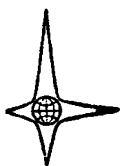




Г. Бонди

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ и ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
« М И Р »

Relativity and Common Sense

A New Approach to Einstein

by

HERMANN BONDI

Science
Study
Series

Anchor Books
Doubleday & Company, Inc.
Garden City, New York
1964

Г. Бонди

Относительность и здравый смысл

Перевод с английского и предисловие
Н. В. МИЦКЕВИЧА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1967**

УДК 530.12

***Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики***

ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Итак, читатель получает еще одну популярную книгу по теории относительности, которая носит интригующее и даже парадоксальное название. «Относительность и здравый смысл». Автор ее — профессор Лондонского университета Г. Бонди.

Если читатель до этой книги познакомился с книгой «Теория относительности в иллюстрациях» Дж. Шварца (в русском переводе она названа «Как это произошло?»), выпущенной этим же издательством год назад, то у него, пожалуй, будет основание удивиться. Проф. Шварц развенчивает «здравый смысл», а проф. Бонди на него опирается и даже выносит в заглавие книги, причем переводчик (один и тот же у обеих книг) не скупится на похвалы этим изложениям теории относительности. Может быть, он просто отдает дань рекламе?

Могу уверить читателя, что это подозрение неосновательно. Дело в том, что здравый смысл можно понимать по-разному, и у него есть как хорошие, так и плохие стороны. Если здравый смысл понимать как застывшие представления нашей обыденной жизни, то с ними бесполезно идти не только на знакомство с теорией относительности, но и на любой научный или литературный диспут. Если же в здравом смысле оставить лишь «правильные» представления и идеи — те, дальнейшее развитие которых привело к созданию

новой физики, то само собой разумеется, что с этого здравого смысла и нужно начинать знакомство с наукой. Но каждый автор ищет тот путь, который ему кажется лучше, по которому он надеется скорее привести читателя к цели. Как известно, выразительнее всего бывает мысль, содержащая некоторое преувеличение, гротеск; этим и пользуются популяризаторы.

Теория относительности действительно новая и своеобразная наука. В ней переплелось то, что пришло еще от Ньютона, и то, что каких-нибудь сто лет назад сделали Максвелл и Фарадей; в ней старые, как мир, понятия пространства и времени объединились в одно целое. Читатель встречается с давно знакомыми понятиями, но вдруг обнаруживает, что они приобрели совершенно новый и весьма близкий друг другу смысл. Пусть только никто не пугается «внезапного» появления «индивидуального», «зависящего от пути» времени, пусть никого не ставит в тупик «парадокс близнецов» — и Бонди и Шварц замечательно ясно и точно объясняют большинство таких непривычных сторон теории относительности. Нужно только подойти к их книгам с желанием понять господствующие в мире законы — и не сетовать, если этого не удастся добиться с первого раза.

Герман Бонди — один из крупнейших современных английских ученых. Он автор многих важных и сложных трудов по общей теории относительности и космологии, руководитель лондонской гравитационной группы. Он больше склонен к глубоким математическим исследованиям, и замечательно то, что ему так удалось это новое изложение специальной (частной) теории относительности Эйнштейна, построенное на базе остроумных «практических» примеров. Автор начинает с простой механики. Вы знаете, что с вращением Земли связаны фиктивные силы Кориолиса?

Очень может быть, что да. Но связывали ли вы их когда-нибудь с урожайностью наших степей? Бонди, начав с таких казалось бы далеких от релятивизма вопросов, вводит читателя в самую гущу современной науки, современного понимания физических явлений.

Через очень многие популярные книги по теории относительности прошла «притча» о фантастически длинном поезде, несущемся с околосветовой скоростью по бесконечной абсолютно плоской равнине.

Для читателя, не искушенного в абстракциях, такой образ почти ничего не давал и потому оставался непонятным. Вместо этого Бонди «запускает» на страницах своей книги серию чрезвычайно быстрых ракет, космонавты которых обмениваются друг с другом своими впечатлениями. Конечно, такими ракетами человечество пока не располагает (и вообще принципиальная возможность их постройки проблематична), но события наших дней сделали ситуации, обыгранные Бонди, психологически близкими и понятными нам. Наконец, его книга в высшей степени физична — в ней почти нет математики, и к выводам читатель приходит не из формул, а путем рассмотрения гораздо более доступных несложных мысленных экспериментов и воображаемых, но психологически понятных ситуаций. Вот почему эта книга так хороша для начинающих читателей. При этом Бонди опирается на «здравый смысл», как он его понимает: просто он последовательно и внимательно анализирует картину явлений при быстрых движениях и показывает, что строго логическое продолжение традиционных идей физики (например, механики Ньютона) с необходимостью приводит к признанию тесной связи пространства и времени, к выявлению зависимости времени от пути, т. е. к чисто «релятивистским» представлениям.

Если читатель, прочитав эту книгу, заинтересуется теорией относительности, ему можно порекомендовать

прочитать совершенно оригинальную книжку Шварца, о которой я уже упоминал, а также «Азбуку теории относительности» К. Дьюрелла и — особенно для любителей физики вообще — «Эйнштейновскую теорию относительности» Макса Борна.

В наш век, когда теория относительности стала инженерной наукой, она больше не нуждается в защите. Теперь не она нуждается в нас, а мы — люди XX века — в ней, в ее богатстве идей, в глубине ее законов, в их разнообразных и часто неожиданных практических приложениях. Поэтому дело популяризации этой теории так актуально. Пусть наши будущие физики и техники узнают ее как можно раньше и научатся думать с самого начала на ее языке.

Н. Мицкевич

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга — второе произведение проф. Г. Бонди, опубликованное в серии «Изучение наук», и в нем автор делает попытку дать принципиально новое изложение теории относительности для читателей-неспециалистов.

В то время как другие популяризаторы старались излагать теорию относительности, *п р о т и в о п о с т а в л я я* ее идеям Исаака Ньютона, Бонди выводит эту теорию из *с а м ы х* ньютоновских идей. В его изложении теория относительности не является ни революционным переворотом, ни крахом классической механики — напротив, она представляется результатом естественного развития последней, неизбежным при переходе к скоростям, приближающимся к скорости света.

Если математическая подготовка читателя даже невелика, ему все равно будет нетрудно проследить за теми математическими рассуждениями проф. Бонди, без которых нельзя понять элементов теории относительности. Эту теорию всегда начинали излагать с преобразований Лоренца, которые касаются движущихся относительно друг друга систем координат, и лишь потом, исходя из этих преобразований, вводили специфические понятия теории и получали ее своеобразные эффекты. Бонди делает все это в обратном порядке. Прежде всего он выводит указанные понятия и эффекты, а уже затем, просто алгебраически, он показывает, как они приводят к преобразованиям Лоренца.

Такой порядок изложения основ теории относительности имеет явные преимущества для читателя, знакомящегося с этой теорией впервые. Дело в том, что Бонди рассматривает ньютоновские идеи под таким углом зрения, который естественнее всего позволяет развить представления теории относительности, и только вслед за этим он облачает эти представления в математическую форму. При такой логической последовательности каждый предыдущий шаг с необходимостью влечет за собой последующий, и читатель уверенно поднимается по этим ступеням.

Как и предыдущая («Вселенная в целом», 1960 г.), эта книга основывается на статьях, которые ее автор написал для еженедельника «Лондон иллюстрайтед ньюс», однако для данного издания текст был пересмотрен автором и дополнен новыми материалами.

Теория относительности и теория гравитации — область профессиональных интересов проф. Бонди, однако он больше известен в кругу любителей науки и студенчества как один из трех основных создателей так называемой теории «стационарной вселенной» в космологии (два других — Фред Хойл и Томас Голд). Родившись в Вене, Бонди окончил Тринити-колледж (Кембридж, Англия) и является профессором прикладной математики в Кингс-колледже (Лондонский университет). Он относится к числу тех ученых, которые горячо верят в свой долг разъяснять обществу смысл науки, и его участие в общеобразовательных передачах Би-Би-Си сделало его если не звездой, то во всяком случае лицом, отнюдь не безразличным для зрителей английского телевидения.

Проф. Бонди является членом Кембриджского философского общества, Королевского астрономического общества и Королевского общества.

Джон Х. Дерстон

„На плечах гигантов“

Когда теория относительности только появилась, да и много лет после этого ее воспринимали как совершенно революционную теорию. Главное внимание при этом обращали на самые удивительные из ее выводов. Однако с течением времени эти сенсационные стороны работы Альберта Эйнштейна перестали вызывать удивление — по крайней мере у ученых, — и теперь в этой теории начинают видеть не революцию, а естественные и неизбежные последствия всей той работы, которая была проделана физиками со времен Исаака Ньютона и Галилео Галилея. Хотя некоторые важные понятия теории совершенно неожиданно и радикально менялись, мы можем теперь заметить, что положения, претерпевшие такие изменения, были как раз менее существенными, а основные и определяющие идеи теории полностью сохранились.

Тот подход к теории относительности, который мы излагаем в этой книге, может быть назван подходом с точки зрения традиций. Поскольку речь идет о традициях физической науки, нам придется обсудить многие основные идеи классической физики, послужившие почвой, на которой выросла теория относительности. Науке свойственна преемственность. Превосходно выразился сам Ньютон: «Если мой взгляд проникал дальше, чем взгляды других, то это потому, что я стоял на плечах гигантов». Цель нашей книги требует наглядно обрисовать, что думали на каждом этапе все гиганты от Ньютона до Эйнштейна и чем именно подтверждались их взгляды. И если вам покажется, что наш путь к теории относительности, особенно к получению каких-то сенсационных выводов, был не очень

коротким, то следует помнить, что мы считаем просто приятным и полезным обойти как старые, так и новые области физики, а кроме того, ведь нам пришлось карабкаться со ступени на ступень.

Понятие силы

Одной из труднейших задач науки является выбор того конкретного явления, которое стоит исследовать. Говорят, что неуч может задать большее число вопросов, чем способен ответить мудрец, однако в науке оказывается существеннее, чтобы мудрецу был задан правильный вопрос. Ответить на него — это уже второй шаг. Одной из старейших проблем является движение, в течение столетий волновавшее умы людей. Почему предметы движутся именно так, а не иначе? Что приводит их в движение? Мы инстинктивно чувствуем, что если неодушевленное тело предоставить самому себе, то оно перестанет двигаться. Мячик подпрыгивает каждый раз все ниже и ниже, пока наконец не остановится. Катящаяся телега (по крайней мере, на ровном месте) постепенно замедляет свое движение и останавливается. В конце концов остановится и камень, даже если он скользит по самому гладкому льду. Казалось бы, всякое движение должно вызываться лишь живым существом — как, например, волейболист бросает мяч. Однако, каким бы верным это замечание ни было в малых масштабах, в больших масштабах оно, по-видимому, терпит крах. Ведь дует же ветер — и если мы не придумаем бога ветров, то нет никакого одушевленного существа, которое приводило бы его в движение. В океане сменяются приливы и отливы, существуют течения. Наконец, таинственнее всего то, что Луна и планеты все время продолжают двигаться по небосводу. Спрашивается, какое движение сложнее, — постоянное обращение Луны вокруг Земли или же остановка мяча после того, как он несколько раз подпрыгнет?

Поскольку нам привычнее мяч, а сущность движения Луны менее очевидна, то в течение долгого времени все, не задумываясь, соглашались, что движение мяча является более простым, а потому естественно и прекращение движения. Предполагалось, что состо-

яние покоя чем-то привлекательно для всех предметов, в то время как для объяснения постоянного движения планет нужно было делать особые предположения: например, Кеплер считал, что планеты толкают по орбитам ангелы. Понадобился гений Ньютона, чтобы увидать истинную, и притом совершенно иную картину мира. В состоянии покоя нет ничего исключительного; имеется лишь целый ряд очень сложных явлений, которые можно назвать господством сил трения в реальных процессах. В космосе перед нами развертываются более простые явления, не усложненные трением, и небесные тела движутся согласно законам природы. До Ньютона считали, что постоянство их движения требует особого объяснения, — например, с привлечением особой силы. И только Ньютон понял, что вопрос ставился неправильно. Сама скорость вовсе не требует объяснения, а вот изменение скорости — *ускорение* — это как раз то, что необходимо объяснить.

Роль ускорения

Понятие ускорения является самым основным. Оно обозначает быстроту изменения скорости. Скорость изменяется не только тогда, когда возрастает или убывает, но и когда изменяется ее направление. Ускорение отсутствует лишь тогда, когда тело движется прямолинейно с одной и той же скоростью, а само ускорение является мерой отклонения движения тела от такого стандартного движения. В наши дни, когда транспорт может плавно двигаться, нам стало легче понять, что скорость не играет роли. Чтобы налить чашку чая у себя дома за столом, конечно, требуется минимум искусства. И чтобы налить такую же чашку чая в реактивном самолете, плавно летящем со скоростью 1000 км/час , требуется ничуть не больше искусства — это действие ничем не отличается от предыдущего. Совершенно не существенно, что в одном случае мы движемся относительно Земли, а в другом — нет. Итак, первое великое открытие Ньютона, которое мы можем назвать его *принципом относительности*, состоит в том, что скорость не играет никакой роли. Выражаясь точнее, все, что происходит в каком-то ящике, не зависит от скорости этого ящика, если только она постоянна.

Это можно проверить в вагоне-ресторане. Если поезд идет плавно, то в вагоне так же просто налить чашку чая, как и в реактивном лайнере, но если поезд либо резко затормозит, либо будет поворачивать, либо подсакивать на пересечении путей, то нам уже понадобится гораздо больше ловкости, иначе чай окажется пролитым.

Следовательно, как только скорость перестает быть постоянной, как только возникают ускорения, появляется нечто новое. Как вычисляют ускорение? Проще всего это сделать, если изобразить скорость стрелкой, направленной в ту же сторону, что и движение, причем длина стрелки изображает величину скорости. Если теперь сравнить стрелки скоростей, взятые в какой-то один момент времени и секундой позже, совместив начала этих стрелок, то новая стрелка, соединяющая концы первой и второй стрелок скоростей, будет изображать ускорение. Когда поезд наращивает скорость, ускорение имеет одинаковое направление со скоростью. Однако ничуть не менее важен случай, когда поезд сворачивает по дуге. Величина скорости остается при этом постоянной, но стрелка, изображающая скорость, меняет свое направление. Легко видеть, что стрелка, соединяющая концы двух стрелок скоростей, взятых в очень близкие моменты времени, направлена под углом, более или менее близким к прямому (90°) по отношению к направлению скоростей. Другими словами, в этом случае ускорение перпендикулярно скорости.

Чтобы объяснить существование ускорения, вводят понятие силы. Сила — это необходимое условие для появления ускорения. Такое заключение нас едва ли удивит. Возьмите в руки бечевку с привязанным на конце камнем и попробуйте кружиться. Чтобы камень все время оставался на одном расстоянии от вас, вам необходимо подтягивать его с какой-то силой. Ваш камень будет двигаться по кругу, а значит, его ускорение будет направлено под прямым углом к его пути. Следовательно, ускорение будет направлено к вам, и ваша сила, приложенная к камню (через посредство бечевки), является той самой силой, которая вызвала появление ускорения, удерживающего камень на его орбите.

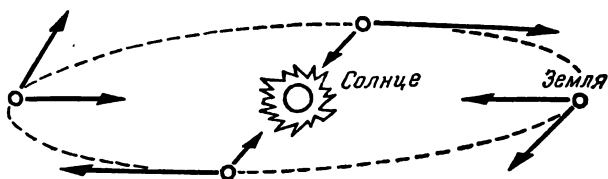


Рис. 1. Стрелки, касательные к орбите, указывают направление скорости движения Земли в четырех положениях. Перпендикулярные им стрелки, указывающие на Солнце, дают направление ускорения.

Другой пример, но уже в космических масштабах,— движение Земли вокруг Солнца (рис. 1). Тот, кто полагает, что для поддержания движения требуется какое-то воздействие, будет искать его в том направлении, в каком движется Земля. Но если смотреть в этом направлении, то нельзя увидеть ничего примечательного: просто каждый раз на глаза будут попадаться все новые объекты. Если же посмотреть под прямым углом к направлению скорости, т. е. в направлении ускорения Земли, то мы будем всегда видеть одно и то же, а именно Солнце, которое без сомнения должно играть весьма существенную роль. Другими словами, просто заменив вопрос «чем обусловлена скорость движения Земли?» вопросом «чем обусловлено ускорение Земли?», мы перестаем гоняться за собственной тенью и обнаруживаем Солнце,— безусловно, самого важного из наших астрономических соседей. Таким образом, нам понадобился всего один шаг (посредством изменения вопроса), чтобы перейти от незнания причины движения Земли к естественной мысли, что орбита Земли имеет свой строго определенный вид благодаря Солнцу. Подобным же образом Ньютон объяснил движение Луны вокруг Земли, доказав, что ускорение Луны всегда направлено к Земле, которую поэтому можно считать причиной движения Луны.

Единство физики

Из наших простых рассуждений следует еще один вывод. Много говорят о специализации науки и об ее узких разделах, но только что упомянутые совершенно

фундаментальные опыты и наблюдения явлений природы указывают на единство физики.

Когда пишут учебники или принимают экзамены в университете, физику для удобства разбивают на такие разделы, как механика или динамика (наука о силах), оптика (наука о свете) и т. д., но это деление в высшей степени искусственно, и его не следует превращать в догму. Наверное, нельзя даже придумать такого опыта, который был бы чисто механическим или чисто оптическим, — мы всегда имеем дело с сочетанием нескольких областей физики. Например, когда Ньютон обнаружил, что в динамике важнейшую роль играет ускорение, а ускорение Земли направлено в сторону Солнца, он исходил из сочетания динамики и оптики. Ускорение — главная динамическая характеристика движения Земли по ее орбите — направлено туда, где мы видим Солнце, т. е. речь идет о простейшем и очень важном оптическом наблюдении. Значит, мы доказали важную роль ускорений для механики, по существу, из оптических наблюдений — отметив то направление, откуда приходят к нам солнечные лучи. Мы все время будем руководствоваться этим уроком, говорящим о единстве физики, и тогда мы с неизбежностью придем к идеям эйнштейновской теории относительности и сможем избежать тех заблуждений, из-за которых физика в конце XIX века погрязла было в трясине.

Импульс

В предыдущей главе мы обратили внимание главным образом на то, как Ньютон отождествил направление силы с направлением ускорения, а также на тот факт, что в отсутствие силы нет и ускорения. Однако мы еще не выяснили, чему именно будет равно ускорение, если величина силы задана. Ответить на этот вопрос нам поможет понятие массы или; говоря более научно, понятие импульса. Все мы отлично знаем, что одна и та же пружина, если ее каждый раз одинаково растягивать, толкает разные предметы с разной скоростью, и мы говорим, что предмет, который труднее сдвинуть, более массивный, а предмет, приобретающий большую скорость, — легкий. Продумав этот вопрос глубже, мы скажем, что одна и та же сила (например, всякий раз одинаково растянутая пружина) придает разным телам различное ускорение (в разных пропорциях). Опыт показывает, что эта пропорция даже не зависит от того, насколько именно была растянута пружина, хотя это, конечно, и повлияет на величину ускорения отдельных тел. Тем самым мы ввели понятие *массы*, когда сказали, что ускорение, вызванное данной силой, обратно пропорционально массе предмета, на который эта сила действовала, т. е. чем больше масса, тем меньше величина ускорения. В повседневной жизни мы обычно измеряем не массу, а вес, потому что, как показал опыт, вес и масса теснейшим образом связаны друг с другом — настолько тесно, что мы практически не ошибемся, даже поменяв их местами. Однако с точки зрения физика понятие веса сложнее, чем понятие массы, — ведь вес тела зависит от нового фактора — от

величины гравитационного поля Земли в данном месте (силы тяжести).

В физике важную роль играет понятие *импульса*. Чтобы получить импульс, нужно просто умножить массу на скорость. Массы предметов обычно не изменяются — если не говорить о тех случаях, когда, например, капля дождя растет, пока она еще падает в породившем ее облаке, или ракета движется, выбрасывая назад газы. Быстрота изменения импульса равна силе — этот закон, оказывается, включает и более сложные случаи с каплей дождя и ракетой, о которых мы только что говорили. Это исключительно полезный закон — ведь его можно применить сразу к целой системе предметов, не думая о том, из чего она состоит. Мы пришли к очень важному выводу, красной нитью проходящему через всю науку. Дело в том, что в науке всегда приходится мириться с незнанием чего-то. Мы никогда не располагаем всеми данными — даже знания ученого всегда очень ограничены, и ему нужно выжать из них все, что только можно. Если бы ученый стал дожидаться, пока ему станут известны все детали, то он никогда не пришел бы ни к какому выводу — как нерешительный человек, колеблющийся в ожидании, когда он сможет взвесить абсолютно все доводы за и против. Встав на место такого нерешительного человека, мы отказались бы обсуждать, как именно воздействует гравитационное поле Земли на движение Луны, пока нам не станут известны все детали внутреннего строения Земли. К счастью, без этого можно обойтись, и мы можем сделать очень подробные предсказания свойств лунной орбиты и движения искусственных спутников Земли, не очень-то много зная о внутреннем строении планеты, на которой мы живем.

