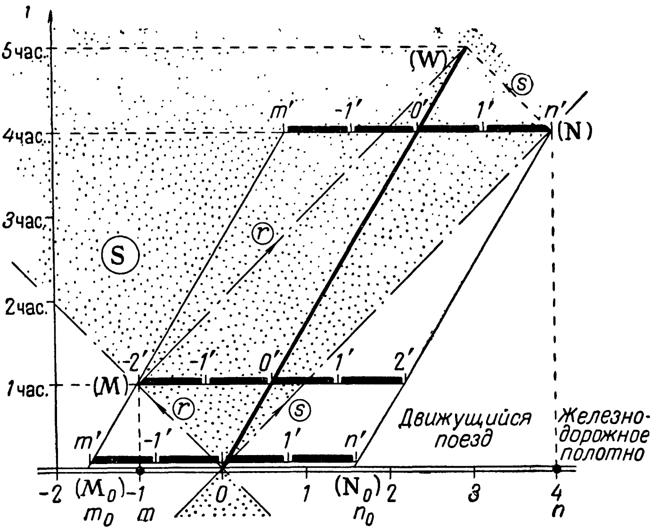


Рис. 25.

диаграмме траектории движения световых сигналов *r* и *s*, излученных из точки, в которой происходит событие (O) (рис. 25). Если называть *световым часом* расстояние, которое свет проходит за 1 *час* (около миллиарда километров), то это условие можно выразить так: события (O) и (W) должны быть разделены меньшим числом миллиардов километров в пространстве, чем числом часов во времени, т. е. эти события должны быть «ближе в пространстве, чем во времени».

В общем случае, если это условие выполнено, можно вычислить собственное время T'_{ow} явления (O) — (W) в системе Л′, где события (O) и (W) являются пространственно-совпадающими, не зная скорости v, а зная лишь расстояние ow и промежуток времени t_{ow} [1].

Разность

$$\boxed{\left(\begin{array}{c}\text{Интервал времени между}\\ \text{событиями в некоторой}\\ \text{системе отсчета}\end{array}\right)^2 - \frac{\left(\begin{array}{c}\text{Расстояние между}\\ \text{событиями в этой системе}\end{array}\right)^2}{(\text{Скорость света } c)^2}}$$

сохраняет одно и то же численное значение при любом выборе системы отсчета, оставаясь всегда равной квадрату собственного времени. Она представляет собой так называемый *фундаментальный инвариант*, значение которого не зависит от выбора системы отсчета [2].

Как мы видели, порядок следования событий, пространственно-совпадающих в некоторой системе отсчета Л′, не изменится при переходе к другой системе отсчета, а события, «более близкие в пространстве, чем во времени», всегда являются пространственно-совпадающими в некоторой системе отсчета. Поэтому порядок следования событий, удовлетворяющих этому условию, будет *инвариантным* относительно выбора системы отсчета.

События, с которыми мы встречаемся в повседневной жизни, отделены друг от друга промежутками времени порядка нескольких часов, а расстояния между ними гораздо меньше нескольких световых часов. Поэтому все обычные пары последовательных событий гораздо ближе

---

[1] Действительно, $T'_{ow} = C \cdot t_{ow}$, но $C^2 = 1 - (v^2/c^2)$; следовательно,

$$T'^2_{ow} = t^2_{ow} - \frac{v^2 t^2_{ow}}{c^2}.$$

Поскольку $v \cdot t_{ow} = ow$, получаем

$$\boxed{T'^2_{ow} = t^2_{ow} - \frac{(ow)^2}{c^2}.}$$

[2] Некоторые авторы в качестве основного инварианта теории относительности рассматривают несколько иную величину — произведение собственного времени на скорость света c (эту величину часто называют просто *интервалом*, обозначая его через s). Очевидно, для событий, которые в некоторой системе отсчета являются пространственно-совпадающими, квадрат интервала s^2 будет положительным, причем $s^2 = c^2 \cdot t^2_{ow} - (ow)^2$.

друг к другу в пространстве, чем во времени, и, следовательно, представляют собой события типа (O) — (W).

Вот почему как для наблюдателя, покоящегося относительно Земли, так и для движущегося наблюдателя (летящего на самолете или в ракете) исторический порядок следования событий один и тот же. Этим объясняется ложность «очевидной» мысли, согласно которой порядок следования событий будет инвариантным, «абсолютным» для всех пар событий, даже если они не являются событиями типа (O) — (W), т. е. если они окажутся «ближе друг к другу во времени, чем в пространстве».

Таким образом, мы пришли к одному из наиболее ошеломляющих результатов теории Эйнштейна, к одному из ее самых важных «парадоксов» — *существуют пары событий, для которых порядок следования во времени может меняться на противоположный при переходе от одной инерциальной лаборатории к другой.*

Мы уже встречались с такими парами событий. Таковы, например, события (M) и (N), одновременные в поезде Л′.

Мы знаем, что эта одновременность относительна и что она нарушается, если события рассматривать в системе отсчета железнодорожного пути, в которой событие (M) происходит в момент $t_m = 1$ час., а событие (N) — в момент $t_n = 4$ час., т. е. *после* события (M). Но достаточно взглянуть на любую из диаграмм (S), например показанную на рис. 25, чтобы понять, что порядок следования этих событий непосредственно связан с направлением движения поезда Л′ по отношению к платформе Л. Действительно, если бы система Л двигалась относительно системы Л′ со скоростью $v = {}^3/_5$ не влево, а вправо, мы имели бы $t_m = 4$ час. и $t_n = 1$ час.

В качестве упражнения, а также чтобы лучше разобраться в диаграмме (S), мы можем проследить обращение порядка следования событий (M) и (N), рассматривая их в поезде Л″, который движется по отношению к железнодорожному полотну в том же направлении, что и поезд Л′, но со скоростью v, большей чем ${}^3/_5$ и равной, скажем, ${}^4/_5$.

Вычислив для этой скорости коэффициент релятивистского сокращения C, мы найдем, что он равен ${}^3/_5$. Зная величину этого коэффициента, мы легко сможем построить диаграмму (S), представляющую движение более быстрого поезда Л″ по отношению к платформе Л.

Одна из таких диаграмм, изображенная на рис. 26, показывает, что события (M) и (N), имеющие в системе Л координаты

$$\text{(M)}: \qquad m(-1) \qquad t_m = 1 \text{ час.},$$
$$\text{(N)}: \qquad n(+4) \qquad t_n = 4 \text{ час.},$$

происходят в системе Л″ соответственно в точках $m''(-3)$ и $n''\ (+4/3)$. Тогда из свойства (Э) следует, что событие (M)

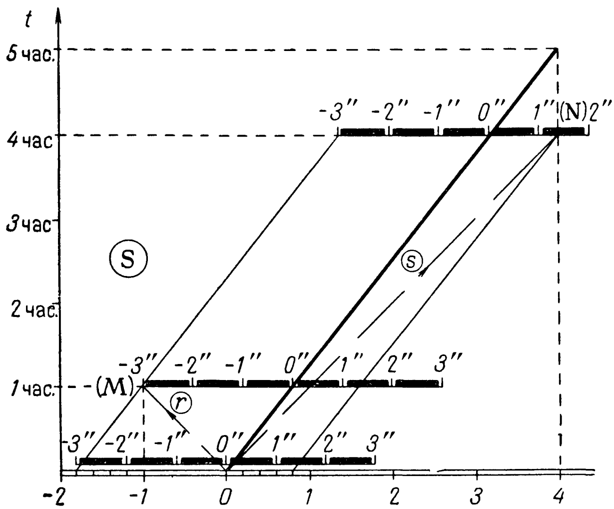


Рис. 26.