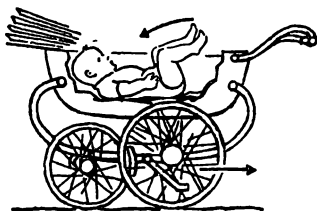
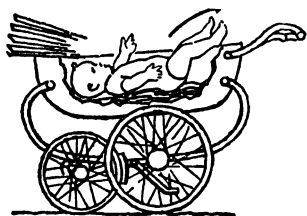
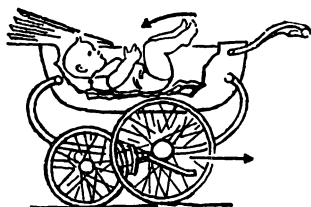
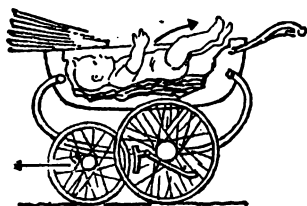
Движение системы тел

Импульс является одной из тех величин, которые математики называют аддитивными. Импульс большого тела равен сумме импульсов его частей. Между этими частями могут действовать сколь угодно сложные внутренние силы, но импульс всего тела в целом изменяется только в зависимости от приложенной к

телу внешней силы. Сплошь и рядом важнее всего бывает узнать закон движения системы тел в целом, не задумываясь о движении каждой ее отдельной части. Мы поясним это рассуждение простым бытовым примером. Возьмем коляску с ребенком, стоящую на ровной и гладкой земле. Вначале пусть ребенок спит, а вся система — коляска и ребенок — находится в покое. Потом ребенок просыпается и начинает барахтаться. Спрашивается, что произойдет? Сможет ли ребенок сдвинуть коляску с места (рис. 2)?

Если говорить о системе коляска — ребенок в целом (предполагая, что ребенок не может вывалиться из коляски — система не может разделиться), то импульс этой системы не изменится, пока не подействуют внешние силы. Чтобы система сдвинулась в горизонтальном направлении, потребуются горизонтальные внешние силы. Они могут здесь появиться не иначе как в результате трения о землю. Возможны два случая: либо тормоз коляски выключен, и она может плавно кататься — тогда трения о землю нет; либо тормоз включен, и тогда такое трение присутствует, потому что колеса вращаются с трудом. В первом случае (при выключенном тормозе) импульс системы в целом должен быть все время равен нулю, и поэтому так называемый центр масс системы будет оставаться в покое, если первоначально он не двигался. При этом в системе все же могут происходить внутренние движения. Так, если ребенок вытянет ножки, то коляска немного сдвинется в противоположном направлении благодаря отдаче, но как только ребенок снова подожмет ножки, коляска вернется точно в исходное положение.

Что будет происходить при включенном тормозе? Конечно, если тормоз действует идеально, а поверхность земли очень шероховатая, то коляска не сдвинется с места, и говорить будет не о чем. Но допустим, что почва достаточно гладкая, так что возможно какое-то движение. Тогда можно себе представить следующую картину: вытягивая ножки, ребенок как бы увеличивает свой вес, потому что при этом сам он откидывается вниз, колеса коляски сильнее прижимаются к земле, трение усиливается и движения не происходит. Наоборот, когда ребенок поджимает



Р и с. 2. На первых двух картинках тормоз коляски выключен, и движение ножек ребенка вызывает одинаковые и противоположно направленные перемещения коляски. На двух последних картинках тормоз включен, и теперь движения коляски в противоположных направлениях уже не одинаковы.

ножки, опускает их ниже, его вес как бы уменьшается, уменьшается и трение колес о землю — коляска может теперь немного сдвинуться. Теперь каждый раз коляска сдвигается в одну и ту же сторону. Если ребенок будет так сучить ножками достаточно долго, то коляска при включенном тормозе может отъехать довольно далеко, тогда как при выключенном тормозе движения в целом не будет, хотя коляска слегка смещается взад и вперед при каждом движении ребенка.

Этот результат как раз противоположен тому, чего на первый взгляд можно было бы ожидать, но проверка подтверждает наш вывод, если опыт произвести при соответствующих условиях. Конечно, если дорога идет под уклон или коляску подталкивает ветер, ее было бы очень опасно оставлять с выключенным тормозом, но, например, дома на ровном и гладком полу все будет происходить в точности так, как мы описали. При выключенном тормозе коляска будет все более сдвигаться при каждом движении ребенка, но сдвиги вперед и сдвиги назад будут друг друга полностью компенсировать — движения в целом не будет. Напротив, если включить тормоз, каждое отдельное движение ребенка будет гораздо меньше сдвигать коляску, чем прежде, но в сумме эти сдвиги с течением времени могут стать очень заметными. Замечательно, что мы оказались в состоянии очень точно определить поведение коляски на ровной поверхности в отсутствие трения. Ведь можно было предполагать, что для того, чтобы предсказать движение коляски, следовало бы знать, как именно ребенок дрыгает ножками, а может быть, и проконсультироваться у специалиста по психологии детей, чтобы поточнее выяснить поведение ребенка! Все это, оказывается, излишне. Когда не действуют силы трения, мы можем уже кое-что сказать о движении коляски, не задумываясь, что в ней происходит. Поэтому-то так важен закон сохранения импульса. Именно этот закон позволяет нам делать определенные заключения о поведении системы в целом, хотя бы мы и не понимали отдельных ее частей. И во-вторых, мы сделали заключение о решающей роли упорядоченных движений. Дело в том, что как бы малы такие движения ни были, с течением

времени они могут дать большое перемещение, как это было в случае коляски с включенным тормозом. Наоборот, гораздо большие движения неза торможенной коляски в сумме уничтожились.

Импульс самолета

Закон сохранения импульса находит множество применений — это один из важнейших законов физики, которыми мы располагаем. Поэтому о винтовом самолете мы можем утверждать, что импульс этого самолета, направленный вперед, может быть увеличен лишь в результате придания воздуху импульса, направленного назад. Работа пропеллера самолета и состоит в таком проталкивании воздуха назад. И в результате такой отдачи самолет устремляется вперед. В этом смысле между винтовым и реактивным самолетом существует лишь чисто конструктивное различие. В одном случае оказывается выгоднее поставить пропеллер снаружи самолета, чтобы вызвать поток воздуха назад; в другом выгоднее установить весь двигатель внутри самолета и обеспечить таким путем образование мощного потока воздуха и отработанных газов, также направленного назад. В любом случае, как этого требует закон сохранения импульса, полученное самолетом ускорение вперед должно быть компенсировано таким же движением назад, которое мы придаем другим предметам, чтобы изменение импульса одного тела было равно и противоположно по направлению изменению импульса другого тела. В движении назад участвуют всегда как отработанные газы, так и воздух, окружающий мотор, и их относительная роль зависит от того, сколько воздуха имеется в окружении. Чем выше поднимается самолет, тем реже атмосферный воздух и тем существеннее поток выхлопных газов мотора по сравнению с потоком самого воздуха. Если же выйти в космическое пространство, где практически царит полная пустота, космическому кораблю можно будет придавать ускорение лишь за счет направленного назад импульса отработанных газов. Поэтому космические корабли, а также высотные ракеты должны использовать только заключенное в них са-

мих вещество — это единственный способ придать им поступательный импульс как компенсацию того направленного назад импульса, который уносят газы. По такому принципу работает и ракета, которую можно увидеть в действии и не запуская ее в космос, — например, во время фейерверков и праздничных салютов.

Скорость не играет роли

В атмосфере при увеличении скорости мы сталкиваемся все с новыми и новыми затруднениями. Здесь из всех вариантов движения выделено состояние покоя — мы говорим, что самолет движется, а воздух остается на месте. Чем быстрее летит самолет, тем больше его трение об окружающий воздух и тем труднее двигателю поддерживать нужную скорость. Но вне атмосферы — в космосе — все иначе. Чтобы скорость космического корабля возросла с 2000 до 3000 км/час, потребуется не больше горючего, чем для ускорения корабля той же массы со 100 000 до 101 000 км/час. Принцип относительности Ньютона утверждает, что скорость не играет никакой роли при таких динамических процессах. Космический корабль будет сохранять неизменной скорость 10 000 км/час с тем же успехом, как и 1000 км/час, и для одинакового изменения скорости в обоих случаях потребуется одинаковое усилие. Представление о том, что состояние покоя «истинно», целиком обусловлено нашим непосредственным окружением, когда воздух над нами и почва под нами кажутся неподвижными. Но лишь только мы выйдем за круг этих условий и отбросим наши привычные представления, как любая скорость окажется одинаково хороша, лишь бы только законы механики оставались в силе. Это — прямое следствие законов Ньютона и жизненно важный принцип этого раздела физики.

3

Вращение

В предыдущих главах мы разобрали вопрос о несущественности скорости. Однако, если говорить о всех возможных видах движения обычного твердого тела, то поступательная скорость будет лишь одной из характеристик. Ведь кроме поступательного движения такое тело может еще и вращаться. На первый взгляд может показаться, что у вращательного движения, как и поступательного, тоже нет никакого выделенного состояния (вспомним относительность состояния покоя). Но это не так. Мы отлично знаем, что существует такое состояние без вращения, когда тело не испытывает внутренних напряжений, тогда как приведенное во вращение тело подвергается растяжению, и в нем возникают силы, которые не дают его частям, удаленным от оси вращения, разлететься в стороны. В причинах этого нетрудно разобраться. Сила будет отсутствовать лишь в том случае, если движение происходит с постоянной скоростью (как по величине, так и по направлению). Если же тело вращается, то его частицы все время изменяют направление своей скорости. Поэтому должна существовать какая-то сила, удерживающая эти частицы, — *центростремительная сила*, которая уравнивает фиктивную центробежную силу, отбрасывающую частицы в стороны. Центростремительная сила обращается в нуль лишь при полном отсутствии вращения. Значит, тот самый закон, из которого следует отсутствие привилегированного состояния покоя в поступательном движении, требует, чтобы во вращательном движении состояние покоя было выделено. Когда мы говорим, что скорость тела равна нулю, мы просто выделяем

какое-то состояние покоя. Напротив, говоря, что тело не вращается, мы имеем в виду нечто совершенно определенное, абсолютное.

Скорость вращения тела мы можем определить либо через время его полного оборота, либо через какую-то часть этого времени. Можно, например, говорить о времени, за которое тело поворачивается на 1° или, как это обычно делают математики, на угол, немного превышающий 57° (точнее, 180° , деленные на число π); этот угол называется *радианом*. Величина, обратная этому времени, называется *угловой скоростью*. Чем больше угловая скорость, тем быстрее вращается тело. В технике принято говорить о числе оборотов в минуту — в этих единицах обычно измеряется скорость вращения моторов. Во всяком случае, независимо от способа ее измерения, угловая скорость является правильной мерой вращательного движения.

Вращение Земли

Земля является тем телом, вращение которого для нас особенно важно. Как узнать, что Земля вращается? Наверное, самым известным способом является метод маятника Фуко. Чтобы разобрать принцип его действия, представим себе обычный маятник, свободно подвешенный на Северном полюсе и качающийся там. Итак, маятник свободно качается под действием гравитации (силы тяжести), и если мы с самого начала пустили его вычерчивать прямую линию, то он будет продолжать делать это и в дальнейшем. Вращение Земли к этому никакого отношения не имеет, она будет просто вращаться под маятником. Значит, с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с Землей, плоскость колебаний маятника должна будет поворачиваться в направлении, как раз противоположном направлению вращения Земли. Если этот маятник подвесить не на полюсе, а в каком-то другом месте, то положение несколько изменится — вращение Земли будет частично отражаться на плоскости качаний маятника, а частично будет стремиться отклонить маятник от вертикали. Легко видеть, что если взглянуть сверху вниз на Северном полюсе, то покажется, что плоскость колебаний

маятника Фуко поворачивается по часовой стрелке; если же взглянуть сверху вниз на Южном полюсе на подвешенный там маятник Фуко, то плоскость его колебаний будет поворачиваться против часовой стрелки. Не требуется особой математической подготовки, чтобы сообразить, что в любом месте между этими точками поверхности Земли положение будет промежуточным. Так, на экваторе плоскость колебаний маятника относительно Земли вообще не будет изменяться, в северных широтах она будет поворачиваться по часовой стрелке, но медленнее, чем на самом полюсе, причем скорость этого вращения при переходе в более низкие широты будет постепенно падать до нуля. В южном полушарии все будет в точности наоборот. Таким образом, маятник Фуко пригоден для обнаружения и измерения вращения Земли вокруг её оси.

Вращение Земли можно обнаружить и другим путем, а именно — взглянув на «неподвижные» звезды. Земля вращается и по отношению к ним, так что нам кажется, что небесная сфера поворачивается вокруг Земли. Весьма примечателен тот факт, что скорость вращения Земли относительно маятника Фуко, помещенного на полюсе, со всей достижимой для измерения точностью соответствует вращению Земли относительно неподвижных звезд. Поэтому напрашивается вопрос, впервые заданный епископом Беркли в XVIII в. и уточненный затем Э. Махом в конце прошлого столетия, а также Эйнштейном в начале нашего века: как связаны между собой эти две скорости вращения? Грубо говоря, получается, будто дальние объекты вселенной определяют, какое из состояний вращения вблизи нас следует считать истинным вращением, а какое — покоем. Самые точные определения того состояния, в котором вращение отсутствует, сделанные исходя из наблюдений за движениями планет солнечной системы, оказываются в точном согласии с выводами, полученными по наблюдениям удаленных тел. Каким именно образом эти далекие тела определяют состояние отсутствия вращения, не совсем ясно, хотя общая теория относительности Эйнштейна и продвинулась довольно далеко в понимании этого загадочного факта.

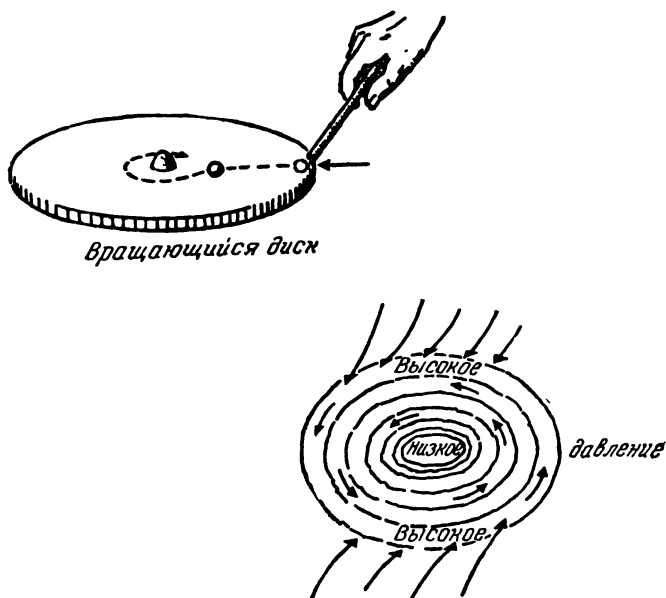


Рис. 3. Как и в опыте с шариком на вращающемся диске, ветры над поверхностью Земли отклоняются, дующ из одного места в другое, из-за вращения нашей планеты. Это вынуждает ветры двигаться по замкнутым линиям, а не дуть по прямой из области высокого давления в область низкого давления.

Эффект Кориолиса

Казалось бы, динамические эффекты, вызванные вращением Земли, едва ли могут существенно сказываться на нашей повседневной жизни, хотя само вращение довольно просто заметить по звездам, поведению маятника Фуко или гироскопу. Однако приходится признать, что весь строй нашей жизни определяется этим вращением. Оно действует в первую очередь на движение атмосферы, т. е. на ветры. Пожалуй, это влияние проще всего проиллюстрировать на примере патефонного диска (рис. 3). Возьмем шарик и осторожно пустим его в сторону оси этого диска. Если он первоначально покоился относительно диска, то в новом месте он сохранит прежнюю скорость движения вместе с диском, а так как прежде

он отстоял от оси на большее расстояние, то будет казаться, что он станет опережать свое новое окружение в его вращении. Подобным же образом частица, движущаяся относительно диска по окружности с центром на его оси в ту же сторону, куда вращается сам диск, будет вращаться быстрее самого диска, и для того, чтобы удержать ее на этом круговом пути, потребуется большая сила, чем прежде. Если нужного увеличения центростремительной силы не произойдет, то наша частица будет отброшена дальше от оси вращения по отношению к тому месту диска, в котором она находилась. Таким образом, вращение диска приводит к тому, что любая движущаяся по нему частица будет отклоняться под прямым углом к направлению, в котором она первоначально двигалась. Эта отклоняющая сила, именуемая *силой Кориолиса* *, особенно влияет на движение ветров.

Движение ветров

Ветры дуют в основном из областей высокого давления в области низкого, стремясь выровнять давление в этих областях. Однако при таком движении между областями с разным давлением ветер настолько сильно отклоняется в сторону, что вместо того, чтобы дуть в сторону центра пониженного давления, он движется по окружности вокруг этого центра. По крайней мере именно так обстоит дело в умеренных широтах, в результате чего там образуются системы ветров, дующих вокруг областей пониженного давления и образующих *циклоны*, и системы ветров, дующих в противоположном направлении вокруг областей повышенного давления, создающие *антициклоны*. В результате ветер не затихает значительно дольше — до тех пор пока он не перенесет достаточное количество воздуха в область пониженного давления и давления не сравняются. Воздушный поток успевает много раз оббежать вокруг

* Гаспар Гюстав де Кориолис (1792—1843) — французский инженер и ученый. Он ввел понятие «работы» как произведения силы на путь.

центра, и поэтому время жизни областей высокого и низкого давления очень велико. В силу устойчивости этих областей они могут перемещаться далеко в глубь материков; если это области низкого давления, то они принесут с собой дожди в районы, далекие от океана. Главным образом благодаря такому «дрейфу» областей пониженного давления большие пространства материков в умеренных и сравнительно высоких широтах оказываются плодородными и не превращаются в пустыни. Подобным же образом пассаты — ветры, также возникающие вследствие вращения Земли (правда, не совсем так, как циклоны) в областях, примыкающих к экватору, несут влагу в соседние районы континентов. Значит, все особенности существования жизни на Земле и развитие сельского хозяйства зависят от факта вращения Земли. Особенно интересно, что вращение Земли, отклоняя ветры в сторону от их целенаправленного пути, приводит к возникновению ситуации, как раз противоположной тому, чего можно было бы первоначально ожидать: вместо того, чтобы дуть из области высокого давления в область низкого давления перпендикулярно линиям постоянного давления, ветер оказывается направлен почти в точности по изобарам (линиям постоянного давления).

Момент импульса и угловая скорость

Как при поступательном движении тело стремится сохранить это свое состояние и не изменяет своей скорости, пока на него не подействует внешняя сила, точно так же вращающееся тело стремится сохранить свое состояние вращения. Характеристику тела, сохраняющуюся при прямолинейном движении, мы называем *импульсом* (можно было бы сказать: «линейный момент») и формулируем правило: при отсутствии сил импульс не изменяется. Особенно важно, что это правило можно применять к системе в целом, причем для того, чтобы определить поведение импульса системы в будущем, нет необходимости знать детально ее строение. Единственное, что мы должны знать, это наличие внешних сил. Характеристику же

тела, сохранение которой выражает устойчивость вращательного движения, мы назовем *моментом импульса* (по-другому: «угловой момент»). Тогда, если на тело не действуют силы, стремящиеся замедлить его вращение или закрутить его быстрее (в физике их называют *парами* или *моментами сил*), его момент импульса будет сохраняться неизменным.

Но если импульс тела был очень просто связан с его скоростью (пропорционален ей, причем коэффициент пропорциональности служила масса), то момент импульса и угловая скорость связаны друг с другом не так просто. Масса остается неизменной, кроме тех случаев, когда какие-то части тела отбрасываются от него, как это имело место в случае ракеты.

Однако «коэффициент», связывающий момент импульса и угловую скорость, как нетрудно обнаружить, ведет себя сложнее. Если все частицы, составляющие тело, сосредоточены вблизи оси вращения, то они будут двигаться вокруг этой оси с малыми скоростями, даже если тело делает много оборотов в секунду. Если же изменить форму этого тела так, что многие его частицы будут располагаться далеко от оси, то при той же угловой скорости тела движение этих частиц окажется более быстрым. Значит, если отодвинуть массы от оси вращения, то даже при небольшой угловой скорости момент импульса тела будет велик, а если приблизить все массы к оси — момент импульса при той же угловой скорости уменьшится. Поэтому можно изменять угловую скорость, просто сдвигая и раздвигая массы и оставляя момент импульса без изменения. Этим пользуются при фигурном катании на коньках. Искусный конькобежец сначала медленно вращается, раскинув руки в стороны; затем он прижимает руки к себе, стараясь сделаться как можно уже. Поскольку момент импульса конькобежца сохраняется неизменным, угловая скорость его вращения должна сильно увеличиться. Вообще-то все это довольно сложно, и прямо-таки удивительно, как хорошо разбираются в таких вещах кошки — хотя бы даже и инстинктивно.

Падающая кошка

Все знают, что как кошку ни брось, она все равно опустится на лапы. На первый взгляд это кажется удивительным. Если кошку бросили, с самого начала не придав ей вращения, а значит, и момента импульса, то как же она может повернуться лапами вниз? (рис. 4). Ведь для этого ей нужно, падая, какое-то время вращаться, т. е. приобрести угловую скорость, хотя ее момент импульса должен быть все время равен нулю. Как это кошка ухитряется получить угловую скорость, не имея момента импульса? Все объясняется удивительной гибкостью кошки*. Предположим, что сначала кошка оттопырит задние лапы, поджав передние и вытянув вперед шею, и станет, скручивая тело, поворачивать переднюю часть туловища. Момент импульса у кошки в целом, конечно, не появится, как его не было и вначале. Но поскольку масса ее задних ног отодвинута далеко от оси вращения, то очень маленькая угловая скорость задней половины тела кошки даст такой же момент импульса, что и большая угловая скорость его передней половины, так как масса передних лап придвинута близко к оси вращения. Направления этих вращений противоположны, и оба момента импульса взаимно уничтожаются, давая полный момент, равный нулю. Однако при этом передняя половина кошки поворачивается в одном направлении гораздо сильнее, чем задняя половина — в противоположном.

Затем кошка оттопыривает передние лапы, поджимает задние и перекручивается в обратную сторону. Теперь с большей угловой скоростью движутся задние лапы, а с меньшей — передние, так как задние лапы приближены к оси вращения, а передние удалены от нее. На этом втором этапе передняя часть кошки повернется, конечно, намного меньше, чем ее задняя часть. Когда в конце этого этапа кошка оттопырит задние лапы и подожмет передние, ее

* Фактически движение кошки еще сложнее, чем описано ниже, но основывается оно на изложенных здесь принципах. Движения, которые кошка обязательно должна совершать, мы обсуждаем лишь в общих и основных чертах, чтобы несколько упростить задачу.

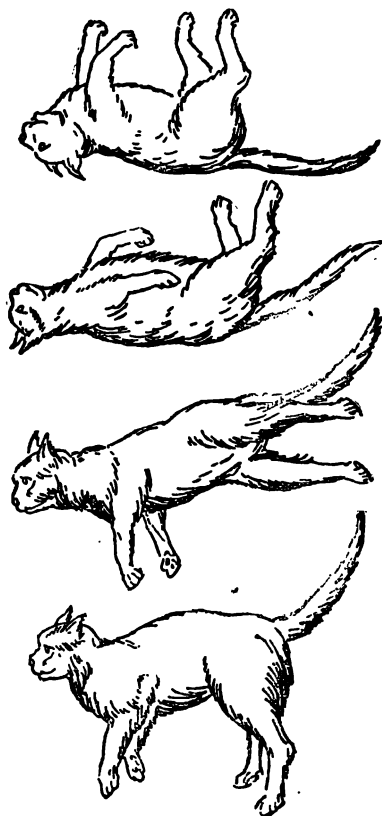


Рис. 4.

положение будет тем же, что в самом начале, только вся она окажется повернутой на заметный угол. Быстро повторяя раз за разом такие движения, кошка правильно ориентирует себя в пространстве и приземляется на лапы. На этом примере мы видим, как можно обойти закон сохранения момента импульса, не нарушая его, чего невозможно сделать с импульсом в поступательном движении.

Подведем итог нашим рассуждениям о поступательном и вращательном движении. Выделенное состояние покоя существует во вращательном движе-

нии, но в поступательном движении оно отсутствует. Невращающаяся и неускоренная система называется *инерциальной*. Существует бесчисленное множество инерциальных систем, каждая из которых движется относительно другой инерциальной же системы с постоянной скоростью, прямолинейно и без всякого вращения.

Таким образом, одним из важных следствий ньютоновской физики является заключение о существовании бесчисленного множества инерциальных систем. Как мы увидим дальше, это заключение распространяется без малейшего изменения и на теорию относительности.

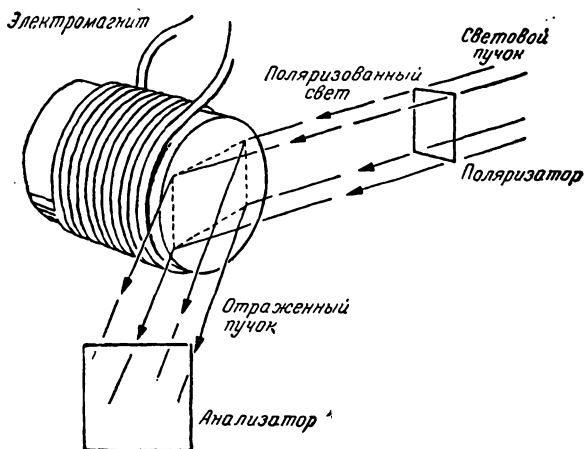
Свет

Теперь мы перейдем к другому разделу физики — эффектам, связанным со светом.

Наш повседневный опыт сразу же указывает на две особенности света. Во-первых, свет распространяется прямолинейно, а во-вторых, скорость его распространения чрезвычайно велика. Первое свойство следует из того факта, что мы не видим, что делается за углом. Второе же свойство основывается на следующем: свет распространяется так быстро, что мы не замечаем, требуется ли ему вообще для этого время. На этих двух свойствах и на связанных с ними законах отражения и преломления основывается наука, называемая геометрической оптикой. Несмотря на всю свою полезность, она во многих отношениях несовершенна и полностью оторвана от остальной физики. Физическая теория, связывающая свет с другими явлениями природы, сравнительно молодая и в основном заложена Максвеллом *. Первый эксперимент, наглядно продемонстрировавший связь между светом и другими явлениями (в данном случае магнетизмом), принадлежит Фарадею **.

* Джеймс Кларк Максвелл (1831—1879), родом из Шотландии, один из величайших физиков. Знаменитые уравнения, носящие его имя, раскрыли электромагнитную природу света и позволили предсказать существование радиоволн. Часто говорят, что они выражают единственный закон физики, выдержавший все испытания при развитии научного мышления в XX в.

** Майкл Фарадей (1791—1867) — великий английский физик-экспериментатор, открывший электромагнитную индукцию и заменивший представление о действии на расстоянии понятием «поля». Максвелл вывел свои уравнения, чтобы математически выразить открытые Фарадеем законы и введенные им понятия. Открытия Фарадея тем более замечательны, что он был самоучкой.



Р и с. 5. Когда электромагнит выключен, исследование с помощью анализатора света, отраженного от металла на полюсе магнита, не обнаруживает изменения поляризации. Если же включить электромагнит, то анализатор перестает пропускать свет, потому что плоскость поляризации изменилась.

Фарадей и поляризация света

Свету можно придать свойство, называемое поляризацией. Нам незачем входить в подробности этого явления; скажем только, что поляризованный свет — это как бы «причесанный» свет. Проходя через определенные вещества, например сквозь некоторые кристаллы, свет становится таким, как будто его «причесали» в направлении, перпендикулярном направлению его распространения. Это направление «прически» называется плоскостью поляризации. Если повернуть кристалл, то плоскость поляризации пропущенного через него света также повернется. Плоскость поляризации обладает тем замечательным свойством, что свет, который мы поляризовали, в дальнейшем ее уже не меняет. Например, такой свет уже не сможет пройти сквозь подобный кристалл, повернутый на 90° по отношению к первому кристаллу, просто потому, что он «причесан» не в том направлении, чтобы его пропустил второй кристалл. Фарадей обнаружил, что хотя плоскость поляризации света и не изменяется при

отражении от обычного зеркала или поверхности металла, но она поворачивается, когда мы отражаем свет от поверхности сильного магнита (рис. 5). Таким образом, Фарадей доказал, что существует связь между магнитными силами и светом, и подготовил тем самым почву для последующих работ Максвелла, открывшего электромагнитную природу света.

Максвелл и электромагнитная теория света

Максвелл пришел к замечательному выводу, что изменения так называемого электромагнитного поля распространяются с определенной скоростью, а лабораторные опыты над электромагнитной индукцией показали, что эта скорость равна скорости света. Такое совпадение скорости, найденной из опытов над электромагнитными явлениями в лаборатории, и совершенно независимо измеренной скорости света было мощным доводом в пользу электромагнитной теории света. Теория Максвелла привела к удивительному выводу, что свет — это всего лишь частный случай таких движущихся изменений поля, которые всегда являются волновыми процессами. Иначе говоря, во всех этих случаях существуют период колебаний и длина волны, и вывод Максвелла состоял в том, что все эти возмущения должны распространяться со скоростью света независимо от их длины волны.

Так была подготовлена почва для открытия Герца*, показавшего, что при самых обычных электрических возмущениях, например при разряде, на некотором удалении возникает электрическое поле, которое подчиняется закону распространения, открытому Максвеллом. От этого открытия оставался всего один шаг до приема и передачи радиоволн со всем огромным разнообразием их длин волн — от очень длинных, используемых для радиопередач, и до коротких, применяемых в телевидении и радиолокации. Таким образом, электрические устройства можно применить для передачи и приема радиоволн с длиной

* Генрих Герц (1857—1894) — немецкий физик, прославившийся своими опытами над электромагнитными волнами. Его перу принадлежат также первоклассные работы в других областях физики и прекрасная книга «Принципы механики».

волны от нескольких миллиметров до нескольких метров, используемых в телевидении, и далее до волн длиной во много километров, применяемых для радиопередач. Каждой длине волны соответствует определенная частота, т. е. число колебаний в секунду. Частота измеряется в герцах (гц), тысячах герц (килогерцах) и миллионах герц (мегагерцах). Для возбуждения и приема еще более коротких волн, чем самые короткие радиоволны, применяются уже не электрические приборы, а устройства, использующие возбуждение атомов или молекул, и, наконец, для получения самых коротких волн возбуждаются атомные ядра.

В сетчатке наших глаз содержатся вещества, атомы которых реагируют на определенный диапазон длин волн (середина этого диапазона лежит где-то около $1/20\,000$ см). Самые длинные из таких волн возбуждают именно те атомы, которые вызывают у нас ощущение красного цвета, средние дают ощущение желтого, затем зеленого и синего, а самые короткие — фиолетового цвета. В действительности механизм цветового зрения очень сложен, и нельзя даже сказать, что определенные длины волн дают определенные цвета; все это несравненно хитрее, и процесс цветового зрения нельзя свести к простой схеме.

Более длинными волнами, чем видимый свет, но более короткими, чем радиоволны, обладают те лучи, которые называются инфракрасными или тепловыми; с другой стороны, короче волн видимого света будут ультрафиолетовые — под действием некоторых из них наша кожа становится коричневой — приобретает загар. Еще короче длина волны у рентгеновских лучей, а уж совсем коротковолновыми являются гамма-лучи, испускаемые при ядерных превращениях. Огромная мощь теории Максвелла в том, что она охватывает весь этот необозримый диапазон волн, по-разному возбуждаемых, по-разному принимаемых и при всем том распространяющихся всегда согласно законам, открытым Максвеллом. Ко всем этим волнам применим закон прямолинейного распространения, но волновая природа их движения приводит к тому, что они способны немного огибать объекты, размеры которых сравнимы с длиной волны.

Однако не следует думать, что для радиосвязи вокруг земного шара используется именно это свойство, — вовсе нет. Просто под действием излучения, исходящего от Солнца, вещество верхних слоев нашей атмосферы становится способным отражать радиоволны, подобно зеркалу. Этот слой называется ионосферой, и чрезвычайно удобно, что волны, начиная с длины около 15 м и больше, отражаются от ионосферы, а затем от поверхности Земли и т. д. — они оказываются пойманными в этом промежутке. Поэтому-то можно охватить радиосвязью весь земной шар. С другой стороны, для некоторых целей, например в телевидении, требуются более высокие частоты (меньшие длины волн), главным образом потому, что низкочастотные волны не могут нести то чудовищное количество информации, которое требуется для передачи изображений по радио. Поэтому прием телевизионных передач более или менее ограничен той областью, где передатчик и приемник могут лежать практически в пределах прямой видимости. Значит, охватить телевидением большие области гораздо труднее, чем длинноволновыми радиопередатчиками. Для лучшего воспроизведения звука также предпочтительнее использовать очень короткие волны; поэтому, чтобы обеспечить наилучший прием, используются высокочастотные передачи с частотной модуляцией. Применяемые при этом волны все-таки достаточно длинны, чтобы огибать такие небольшие препятствия, как деревья и даже здания.

Радиолокация для измерения расстояний

Радиолокация — это особый случай применения коротких радиоволн, имеющий огромное значение для военных и мирных целей и представляющий большой интерес для физика. Принцип радиолокации состоит в посылке и последующем приеме отраженного от цели короткого импульса излучения. Принятый сигнал дает информацию о расстоянии до цели и о направлении на нее. Что касается последнего, так это просто-напросто то направление, в котором мы посылали импульсы и получали отражения. Определение

расстояния немного сложнее, но оно нас интересует гораздо больше.

Измерению подлежит промежуток времени между испусканием и обратным приемом одного и того же импульса. Поскольку известно, что радиоволны распространяются со скоростью света, то, умножая этот промежуток времени на скорость света, мы получим всю длину пути, пройденного импульсом, — до цели и обратно, т. е. удвоенное расстояние до цели. Принцип такого измерения расстояний особенно интересен тем, что в нем не используется ни линейка, ни измерительная рулетка — вообще никакой эталон длины. Все, что требуется сделать, — это измерить промежуток времени и помножить его затем на определенное число — скорость света.

Теперь мы можем немного поразмыслить об истинной природе длины. В физике часто оказывается очень полезно отвлечься от конкретных обстоятельств нашей жизни, в которой одни материалы дешевле, а другие дороже, в которой температура лишь незначительно колеблется около некоторого среднего значения, весьма далекого от сурового мороза космического пространства и от невероятного жара звезд, и т. д. Сделаем здесь очень простое предположение в этом духе. Пусть, например, строители радиолокаторов настолько превзошли изготовителей линеек, что вместо линеек все стали пользоваться исключительно радиолокаторами, измеряя время между испусканием и приемом импульса. И если бы мы выросли в такой век, когда расстояния определяются путем измерения времени, если бы мы выросли, не пользуясь ни линейками, ни другими эталонами длины, то, я думаю, никому и в голову не пришло бы вообще говорить о масштабах длины.

Единицы длины

Но мы и так уже пользуемся временем для выражения длин. Это сплошь и рядом делают в астрономии, когда для того, чтобы избежать громоздких чисел, выражают расстояние до звезд в световых годах, т. е. в таких отрезках, которые свет проходит за год. Однако нет никаких причин применять эти единицы

длины в одних только грандиозных астрономических масштабах. Мы могли бы говорить о световых микросекундах, т. е. расстояниях, которые свет проходит в одну миллионную долю секунды. Эта длина составляет около 300 м, и ею вполне удобно пользоваться. Световая миллимикросекунда равна $1/1000$ этой единицы и составляет около 30 см и т. д. Представим себе теперь такое общество разумных существ, которое не знает ни метров, ни футов, а выражает все длины в световых секундах, миллимикросекундах или вообще в такого рода единицах. Если представителю такого общества задать вопрос, что такое скорость света, то он только широко раскроет глаза. Он не сможет представить себе эту величину выраженной в метрах в секунду, как это могло бы быть; для него это просто единица — естественная единица скорости. Если предмет движется с этой скоростью, то он движется так же быстро, как свет. Все обычные скорости выражались бы в долях этой стандартной величины. Тогда скорость реактивного самолета равнялась бы примерно одной миллионной; иначе говоря, на полет между двумя пунктами этот самолет затрачивает в миллион раз больше времени, чем свет. Подобным же образом скорость поезда или автомобиля равна одной десятиллионной (около 110 км/час). Другими словами, приняв естественный эталон скорости — скорость света, это общество избавилось бы от необходимости вводить вместе два эталона — и времени и длины, а также пользоваться громоздким значением скорости света как коэффициентом, связывающим время и длину. Эта цивилизация признавала бы только эталон времени, что, пожалуй, заметно упростило бы жизнь, и члены этого общества удивлялись бы нам, как людям, туманно и глупо оперирующим с длиной и со временем.

Здесь не мешает упомянуть и о возможности другого общества, которое относилось бы к нам так же, как мы к только что описанной цивилизации. Пусть это новое общество считает направление с севера на юг священным и всегда измеряет его в милях, тогда как направление с востока на запад рассматривается как самое заурядное и всегда измеряется в ярдах. Если человек с самого раннего возраста воспи-

тан в таком взгляде на вещи, то потребуются довольно-таки пытливый ум, чтобы предположить какую-то связь между длинами, взятыми с севера на юг, с одной стороны, и с востока на запад, с другой. Исследуя эту проблему, их физики обнаружили бы, наконец, замечательный факт: 1760 ярдов, отмеренных с востока на запад, «в некотором смысле» равноценны одной миле, отмеренной с севера на юг; это число 1760 было бы провозглашено святой святых учеными этой цивилизации, примерно так же, как нами — скорость света. Конечно, мы должны были предположить, что в национальном бюро стандартов этой цивилизации хранятся два отдельных эталона — эталон мили, предназначенный для измерений в направлении с севера на юг, и эталон ядра для измерений с востока на запад. На наш взгляд это представляется бессмысленной путаницей, но я не сомневаюсь, что точно так же выглядели бы и мы сами с точки зрения цивилизации, которую мы описали первой. Физик всегда предпочитает более простые заключения; он сразу же согласится, что действительно нет никаких оснований для того, чтобы пользоваться эталоном длины, и что вполне достаточно иметь эталон времени.

Спросим теперь, чему же равна скорость света? Конечно, скорость света по определению равна единице. Поэтому то, что называется измерением скорости света, будет представляться этому физiku сложным и окольным путем определения длины эталона метра в Париже через величину общезвестного эталона времени.

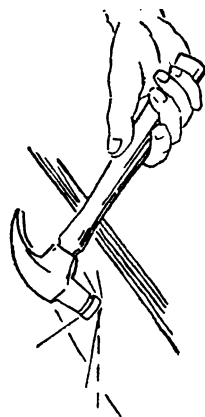
Скорость света

С этих позиций мы можем рассматривать эталон времени как основной, а эталон длины — как второстепенный и несущественный. Такое заключение представляется разумным, особенно если подумать, из чего на самом деле изготовлены наши линейки и измерительные рулетки. Известно, что они состоят из атомов, а их внешняя форма поддерживается электрическими силами, действующими между этими атомами. У атомов, как известно, есть свои периоды колебаний, и мы называем очень твердыми те вещества,

в которых, благодаря определенным периодам колебаний атомов, между атомами сохраняется одно и то же расстояние независимо от формы сделанного из этих веществ предмета. Поэтому мы можем утверждать, что на самом деле длина стержня определяется периодом колебаний атомов, составляющих этот стержень, причем величина этого периода, как обычно, переведена на язык длины с помощью скорости света. И если мы (с полным основанием) говорим, что расстояния между атомами в так называемых твердых телах соответствуют периодам колебаний этих атомов, то мы можем также сказать, что эти расстояния по существу определены радиолокационными методами. При таком подходе длина становится второстепенным, а время — самым основным понятием, причем скорость света с необходимостью оказывается равна единице. Но если мы настолько извращены, что предпочитаем измерять длины в метрах, а не в световых миллимикросекундах, то нам придется внести условный множитель перехода, фактически определяющий этот метр, и мы называем такой множитель скоростью света.

Распространение звуковых волн

Нас больше всего интересуют те свойства света, которые связаны с его распространением. Чтобы выяснить эти свойства, разберемся в разнице между светом и другими волновыми процессами. Из этих последних нам прежде всего знаком звук. Звук образуется областями сжатия и разрежения, которые распространяются в воздухе со скоростью около 330 м/сек, или около 1200 км/час. Высота того звука, который мы слышим, определяется его длиной волны (и тем самым его частотой). Самые низкие звуки, которые мы слышим, имеют частоту около 20 гц, т. е. их длина волны равна примерно 16 м. (Заметим, что произведение длины волны на частоту равно скорости — в данном случае скорости звука.) Подобным же образом самые высокие доступные нашему слуху звуки имеют частоту около 20 кгц, а значит, длину волны примерно 1 см (для разных людей и для одного и того же человека в разном возрасте эти цифры несколько различаются). Обычно середина диапазона частот нашего голоса приходится на частоту около 1 кгц (длина волны близка к 30 см). Скорость звука нетрудно определить с помощью многих опытов благодаря тому, что она гораздо меньше скорости света. Так, например, глядя на молотобойца, работающего достаточно далеко от нас, мы заметим разрыв между моментами прихода света и прихода звука — ведь свету нужно ничтожное время — микросекунды, чтобы пробежать это расстояние, тогда как звуковая волна должна затратить на это несколько секунд (рис. 6). Поэтому изучить законы распространения звука очень легко.



Свет пробегает всего за 1 микросекунду
Звук проходит за 1 секунду



Рис. 6.

Допплеровский сдвиг

Одним из самых интересных и довольно обычных эффектов распространения звука является так называемый доплеровский сдвиг. Если мимо вас по железной дороге на большой скорости мчится гудящий локомотив, то как только он поравняется с вами, звук сирены неожиданно становится более низким. (Очевидно, что этот эффект вызван движением локомотива: если бы и источник звука и наблюдатель стояли на одном месте относительно воздуха, то звук, который слышит наблюдатель, имел бы в точности ту же высоту, с которой он был испущен. Причину этого эффекта нетрудно понять, но можно еще упростить задачу, если взять источник звука, движущийся очень быстро, скажем со скоростью, равной половине скорости звука.

Предположим, что скорость звука равна точно 330 м/сек (1200 км/час). Пусть к тому же источник звука движется нам навстречу, а мы, слушая этот звук, остаемся в покое по отношению к воздуху. Рассмотрим источник звука в два момента времени, разделенные интервалом 1 сек . За эту секунду он приблизится к нам на 165 м ; звук, испущенный им во второй момент времени, должен пройти на 165 м меньше, чем звук, испущенный в первый момент. Чтобы покрыть эти 165 м , звуку нужно ровно полсекунды. Поэтому второй звуковой сигнал пропутешествует на полсекунды меньше, чем первый, испущенный в первый момент. А поскольку из источника они вышли с интервалом 1 сек , звук, испущенный во второй момент, придет к нам лишь на полсекунды позднее, чем звук, испущенный в первый момент. Значит, вместо того, чтобы воспринимать два звуковых сигнала с разрывом в 1 сек , мы будем воспринимать их как следующие друг за другом с гораздо меньшими интервалами.