происходит в момент $t_m''=3$ час., а событие (N) — в момент $t_n''=1$ час. 20 мин., т. е. в порядке, *противоположном* тому, в котором они происходят в поезде Л′ (см. рис. 25).

Понятно, что перед наблюдателями на железнодорожном пути возникает задача — узнать, может ли существовать такой «поезд» Л′, в котором окажутся *одновременными* (разделенными нулевым интервалом времени) два события (M) и (N), *не подчиненные* тому условию, которое было наложено на пару событий (O) и (W). Эта задача подобна и в известном смысле симметрична предыдущей задаче (так как теперь события ближе во времени, чем в пространстве, т. е. время и пространство поменялись местами).

На рис. 27 мы видим, что интервал времени между событиями (M) и (N), измеряемый физиками на железнодорожном пути, равен $t_{mn}=3$ *час*, а расстояние между ними равно $mn=5$ единицам. Таким образом, физики на

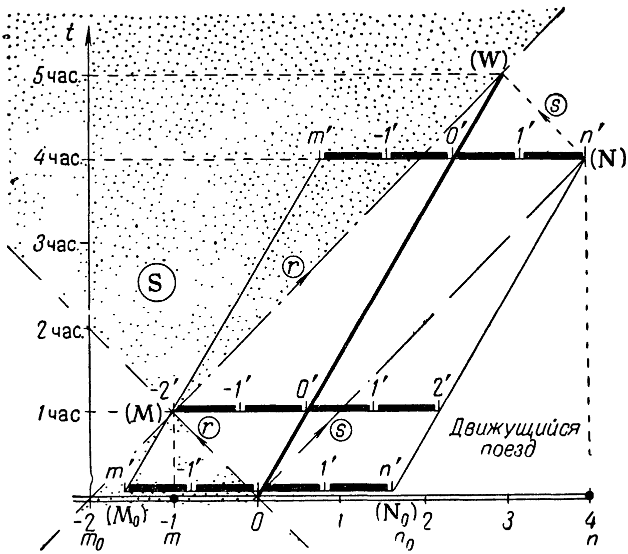


Рис. 27.

платформе могут найти «скорость поезда» $v={}^3/_5$, разделив величину «смещения одновременности» t_{mn} на расстояние mn. Не кажется ли вам странной эта операция? Ведь мы привыкли определять скорость путем обратной операции — деления расстояний на промежутки времени!

Действительно, общий анализ, проведенный нами в разд. 31 (стр. 122), показал, что при любой скорости v относительного движения промежуток времени t_{mn} связан с расстоянием mn соотношением

$$\frac{v}{c}=\frac{c\cdot t_{mn}}{mn}.$$

В выбранной нами системе единиц $c=1$, потому-то мы и делим время t_{mn} на расстояние mn. В действительности при делении мы получаем отношение двух скоростей, деля расстояние $c \cdot t_{mn}$, пройденное светом за t_{mn} *час*, на расстояние mn.

Таким образом, всякий раз, когда деление t_{mn} на mn дает «скорость» v, меньшую 1, т. е. всякий раз, когда расстояние между рассматриваемыми событиями в произвольной системе отсчета Л превышает расстояние, которое свет проходит в течение соответствующего промежутка времени t_{mn}, физики, лаборатория которых связана с системой отсчета Л, могут найти систему Л′, в которой события (М) и (N) одновременны.

На диаграмме (S) это условие графически изображается следующим образом. Точка, обозначающая событие (N), более позднее, чем событие (М), находится вне *светового конуса*[1], образованного прямыми, изображающими траектории движения световых сигналов r и s, испущенных из точки (М). Про такие пары событий можно сказать, что они «ближе во времени, чем в пространстве» (см. рис. 27).

Повторив все наши рассуждения, мы можем составить новое инвариантное выражение[2] из величин mn и t_{mn},

---

[1] Световой конус не является поверхностью в обычном, 3-мерном смысле. Это геометрическое место точек, в которые рано или поздно попадет свет от мгновенной вспышки в вершине конуса (световой конус будущего), и геометрическое место точек, из которых свет может попасть в вершину конуса (световой конус прошлого). Под точками (в том числе под вершиной конуса) здесь понимаются 4-мерные точки, характеризуемые как их положением в пространстве, так и моментом времени, т. е. это *события*, а пространство мыслится как *пустое*. Можно сказать, что все, что мы видим вокруг себя в данный момент времени в ясную ночь, находится в световом конусе прошлого с вершиной в глазу наблюдателя в этот *момент*. Иначе говоря, световой конус — это каждый раз *весь мир*, 3-мерные точки которого взяты в определенной последовательности во времени, а не в один и тот же момент, как мы привыкли представлять себе Вселенную в обыденной жизни.— *Прим. ред.*

[2] Действительно, мы можем выписать следующий ряд соотношений:

$$\left(D'_{mn}\right)^2 = C^2 \cdot (mn)^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot (mn)^2 = (mn)^2 - c^2 t^2_{mn}.$$

Некоторые авторы вводят величину $s^2 = c^2 \cdot t^2_{mn} - (mn)^2 = -(D'_{mn})^2$, аналогичную квадрату интервала $s^2 = c^2 \cdot t_{ow} - (ow)^2$. Очевидно, в этом случае квадрат интервала будет отрицательной величиной.

определяющее расстояние D_{mn} в «системе одновременности».

Итак, с одной стороны, мы имеем пары событий, таких, как (O) — (W), которые «ближе в пространстве, чем во времени» и в некоторых системах отсчета могут быть пространственно-совпадающими. Порядок следования таких событий будет *абсолютным*. С другой стороны, мы имеем пары таких событий, как (M) — (N), которые «ближе во времени, чем в пространстве». В некоторых системах отсчета они могут быть *одновременными* и порядок их следования относителен [1].

Совокупность всех таких пар событий исчерпывает почти все возможности, которые могут представиться. Но нам остается рассмотреть еще предельный случай таких пар, как (O) — (N) или (O) — (M) (пары событий, «равно отстоящих» друг от друга как в пространстве, так и во времени). К этому типу принадлежат также пары событий (M) — (W) и (N) — (W).

Однако мы не имеем права применять к событиям типа (M) или (N), которые находятся на прямых, изображающих относительное движение световых сигналов r или s, исходящих из точки o, рассуждения, которые применимы к паре событий (O) — (W), когда точка, изображающая событие (W), находится внутри конуса, образуемого траекториями движения этих сигналов и не касается их.