В качестве таких сигналов мы можем взять, например, точки высокого давления звуковой волны частотой 1000 гц , которую дает наш источник. Такие вершины (гребни) в этой волне повторяются тысячу раз в секунду, а значит, отстоят друг от друга на миллисекунду. За эту миллисекунду источник пройдет

0,165 м, а звуку, испущенному еще через миллисекунду, потребуется на полмиллисекунды меньше времени, чтобы прийти к нам. Поэтому к нам эти пики давления будут приходить каждые полмиллисекунды, что соответствует частоте 2000 гц. Это значит, что высота звука, воспринятая нами, будет на целую октаву выше высоты звука, испущенного источником. Точно так же нетрудно заметить, что если источник удаляется от нас, то каждому последующему звуковому сигналу придется покрывать все большее расстояние, так что промежутки между приходами последовательных гребней волны будут больше, чем промежутки между моментами излучений этих гребней, и высота звука поэтому понизится. Так объясняется всем известный эффект сирены проносящегося мимо наблюдателя локомотива; этот эффект называют *доплеровским сдвигом*.

Не так общеизвестно, но важно для нашего дальнейшего изложения, что доплеровский сдвиг частоты неодинаков в случае движения источника относительно воздуха и неподвижного наблюдателя (только что рассмотренный случай) и в случае движения наблюдателя, когда воздух и источник остаются в покое. Допустим, что мы быстро едем на машине навстречу источнику звука со скоростью, равной половине скорости звука. Рассмотрим два звуковых сигнала, испущенных этим источником с промежутком в 1 сек. В какое-то время к нам придет звук, испущенный в первый момент. Посмотрим теперь, что будет через $\frac{2}{3}$ сек. Поскольку мы двигались со скоростью, равной половине звуковой (165 м/сек), за это время мы приблизимся к источнику на 110 м. Поэтому звуку, испущенному этим источником, чтобы достичь нас, потребуется на $\frac{1}{3}$ сек меньше времени, чем первому звуковому сигналу. Значит, в этот самый момент до нас и дойдет второй сигнал, испущенный через 1 сек после первого, — мы услышим его через $\frac{2}{3}$ сек после того, как до нас дошел первый сигнал. Хотя он и вышел на целую секунду позже, уменьшившееся расстояние между нами и источником сократило время его путешествия ровно на $\frac{1}{3}$ сек.

Таким образом, двигаясь навстречу источнику звука, мы будем принимать с промежутками $\frac{2}{3}$ сек

те сигналы, которые испускались каждую секунду. Мы видим, что теперь частота звука увеличилась на 50%, а не на 100%, как это было в случае движущегося источника, и высота звука возросла не на целую октаву, а лишь на $\frac{1}{5}$. Поэтому недостаточно учитывать только скорость движения источника относительно наблюдателя — необходимо знать и скорость источника относительно воздуха, и скорость наблюдателя относительно воздуха. При малых скоростях еще не так важно, кто именно движется, но уж если мы взяли скорость, равную половине звуковой, то это стало весьма существенно.

Звуковая ударная волна

Если описанные выше эффекты были достаточно удивительными при умеренных скоростях, то они станут совсем необычными, когда мы превзойдем скорость звука. С появлением сверхзвуковых самолетов это стало совсем обычным делом, и одним из наиболее известных и наиболее прискорбных эффектов сверхзвуковых полетов является ударная волна или, как часто называют это явление, — преодоление звукового барьера. Это явление очень интересно и заслуживает того, чтобы его обсудить.

Рассмотрим сначала (рис. 7) самолет, летящий на постоянной высоте 4 км со скоростью, превышающей скорость звука, например 400 м/сек; напомним, что звук распространяется со скоростью 330 м/сек. Когда самолет находится еще далеко от нас, направленная на нас составляющая его скорости превышает скорость звука. Иными словами, расстояние между нами и самолетом уменьшается быстрее, чем распространяется звуковая волна, так что звук, относящийся к более поздним моментам полета, мы услышим раньше, чем звук, возникший в предыдущие, более ранние моменты. Когда же самолет подойдет к нам ближе, то расстояние от него до нас будет уменьшаться уже далеко не так быстро. В самом деле, это расстояние станет наименьшим, когда самолет очутится точно над нами, а затем оно снова начнет увеличиваться. Поскольку в эти моменты удаление от самолета остается примерно постоянным, так как оно приблизительно

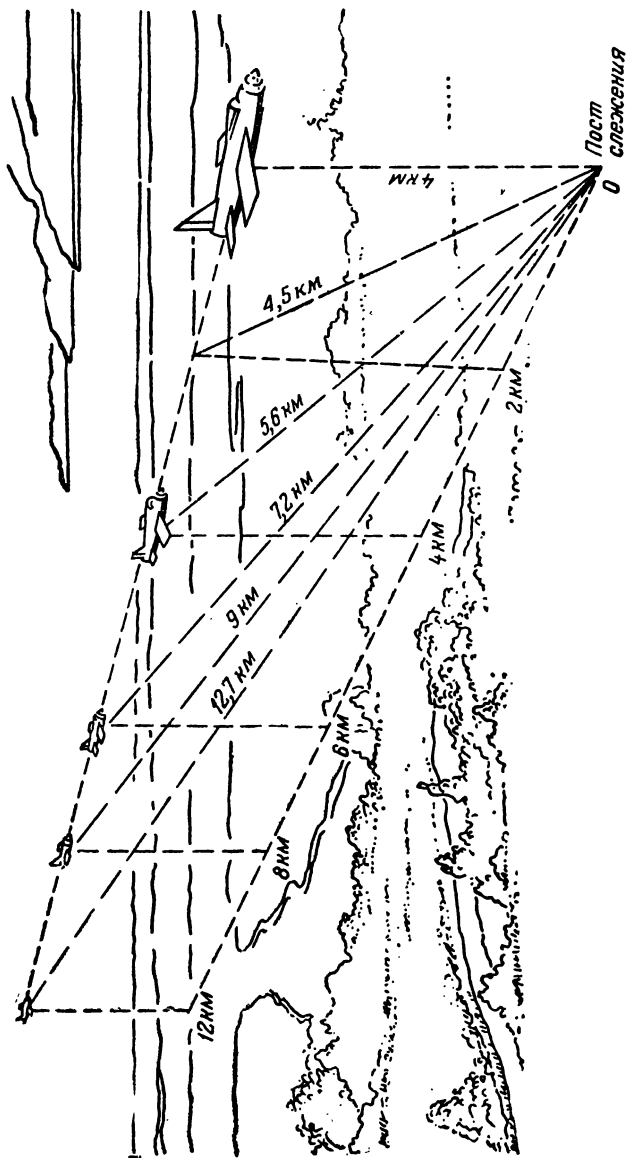


Рис. 7. К обсуждению ударной волны от сверхзвукового самолета.

равно высоте полета, то расстояние самолета до нас изменяется не так быстро, несмотря на огромную скорость самолета.

Итак, некоторое время самолет сохраняет примерно одно и то же расстояние от нас. А раз его расстояние до нас уменьшается медленнее, чем распространяется звук, то звук от более поздних моментов полета дойдет до нас позднее, чем от более ранних, как обычно. Значит, дальнюю часть полета самолета мы прослушиваем в обратном порядке, а более близкую (позднюю) часть полета слышим в обычной последовательности. Поэтому сначала мы вообще не слышим этого самолета, а затем до нас одновременно доходит звук сразу со значительной части его пути, потому что там расстояние от самолета до нас уменьшалось точно с такой же скоростью, с которой это расстояние проходил звук. Таким образом, гул от самолета за некоторый промежуток времени придет к нам в один и тот же момент. Именно это неожиданное появление звука сразу от целого отрезка пути самолета, ставшее таким оглушительным благодаря сложению всех шумов, и называется ударной волной.

Для большей определенности предположим (см. табл. 1), что, когда наш секундомер показывает 0 сек, самолет находился на таком расстоянии от нас, при котором точка на земной поверхности, находящаяся прямо под самолетом, была удалена от нас ровно на 12 км. Поскольку самолет летел на высоте 4 км, его расстояние от нас было немного больше, а именно 12,7 км; чтобы дойти до нас, звуку требовалось приблизительно 38,5 сек. За следующие 10 сек самолет пролетел около 4 км. Точка, над которой он находился, была от нас уже в 8 км, расстояние между нами и самолетом по прямой составляло около 9 км, и звуку требовалось 27,3 сек, чтобы пройти его. В этом случае звук был испущен на 10 сек позже, чем в предыдущем, так что он пришел к нам через 37,3 сек после 0 сек, т. е. за 0,8 сек до того звука, который был испущен десятью секундами раньше. Еще через 5 сек точка, над которой пролетал самолет, была от нас всего в 6 км, расстояние по прямой от самолета до нас равнялось 7,2 км, и звук покрыл его за 21,8 сек, придя к нам еще

на полсекунды раньше, чем звук, излученный за 5 сек до этого.

Таблица 1

Момент испускания звука, сек	Координата точки, над которой пролетает самолет, км	Расстояние от самолета до наблюда- теля по прямой, км	Время пробега звука, сек	Момент прихода звука к наблюда- телю, сек
0	12	12,7	38,5	0+38,5
0+5	10	10,8	32,7	0+37,7
0+10	8	9,0	27,3	0+37,3
0+15	6	7,2	21,8	0+36,8
0+20	4	5,6	17,0	0+37,0
0+25	2	4,5	13,6	0+38,6
0+30	0	4,0	12,1	0+42,1

Пятью секундами позднее направление на самолет уже составляло с горизонтом 45° , так что самолет пролетал над точкой, лежащей всего в 4 км от нас, а расстояние до него по прямой составляло около 5,6 км, которые звук прошел примерно за 17 сек. Поэтому звук, испущенный тогда самолетом, пришел к нам почти одновременно с тем звуком, который испустил самолет за 5 сек до этого (точнее, он пришел на 0,2 сек позже). Таким образом, до некоторого момента (см. четвертую строку табл. 1) мы вообще не слышали подлетавшего самолета! Еще через 5 сек самолет пролетал над точкой, удаленной от нас на 2 км, по прямой до самолета было 4,5 км, звук прошел их за 13,6 сек и дошел до нас поэтому на 1,6 сек позднее, чем звук, испущенный пятью секундами раньше. Наконец, еще через 5 сек самолет будет прямо над нами, а звук придет с высоты в 4 км через 12,1 сек, т. е. на 3,5 сек позже, чем испущенный за 5 сек до этого. Итак, в течение почти 37 сек с момента начала наблюдения мы ничего не слышали. Потом внезапно, подобно удару, мы услышали звук от целого участка траектории самолета, а затем слышим одновременно два звука: звук, испущенный самолетом после этого момента, и звук, испущенный самолетом раньше, когда он был дальше от нас. Таким образом, гул от самолета, относящийся к моменту начала наблюдения

(0 сек) и точке на земле в 12 км от нас, дошел до нас в то же самое время, что и звук, испущенный самолетом, когда он пролетал над точкой, удаленной от нас всего на 2 км.

Часто можно наблюдать еще одно явление. Пусть самолет летел сначала в том же направлении и на той же высоте, что и в предыдущем примере, но скорость его немного меньше скорости звука. Поэтому, хотя он и приближался к нам довольно быстро, звук, соответствующий различным моментам полета, доходил до нас в порядке следования этих моментов друг за другом. Допустим теперь, что самолет стал лететь быстрее, превышая скорость звука, и тогда началась уже рассмотренная нами картина, когда, как мы помним, гул воспринимался в обратном порядке по времени. Между периодом поступления звука в нормальном порядке (дозвуковой полет) и периодом поступления звука в обратном порядке (сверхзвуковой полет) должен быть такой момент, когда мы одновременно услышим звук, пришедший с целого участка пути самолета — новый звуковой удар. Это случится как раз в момент приближения к нам самолета со скоростью звука. Сам он в этот момент будет двигаться немного быстрее звука, так как его путь направлен не точно к нам. Значит, при таком полете будет два звуковых удара, и сначала мы услышим первый из упомянутых здесь. До этого удара мы еще ничего не слышали, а после него мы услышим сразу звук, испущенный в течение трех периодов полета: в дозвуковом полете, пока самолет еще не увеличил свою скорость, поступающий к нам в нормальном порядке; при сверхзвуковом полете на том участке, где самолет был еще далеко от нас, — в обратном порядке по времени; наконец, на последнем участке полета, начиная с того момента, когда самолет был почти прямо над нами, — вновь поступающий в нормальном порядке, но одновременно с двумя предыдущими звуками. Чуть позже мы услышим второй удар, который мы разобрали здесь только что; после него мы будем слышать лишь звук, испущенный этим самолетом, когда он был над нами или уже улетал вдаль.

Разные результаты, получаемые при движении излучателя или приемника звука, следуют из того, что

ударные волны могут появиться только при движении излучателя со сверхзвуковой скоростью. Пусть на поверхности земли имеется источник звука и навстречу ему со скоростью, превышающей скорость звука, летит самолет. Его пассажиры не услышат ничего похожего на звуковой удар. Дело в том, что удар случается лишь тогда, когда звук собирается сразу от целого отрезка пути, в один и тот же момент приходя к приемнику. Если бы излучатель покоился относительно воздуха, то, чтобы дать такой эффект, звуковым волнам пришлось бы догонять друг друга, а это никак не может быть, так как скорость звука одна и та же для всех звуковых волн — и никакого удара не произойдет.

Мы хорошо знакомы еще с одним видом волн — с волнами на поверхности воды. Подобно звуковым волнам, они распространяются в среде (воде), но свойства их гораздо сложнее, потому что скорость их зависит от длины волны. Например, волны длиной 450 м (расстояние между соседними гребнями) бегут по океану со скоростью около 100 км/час, тогда как волны, расстояние между соседними гребнями которых составляет всего 30 см, движутся со скоростью только 2,4 км/час. Но несмотря на это различие, на примере таких волн можно проиллюстрировать многие свойства звуковых волн, обсуждавшиеся в этой главе.

Особое положение света

Когда Максвелл около ста лет назад доказал, что свет — это волны, все заинтересовались и другими видами волн, надеясь найти сходство между ними и светом и таким образом лучше понять процесс распространения света. В таких видах волн недостатка нет — это звуковые волны и волны на поверхности воды, волны в натянутых струнах, волны землетрясений и т. д.

Все эти волны по необходимости распространяются в среде, которая сама может тоже двигаться, и определение ее скорости никак не зависит от движения волн. Более того, скорость самой среды в разных точках не обязательно должна быть одинаковой, что ведет к сложным процессам рассеяния и преломления волн. Не удивительно, что первоначально никто полностью не сознавал, что процесс распространения света в корне отличается от всех этих явлений. Чтобы свету было в чем распространяться, придумали гипотетическую среду, которую называли эфиром. И, как часто бывает в науке, эта идея, основанная на несуществующей аналогии, дала полнейшую осечку и вместо того, чтобы помочь, спутала все карты.

Гипотетический эфир

Этот эфир был придуман для одной и только одной цели — чтобы в нем распространялся свет, чтобы дать свету ту среду, какой для звука является воздух. Но ведь воздух можно взвесить, воздухом можно подуть, его можно откачать или,

наоборот, накачать куда-то под давлением. Ничего подобного нельзя сделать с гипотетическим эфиром. Он должен находиться повсюду, так как его нельзя удалить. Эфиром нельзя подуть или закрутить его вихрем — иначе он замедлял бы движение планет и тормозил всю солнечную систему, а ведь движение планет ясно показывает, что такого трения нет. Даже большие тела не могут сдвинуть эфир. Например, когда мы видим, как Луна проходит мимо звезды, свет от этой звезды доходит до нас без какого-либо заметного изменения до тех самых пор, пока диск Луны не закроет ее. Это значит, что Луна не влияет на эфир даже у самой своей поверхности. Следовательно, у такого эфира нет никаких свойств, кроме одного, — он создает сходство между процессами распространения света и распространения звука. Но если обратиться к ньютоновской механике, сразу же становится ясно, что на самом деле сходства между этими процессами нет.

Мы уже выяснили, что равномерное движение не влияет на механические процессы. Помните, сколько внимания мы уделили полному и точному сходству между наливанием чая в самолете и у себя дома за столом. Это сходство мы называли ньютоновским принципом относительности, который утверждает, что все движущиеся по инерции наблюдатели равноценны друг другу с точки зрения механики: если один из них поставит в своей собственной системе некоторый опыт, то у него получится точно такой же результат, как и у любого другого инерциального наблюдателя в его собственной системе координат. Эту же мысль можно выразить несколько иначе: скорость несущественна и играет роль только ускорение. Например, в комфортабельном воздушном лайнере мы можем беседовать со своими соседями точно так же, как мы говорили с ними на поверхности земли. Это тоже проявление ньютоновского принципа относительности. В сущности, звук — это механическое явление, состоящее в движении воздуха. Говорящий (излучатель), воздух (среда распространения) и слушатель (приемник) — все движутся вместе со скоростью самолета, так что испытывают в точности то же самое, что испытывали бы в покое на земле.

Беспочвенность представлений об эфире

Как ведет себя свет в самолете? Единственный простой ответ (для нашего поколения этот ответ очевиден) гласит: все, что происходит на самолёте, должно совпадать с тем, что происходит на земле, хотя речь идет теперь уже о распространении света. Но с точки зрения гипотезы об эфире, как бы абсурдно это нам теперь ни показалось, самолет должен был бы оказаться совсем в другом положении, чем земля. Как мы уже видели на примере Луны, тела в своем движении не могут увлекать за собой эфир. Это значит, что если мы будем считать эфир неподвижным относительно наблюдателя на поверхности земли, то сквозь летящий самолет будет дуть «эфирный ветер», что должно повлиять на распространение света. Конечно, скорость самолета несравненно меньше скорости света (около одной миллионной ее), однако те же соображения верны и при много больших скоростях. Кроме того, чувствительность приборов для измерения скорости света и других его свойств исключительно велика. Таким образом, гипотеза об эфире приводит к нелепому выводу о том, что состояние равномерного движения можно отличить от состояния покоя оптическими средствами, хотя механическим путем сделать это невозможно.

Этот «вывод» явно противоречит всем высказанным нами соображениям об единстве физики — о невозможности отделить оптику от механики и других физических дисциплин. Если с точки зрения механики движущиеся по инерции наблюдатели ничем друг от друга не отличаются, то вообще не должно быть никакого способа, чтобы обнаружить разницу между ними. Такое само собой разумеющееся распространение ньютоновского принципа относительности на оптику 70 лет назад никому не приходило на ум — гипотеза эфира тогда настолько владела умами ученых, что они занялись «измерением» эфирного ветра. Теперь мы знаем, что все эти представления об эфире, приводившие к выводу о существовании эфирного ветра, не принесли ничего, кроме вреда и путаницы, но в то время было очень трудно это понять.

Чтобы обнаружить эфирный ветер, был поставлен один из самых знаменитых физических опытов — эксперимент Майкельсона — Морли. Только неудача этого эксперимента заставила ученых признать тот факт, что физика едина, что если скорость не играет роли в механике, то она не должна играть роли и в оптике.

Из этой нелепой гипотезы эфира вытекало, что эфир никак не может стоять на месте относительно Земли, потому что та несется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек, т. е. примерно в $\frac{1}{10\,000}$ скорости света. Но вместе с тем Земля не может увлекать эфир следом за собой — ведь мы знаем, что Луна, например, не может этого сделать. К тому же, если бы Земля толкала и тащила с собой окружающий ее эфир по отношению к той части эфира, которая находится далеко от нее, то это привело бы к сложным эффектам преломления света, и нам казалось бы, что звезды движутся по-разному, а этого на самом деле не наблюдается. Итак, гипотеза эфира предсказывает существование эфирного ветра, дующего со скоростью примерно $\frac{1}{10\,000}$ скорости света. Как измерить этот эфирный ветер? Он должен проявляться в виде различия скорости света в разных направлениях.