Действительно, если применить предыдущие рассуждения, например, к паре (O) — (N), то это привело бы к тому, что нам пришлось бы делить расстояние on на время t_{on}, или наоборот. В обоих случаях мы получили бы результат $v=1$. Тогда нам пришлось бы рассматривать события (O) и (N) либо как пространственно-совпадающие, либо как одновременные в поезде Л′, движущемся относительно платформы *со скоростью света*. Но тогда коэффициент C обратился бы в нуль, и по обычным формулам мы получили бы, что собственное время между пространственно-совпадающими событиями равно нулю, а расстояние между одновременными событиями (в «системе одновременности») также равно нулю.

---

[1] Интервал s^2 пространства-времени, соединяющий события типа (O) и (W), часто называют *временноподобным*, а интервал, соединяющий события типа (M) и (N), — *пространственноподобным*.— *Прим. перев.*

Но, как мы знаем, один из основных принципов теории Эйнштейна состоит в том, что никакое материальное тело [1] не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света или равной ей. Истинное физическое объяснение пар событий (O) — (N), (O) — (M) и т. д. состоит в том, что эти события непосредственно связаны друг с другом световыми сигналами [2].

Читатель не должен смешивать обращение в нуль собственного времени или расстояния в «системе одновременности» для пар событий типа (O) — (N) в воображаемом поезде, который двигался бы со скоростью света (предельный случай), и промежуток времени и расстояние между этими событиями в реальных поездах Л′ или в реальных физических лабораториях Л. Напомним, например, что для пары событий (O) — (N) мы имеем следующие характеристики:

	Промежуток времени	Расстояние
В системе Л	$t_{on} = 4$ *час*	$on = 4$
В системе Л′	$t'_{on} = 2$ *час*	$o'n' = 2$

Поскольку ни в одном реальном поезде события (O) и (N) не являются ни пространственно-совпадающими, ни одновременными, то коэффициент C не входит ни в соотношение между t_{on} и t'_{on}, ни в соотношение между on и $o'n'$.

[1] Под «материальным телом» автор понимает макроскопический объект. Вообще термин «материя» в физике (особенно в публикациях не на русском языке) часто употребляется в своем узком смысле — для обозначения лишь вещества. В действительности материальность объекта однозначно определяется наличием у него массы (энергии). Поэтому материальны и движущиеся со скоростью c фотоны, так как они обладают массой (энергией) движения. Заметим, что массу движения не следует смешивать с массой покоя (у фотона последняя не существует).— *Прим. ред.*

[2] Нужно учесть, что для пар событий типа (O) — (N) квадрат интервала s^2 между этими событиями равен нулю.

ГЛАВА 10

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОРЕНЦА И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ

38. Пример физического подхода: вывод преобразования Лоренца

Как мы уже знаем, преобразование промежутка времени и расстояния между двумя событиями при переходе от одной системы отсчета к другой удовлетворяет определенным соотношениям. Эти соотношения достаточно просты, если события в системе отсчета являются одновременными или пространственно-совпадающими.

Однако есть немало задач, в которых речь идет о взаимосвязи таких двух лабораторий, ни в одной из которых рассматриваемые события не являются ни одновременными, ни пространственно-совпадающими.

С такой задачей мы сталкиваемся, рассматривая, кроме системы отсчета Л, связанной с железнодорожным полотном, и системы отсчета Л′, связанной с движущимся поездом, третью систему отсчета Л″, связанную с ракетой, движущейся по отношению к железной дороге в том же направлении, что и поезд, но с гораздо большей скоростью. Если нас интересует относительная скорость ракеты по отношению к поезду, то, зная скорости v и u поезда и ракеты по отношению к железнодорожному пути, мы ее легко найдем, воспользовавшись классическим правилом векторного сложения скоростей. Согласно этому правилу, скорость ракеты по отношению к поезду получается вычитанием скорости v поезда из скорости u ракеты по отношению к железной дороге.

Пусть, к примеру, скорость ракеты $u = {}^5/_7$, а скорость поезда $v = {}^3/_5$. Тогда по классической теории относительная скорость ракеты равна

$$u - v = \frac{5}{7} - \frac{3}{5} = \frac{4}{35}.$$

Мы покажем, что, согласно теории Эйнштейна, скорость ракеты по отношению к поезду существенно отличается от этого «классического» значения.

Обозначим через u' скорость ракеты по отношению к поезду, полученную по теории Эйнштейна. Попытаемся вычислить величину u' при помощи основных соотношений, выведенных в предыдущих главах.

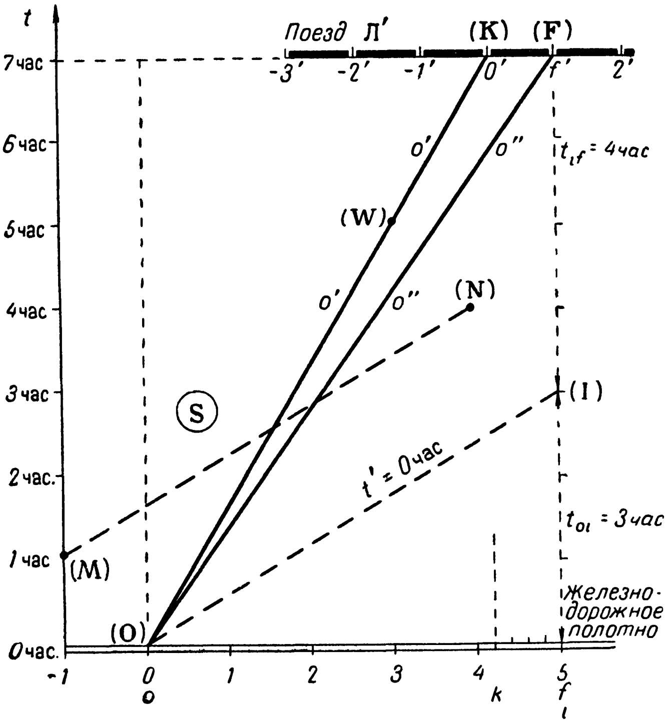


Рис. 28.

Пусть o'' — точка ракеты, которая в момент $t=0$, определяющий событие (O), проходит через точку o железнодорожного полотна (рис. 28). Предположим, что движение ракеты является «простым». Тогда мы можем однозначно описать это движение, зафиксировав два следующих события: прохождение точки o'' через точку o, т. е. событие (O), и прохождение точки o'' через точку f $(+5)$ железнодорожного полотна в момент $t_f=7$ час. Последнее из этих событий мы обозначим буквой (F).

На рис. 28 мы видим, что прямая (O) — (F), изображающая относительное движение ракеты на диаграмме

(S), не совпадает с прямой (O) — (W), изображающей относительное движение точки o' поезда, скорость которого по отношению к железной дороге равна всего $^3/_5$.

События (O) и (F) в системе отсчета железнодорожного полотна не являются ни пространственно-совпадающими, ни одновременными, поскольку ни расстояние of между этими событиями, ни интервал времени t_{of} между ними не равны нулю:

$$of = 5; \qquad t_{of} = 7 \text{ час.}$$

Так как, с другой стороны, событие (F) не находится на прямой, изображающей относительное движение точки o' поезда, то события (O) и (F) не являются пространственно-совпадающими также и в системе отсчета поезда. Кроме того, как мы сейчас покажем, в поезде эти события не могут быть и одновременными.