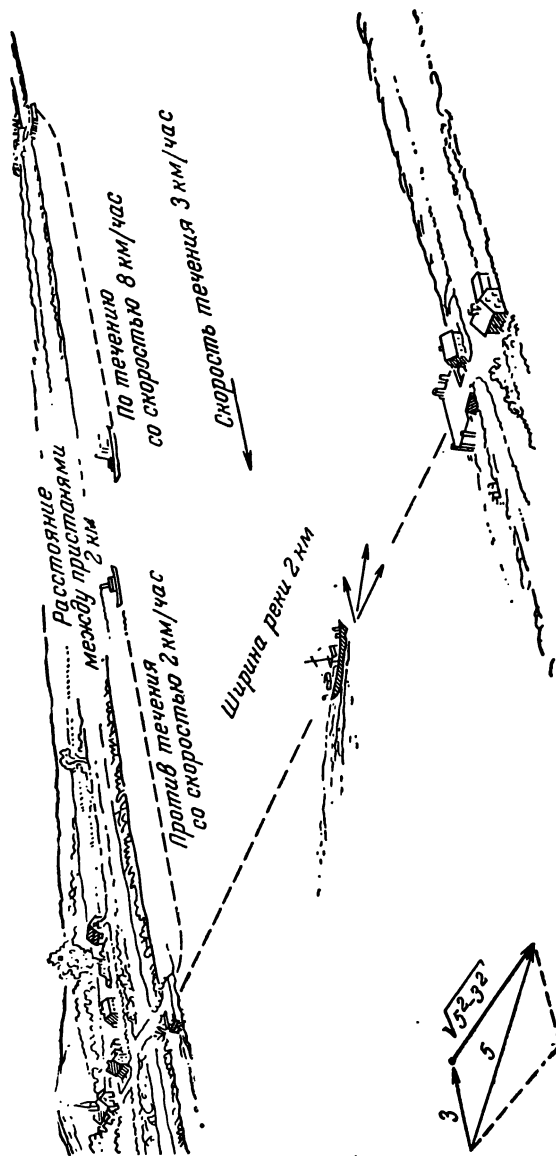
Измерение скорости

Скорость предметов обычно измеряют так: сначала измеряют длину какого-то отрезка пути, а потом ставят на его концах наблюдателей с часами, которые отмечают время прохождения объекта мимо них. Если разделить длину этого отрезка пути на разность показаний часов, то получится скорость. Если длина задана, то чем быстрее летит предмет, тем точнее следует измерять время, и даже малая ошибка в синхронизации наших часов сведет на нет весь опыт по определению скорости. Поскольку свет распространяется чрезвычайно быстро, то понятно, как трудно проводить этот эксперимент при любом расстоянии, которое на практике может разделять наблюдателей, особенно если требуется измерить скорость света настолько точно, чтобы заметить дей-

ствие на нее эфирного ветра. Возникает и другое затруднение: ведь наблюдатели обычно сверяют (синхронизируют) свои часы, посылая друг другу световые сигналы. Таким образом, они ставят синхронизацию в зависимость как раз от того, что собираются измерять, — от скорости света. Избежать этих затруднений можно, если работать в одном и том же месте и измерять длину пути света от наблюдателя до зеркала и обратно. Для обнаружения же эфирного ветра нужно сравнить время распространения света по замкнутому пути вверх и вниз по течению эфира и время его распространения (тоже по замкнутому пути) поперек этого течения. Следующий пример поясняет сказанное.

Представим себе, что мы находимся на реке шириной 2 км, текущей со скоростью 3 км/час (рис. 8). Пусть у нас есть лодка, двужущаяся в стоячей воде со скоростью 5 км/час. Требуется, во-первых, съездить на ней до другого места на том же берегу, расположенного в 2 км вверх по течению, и вернуться назад; во-вторых, нужно переплыть реку до точки, лежащей прямо напротив, и тоже вернуться назад. Сколько времени потребуется на эти поездки? Сначала, плывя на лодке вверх по течению, мы будем делать эффективно 2 км/час, причем мотор будет работать на мощности, рассчитанной на скорость 5 км/час, против течения в 3 км/час, и нам понадобится 1 час, чтобы добраться до цели выше по течению. На обратном пути течение будет попутным, и, прибавив скорость лодки 5 км/час к скорости реки 3 км/час, мы получим скорость 8 км/час, т. е. 2 км будут пройдены за четверть часа. Значит, дорога туда и обратно займет 1 час 15 мин.

Во втором случае, пересекая реку, нам не следует направлять нос лодки прямо к противоположному берегу, потому что иначе течение снесет нас далеко вниз по реке. Нос лодки нужно направить немного вверх по течению, чтобы из скорости 5 км/час в том направлении, куда обращен нос лодки, 3 км/час отнеслось к направлению вверх по течению и компенсировало скорость течения реки. Из чертежа в нижнем левом углу рис. 8 видно, что при этом у нас остается эффективная скорость 4 км/час для



пересечения реки, и дорога в каждый конец поперек реки займет по полчаса — в сумме 1 час. Значит, путь в 2 км и возвращение к исходному месту требует разного времени в зависимости от того, путешествуем ли мы вверх и вниз по течению или поперек него. Этот метод и был использован в знаменитом эксперименте Майкельсона — Морли*.

Эксперимент Майкельсона — Морли

Свет посылался в двух направлениях, отражался на одинаковых расстояниях от исходной точки, а затем сравнивалось время его распространения или, точнее, число длин волн, уложившихся на длине участка пути. Принимая скорость движения Земли приблизительно равной 30 км/сек — около $\frac{1}{10\,000}$ скорости света, мы найдем, что разность времени должна быть равна всего лишь $\frac{1}{200\,000\,000}$ от всего времени распространения света. Но методы спектроскопии настолько точны, что это различие можно обнаружить с помощью так называемой интерференции, когда вернувшиеся с разных направлений световые волны накладываются друг на друга. Сначала замечают результат сложения этих волн при одном положении прибора, а потом поворачивают его на какой-то угол. Если вызванное этим изменение направлений изменит и время распространения света (например, путь света поперек течения эфира превратился при повороте в путь вверх и вниз по течению, или наоборот), то это приведет к сдвигу интерференционных полос при наложении двух волн. Такого сдвига не обнаружилось.

Пагубная идея эфира настолько глубоко укоренилась в сознании людей, что этот результат всем представлялся непостижимым. Теперь этот отрицательный

* Альберт Абрахам Майкельсон (1852—1931) — первый американский ученый, получивший Нобелевскую премию (1907). Кроме вклада в теорию относительности, он измерил скорость света и изобрел интерферометр для точнейших измерений с помощью длин световых волн.

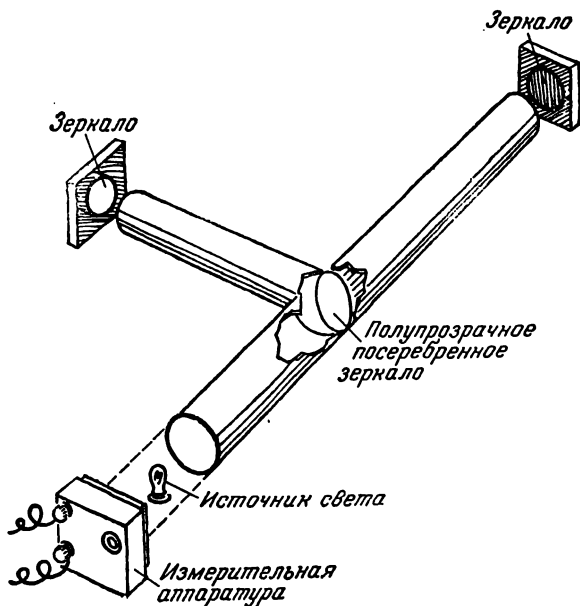
Эдвард У. Морли (1838—1923), участвовавший совместно с Майкельсоном в постановке знаменитого опыта по эфирному ветру, по образованию был химиком. [См. книгу Джеффа «Майкельсон и скорость света», ИЛ, М., 1963. — *Прим. ред.*]

результат совершенно ясен — ведь мы считаем, что время распространения света не зависит от направления, т. е. от того, распространяется ли световой луч в направлении движения Земли, против него или под прямым углом поперек него. При распространении света наша скорость не играет роли точно так же, как и в механике. Этот отрицательный вывод из эксперимента Майкельсона — Морли оказался фундаментальным и привел к утверждению, что в оптических явлениях скорость ничуть не более существенна, чем в механических. Это утверждение обычно называют *принципом относительности*, и оно впервые было отчетливо сформулировано Эйнштейном в 1905 г. Более ранние формулировки были даны Лоренцом* и Пуанкаре**.

В заключение отметим, насколько бессмысленным представляется нашему поколению фундаментальный эксперимент, проведенный 70 лет назад. Ясно, что если бы при повороте прибора Майкельсона — Морли одно или оба его световых плеча изменили свою длину, то от этого результат опыта заметно изменился бы. Поэтому экспериментаторы приложили массу усилий к тому, чтобы обеспечить максимальную жесткость конструкции. Нам это кажется теперь весьма занятным. Современная техника позволяет установить длину этих плеч радиолокационными методами или равноценными им методами оптической интерференции. Но это значит, что мы определяли длину плеч, измеряя время, которое требуется свету, чтобы пройти в оба конца. Если мы определяем расстояние до какого-то зеркала, требуя, чтобы время распространения света до него и об-

* Генрик Антоон Лоренц (1853—1928) — блестящий голландский физик, еще до Эйнштейна построивший подобие теории относительности при попытке приспособить уравнения Максвелла к новым экспериментальным фактам. Эйнштейн в своей специальной теории относительности вывел основные математические формулы, совпавшие с преобразованиями Лоренца, когда он еще не знал о вышедшей до этого работе Лоренца.

** Жюль Анри Пуанкаре (1854—1912) — выдающийся французский и один из крупнейших мировых математиков начала нашего века. Многие специалисты-физики считают, что он построил бы эйнштейновскую теорию относительности, если бы Эйнштейн не опередил его.



Р и с. 9. Скорость света в двух различных направлениях можно сравнить с помощью интерферометра.

ратно оставалось одним и тем же независимо от направления пути в пространстве, то нас не может удивить, что время путешествия света до зеркала и обратно окажется постоянным при изменениях направления этого пути. Против этого можно возразить, что ведь Майкельсон и Морли вовсе не пользовались радиолокатором или методами интерференции для того, чтобы сохранить неизменными расстояния зеркал от источника света. Они использовали для этого жесткость материала прибора, и можно сказать, что результат их опыта подтвердил эквивалентность использования жестких стержней, с одной стороны, и радиолокационных и оптических интерференционных методов, с другой. Однако это последнее утверждение — просто «логический круг»: ведь мы уже подчеркивали в одной из предыдущих глав, что длина жесткого стержня определяется электрическим взаимо-

действием его атомов, т. е. в конечном счете тем же, что лежит в основе радиолокации.

И вот теперь, через 70 лет, нам не только очевидно, каким должен был быть результат эксперимента Майкельсона — Морли, но и стало яснее ясно, что этого эксперимента вообще не следовало ставить. Но таким «задним умом» в науке не проживешь. Эксперимент Майкельсона — Морли знаменит именно потому, что он впервые привел нас к взглядам, которые проникли в самую глубину нашего сознания и сделали теперь этот эксперимент просто очевидным. Не может быть более выдающегося научного открытия, чем то, о котором через много лет с недоумением скажут: да разве это вообще могло считаться открытием? Лишь то действительно ценно, что стало очевидным, ибо лишь абсолютная истина так глубоко влияет на наше сознание и таким коренным образом изменяет наш взгляд на вещи, что мы даже не можем себе представить, чтобы она с самого начала не была ясна человеку.

О здравом смысле

В этой книге, особенно в предыдущей главе, мы привели доводы, убедительно говорящие о том, что все инерциальные наблюдатели должны считаться равноценными, и притом не только с позиций механики, как это обнаружил еще Ньютон, но и в отношении законов света. Отсюда следует, в частности, что скорость света одинакова во всех направлениях и не зависит от движения наблюдателя, если только тот находится в покое или движется по инерции.

Как мы уже подчеркивали раньше, этот вывод совершенно очевиден, если мы условимся измерять расстояние методами радиолокации. Тогда, чтобы найти расстояние до цели, мы измеряем время, а именно половину того времени, которое пройдет между испусканием и обратным приемом радиоимпульса. Хотя мы ничуть не ошибемся, если будем описывать это расстояние непосредственно с помощью времени, все исследователи по привычке умножают последнее на совершенно условное (а потому совершенно произвольное) число, именуемое скоростью света, просто для того, чтобы выразить расстояние в метрах, милях, футах и пр., а не в секундах. Кроме того, принцип единства физики требует, чтобы системы, равноправные с точки зрения всех внутренних механических экспериментов, были одинаковы и с точки зрения вообще любых внутренних экспериментов.

Все это просто с неизбежностью приводит к принципу относительности Эйнштейна: все инерциальные наблюдатели физически равноправны, и не может существовать такого внутреннего эксперимента, в результате которого обнаружится хотя бы какое-нибудь

различие между этими инерциальными наблюдателями. Иными словами, этот принцип гласит, что нет никаких оснований отдать предпочтение скорости какого-нибудь самолета, если наблюдатель не выглядит в окошко и если самолет летит без ускорения.

Думая об этом великом принципе физики на шестидесятом году его существования, невозможно не удивляться, как люди вообще могли когда-то думать иначе. И это ничуть не умаляет грандиозного достижения Эйнштейна, — напротив, если, привыкнув к нему, мы уже не можем представить себе, как все было без него, то это свидетельствует о поистине огромном прогрессе нашего мышления.

Несмотря на почти полную очевидность для нас этого принципа относительности, первоначально он встретил довольно холодный прием. Такие случаи часто бывают в физике, когда делается логически неизбежный шаг, к которому принуждает нас эксперимент, и при этом рушатся понятия, которые мы долго лелеяли. В случае принципа относительности таким понятием было время. Как выяснится в следующей главе, принцип относительности изменил понятие времени настолько, что, казалось, оно стало противоречить здравому смыслу.

Наш повседневный жизненный опыт

Отвлечемся ненадолго от принципа относительности и подумаем, что следует понимать под здравым смыслом и следует ли ожидать противоречий между здравым смыслом и физикой. Здравый смысл — это то чудовищное количество опыта, которое мы приобретаем в наши юные годы и из которого мы извлекаем великое множество сведений о мире, в котором живем, и об окружающих нас предметах. Хотя, возможно, в нем содержится кое-что от инстинкта, но в основном здравый смысл — это концентрат опыта. Но тот опыт, который мы накапливаем, черпается, естественно, из нашего повседневного окружения, с помощью тех вещей и веществ, которые у нас под рукой. У нас не возникает никаких «здравых» представлений о поведении газа при температуре в миллион градусов, потому что в обыденной жизни такая штука нам

не попадает. Точно так же у нас не возникает ни малейшего представления о том, как должен выглядеть мир, если мчаться по шоссе со скоростью 100 000 км/сек — просто потому, что с нами этого не случается.

И в то же время здравый смысл служит отличным путеводителем среди тех явлений, на которых он основан, т. е. явлений обыденной жизни. Дело физики — пойти дальше этого, создать и применить приборы, обогащающие наш опыт и позволяющие познать те предметы и те условия, с которыми мы обычно не сталкиваемся. Поэтому можно ожидать, что когда физик при изучении более обширного круга явлений, чем тот, на котором основан здравый смысл, задумается о своих результатах, то представления здравого смысла окажутся либо применимыми, либо не применимыми к ним. Если окажется, что они применимы, то это просто значит, что, расширив круг изучаемых явлений, физик не вышел за пределы того, что было заключено в более узком круге. Если же он по-настоящему выйдет из этого круга, то, естественно, нельзя ожидать, что он сможет продолжать опираться на «здравый смысл». Более того, здравый смысл будет тогда плохим советчиком, и с ним труднее будет приспособиться к новым условиям, чем без него.

Однако к новым условиям всегда можно приспособиться. Люди по своей натуре понятливы, а это равносильно тому, что их ум гибок. Встретившись однажды вплотную с новыми условиями, человек может разобраться в них, приобрести от них новые знания, точно так же, как учат новый язык. Исторически случилось так, что мощь, достаточную для того, чтобы помочь нам вырваться за рамки применимости здравого смысла, физические приборы обрели к концу XIX и в первые годы XX в. Тогда впервые были получены результаты, явно противоречащие нашему повседневному опыту, приобретенному в иных, прежних условиях, и это привело к мучительным поискам и сомнениям.

Теперь мы знаем, что все это было напрасно, что чем глуже проникают наши приборы, тем более странным кажется открывающийся перед нами мир и тем

сильнее и явственнее отличается он от привычного нам мира. Современный физик, по выражению Льюиса Кэррола *, приучен каждый день до завтрака поверить по крайней мере в две невероятные вещи. Иначе говоря, удивительно как раз то, что молекулы газа ведут себя до такой степени подобно бильiardным шарам, а вовсе не то, что поведение электронов так мало похоже на поведение тех же бильiardных шаров. Возвращаясь теперь к эйнштейновскому принципу относительности, укажем, что суть его состоит в распространении ньютоновского понятия относительности на всю физику. Все инерциальные системы равнозначны, в любом смысле слова. Речь идет уже не только о наливании чая, одинаковом как в реактивном самолете, так и за домашним столом, но в том, что, поглядев в зеркало в реактивном самолете, вы увидите то же самое, что вы видите, взглянув в зеркало у себя дома.

Мое индивидуальное время

Если двигаться с постоянной скоростью, то не изменится ни оптика, ни механика, ни физика вообще. Но оказывается, и мы докажем это в следующей главе, что представление о времени с точки зрения здравого смысла несовместимо с принципом относительности, если признать тот факт, что скорость света одинакова во всех инерциальных системах. Необходимо освободиться от прежних представлений о времени, хотя эти представления становятся серьезным злом лишь тогда, когда мы имеем дело с очень большими скоростями — лишь незначительно меньшими, чем скорость света. Однако в принципе затруднения возникают при всех скоростях. Мы твердо знаем, что если у вас и у меня есть часы, на которых стоит уважаемая фабричная марка и которые мы сверили друг с другом (синхронизировали), то независимо от того, что будете делать вы, а что — я, наши часы будут всегда показывать одинаковое время. Однако это

* Льюис Кэррол (литературный псевдоним английского математика Чарлза Латуиджа Доджсона) — автор знаменитых детских книг о приключениях Алисы в стране чудес и в зеркальном мире, на которых воспитывалось много поколений англичан. — *Прим. перев.*

утверждение основано на опыте, относящемся к очень узкому кругу явлений, если судить с позиций физики в целом. Ведь ни вы, ни я никогда не будем путешествовать с действительно большими скоростями. Поэтому мы должны учитывать возможность (но не более), что эта постоянная синхронность ваших и моих часов сохранится, лишь пока мы будем двигаться медленно. Думать, будто наши часы должны показывать одинаковое время, когда мы будем двигаться со скоростями, близкими к световой, только потому, что они показывали одинаковое время, пока мы оба перемещаемся с небольшой скоростью, — явная бессмыслица. Значит, нам следует привыкнуть к мысли, что время — дело индивидуальное. Иначе говоря, мое время — это то, что показывают мои часы.

Время — это то, что измеряется часами. Это и есть здравый взгляд на вещи. Величины, подобные времени и результатам любых других физических измерений, не существуют сами по себе, абстрактно. Какой смысл говорить о чем-то, пока мы не уточнили, как это измерять? Если мы не хотим нести бессмыслицу, говоря о какой-то величине, то прежде всего нужно задать метод ее измерения. Значит, приступая к изучению природы времени без предубеждений и имея в виду, что в повседневной жизни мы по существу не могли узнать, что происходит со временем, когда мы движемся очень быстро, мы должны быть готовы к тому, что универсальное всеобщее время разобьется на множество индивидуальных времен.

Время «зависит от пути»

Возможность того, что время является индивидуальным, а не всеобщим, приводит к вопросу, как «зависит» время от пути. В обыденной жизни мы встречаем два совершенно различных типа величин: одни из них можно назвать зависящими от пути, а другие — не зависящими. Разницу между ними можно описать на примере поездки по холмистой местности (рис. 10). Если мы выехали из одного города, направляясь к другому, и поехали по холмам, поднимаясь и опускаясь по их склонам, и при этом запоминали величины подъемов и спусков на каждой

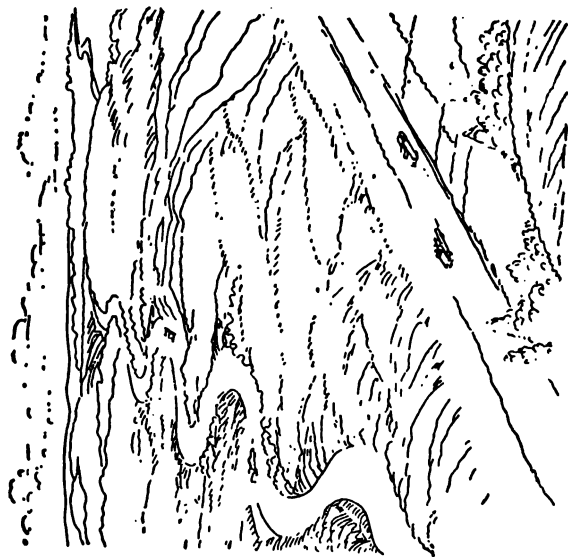
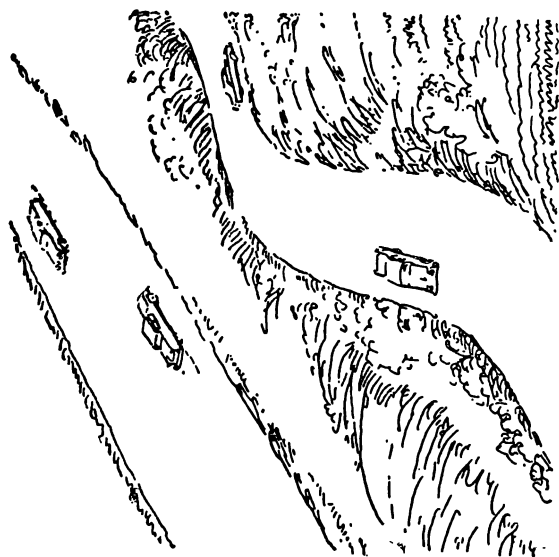


Рис. 10. Километраж как величина, зависящая от пути.