Обратимся к диаграмме (S) на рис. 28, где использована часовая сеть t железнодорожного пути, и нанесем на эту диаграмму «мгновенный снимок» поезда в момент $t_f = 7$ час., одновременный с событием (F). Так как скорость движения поезда по отношению к железнодорожному полотну равна $^3/_5$, то коэффициент релятивистского сокращения $C = {}^4/_5$. Отсюда следует, что для учета релятивистского сокращения все изображения поезда в некоторый момент времени t на диаграмме (S) нужно уменьшить в отношении $^4/_5$.

Тогда рис. 28 показывает, что событие (F) происходит в точке $(+1')$ по шкале поезда; эту точку соответственно обозначим как $f'(+1')$. Расстояние в поезде между событием (O), которое происходит в точке с делением (O'), и событием (F), которое происходит в точке с делением $(+1')$ шкалы поезда, выражается величиной [1].

[1] Этот результат, полученный чисто графическим путем, легко получить и арифметически. Обозначим через (K) событие, определяемое пересечением прямой, изображающей относительное движение точки o', «мгновенным» изображением поезда в момент $t=7$ час. Тогда, очевидно, положение k события (K) на шкале платформы совпадает с положением точки o' на той же шкале в момент $t=7$ час. Поскольку скорость точки o' по отношению к платформе равна $^3/_5$, то эта точка за 7 *час* пройдет расстояние $^{21}/_5 = 4^1/_5$ единицы. Точка k по шкале платформы отстоит на $^4/_5$ единицы от точки $f(+5)$. Но расстоянию kf в «системе одновременно-

$$\boxed{o' f' = 1.}$$

Обратимся снова к рис. 28. Он напоминает нам, что события (M) и (N), одновременные в поезде, на платформе разделены промежутком времени 3 *час* и расстояние между ними равно 5 единицам. Если мы рассмотрим событие (I), происходящее в точке $f(+5)$, в 5 единицах от точки o и одновременное с событием (O) в системе отсчета поезда, то мы легко убедимся, что пара событий (O) — (I) будет вести себя так же, как пара (M) — (N), следовательно, в системе отсчета железнодорожного пути события (O) и (I) также не будут одновременными, а будут разделены промежутком времени в 3 *час*.

На рис. 28′ изображена диаграмма (S′) для иллюстрации движения ракеты по отношению к поезду. Поскольку ракета летит над поездом, ось времени t' на рисунке направлена вверх (тогда как при изображении движения платформы на диаграмме (S′) ось времени обычно направляют вниз, чтобы подчеркнуть, что полотно дороги расположено ниже поезда).

Таким образом, чтобы найти на рис. 28 точку, изображающую событие (I), достаточно определить точку пересечения вертикальной прямой, проходящей через точку $f(+5)$, с прямой, параллельной линии (M) (N) и проходящей через (O). Это сразу же дает $t_i=3$ час. и $t_{if}=4$ *час*.

По определению, события (I) и (F) являются пространственно-совпадающими на железнодорожном полотне, так как они происходят в одной и той же точке $f(+5)$ желез-

---

сти» Л соответствует расстояние kf/C в «другой системе». Тогда расстояние $o'f'$ между событиями (K) и (F) равно 1.

В общем случае такое же рассуждение, но без конкретизации величин v, of и t_{of} непосредственно приводит к формуле

$$o' f' = \frac{of - v \cdot t_{of}}{C}.$$

Полагая здесь $of=x$; $o'f'=x'$; $t_{of}=t$, $A=1/C$, приводим эту формулу к виду

$$x' = A \cdot (x - vt).$$

Читатели, знакомые с математическим аппаратом теории Эйнштейна, легко узнáют в этой формуле первую формулу преобразований Лоренца.

нодорожного полотна. Промежуток времени t_{if} дает собственное время процесса (I)—(F), равное 4 *час.* Этому собственному времени в поезде, движущемся со скоростью

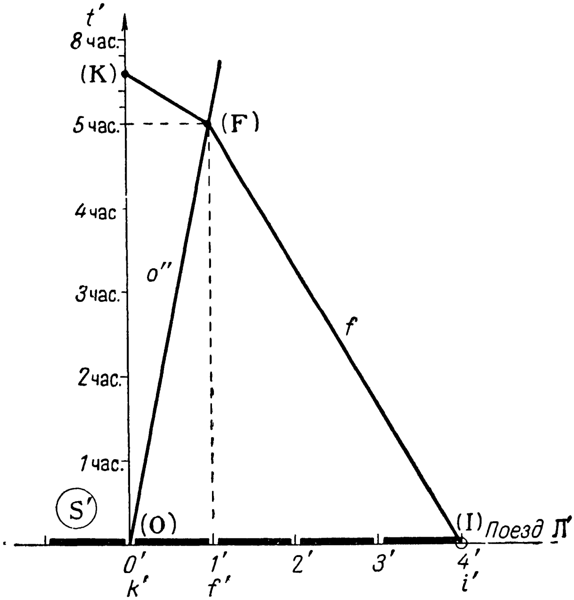


Рис. 28'.

$v = {}^3/_5$ по отношению к железнодорожному полотну (так что $C = {}^4/_5$), соответствует «несобственное» время

$$t'_{if} = 5 \text{ час}$$

Однако диаграмма (S'), представленная на рис. 28', напоминает нам, что само определение событий (I) подразумевает равенство интервалов времени t'_{if} и t'_{of}, поскольку события (I) и (O) в поезде одновременны. Следовательно, мы находим, что

$$\boxed{t'_{of} = 5 \text{ час}^{1)}}$$

[1] С помощью таких же рассуждений можно показать, что в общем случае интервал времени t'_{of} выражается следующей формулой:

Зная, что $t'_{of}=5$ *час* и $(o'f')=1$ единице длины, можно начертить на рис. 28' прямую (O)(F), изображающую движение точки o'' ракеты по отношению к поезду.

Кстати, заметим, что на той же самой диаграмме (S') движение точки f по отношению к поезду изображается прямой (I)(F). Наклон этой прямой соответствует скорости $v={}^3/_5$ железнодорожного полотна по отношению к поезду. Как видно из диаграммы (S') (см. рис. 28'), ракета движется по отношению к поезду так, что за 5 *час* (по часовой сети поезда) она опережает поезд на 1 единицу.

Следовательно, относительная скорость ракеты в системе отсчета поезда равна

$$u'=\frac{1}{5}=\frac{7}{35},$$

а не ${}^4/_{35}$, как это было бы в классической теории [1]).

$$t'_{of}=\frac{t_{of}-\frac{v\cdot(of)}{c^2}}{C}.$$

Используя те же обозначения, что и в предыдущем примечании на стр. 162, и полагая $t'_{of}=t'$, можно переписать эту формулу в виде

$$t'=A\cdot\left(t-\frac{v\cdot x}{c^2}\right).$$

В этой формуле легко можно узнать вторую формулу преобразований Лоренца.

[1]) Найдем u', разделив общую формулу для $o'f'$ на общую формулу t'_{of} [напомним, что $u=(of)/t_{of}$]:

$$u'=\frac{(of)-v\cdot t_{of}}{t_{of}-\frac{v\cdot(of)}{c^2}}=\frac{u-v}{1-\frac{v\cdot u}{c^2}}$$

вместо

$$u'_{\text{класс}}=u-v.$$

Легко видеть, что полученная релятивистская формула сложения скоростей вполне согласуется со свойством (Э), согласно которому скорость света во всех системах отсчета одна и та же и равна c. Действительно, полагая $u=c$, получаем, что $u'=c$.

Решая эту релятивистскую формулу относительно u, можно найти равноценную ей формулу сложения скоростей:

$$\boxed{u=\frac{v+u'}{1+\frac{vu'}{c^2}}.}$$

Совокупность операций, которые позволили нам вычислить расстояние $o'f'$ и промежуток времени t' между событиями (O) и (F), зная расстояние of и промежуток времени t между этими событиями на железной дороге, носит общее название *преобразований Лоренца* в честь знаменитого голландского физика Лоренца, который получил в общем виде формулы, приведенные нами в подстрочных примечаниях к этому разделу. Однако он не сумел вскрыть истинного физического смысла полученных им формул. Заслуга физического истолкования преобразований Лоренца принадлежит Эйнштейну [1].

39. «Путешественник Ланжевена» [2]

Если, как мы показали выше, так называемое отставание часов — не более как неудачный термин, то парадоксальные свойства путешествия на огромной скорости по отношению к некоторой инерциальной системе отсчета по замкнутому маршруту туда и обратно, напротив, вполне реальны.

Эти свойства, предсказанные по существу еще Эйнштейном, представил в особенно увлекательной форме французский физик Поль Ланжевен. Он сравнил сумму собственных времен, прошедших для космонавта, совершившего путешествие туда и обратно в ракете, движущейся с огромной скоростью по отношению к инерциальной лаборатории Л, и суммарное собственное время, прошедшее

---

[1] Очевидно, что общие формулы преобразования Лоренца, полученные для положительных значений x и x', верны независимо от знака x и x'. Очевидно также, что эти формулы описывают и обратный переход от системы отсчета Л к системе отсчета Л':

$$x = \mathrm{A}\,(x' + vt); \qquad t = \mathrm{A}\left(t' + \frac{vx}{c^2}\right).$$

Для этого достаточно в полученных формулах переставить штрихи у x и t, а также заменить v на $-v$. Последнее означает, что, когда ось $o'x'$ поезда движется вправо по отношению к оси ox железной дороги (направленной вправо), железная дорога движется влево по отношению к оси $o'x'$.

К этим двум формулам, строго говоря, надо было бы добавить также соотношения $y = y'$, $z = z'$, т. е. утверждение, что вдоль осей oy и oz (поперек направления относительно движения систем) не происходит никакого (даже релятивистского) сокращения длин.

[2] Описываемое в этом разделе явление чаще называют «парадоксом часов», или «парадоксом близнецов».— *Прим. ред.*

для контрольного наблюдателя, который покоился в этой инерциальной системе отсчета.

Диаграмма (S) позволяет без труда проследить рассуждения Ланжевена. Рассмотрим рис. 29, на котором показано, что «путешественник Ланжевена» отправляется в

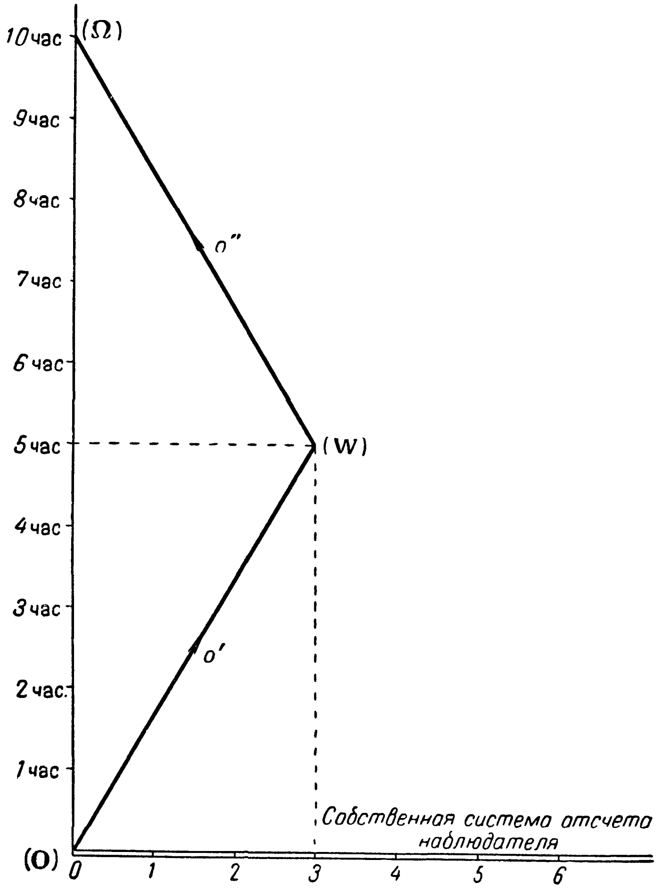


Рис. 29.

полет на ракете Л′ со скоростью $v = {}^3/_5$ в некоторый момент, который мы примем за начало отсчета времени по часовой сетке лаборатории Л. Вспомним, что в прежних рассуждениях такая ракета соответствовала поезду Л′, а инерциальная лаборатория — железнодорожному пути. Тогда вылет ракеты представляет собой событие (O).

После путешествия «туда», собственное время которого $T = 4$ *час* (конечно, по часовой сетке t' ракеты Л′), космонавт осуществляет поворот назад [событие (W)], причем время, затраченное на поворот, пренебрежимо мало по сравнению с T′, или, что то же, «перепрыгивает» на ходу в другую ракету Л″, движущуюся по отношению к лаборатории Л с такой же скоростью $v = {}^3/_5$, но в противоположном направлении. Возвращение космонавта в исходную точку o в системе отсчета Л, где его ждет контрольный наблюдатель, мы назовем событием (Ω), так как оно соответствует «концу путешествия»[1]. Это происходит в точке o системы Л или в точке o'' системы Л″.

Как мы уже знаем, согласно теории Эйнштейна, собственным длительностям путешествия «туда» (O) — (W) и путешествия «обратно» (W) — (Ω) (в каждом случае $T' = 4$ *час*) соответствуют «несобственные» длительности, измеряемые в системе Л физиками, размещенными вдоль всей траектории движения, причем эти «несобственные» длительности растянуты в $A = {}^5/_4$ раза, что соответствует скорости $v = {}^3/_5$. Значит,

$$t_{ow} = A \cdot T' = \left(\frac{5}{4}\right) \cdot 4 = 5 \text{ час},$$

$$t_{w\omega} = A \cdot T' = \left(\frac{5}{4}\right) \cdot 4 = 5 \text{ час}.$$

Отсюда непосредственно видно, что расстояние ow между событиями (O) и (W) в системе отсчета Л, пройденное ракетой по отношению к космодрому за время путешествия «туда» (O) — (W), равно $v \cdot t_{ow} = 3$ единицам (каждая единица равна примерно миллиарду километров!).