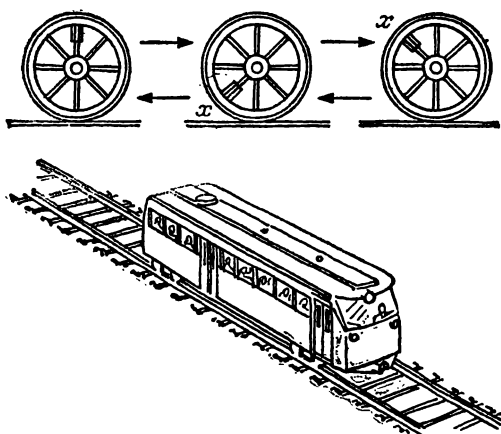


Рис. 11. Колесо каждый раз возвращается в одно и то же положение, когда вагон возвращается на прежнее место, — вращение колеса не зависит от пути (от выбора пути).

части пути, то полное изменение нашей высоты будет равно просто разности высот над уровнем моря города, в котором мы кончили наш путь, и города, из которого мы выехали. Если бы мы поехали совсем по другой дороге, но держали путь из того же первого города в тот же второй город, то полное изменение высоты на протяжении всего пути было бы тем же самым, что и прежде, так как оно равно просто разности высот точек начала и конца путешествия. Это — характерный пример величины, не зависящей от пути. Полное изменение высоты не зависит от выбора дороги. Если же, с другой стороны, мы смотрим на спидометр автомашины и измеряем расстояние между этими двумя городами, то от выбора дороги будет зависеть очень многое. В зависимости от того, по какому пути мы поедem, пройденный между этими городами километраж будет каждый раз другим. Значит, километраж — величина, зависящая от пути. Все это кажется очевидным, но суть в том, что все физические величины можно разделить на зависящие и не зависящие от пути.

Рассмотрим в поисках не зависящей от пути величины движение дизельного поезда, обслуживающего

пригородную одноколейную линию между двумя городами (рис. 11). Если колеса не буксуют (т. е. не скользят по рельсам), то положение колес нашего поезда всегда будет в точности одинаковым, когда он вернется на прежнее место, независимо от того, сколько рейсов взад и вперед он проделал. Тогда, сделав отметку мелом наверху колеса, когда поезд стоял на станции, мы увидим эту отметку также вверху после возвращения поезда назад. Значит, положение колес — величина, не зависящая от пути. Мы можем ей противопоставить зависящую от пути величину, например уровень горючего в баке двигателя, который явно должен зависеть от того, сколько рейсов совершил поезд с момента наполнения бака.

К какой бессмыслице в нашей обыденной жизни привело бы смешение зависящих и не зависящих от пути величин, можно увидеть, если предложить, при приличной стоимости проезда в одну сторону, считать стоимость билета в оба конца равной нулю, потому что пассажир вернется в то же место, откуда он уехал. Вероятно, порядок был бы тогда следующим: отправляясь в одну сторону, вы платите за проезд, а возвращаясь, получаете свои деньги обратно. Такая не зависящая от пути оплата проезда была бы ничуть не похожей на наш железнодорожный тариф, связанный с длиной пути. Для физика и математика зависящие и не зависящие от пути величины — это прямо-таки два разных мира.

Решающим шагом в теории относительности было установление зависимости времени от пути — ведь прежде время считалось величиной всеобщей и универсальной, т. е. не зависящей от пути. Конечно, возможность такой зависимости времени от пути обусловлена лишь тем, что оно стало индивидуальным, а не всеобщим. Но в следующей главе мы придем к важному выводу, что сам принцип относительности не допускает независимости времени от пути.

Природа времени

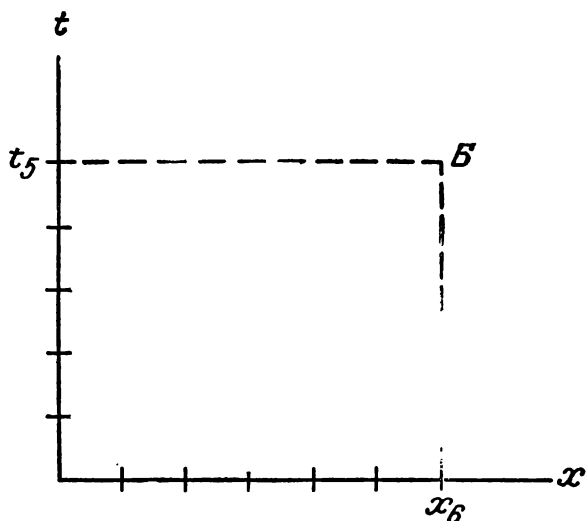
Теперь все подготовлено для доказательства одного из самых интересных следствий теории относительности, а именно, что время — это величина, зависящая от пути. Для этого нам нужно рассмотреть предметы, движущиеся с очень большими скоростями, сравнимыми со скоростью света. Мы никогда не встречали таких объектов в повседневной жизни и никогда не встречались с путешественниками, которым случалось бы летать с такими большими скоростями друг относительно друга. Поэтому нам придется рассматривать непривычные и потому странные ситуации. Однако у нас нет выбора. В больших ускорителях элементарные частицы иногда разгоняются более чем до 99% скорости света, и физик должен разобратся в условиях, которые сопутствуют этим скоростям. Кроме того, летящие с такими скоростями частицы нам попадают в космических лучах. Из-за технических трудностей мы можем разгонять до таких скоростей лишь атомные частицы, и их собственные необычные свойства складываются тогда с теми необычными качествами, которые вызваны их большими скоростями. Но ведь наше воображение не ограничено возможностями современной техники. И по крайней мере для целей нашей беседы мы можем выделить отдельно все необычное, проявляющееся при больших скоростях, позволив себе поставить на место атомных частиц людей, движущихся с такими скоростями.

Специфика больших скоростей

Поскольку нам потребуются инерциальные наблюдатели, они должны двигаться с постоянными скоростями. Чтобы нам не приходилось думать об ужасно коротких промежутках времени, этим наблюдателям нужно дать много места, — можно представить себе их как космонавтов, мчащихся в просторах вселенной гораздо быстрее, чем могут двигаться современные ракеты. Такая выдумка поможет сделать наши рассуждения более доходчивыми. Мы разъясним содержание принципа относительности и затем выведем из него следствия, которые можно наблюдать, так что останется лишь потребовать их проверки путем проведения соответствующих экспериментов.

Напомним, что эйнштейновский принцип относительности утверждает равноправие всех инерциальных (движущихся равномерно и прямолинейно) систем. Уже ньютоновская механика указывает на важность ускорения и несущественность скорости (налить чашку чая в плавно летящем реактивном самолете несколько не сложнее, чем у себя дома) — таким образом определяются инерциальные системы. Механика Ньютона утверждает эквивалентность этих инерциальных систем (в своих механических рамках). Но в предыдущих главах, подчеркивая единство физики, мы выяснили, каким все было бы нелёпым, если бы в разных областях физики действовали разные правила перехода (преобразования) от одного инерциального наблюдателя к другому. Это привело нас к эйнштейновскому принципу полного равноправия всех инерциальных наблюдателей, и мы займемся теперь отысканием следствий из этого принципа, исходя из простых идеализированных опытов.

Наших движущихся наблюдателей лучше изображать, говоря жаргоном этой теории, на пространственно-временных графиках (рис. 12). На этих графиках вертикальная ось изображает время, измеряемое некоторым инерциальным наблюдателем, а горизонтальная ось изображает расстояние в пространстве. К счастью, почти для всех наших выводов будет до-



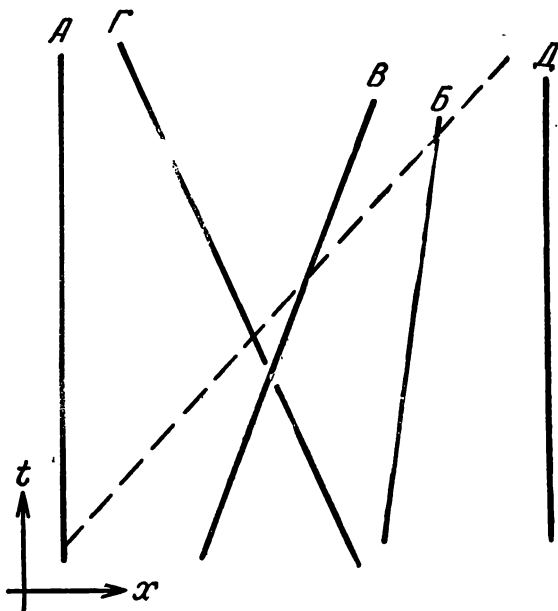
Р и с. 12. Пространственно-временной график.

статочно всего одного пространственного измерения, т. е. все рассматриваемые предметы движутся вдоль одной прямой.

Связь между покоящимся и движущимся наблюдателями

Если график рисует наблюдатель A , то он, понятно, изобразит себя в начале системы координат. Иначе говоря, он приурочит свои наблюдения к тому моменту, когда его время равно нулю, и станет определять положение других наблюдателей (как во времени, так и в пространстве) относительно своего собственного положения в тот момент, когда его время равно нулю. Поскольку он считает, что находится в покое, а значит, не движется никуда по пространственной оси (оси расстояния), то его координата x остается равной нулю. Отрезки вдоль оси t , изображающие истекшее время, показывают положения A на схеме нашего опыта, причем нужно помнить, что отрезки вдоль оси t измеряет именно A .

Например, чтобы измерить положение наблюдателя B в момент $0 + 5$ и на расстоянии в 6 единиц, A отсчитает 5 единиц вверх по оси t и 6 единиц по



Р и с. 13.

оси x , построит в полученных точках перпендикуляры к соответствующим осям и на их пересечении отметит на своем пространственно-временном графике положение B . Так наблюдатель A устанавливает по отношению к себе положение B в данный момент времени и при заданном расстоянии.

Если B также является инерциальным наблюдателем, то, по нашему определению, он движется с постоянной скоростью и проходит равные отрезки пути за равные промежутки времени. Значит, все положения B на пространственно-временном графике будут лежать на прямой линии, и подобным же образом любой другой инерциальный наблюдатель может быть изображен прямой линией *.

* Однако читатель должен помнить, что хотя пространственно-временные схемы очень хорошо показывают, кто, где и когда находится, они всего лишь графические изображения, выполненные одним из наблюдателей. Времена и расстояния, пройденные и измеренные другими наблюдателями, невозможно определить, измеряя длины на таких схемах.

Рис. 13 — это пространственно-временной график A , изображающий также четырех других наблюдателей. Обратите особое внимание на разную крутизну (или наклон, если пользоваться принятым в математике выражением) прямых, изображающих наблюдателей B , V , G , D . Чем круче линия, тем меньше изменяется x при заданном изменении t и тем медленнее движется соответствующий наблюдатель относительно A (тем меньший путь он проходит за данное время). Значит, B движется в сторону от A довольно медленно, а V — несколько быстрее; в то же время D , x -координата которого постоянна, покоится относительно A . И B и V движутся в сторону от A , потому что с течением времени (т. е. вверх по схеме) их x -координаты растут. Напротив, G приближается к A . Линия, соответствующая движению света, который распространяется очень быстро, наклонена гораздо сильнее, так что прерывистой линией мы изобразили распространение вспышки света.

Свет — это волновое явление. В гл. 5 мы рассмотрели другое волновое явление — звук, обратив особое внимание на эффект Доплера, т. е. различие в высоте звука при его посылке и при приеме, вызываемое относительным движением источника звука и наблюдателя. Вы помните, что в случае звука было необходимо знать как скорость излучателя относительно воздуха, так и скорость приемника относительно воздуха. В случае света нет ничего такого, что играло бы роль воздуха, так что нам необходимо знать лишь скорость излучателя относительно приемника. Мы считаем при этом, что оба они движутся по инерции, т. е. с постоянными скоростями.

Пусть два наблюдателя находятся на неизменном расстоянии друг от друга, и первый из них, по имени Арнольд, через одинаковые промежутки времени включает электрический фонарик (рис. 14). Только для определенности и не придавая этому какого-либо особого значения, предположим, что он посылает световые вспышки каждые 6 мин по его часам. Свет каждой вспышки доходит до второго наблюдателя — Глеба. Поскольку расстояние между наблюдателями с течением времени не изменяется, то время распространения каждой вспышки должно быть одним и тем же.

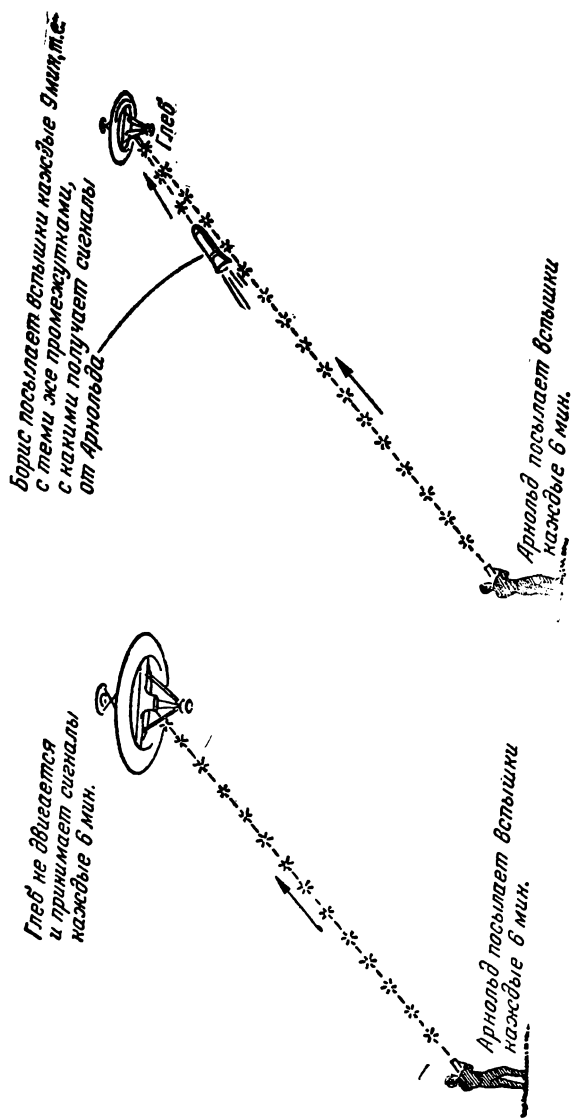
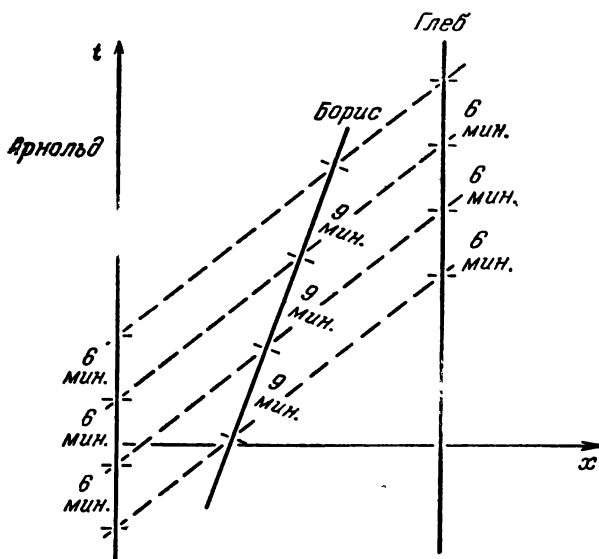


Рис. 14.

Значит, если Арнольд по своим часам зажигает фонарик каждые 6 *мин*, то Глеб будет видеть вспышки через равные промежутки времени — тоже каждые 6 *мин* (по часам Глеба). Мы считаем, что расстояние между Арнольдом и Глебом велико. Может быть, свет дойдет до Глеба через 10 лет (ведь это — идиализированный опыт), но важно только то, что, сколько бы времени он ни шел, все вспышки будут следовать друг за другом через каждые 6 *мин*. Ничего особенно в этом нет, и к тому же оба наблюдателя могут поменяться местами — картина от этого не изменится.

Введем теперь третьего наблюдателя — Бориса, который очень быстро движется от Арнольда к Глебу, а те двое продолжают покоиться по отношению друг к другу. (См. рис. 15; мы советуем читателю держать книгу открытой на этом рисунке, пока он разбирается во всех рассуждениях.) Двигаясь от Арнольда к Глебу, Борис тоже наблюдает вспышки. Поскольку он удаляется от Арнольда, то каждой следующей вспышке приходится проходить до него большее расстояние, чем предыдущей, и она тратит на это больше времени. Поэтому по часам Бориса вспышки будут приходить не каждые 6 *мин*, а через большие промежутки времени — просто потому, что свету от каждой вспышки придется проходить больший путь, чем от предыдущей. При соответствующей скорости, которую мы пока не будем пытаться уточнять, вспышки могут приходить к Борису, например, через каждые 9 *мин* по его часам. Мы постоянно подчеркиваем, что каждый наблюдатель узнает время прихода вспышек по своим собственным часам; ведь иначе нам пришлось бы помучиться, думая, сколько времени он затратит на то, чтобы взглянуть на часы своего приятеля.

Предположим теперь, что у Бориса тоже есть фонарик, например красный, которым он мигает каждый раз, увидев вспышку от Арнольда. Раз Борис видит эти вспышки каждые 9 *мин*, то он посылает красные сигналы тоже каждые 9 *мин*. Эти красные вспышки дальше будут лететь вместе с белыми вспышками Арнольда, потому что они были испущены в те самые моменты, когда свет от Арнольда проходил мимо Бориса (мы пренебрегаем тем временем, которое требуется, чтобы включить фонарик). Эти сигналы



Р и с. 15. Отношение между интервалами приема и интервалами передачи сигналов равно 1 для Арнольда и Глеба, которые покоятся друг относительно друга, $\frac{3}{2}$ для Арнольда и Бориса и $\frac{2}{3}$ для Бориса и Глеба.

Бориса, идущие вместе с сигналами Арнольда, увидит Глеб, который наблюдает вспышки Арнольда (т. е. белые вспышки) каждые 6 мин. Значит, и красные вспышки он будет наблюдать каждые 6 мин. Выразим все это немного иначе.

Арнольд и Борис удаляются друг от друга с определенной скоростью, а именно с такой, что промежутки времени между вспышками Арнольда нужно умножить на $\frac{3}{2}$, чтобы получить интервалы, с которыми Борис видит эти вспышки (9 мин вместо 6). Борис летит навстречу Глебу с той же скоростью, с какой он улетает от Арнольда, но теперь это скорость сближения, а не удаления, и те вспышки, которые излучались каждые 9 мин, будут поступать каждые 6 мин, т. е. чаще, все с тем же коэффициентом (лучше сказать: теперь мы множим на $\frac{2}{3}$). Если бы Борис мигал своим фонариком каждые 6 мин, то Глеб видел бы вспышки соответственно с 4-минутными промежут-

ками. Значит, если взять вместо скорости удаления скорость приближения, то множитель $\frac{3}{2}$, переводящий интервалы между моментами излучения в интервалы между моментами приема вспышек, заменится на множитель $\frac{2}{3}$. Этот вывод совершенно не зависит от того, может ли кто-либо из этих наблюдателей считаться покоящимся (неподвижным) или нет. Даже наоборот, вывод не изменится, кого бы из наблюдателей мы ни считали неподвижным. Существенна лишь относительная скорость наблюдателей. Все, что следует нам усвоить, — это вывод: если какая-то скорость удаления приводит к некоторому соотношению между интервалами передачи и интервалами приема сигналов, то такая же скорость приближения дает в точности обратное соотношение.

Дадим этому выводу более общее выражение. Пусть Арнольд мигает своим фонариком с интервалами h ; тогда Глеб должен увидеть вспышки с интервалами h , так как каждая вспышка тратит одно и то же время на путь от Арнольда к Глебу. Борис увидит их через некоторый интервал kh уже по своим часам, и здесь k — это отношение между интервалами при приеме и при передаче. Если Борис (глядя на свои часы) станет мигать своим фонариком с интервалами kh , то эти вспышки, двигаясь вместе со вспышками, передаваемыми Арнольдом, будут приняты Глебом с интервалами h , откуда для соотношения Борис—Глеб получается обратная величина $1/k$.

Связь между каждым двумя инерциальными наблюдателями у нас полностью определяется отношением между интервалами приема и интервалами передачи. Когда это отношение равно единице (как было в случае Арнольда и Глеба), то оба наблюдателя неподвижны относительно друг друга; если оно больше единицы, то наблюдатели удаляются друг от друга, а если меньше — приближаются друг к другу. Важно, что из принципа относительности, устанавливающего эквивалентность всех инерциальных наблюдателей, со всей ясностью вытекает, что это отношение должно быть одним и тем же, какого бы именно наблюдателя из данной пары инерциальных наблюдателей мы ни заставили посылать сигналы. Как раз отсюда видно, что положение со светом так сильно

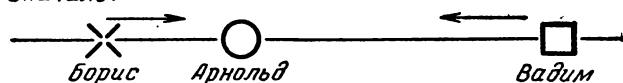
отличается от положения со звуком (гл. V), когда, как вы помните, нужно было учитывать и скорость передатчика, и скорость приемника относительно воздуха.