Ясно, что при таких обстоятельствах покоящийся в точке o контрольный наблюдатель не преминет «потерять» из виду» ракету-путешественницу на время большей части ее полета. Поэтому этапы «удаления» и «приближения» по отдельности еще не будут ничего говорить нашему контрольному наблюдателю. Этого нельзя, однако, сказать о *событиях* вылета (O) и возвращения (Ω) путешественника,

[1] «Омега» (Ω, ω) — последняя буква греческого алфавита. Напомним, что несколько выспренное выражение «альфа и омега» именно поэтому означает «начало и конец».— *Прим. ред.*

которые могут ограничивать во времени физический или биологический (неважно какой!) процесс, протекший за это время в точке *o*, например просто жизненный путь контрольного наблюдателя.

Таким образом, поворот ракеты приводит к тому, что сумма $t_{ow}+t_{w\omega}$ «несобственных» продолжительностей двух фаз путешествия преобразуется в одну собственную длительность $t_{w\omega}=10$ *час* некоторого явления, происходящего в точке *o*, например некоторого периода жизни контрольного наблюдателя. Очевидно, это собственное время для контрольного наблюдателя имеет точно такую же физическую (или биологическую) природу, что и собственное время путешествий «туда» и «обратно», для путешествующего наблюдателя, несмотря на то что для последнего сумма его собственных времен равна $2T'$, т. е. только 8 *час*!

Таким образом, из теории Эйнштейна следует, что если считать продолжительность поворота пренебрежимо малой (и пренебрегать эффектом самого прыжка космонавта из одной ракеты в другую, движущуюся с той же скоростью в противоположном направлении), то необходимо заключить, что *контрольный наблюдатель стареет несколько быстрее, чем «путешественник».* Действительно, между одними и теми же событиями (O) и (Ω) для космонавта проходит 8 *час*, а для наблюдателя 10 *час*, тогда как характер восприятия у того и другого будет совершенно одинаков, ибо в силу принципа относительности «простое» движение по инерции не дает никаких наблюдаемых эффектов [1]).

Конечно, космонавт рискует разбиться насмерть, если ракета будет стартовать со слишком большим ускорением или если он слишком быстро перепрыгнет из ракеты, ле-

[1]) Эту мысль можно выразить подробнее так. Наблюдатель в ракете *действительно* проживет там за время путешествия 8 *час*, а контрольный наблюдатель будет *действительно* ждать возвращения путешественника в течение целых 10 *час*. Их восприятия будут одинаковыми не в том смысле, что ощущение длительности полета будет у обоих «количественно» одно и то же, а как раз наоборот — восприятия обоих наблюдателей будут в равной мере *физиологически нормальными* (в периоды инерциального движения!), так что контрольный наблюдатель совершенно нормально успеет сделать в $^{10}/_{8}$ больше дел, чем столь же нормально успеет сделать путешественник между одними и теми же для них обоих событиями (O) и (Ω). Это будет относиться, например, к числу биений их пульса.— *Прим. ред.*

тящей «туда», в ракету, мчащуюся «обратно». Кроме того, очевидно, что специальная теория относительности неприменима к ускоренным движениям, например к таким скачка́м, даже если они осуществимы [1].

Хотя до сих пор среди специалистов еще нет единого мнения по данному вопросу, большинство физиков считает, что Ланжевен был прав и что продолжительность запуска и ускорения ракеты, а также продолжительность ее поворота, которые не удается описать в специальной теории относительности, всегда можно сделать пренебрежимо малыми, сделав время «инерциального» движения достаточно большим. Успешные запуски космических кораблей (правда, со скоростями, гораздо меньшими «релятивистских») показывают, что периоды запуска и маневрирования при повороте (например, при облете вокруг Луны) действительно не играют существенной роли по сравнению с полной продолжительностью путешествия.

Но можно задать и другой вопрос: нельзя ли поменять ролями системы Л и Л′ вследствие хорошо известного нам свойства взаимности систем отсчета, так что контрольный наблюдатель станет путешественником, а путешественник — «покоящимся» наблюдателем? Не окажется ли тогда, что выводы Ланжевена должны быть заменены на противоположные? Но между «путешественником Ланжевена» и покоящимся наблюдателем нет полного равнопра-

---

[1] Академику В. А. Фоку удалось сформулировать специальную теорию относительности в произвольных (в том числе и неинерциальных) системах отсчета, так что последнее утверждение автора неверно. Читатель должен иметь в виду, что предубеждение, будто неинерциальные системы отсчета можно рассматривать лишь в общей теории относительности, широко распространено; на самом же деле эта последняя теория существенно связана лишь с искривлением пространства — времени, т. е. с описанием гравитационного поля (см., например, В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения. М., 1961).

Главная трудность при описании неинерциальных систем отсчета состоит в более сложном введении в них наблюдаемых физических величин (интервалов времени, длин и пр.), чем в инерциальных системах, где, применяя декартовы координаты, можно, например, просто отождествить временну́ю координату с наблюдаемым физическим временем. Однако в инерциальных системах отсчета ускоренное движение объектов без труда описывается с помощью обычной формулировки специальной теории относительности, так что сомнения автора этой книги в какой-то мере оправданы лишь в отношении *принципа взаимности* (см. дальнейшие абзацы этого раздела).— *Прим. ред.*

вия: контрольный наблюдатель сохраняет по отношению к произвольной инерциальной системе отсчета состояние «простого» (равномерного и прямолинейного) движения,

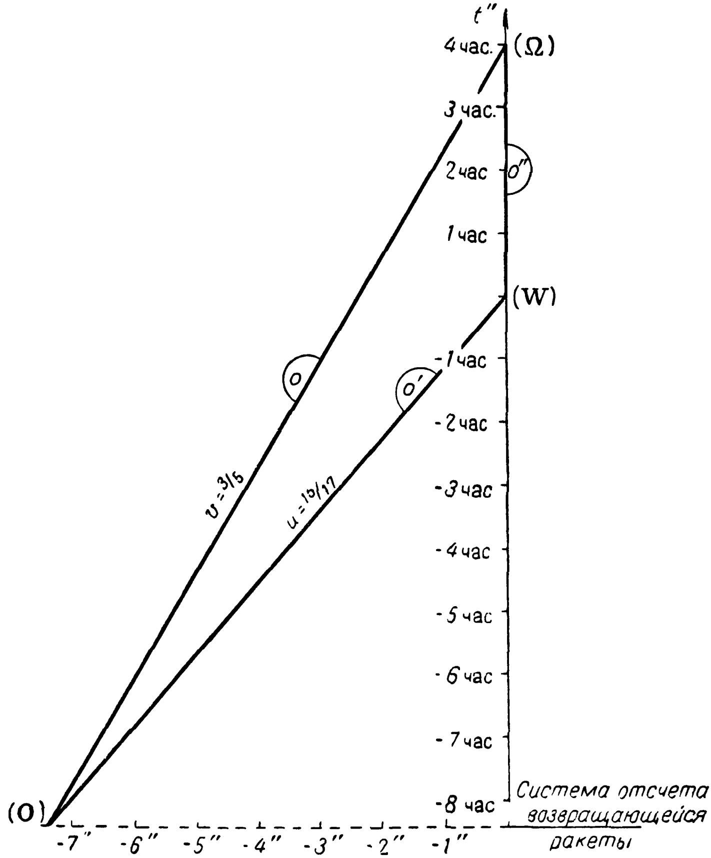


Рис. 30.