Более сложный случай

Теперь мы уже можем применить наш вывод к более сложному случаю (важны отношения между интервалами; каждое отношение зависит только от движения данной пары наблюдателей; при сближении наблюдателей отношение будет обратным величине отношения для их удаления). Присоединим нового наблюдателя — Вадима (теперь мы обойдемся без Глеба), имеющего относительно Арнольда ту же скорость, что и Борис, только направленную противоположно (рис. 16 и табл. 2). Этот наблюдатель тоже движется по инерции. Пусть, кроме того, Борис пролетает мимо Арнольда в 12 час дня по часам Бориса, а Вадим встречает Бориса в 1 час дня — тоже по часам Бориса. Несколько позднее Вадим пролетает мимо Арнольда. Поскольку скорости Вадима и Бориса относительно Арнольда одинаковы, а положение этих двух наблюдателей симметрично относительно Арнольда, то по часам Вадима должен пройти 1 час между его встречами с Борисом и с Арнольдом. Общая картина такова, что в течение всего опыта Арнольд, Борис и Вадим находятся на одной прямой. Сначала Борис был слева от Арнольда, а Вадим справа, но намного дальше, чем Борис. И Борис и Вадим приближаются к Арнольду с одной и той же скоростью. События происходят в таком порядке: сначала Борис пролетает мимо Арнольда, затем Борис встречается с Вадимом и, наконец, Вадим пролетает мимо Арнольда. После этого Вадим будет слева от Арнольда, а Борис намного дальше, чем Вадим, справа от Арнольда. И Борис и Вадим теперь удаляются от Арнольда.

Сосредоточим свое внимание на этих трех встречах (первая — Арнольда и Бориса, вторая — Бориса и Вадима, третья — Вадима и Арнольда). Как уже установлено, между первыми двумя встречами прошел 1 час по часам Бориса, который участвовал в обеих этих встречах. Подобным же образом между двумя последними встречами прошел 1 час по

Вначале:

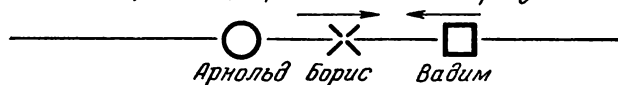


Борис минует Арнольда и оба ставят часы на 12 час. дня

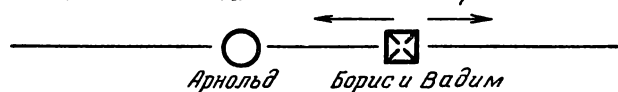


Этап I:

Миновав Арнольда, Борис летит навстречу Вадиму

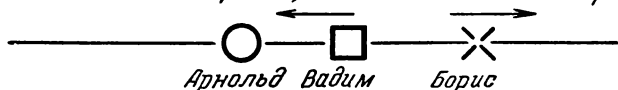


*Встреча Вадима с Борисом
Вадим ставит свои часы по часам Бориса*



Этап II:

Расставшись с Борисом, Вадим летит дальше к Арнольду



Заключительный момент. встреча Вадима с Арнольдом



Р и с. 16. Последовательность событий.

Последовательность событий

Таблица 2

Как ее видит Арнольд Время (по часам Арнольда)	Как ее видит Борис Время (по часам Бориса)	Как ее видит Вадим Время (по часам Вадима)
12 час 00 мин дня Вплотную с Борисом. От Бориса получен сигнал	12 час 00 мин Вплотную с Арнольдом. Поставил часы по часам Арнольда. Послал сигнал	
12 09 Каждые 9 мин поступают сигналы от Бориса (вплоть до 1 час 30 мин дня)	12 06 Каждые 6 мин посылаются сигналы (вплоть до 1 час 00 мин дня)	
1 30 Получен последний сигнал от Бориса. Видна встреча Бориса с Вадимом. Получен первый сигнал от Вадима	1 00 Отправлен последний сигнал. Вплотную с Вадимом	1 час 00 мин Вплотную с Борисом Поставил часы по часам Бориса. Послал первый сигнал.
1 34 Каждые 4 мин поступают сигналы от Вадима (вплоть до 2 час 10 мин дня)		1 06 Каждые 6 мин посылаются сигналы (вплоть до 2 час 00 мин дня)
1 38		1 12
2 10 Получен последний сигнал от Вадима. Вплотную с Вадимом.		2 00 Вплотную с Арнольдом. Отправлен последний сигнал.

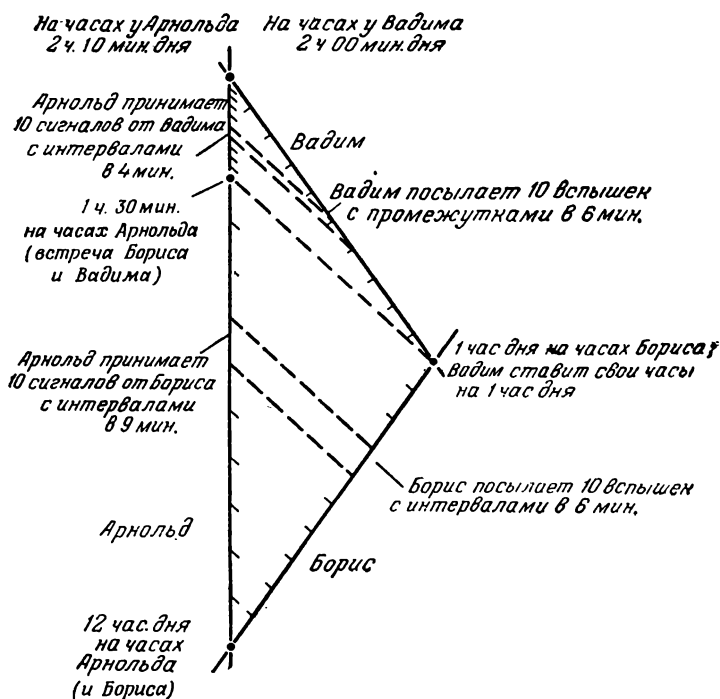


Рис. 17. Последовательность событий на пространственно-временной схеме.

часам Вадима, который на этот раз участвовал в обеих встречах (рис. 17). Пусть теперь Вадим поставит свои часы так, чтобы они показывали то же время, что и часы Бориса в момент их встречи. Это было в 1 час дня, так что при встрече с Арнольдом он отметит 2 час дня. Пусть и Арнольд поставит свои часы по часам Бориса при своей встрече с ним, когда было 12 час. Возникает вопрос: что будут показывать часы Арнольда в момент его встречи с Вадимом? Если это будет не 2 час дня (а мы это докажем!), т. е. если его часы будут показывать другое время, чем часы Вадима, то, значит, мы докажем зависимость времени от пути. Эта зависимость от пути будет несколько другого сорта, чем в случае километража. Она будет определяться сближением или удалением наблюдателей,

иными словами, переходом от одного инерциального наблюдателя к другому, в противоположность случаю, когда мы имеем дело с одним и тем же инерциальным наблюдателем (Арнольдом).

Чтобы выяснить ход времени у Арнольда, предположим теперь, что Борис, начиная с момента своей встречи с Арнольдом, каждые 6 мин по своим часам посылает световой сигнал; последний сигнал он посылает при встрече с Вадимом: Между этими встречами по часам Бориса прошел ровно 1 час, так что последовало как раз 10 интервалов между вспышками. Взяв скорость удаления друг от друга Арнольда и Бориса такой же, как и в предыдущем примере, мы обнаружим, что Арнольд будет принимать эти вспышки по своим часам каждые 9 мин. Часы Арнольда показывали 12 час дня, когда пришла первая вспышка — ведь Борис в этот момент был рядом с ним, так что передача и прием сигнала произошли практически одновременно. Последняя же вспышка пришла к Арнольду через 90 мин — в 1 час 30 мин дня по его часам. В этот момент до него дошел свет с места встречи Бориса и Вадима, т. е. в этот момент он «увидел» их встречу.

Предположим теперь, что и Вадим посылает каждые 6 мин по своим часам световые сигналы — первый, когда он встретился с Борисом, и последний, когда он минует Арнольда. Их будет 10, потому что путь займет у него 1 час. Из предыдущего примера ясно, что Арнольд должен принимать эти вспышки каждые 4 мин, потому что Вадим приближается к нему точно с той же скоростью, с какой Борис приближался в том примере к Глебу. Значит, по часам Арнольда эти 10 интервалов между вспышками займут 40 мин. Первая вспышка пришла к нему в 1 час 30 мин по его часам, потому что она была послана, когда Вадим встретил Бориса, а свет с места их встречи пришел к Арнольду в 1 час 30 мин по его часам. Поскольку последняя вспышка долетела по часам Арнольда через 40 мин, его часы должны в этот момент показывать 2 час 10 мин дня. Но ведь Вадим послал последний сигнал, когда сблизился с Арнольдом, а это случилось по часам Вадима в 2 час дня! И оба наблюдателя были так близко друг к другу, что свет практически не затратил времени, чтобы пройти рас-

стояние между ними — встреча по часам Вадима произошла в 2 *час* дня, а по часам Арнольда — в 2 *час* 10 *мин* дня.

Подведем итоги. Первое из рассмотренных событий — встреча Арнольда и Бориса, когда оба эти наблюдателя поставили свои часы на 12 *час* дня. Борис послал тогда свой первый сигнал, сразу же принятый Арнольдом. Вслед за этим Борис удалялся от Арнольда, а Вадим приближался к Арнольду, оставаясь от него дальше, чем Борис. На этом этапе, продолжавшемся, согласно часам Бориса, 1 *час*, Борис посылал каждые 6 *мин* световые сигналы, которые поступали к Арнольду через каждые 9 *мин* (отношение $\frac{3}{2}$). В конце этого этапа часы Бориса показывают 1 *час* дня, и Вадим пролетает мимо него, поставив свои часы по часам Бориса. Вадим сразу же начинает посылать вспышки света с интервалами в 6 *мин*. Последняя вспышка Бориса, испущенная при этой встрече, летит вместе с первой вспышкой Вадима, и обе они приходят к Арнольду в 1 *час* 30 *мин* дня по часам Арнольда (10 интервалов, каждый продолжительностью по 9 *мин*, первый из которых начался в 12 *час* дня).

На втором этапе Вадим приближался к Арнольду, посылая световые сигналы каждые 6 *мин* (Борис нас больше не интересует, мы следим только за Вадимом). Арнольд принимает сигналы Вадима каждые 4 *мин* (отношение $\frac{2}{3}$). Пропутешествовав 1 *час* по своим часам после встречи с Борисом, Вадим встречается с Арнольдом. Значит, по часам Вадима эта встреча произошла в 2 *час* дня. Десять интервалов между вспышками Вадима занимают 40 *мин* по часам Арнольда. Раз первая из них пришла в 1 *час* 30 *мин* дня по времени Арнольда, то последняя (отправленная Вадимом, когда он пролетал мимо Арнольда) пришла в 2 *час* 10 *мин* дня, и это было то время по часам Арнольда, когда он встретил Вадима (см. рис. 16 и табл. 2).

Тесрия относительности объясняет кажущееся противоречие

Кто же прав? Конечно, мы ответим, что правы оба. Ведь если, например, два шофера поедут

от Нью-Йорка до Бостона, и один насчитает 370, а другой — 400 км, то мы же не скажем, что один из них ошибся, а просто подумаем, что один ехал по более короткому пути. Незачем даже валить вину на спидометр. Нам остается тогда признать, что время, подобно расстоянию, зависит от пути. Время от первой до последней встречи, измеренное Борисом и Вадимом, короче, чем время от первой до последней встречи по измерению Арнольда.

Нечего и думать, будто скорость «подействовала» на часы Бориса и Вадима. Это было бы так же нелепо, как если бы мы заявили, будто кружной путь, выбранный одним из шоферов, так «подействовал» на его спидометр, что он стал показывать больше, чем счетчик на спидометре другой машины. Дело не в том, что что-то не в порядке со спидометрами или с часами, а просто в том, что время — такая же зависящая от пути величина, как и расстояние (километраж). Мы обнаружили, что принцип относительности не позволяет сохранить представление о времени, как о величине, не зависящей от пути, а значит, и представление о существовании всеобщего времени. Существует только индивидуальное время — время, зависящее от пути, выбранного между событиями, так как мы могли выбирать, идти ли нам вместе с Арнольдом или пойти с Борисом, а потом с Вадимом.

Обнаружив это, некоторые запутываются и возражают: «Но ведь можем же мы с тем же основанием считать Бориса покоящимся, а Арнольда движущимся, как мы считали Арнольда покоящимся, а Бориса движущимся». Это именно так, и никто с этим не спорит; единственное, чего мы не можем предположить в этом примере, так это, что и Борис и Вадим неподвижны. Этот эксперимент невозможно повернуть так, чтобы появилась симметрия между Арнольдом, с одной стороны, и Борисом и Вадимом — с другой. Арнольд здесь всего один, а Борис и Вадим — это двое, и как бы мы не оборачивали условия этой задачи, покоиться всегда может лишь один из троих. Одно из измерений всегда производит сам Арнольд, а другое — это комбинация, совокупность измерений Бориса и Вадима.

Величина k — фундаментальное отношение

Ясно, что полученное расхождение на 10 мин за 2 час очень сильно зависит от скорости. Подойдем теперь к этому вопросу с более общих позиций. Предположим, что отношение между интервалами приема и интервалами передач сигналов для Бориса и Арнольда равно k . Как мы доказали раньше, для Вадима и Арнольда тогда оно будет равно $1/k$.

Предположим теперь, что Арнольд и Борис оба поставили свои часы на ноль в момент своей встречи, и примем, что на часах Бориса было $0 + T$ час в тот момент, когда мимо него промелькнул Вадим. В этот же момент Вадим поставил свои часы по часам Бориса, так что на них стало $0 + T$. Вадим понесся навстречу Арнольду с той же самой скоростью, с какой от того удалялся Борис. Поэтому, для того чтобы долететь до Арнольда после встречи с Борисом, Вадиму потребовалось то же самое время T , какое потребовалось Борису, чтобы долететь до Вадима после встречи с Арнольдом. Значит, в момент встречи с Арнольдом часы Вадима показывали $0 + T + T$, т. е. $2T$ (см. табл. 3).

Пусть Борис послал световой сигнал в момент встречи с Арнольдом, а затем — в момент встречи с Вадимом, т. е. с интервалом T по часам Бориса. Когда эти сигналы принял Арнольд, то по его часам промежуток между ними должен быть равным kT . Поскольку первому сигналу не пришлось преодолевать никакого расстояния, ибо он был дан в момент наибольшего сближения Бориса с Арнольдом, то он был принят сразу же, в момент 0 по часам Арнольда, а второй сигнал пришел в kT час по времени Арнольда. Подобным же образом Вадим дал два сигнала в моменты обеих встреч. По часам самого Вадима промежуток между ними составлял T , но поскольку Вадим приближался к Арнольду, последний принял их с интервалом T/k . Первая вспышка от Вадима была послана из того же места и в тот же момент, что и вторая вспышка от Бориса, т. е. при их встрече, и, распространяясь вместе с ней, она дошла до Арнольда в момент kT по часам Арнольда. Поэтому вторая вспышка от Вадима шла к Арнольду в течение $(1/k)T$ час

Таблица 3

Последовательность событий

Как ее видит Арнольд Время (по часам Арнольда)	Как ее видит Борис Время (по часам Бориса)	Как ее видит Вадим Время (по часам Вадима)
0 Вплотную с Борисом. Получен сигнал от него	0 Вплотную с Арнольдом. Поставлены часы по часам Арнольда. Послан сигнал	
	T Вплотную с Вадимом. Послан сигнал	T Вплотную с Борисом. Часы поставлены по часам Бориса. Послан сигнал
kT Видна встреча Бориса с Вадимом. От них обоих получены сигналы		
$\left(k + \frac{1}{k}\right) T$ Вплотную с Вадимом. От него получен сигнал		$2T$ Вплотную с Арнольдом. Послан сигнал

по времени Арнольда. Этот последний сигнал был дан Вадимом, когда тот подлетел вплотную к Арнольду, т. е. он дошел тотчас же. Значит, часы Арнольда показывали время $\left(k + \frac{1}{k}\right) T$ в тот момент, когда на часах Вадима было $2T$ час. Итак, отношение промежутка времени между встречами Бориса и Вадима с Арнольдом, измеренного Арнольдом, к этому же промежутку, измеренному Борисом и Вадимом, равно

$$\frac{\left(k + \frac{1}{k}\right) T}{2T} = \frac{1}{2} \left(k + \frac{1}{k}\right).$$

Это отношение очень чувствительно к изменениям величины k , как это видно из табл 4, в которой приведены также различия между показателями часов Арнольда и Вадима для случая $T=1$ час.

Таблица 4

k	$\frac{1}{2} \left(k + \frac{1}{k} \right)$	Разность времен для $T=1$ час
1	1	0
1,0001	1,000000005	$\frac{1}{30}$ мсек
1,01	1,00005	$\frac{1}{3}$ сек
1,25	1,025	3 мин
1,5	1,083	10 мин
2	1,25	30 мин
4	2,125	2 час 15 мин
10	5,05	8 час 6 мин
100	50,005	4 дня 4 час 36 сек

Хотя связь между величиной k и скоростью будет выведена лишь в следующей главе, не мешает здесь заметить, что значение $k=1,0001$ соответствует скорости 30 км/сек, равной скорости Земли при ее движении по орбите и почти в четыре раза превышающей скорость искусственного спутника Земли, тогда как скорость, соответствующая $k=10$, равна 90% скорости света, а $k=100$ —99,98% скорости света.

В нашей практической жизни коэффициент k всегда так ничтожно мало отличается от единицы, что расхождение часов не может играть ровно никакой роли. Именно это и подкрепляет ложное ощущение, будто время не зависит от пути.

Допустим теперь, что Борис путешествовал со своим маленьким сыном, которому он доверил свои часы, и, когда мимо него проносился Вадим, Борис перебросил сына ему. Пусть Вадим осторожно поймал его и взял с собой в свое путешествие к Арнольду. Вот здесь мы можем поинтересоваться: «А не будет ли все равно: считать покоящимся Арнольда, а путешествующим мальчика, или рассматривать неподвижным мальчика, предоставив путешествовать Арнольду?» Вот это-то и неверно! Ведь все трое — Арнольд, Борис и Вадим — инерциальные наблюдатели, не испытывающие никаких рывков, и если у кого-нибудь из них была в начале нашего эксперимента корзинка с сырыми яйцами, то в конце в ней все было бы в порядке. А вот мальчик — не инерциальный наблюдатель, его скорость неожиданно и резко изменилась, он ощутил мощный

рывок. Если бы с ним послали эту корзинку с сырыми яйцами, то под конец там была бы сплошная яичница! Его никак нельзя сравнивать с Арнольдом, инерциальным наблюдателем. Между ними нет никакой симметрии, и понять это негрудно, так что противоречий не возникает. Если окажется, что толчок при переброске от Бориса к Вадиму не оказался роковым для мальчика или для его часов, о чем мы еще поговорим в одной из следующих глав, то в момент последней из встреч мальчик будет на *2 час* старше, чем при первой, тогда как Арнольд постареет на *2 час 10 мин.*

Это нам следует снова сравнить с километражем: из всех расстояний между двумя городами самое короткое — это расстояние по прямой, а все другие пути будут длиннее. В отношении времени теория относительности утверждает обратное: время между двумя событиями, измеренное инерциальным наблюдателем, — максимальное (наибольшее), а время между ними, измеренное любым другим (неинерциальным) наблюдателем, — более короткое. Значит, путешествуя, можно было бы оставаться молодым, если бы только не те острые ощущения, которые придется испытать, когда Борис будет тебя перебрасывать Вадиму. Относительные скорости, с которыми двигались наблюдатели в этом примере, мы подсчитаем в следующей главе. Ясно, что они весьма велики — много тысяч километров в секунду. Такие скорости настолько далеки от испытываемых нами в обыденной жизни, что несколько не удивительно, какими непривычными для нас должны быть проявления этих необычных условий.

Скорость

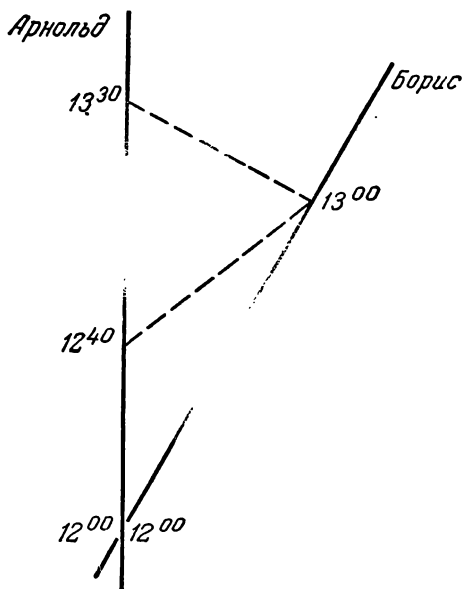
В двух предыдущих главах мы узнали очень многое об инерциальных наблюдателях, задавшись величиной отношения между промежутками времени в приеме двух световых сигналов одним наблюдателем и в излучении их — другим. Но как связать это столь важное для всех наших выводов отношение со скоростью наблюдателей друг относительно друга? Ведь перейти к скорости — значит перейти к гораздо более привычной и понятной нам величине.

Вернемся к героям предыдущей главы — Арнольду и Борису, движущимся относительно друг друга. Чтобы идти в ногу с веком, вооружим их вместо фонариков радиолокаторами (в принципе это одно и то же) и допустим, что, получив сигнал от Арнольда, Борис сразу же сигналит ему своим лучом. Как мы увидим, эта картина не отличается от случая, когда мы посылаем радиолокационный импульс и вновь принимаем его после отражения от поверхности Луны или какого-нибудь искусственного спутника, положение которого нам требуется точно определить (рис. 18).

Поскольку мы придали отношению между интервалами приема и интервалами передачи величину $3/2$, то сигналы Арнольда, отправленные с промежутками в 6 мин, поступают к Борису каждые 9 мин. Мы приняли также, что в момент пролета наблюдателей друг мимо друга их часы показывали одно и то же время — 12 час дня. Значит, если Арнольд отправит первый импульс в 12 час, а второй — в 12 час 40 мин дня, то эти сигналы придут к Борису с интервалом в 60 мин (по часам Бориса), как это изображено на рис. 19. Так как Борис повстречался с Арнольдом в 12 час по времени Арнольда, то первый сигнал Арнольда дошел



Р и с. 18. Арнольд измеряет скорость Бориса (отношение интервалов $3/2$).