тогда как путешественник совершает по отношению к произвольной инерциальной системе отсчета два различных последовательных «простых» движения.

Можно порекомендовать читателю в качестве упражнения рассмотреть путешествие нашего космонавта с точки зрения системы отсчета Л″, связанной с ракетой, летящей «обратно». Соответствующую диаграмму (S″) легко построить, заметив, что по отношению к системе Л″ наблюдатель движется со скоростью $v = {}^3/_5$, тогда как ракета, летящая «туда», движется по отношению к этой системе со скоростью $u = {}^{15}/_{17}$ (которую можно найти, используя релятивистскую формулу сложения скоростей, выведенную в разд. 38). Этим двум скоростям соответствуют коэффициенты релятивистского сокращения, равные $^4/_5$ и $^8/_{17}$. Диаграмма (S″) приведена на рис. 30, который ясно показывает, что выводы Ланжевена не изменяются, если по-прежнему пренебрегать продолжительностью «скачков».

Действительно, собственное время возвращения непосредственно указано на диаграмме. Но продолжительность путешествия «туда», равная 8 *час* 30 *мин* по часам в системе отсчета Л″,— «несобственное» время. Умножая его на коэффициент релятивистского сокращения $C = {}^8/_{17}$, мы находим собственное время $T' = 4$ *час*. Точно так же продолжительность «простого» движения контрольного наблюдателя *o*, равная 12 *час* 30 *мин*, является «несобственным» временем. Умножая его на коэффициент C, равный $^4/_5$, находим, что собственное время движения контрольного наблюдателя равно 10 *час*.

Как мы уже отметили, в вопросе о «путешественнике Ланжевена» еще далеко не все можно считать достоверно установленным. Поэтому читатель должен подойти к этой проблеме с должной осторожностью (тем более что проблема вызывает огромный интерес в связи с космическими путешествиями). Однако у него не должно остаться никакого сомнения в том, что ни один вариант решения этой проблемы не может поколебать эйнштейновской теории основных свойств пространства — времени, изложению которых была посвящена эта книга!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В наши дни ученым все чаще и чаще приходится иметь дело со скоростями, близкими к скорости света. С такими скоростями физики сталкиваются, исследуя космические лучи. Такие скорости, вплоть до 99,99999% скорости света, достигнуты в наиболее совершенных ускорителях элементарных частиц. Недалек тот день, когда ракеты с «путешественниками Ланжевена» на борту будут стартовать в космос с огромными скоростями, достаточно большими, чтобы можно было обнаружить эффект замедленного старения путешествующих.

При таких огромных скоростях «релятивистский множитель» C оказывается настолько значительным, что движение тел тогда просто невозможно изучать в рамках устаревших классических понятий о времени и о пространстве.

Релятивистские эффекты давно уже перестали быть «философическими хитростями», теперь это неотъемлемая часть целого современной науки.

Читатель смог уже убедиться, что теория Эйнштейна в сущности более проста и изящна, чем прежние физические теории. Возможно, наши потомки найдут теорию относительности такой же очевидной и естественной, каким мы находим представление о сферичности Земли или о системе мира по Копернику.

Мы не ставили себе целью дать полный обзор всех открытий Эйнштейна. Мы лишь разобрали вопросы, наиболее трудные для понимания, когда приходится сталкиваться с ними впервые, и которые бывают изложены либо в грубо упрощенном виде, либо на чрезмерно математизированном языке. Смеем надеяться, что мы выполнили пожелание Гастона Берже, сказавшего: «Всякий прогресс в познании должен сопровождаться таким разъяснением, которое сделало бы его суть доступным для всех остальных».

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Профессор Парижского университета (Сорбонны) Владимир Курганов задумал эту книгу как строгое, но популярное изложение специальной (частной) теории относительности [1], в котором главную роль играет анализ хода физических рассуждений. Автор считает, что внутренняя логика математического расчета перегружает обычные математизированные изложения специальной теории относительности и затемняет физический смысл проблем. Это утверждение спорно. Напротив, язык математики — наиболее ясный, емкий и гибкий — как нельзя лучше приспособлен для описания и исследования явлений природы. Конечно, у него, как у всякого языка, существуют свои нормы, свой «грамматический» строй, однако концентрированный математический вывод следствий из основных полученных опытным путем постулатов теории более обозрим и поддается более простому осмыслению [2], чем аналогичный вывод, полученный в ходе словесных рассуждений. Проф. Курганов считает, что это не совсем так, и поэтому строит свою книгу, рассматривая различные мысленные эксперименты и иллюстрируя их графиками. Этот прием вполне законен, и автор в конце концов знакомит читателя со всеми основными кинематическими следствиями специальной теории относительности, выводя их при

[1] Общая теория относительности рассматривает произвольное движение наблюдателей в присутствии гравитационного и других полей. Специальная теория относительности, которую иногда называют частной, является частным случаем общей теории относительности, когда рассматривается лишь инерциальное движение наблюдателей и можно пренебречь действием гравитационного поля (традиционный подход к теории).

[2] При этом от читателя требуется владение «языком», и недостаток математической тренировки у широкого круга читателей вызывает необходимость обращаться к популярной литературе.

помощи теоремы Пифагора и четырех действий арифметики.

Популярных книг по частной теории относительности уже довольно много. Книга проф. Курганова начинается с выяснения смысла основных геометрических и физических понятий, без которых невозможно говорить о законах природы и теории относительности. Знакомство с этими понятиями и ясность в обращении с ними — необходимое звено в общем интеллектуальном развитии всякого человека, особенно в наш век прогресса техники и естественных наук.

Несмотря на пресловутый отказ от языка математики, стиль автора все же остался довольно сухим. Но читатель, который последовал совету автора и читал книгу внимательно, не «по диагонали», безусловно, оценил, как много в ней содержательных и глубоких идей. Поэтому наша задача здесь — говорить не столько о достоинствах книги, сколько об имеющихся в ней, на наш взгляд, пробелах.

Прежде всего в ней сильно упрощено представление об опыте Майкельсона — Морли, так что может показаться, будто этот опыт окончательно послужил установлению того факта, что скорость света одинакова в различных системах отсчета. На самом деле этот эксперимент лишь доказал, что скорость света *изотропна* (одинакова во всех направлениях) в любой инерциальной системе отсчета. Хотя от этого всего один шаг до заключения о постоянстве скорости света вообще, на самом деле экспериментаторам (Кеннеди и Торндайку) пришлось ставить специальный, соответственно усложненный опыт, чтобы его доказать. Читателю, кроме того, было бы полезно приобрести более конкретное представление и о самой постановке опыта Майкельсона, не ограничивающееся классической и остроумной притчей о релятивистском поезде. Для дальнейшего знакомства с этими вопросами можно рекомендовать следующие книги: М. Борн, «Эйнштейновская теория относительности» (М., «Мир», 1964), Д. Бом, «Специальная теория относительности» (М., «Мир», 1967) и подготавливаемый к изданию на русском языке отличный учебник Э. Тейлора и Дж. Уилера «Физика пространства — времени» [1]. Без математических формул теорию относительности очень живо и остроумно излагает Г. Бонди в

[1] Эта книга выйдет в 1968 г. в издательстве «Мир».

книге «Относительность и здравый смысл» (М., «Мир», 1967). Специально для ознакомления с опытом Майкельсона — Морли читатель может обратиться к книге Б. Джеффа «Майкельсон и скорость света» (М., ИЛ, 1963 г.).

Проф. Курганов кратко касается гипотезы о мировом эфире в форме, развивавшейся Лоренцем, и довольно категорично говорит о внутренней противоречивости этой гипотезы. На самом же деле противоречия содержались лишь в первоначальных примитивных попытках использовать гипотезу эфира, тогда как в теории Лоренца с формальной точки зрения противоречий нет. Все экспериментальные факты находятся в согласии как с теорией относительности Эйнштейна, так и с теорией Лоренца. Однако теория Лоренца отягощена ненужными понятиями, которые играют роль «вещей в себе» (в принципе не поддается измерению и даже наблюдению, например, абсолютная скорость движения систем отсчета в мировом эфире), поэтому сам Лоренц впоследствии перешел на позиции Эйнштейна. Этот вопрос проанализирован в уже упоминавшейся книге Д. Бома.

Автор по существу не приемлет кинематических эффектов теории относительности. Ход его рассуждений при этом вкратце таков. Наблюдая движущиеся часы (определенным образом протекающий во времени физический процесс), наблюдатель и покоящиеся относительно него ассистенты заметят, что эти часы, с их точки зрения, отстают. Однако, зная скорость движения часов, они могут пересчитать показания своих («неподвижных») часов так, чтобы получить вполне однозначно показания движущихся часов. На этом основании автор заключает, что объективный смысл имеет лишь собственное время протекания процессов, что замедление хода часов (так же как и сокращение масштабов) — просто неудачно выбранный термин. Нам кажется, что при этом автор, справедливо опасаясь «субъективизации» истолкования теории, смешивает относительное и субъективное. Спора нет, свое «собственное» время — это единственное, что «знает» о длительности процессов (и по чему «выверяет» эту длительность) любой объект. И тем не менее поскольку собственное время для каждого объекта свое и поскольку эта мозаика времен не составляет единого целого (математики называют это неголономностью), то эффект замедления хода движущихся часов — *объективно* существующий эффект, зависящий не от субъективной воли наблюдателя, а от объективной физической характеристики его движения — его скорости относительно наблюдаемого объекта. Если такая скорость известна, то величина замедления хода часов определяется совершенно однозначно! [1]

Кинематические эффекты не следует отрицать на том основании, что они происходят без участия реальных сил. Действительно, релятивистское сокращение масштабов никак не связано ни с какими силами (это и имеет в виду проф. Курганов, говоря, что оно не есть «материальное сокращение»). Однако это наблюдаемый эффект (хотя бы в принципе). Подобным же образом кинематическим эффектом ньютоновской механики является возникновение «сил инерции» в неинерциальных системах отсчета, и хотя эти силы именуются фиктивными, они реально играют важную роль (вспомним, например, закон Бэра для эволюции русел рек). Кинематические эффекты существуют вполне объективно, и главное их свойство, которое отнюдь не должно нас смущать, состоит в том, что эти эффекты можно устранить при переходе наблюдателя к соответственно выбранной «собственной» (в иных случаях «инерциальной») системе отсчета.

Однако было бы полезно отметить одну важную сторону реального наблюдения релятивистского сокращения масштабов. Если фотографировать быстро движущийся объект из одной точки (а не системой приближенных к нему вплотную фотоаппаратов), то вид этого объекта на снимках отнюдь не будет напоминать картины упомянутого сокращения. В чем здесь дело? Фотоаппарат в каждый момент времени улавливает свет, который приходит к нему в этот момент, но из разных точек фотографируемого объекта этот свет выходит в разные моменты в зависимости от удаленности точек от фотоаппарата. Если объект движется со скоростью, сравнимой со скоростью света, то за время, пока свет от удаленной части объекта поравняется с более близкой частью, эта часть уже пройдет заметное расстояние, и свет от нее, идущий вместе со светом

---

[1] Итак, «скорость» течения времени не существует сама по себе; более того, если бы не было материальных объектов, то не имели бы смысла ни время, ни пространство. (Это главная идея так называемого принципа Маха, сыгравшего важную роль в становлении идей теории относительности Эйнштейна.)

от удаленной части объекта, будет испущен лишь когда наш объект заметно продвинется вперед (фотографирование в этом примере ведется спереди). Поэтому на фотографии размеры объекта будут искажены (релятивистское сокращение, напротив, нельзя назвать искажением!) — объект покажется растянутым. Читатель легко удостоверится в этом, сделав рисунок. Этот специфический «эффект» иногда действует против релятивистского эффекта (как в данном примере), а иногда складывается с ним более хитрым образом (усиливая его или даже «поворачивая» объект). Этот простой и важный вывод был получен в 1959 г. Дж. Террелом (лишь через 54 года после создания Эйнштейном специальной теории относительности!) и приобретает все больше сторонников. То же произойдет и с движущейся по циферблату стрелкой летящих с релятивистской скоростью часов, если «контрольный наблюдатель», считающийся покоящимся, смотрит на них из одной точки, не пользуясь услугами ассистентов, расположившихся на пути следования часов.

Будем надеяться, что читателя заинтересовала трактовка проф. Кургановым некоторых выводов частной теории относительности Эйнштейна и что это заставит его глубже вдуматься в теорию, лучше понять ее. Нелишне также напомнить, что в науке хорошей традицией является аргументированность и тактичность в рассуждениях, уважение к обоснованным личным взглядам. С этой точки зрения и следует рассматривать как сделанные нами здесь замечания, так и оригинальные выводы проф. Курганова.

Теперь дело самого читателя сопоставить разные подходы к релятивистской физике, оценить нюансы ее истолкования и сознательно сформулировать свое собственное миросозерцание.

Н. Мицкевич

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ II

В ПОИСКАХ «ИСТИННОЙ» СКОРОСТИ ЗЕМЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ

ЧАСТЬ III

ПРОСТРАНСТВО — ВРЕМЯ ЭЙНШТЕЙНА И ЕГО «ПАРАДОКСЫ»

В. Курганов

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Редактор *М. Я. Рутковская*
Художник *А. Д. Смеляков.* Художественный редактор *Н. А. Фильчагина*
Технический редактор *Е. С. Потапенкова.* Корректор *Е. В. Кочегарова*

Сдано в производство 5/XI 1967 г. Подписано к печати 13/II 1968 г. Бумага тип. № 2. $84 \times 108^1/_{32}$=2,82 бум. л. Печ. усл л. 9,45. Уч.-изд. л. 9,14.
Изд. № 27/4195. Цена 63 коп. Зак. 667
Издательство «Мир» Москва, 1-й Рижский пер., 2.
Темплан изд-ва «Мир» 1968 г. пор. № 138.

Ярославский полиграфкомбинат
Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ярославль, ул. Свободы, 97.