Р и с. 19. Пространственно-временная схема, изображающая, как Арнольд измеряет скорость Бориса.

до него в этот же момент (в 12 час дня и по его часам), а второй — в 1 час дня, как раз когда он встретился с Вадимом. Борис сразу же отправил обратный сигнал, и этот ответ, посланный по его часам через 60 мин после полудня, был получен Арнольдом (согласно пропорции $3/2$) через 90 мин после полудня (рис. 19). Вспомнив наши рассуждения на стр. 77—79, мы должны иметь в виду, что ни Арнольд, ни Борис не могут утверждать категорически, что кто-то из них покоится, а другой движется: они имеют право лишь сказать, что удаляются друг от друга. Именно поэтому отношение $3/2$ относится к обоим направлениям посылки сигналов. Значит, Арнольд послал радиолокационный импульс в 12 час 40 мин дня, а отраженный импульс вернулся к нему в 1 час 30 мин дня — на 50 мин позже. Следовательно, для путешествия от Арнольда до Бориса и назад сигналу потребовалось 50 мин; пройденное им расстояние в два раза больше расстояния между этими наблюда-

телями. Мы видим, что на путешествие от Арнольда до Бориса свет (или радиолокационный импульс) потратил половину этого времени — *25 мин*, так что расстояние до Бориса в момент, когда он отвечал, равнялось 25 световым минутам.

Сколько же времени потребовалось Борису (но по часам Арнольда), чтобы улететь на такое расстояние? Момент времени, который Арнольд связывает с отражением своего сигнала, должен быть посередине между моментом его посылки и обратного приема, т. е. посередине между *12 час 40 мин* и *1 час 30 мин* дня — в *1 час 05 мин* дня. У Арнольда нет никакой иной возможности, кроме выбора этого момента для отражения импульса. Поскольку скорость света по определению равна единице, то в представлении Арнольда свету было нужно ровно столько же времени, чтобы дойти до Бориса, сколько и для того, чтобы вернуться назад. И уж во всяком случае ему не следует пытаться вводить «поправку» на скорость Бориса. Ведь этот импульс вернулся бы в тот же самый момент и в том случае, если бы он отразился от предмета, двигавшегося совсем иначе, чем Борис, но просто оказавшегося рядом с ним в момент отражения. Поэтому Арнольду ничего не остается делать, кроме как принять для этого события время в *1 час 05 мин* дня. Таким образом он пришел к выводу, что Борису потребовалось *65 мин* (с *12 час* до *1 час 05 мин* дня) для того, чтобы пройти расстояние, которое свет проходит за *25 мин*. Значит, скорость Бориса относительно него составляет $25/65 = 5/13$ скорости света в исчислении Арнольда. Если взять общепринятое значение для скорости света, то эта дробь, выражающая скорость движения Бориса относительно Арнольда в долях скорости света, равна $115\,400 \text{ км/сек}$ — величина, весьма почтенная по нашим понятиям, однако отнюдь не невозможная. В силу сделанных нами предположений скорость Вадима относительно Арнольда имеет в точности ту же величину.

Длинные поезда Эйнштейна

Статья Эйнштейна по специальной теории относительности, которой посвящены эти страницы, вышла в 1905 г. Самолет поднялся в воздух всего за два

года до этого, и поезд был самым быстрым средством сообщения. Казалось в высшей степени невероятным, чтобы транспорт когда бы то ни было превысил скорость 200 км/час . Когда в 1916 г. Эйнштейн писал книгу о теории относительности, предназначенную им для массового читателя, он не мог найти лучшего примера для иллюстрации своих мыслей, чем воображаемый бесконечно длинный поезд, мчащийся мимо бесконечно длинной платформы со скоростью, приближающейся к световой. Все авторы, пытавшиеся вслед за ним в течение более чем сорока лет популяризовать теорию относительности, пользовались тем же примером. Даже в книге Бертрана Расселла «Азбука теории относительности», изданной в 1958 г., различные вопросы обсуждаются на примере поезда, несущегося со скоростью, равной $3/5$ скорости света, по прямолинейному пути бесконечной длины. У этих авторов не было выбора. Какими бы надуманными ни казались эти поезда, они представлялись авторам почти что единственным примером, доступным пониманию простого читателя и не кажущимся ему какой-то фантастической чепухой. После этого неудивительно, что широкая публика считала теорию относительности в лучшем случае бесполезными умозрениями оторванных от жизни мыслителей, а в худшем — наукообразными домыслами.

Сейчас все переменялось. Мы посылаем ракеты к Луне, Марсу и Венере. Самый твердолобый скептик уже не сомневается в том, что при жизни самых юных читателей этих страниц космические станции станут реальностью. Советские и американские космонавты уже кружатся вокруг Земли со скоростью почти $30\,000 \text{ км/час}$ — и хотя скорость нашего Бориса в $115\,400 \text{ км/сек}$ намного превышает эту скорость, мы все же можем теперь более реалистично представлять себе те скорости, которых никак не могло постигнуть сознание наших отцов и дедов. Экспериментаторы на больших ускорителях ежедневно имеют дело со скоростями в $9/10$ световой, так что их профессия является чисто релятивистской и они каждый день сталкиваются с эффектами теории относительности. За несколько лет специальная теория относительности спустилась с облаков фантазии и философского умо-

зрения на твердую почву всеобщих потребностей и интересов.

Человеческому уму свойственно усваивать что-то с большей легкостью, если имеется явная потребность в усвоении этого. У наших отцов не было истинной потребности понять теорию относительности, но у нас она уже есть, и мы можем обратиться к приключениям Арнольда, Бориса и Вадима, не испытывая того ощущения неправдоподобности, которое смущало пассажиров бесконечно длинных поездов Эйнштейна. Хотя наши Арнольд, Борис и Вадим — не менее фантастические персонажи, все же их путешествие в космосе отражает те условия, с которыми — пусть более сложно и технически совершенно, чем это описывали мы, — сталкиваются и работают современные ученые и инженеры в своих лабораториях. Теперь, помня, что мы разбираем смысл вполне реальных понятий, вернемся к нашим трем инерциальным наблюдателям, столкнувшимся с разнообразием времен в специальной теории относительности.

Определение относительных скоростей с помощью радиолокатора

Возьмем снова движение наших наблюдателей из гл. 8, но рассмотрим несколько видоизмененный случай. Пусть снова Борис и Вадим движутся с одинаковой по величине скоростью относительно Арнольда и пусть между встречами Бориса с Арнольдом и с Вадимом промежуток времени равен одному часу, с точки зрения Бориса, а между встречами Вадима с Борисом и Арнольдом — тоже одному часу, но уже по часам Вадима. Пусть теперь, однако, наш фундаментальный коэффициент будет равен не $3/2$ (отношение между промежутками во вспышках, посылаемых Борисом, и промежутками в их приеме Арнольдом), а просто 3 (рис. 20). Тогда один час по часам Бориса, прошедший между его встречами, станет тремя часами для Арнольда, а один час Вадима — всего третьей частью часа, т. е. 20 мин, по часам Арнольда. Значит, согласно нашему прежнему рассуждению, по часам Арнольда прошло 3 часа 20 мин между его встречами с Борисом и Вадимом. Если Арнольд отправляет второй радиолока-

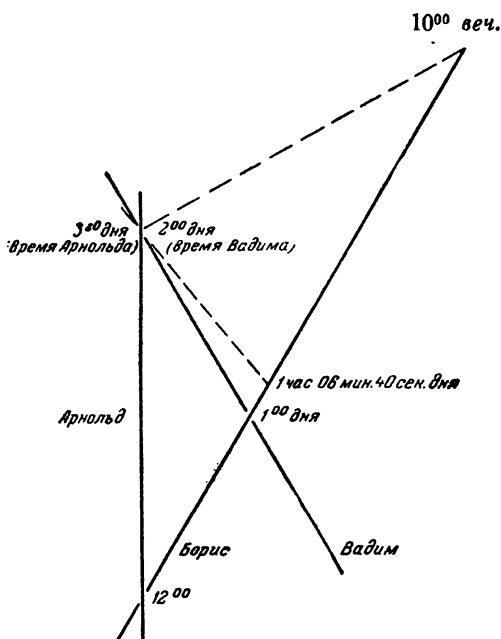


Рис 20. Борис измеряет скорость Вадима (отношение интервалов 3:1).

ционный импульс в 12 час 20 мин дня (через 20 мин после того, как мимо него пролетел Борис), то в силу отношения 3/1 этот импульс достигнет Бориса через 60 мин после первой встречи — в 1 час дня по часам Бориса. Снова пользуясь соотношением 3/1, получим, что посланный в тот момент обратный сигнал придет к Арнольду в 3 час дня по его часам — через 160 мин после того, как был отправлен второй сигнал Арнольда. Значит, решит Арнольд, расстояние до второй встречи составляет 80 световых минут, а момент ее лежит посередине между 12 час 20 мин и 3 час дня — т. е. это 1 час 40 мин дня. Таким образом, за 100 мин по времени Арнольда Борис покрыл расстояние в 80 световых минут; это дает скорость, равную $\frac{4}{5}$ скорости света — как раз 240 000 км/сек.

При таком способе измерения скорость Бориса всегда будет меньше скорости света. Как мы увидим

дальше, она вообще не может превзойти скорость света.

Что можно сказать о скорости Вадима относительно Бориса? Обыденная жизнь подсказывает нам привычную процедуру — скорости предметов можно просто складывать. Когда мимо нас проходит со скоростью 80 км/час поезд, а в нем вперед по направлению движения идет человек со скоростью 4 км/час, то скорость этого человека относительно нас составит 84 км/час. Но если мы станем вести расчет по этому примитивному способу и учтем, что скорость Вадима относительно Арнольда равна скорости Бориса, но направлена противоположно ей, а скорость Бориса составляет $\frac{4}{5}$ скорости света, то получится, что Вадим движется относительно Бориса со скоростью, равной $\frac{8}{5}$ световой, в явном противоречии с высказанным выше утверждением.

Однако не будем спешить с выводами. Только что мы разработали превосходный способ определения скоростей посредством той самой радиолокационной методики, которая применяется в действительности. Разве нельзя воспользоваться этим же способом, чтобы непосредственно найти скорость Вадима относительно Бориса в нашем примере? Пусть Борис решил определить, на каком расстоянии от него произошла встреча Арнольда с Вадимом. Пользуясь радиолокатором, он должен отправить импульс немного спустя после того, как Вадим пролетел мимо него — ведь свет движется быстрее Вадима, — а затем дожидаться отраженного сигнала. При обсуждавшемся только что случае быстрого движения Вадим и Арнольд встретились через 200 мин (по часам Арнольда) после того, как Борис пролетел мимо Арнольда. Когда Борис должен послать свой радиопульс, чтобы он дошел до Арнольда именно в этот момент?

Так как отношение между интервалом при передаче к интервалу при приеме равняется теперь трем, то Борис должен по своим часам отправить сигнал через одну треть от 200 мин, т. е. через 1 час 06 мин 40 сек после того, как он миновал Арнольда (рис. 20), или через 6 мин 40 сек после того, как просигналил Вадим, находясь рядом с ним. Радиолокационный им-

пульс вернется к Борису за время, втрое большее, чем промежуток между встречами Арнольда с Борисом и с Вадимом, измеренный по часам Арнольда. Три раза по *3 час 20 мин* дает *10 час*, так что Борис примет ответный сигнал в *10 час* вечера — через *8 час 53 мин 20 сек* после отправления своего сигнала. Значит, расстояние до места встречи Арнольда с Вадимом по измерению Бориса равно 4 световым часам 26 световым минутам и 40 световым секундам. Момент этой встречи по часам Бориса лежит посередине между отправлением и приемом сигналов, а сигнал, принятый им, пришел через *4 час 33 мин 20 сек* после того, как он повстречался с Вадимом. Значит, по данным Бориса Вадим прошел 4 световых часа 26 световых минут 40 световых секунд за *4 час 33 мин 20 сек*. Это дает скорость, близкую к скорости света, а именно около 97,5% ее, но не больше скорости света. Таким образом, складывая две скорости, каждая из которых равна 80% скорости света, мы получили лишь 97,5% скорости света.

Продолжая эти рассуждения, мы могли бы показать, что складывая любое число скоростей, каждая из которых меньше чем скорость света, мы никогда не сможем получить скорость, равную или превышающую скорость света — суммарная скорость всегда будет меньше ее. Отсюда следует, конечно, что сложение больших скоростей — вовсе не такое простое дело, как сложение малых, но этот вывод получился как раз в результате установления разумного способа измерения интервалов времени, расстояний и определения скоростей. Значит, скорость света оказалась у нас чем-то вроде радуги — как бы мы ни старались приблизиться к ней, мы никогда не сможем до нее достать.

Этот вывод представляется совершенно очевидным следствием наших предположений, если взглянуть на него с другой стороны. Когда наблюдатель движется медленнее света, отправленный им световой луч опережает его — с этим должен согласиться любой наблюдатель. Как бы ни двигался этот другой наблюдатель, излучатель света для него всегда летит медленнее самого света. А раз скорость света одна и

та же для всех наблюдателей, то и его скорость по отношению к любому наблюдателю будет меньше, чем скорость света.

Взаимосвязь между k и v

Для того чтобы распространить проделанные расчеты на самый общий случай, мы примем отношение интервалов равным k и предположим, что Арнольд посылает свой сигнал через время T после того, как он и Борис пролетели друг мимо друга; момент встречи они оба для удобства выбирают в качестве начала отсчета времени. Борис примет тогда этот сигнал в момент времени kT , а его ответ дойдет до Арнольда в момент $k \cdot kT = k^2 T$. Значит, Арнольд найдет, что промежуток времени между отправлением и приемом обратного сигнала равен $(k^2 - 1)T$, так что расстояние от Арнольда до Бориса, когда последний послал ответный сигнал, равно $\frac{1}{2}(k^2 - 1)T$. Кроме того, поскольку скорость света во всех направлениях одна и та же (и равна единице), то момент отправления Борисом ответного сигнала по определению Арнольда приходится на середину промежутка времени между отправлением прямого сигнала и приходом ответного, т. е. это $\frac{1}{2}(k^2 + 1)T$. Между моментом 0 и этим моментом Борис удалился из непосредственных окрестностей Арнольда на расстояние $\frac{1}{2}(k^2 - 1)T$. Поэтому скорость Бориса равна отношению этих двух величин, т. е.

$$v = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}. \quad (1)$$

Отметим, что скорость v здесь просто безразмерное число. Это естественное следствие того, что мы приравняли скорость света единице. Заметим также, что при $k=1$ (интервалы одинаковы) мы получим состояние относительного покоя: $v=0$; а замена k на $1/k$ лишь меняет знак скорости v на обратный в согласии с выводами, сделанными в гл. 8. Наконец, при всех значениях k скорость лежит между -1 (приближение со скоростью света) и $+1$ (удаление со скоростью света). При $v = +1$ это — прямое следст-

ние нашего метода измерения, ибо иначе радиолокационный импульс не мог бы настичь Бориса; замена же k на обратную величину дает $v = -1$. Решая уравнение (1) относительно k , получим

$$k = \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}. \quad (2)$$

Связь между v и k проиллюстрирована также в табл. 5, где приведены и значения скорости в обычных единицах — км/сек.

Таблица 5

k	1	1,001	1,1	1,5	3	10	100
v	0	0,001	0,095	0,385	0,8	0,98	0,9998
v , км/сек	0	300	28 500	115 500	240 000	294 000	299 940

Сложение скоростей

Перейдем теперь к сложению скоростей. Рассмотрим трех наблюдателей — Арнольда, Бориса и Давида, причем отношение интервалов при передаче к интервалам при приеме равно k для Арнольда и Бориса и k_1 для Бориса и Давида, и предположим, что с точки зрения Арнольда Давид находится позади Бориса (рис. 21). Сигналы, отправленные Арнольдом с промежутком T , Борис примет с промежутком kT . Если при получении сигналов от Арнольда Борис будет также отправлять свои сигналы (очевидно, с промежутками kT), то Давид получит их с промежутками kk_1T одновременно с сигналами от Арнольда. Значит, отношение интервалов для Арнольда и Давида равно kk_1 , или, говоря иначе, значения k перемножаются в цепочке наблюдателей. Это и есть фундаментальное правило сложения скоростей, дающее при малых скоростях всем знакомое обычное сложение. Отметим, что какие бы числа ни получались при перемножении величин k , скорость, соответствующая всему произ-

ведению (обоим крайним наблюдателям в цепочке), всегда меньше скорости света [см. формулу (1)].

Для того чтобы перевести закон умножения отношений на язык скоростей, обозначим через v скорость пары Арнольд — Борис, через v_1 — пары Борис — Давид, а через w — пары Арнольд — Давид. Мы получим тогда:

$$k = \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}, \quad k_1 = \sqrt{\frac{1+v_1}{1-v_1}}, \quad (3)$$

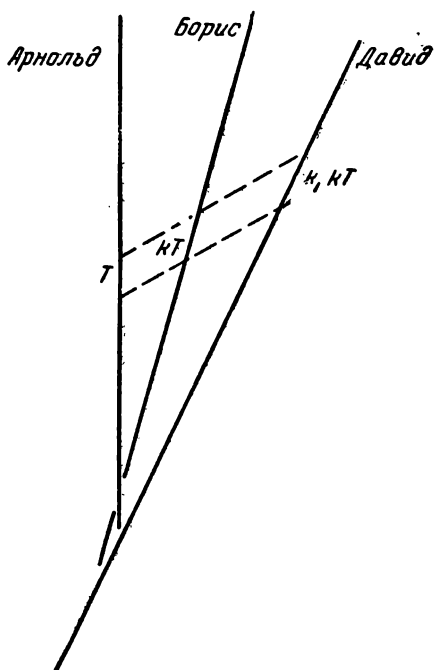
$$w = \frac{k^2(k_1^2) - 1}{k^2(k_1^2) + 1} = \frac{\left(\frac{1+v}{1-v}\right)\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right) - 1}{\left(\frac{1+v}{1-v}\right)\left(\frac{1+v_1}{1-v_1}\right) + 1} = \frac{v + v_1}{1 + v \cdot v_1}. \quad (4)$$

Отсюда сразу видно, что при малых v и v_1 их сумма равна w ; в то же время любые v и v_1 , не превышающие единицы, дают w , также не превышающую единицу. Этот результат в точности подтверждает те выводы, которые мы уже получили в частных примерах.

Собственная скорость

Существует и другой способ определения скорости; эта новая скорость не так близка к обычно используемому понятию (путь, пройденный за единицу времени), но все же оказывается полезной.

Пользуясь радиолокатором, Арнольд применяет, вероятно, единственно возможный метод определения расстояния до места встречи Бориса и Вадима. Однако для определения времени этой встречи он вычислял среднее из времен излучения и возвращения назад своего радиолокационного сигнала, хотя это не единственный способ определения времени. Вместо этого он мог бы посмотреть на часы Бориса и взять отношение того расстояния, которое Борис пролетел согласно измерению Арнольда, ко времени, которое потребовалось для того, чтобы покрыть это расстояние, по часам самого Бориса. Полученная таким образом «гибридная» величина называется собственной скоростью. Мы говорим «собственная» потому, что делим расстояние на время, в котором живет Борис — его собственное время. По часам Бориса про-



Р и с. 21. Комбинирование коэффициентов k .

шло 60 мин с того момента, как он миновал Арнольда и пока не повстречал Вадима. За это собственное время он прошел 25 световых минут, и его собственная скорость поэтому равна $\frac{5}{12}$ вместо $\frac{5}{13}$ — значения, полученного раньше для его обычной скорости. Если теперь перейти к рассмотренному позднее более быстрому движению, когда отношение интервалов передачи и приема для Бориса и Арнольда составляло $\frac{3}{1}$, то вспомним, что при встрече с Вадимом расстояние Бориса от Арнольда составляло 80 световых минут. Кроме того, по часам Бориса к тому времени прошел 1 час с момента встречи с Арнольдом, так что его собственная скорость в этом случае равна $\frac{4}{3}$. Значит, собственная скорость объекта может быть больше единицы. Ясно, что она может расти неограниченно, и собственная скорость света, определенная

таким же образом, будет равна бесконечности — вывод, который можно сразу же сделать из проведенных выше рассуждений.

Для многих вычислений в теории относительности удобнее использовать собственную, а не обычную скорость. Дело в том, что для получения обычной скорости мы делим длину пути, которую разные наблюдатели считают разной, на время, которое также будет разным для разных наблюдателей. Напротив, при вычислении собственной скорости мы хотя и берем прежний путь, измеряемый по-разному разными наблюдателями, но уже по крайней мере время здесь — это собственное время, измеренное самим «путешествующим» наблюдателем, а потому это нечто такое, с чем согласится любой. Кто бы ни поглядел со стороны на часы Бориса в два определенных момента, соответствующие событиям, происшедшим в жизни самого Бориса, — он увидит на них одно и то же время для каждого события, а значит, получит одинаковый интервал времени между парами событий.

Особый характер света

Из наших рассуждений следует еще один вывод. Мы уже видели, что, увеличивая отношение интервала приема к интервалу передачи между Борисом и Арнольдом с $\frac{3}{2}$ до 3, мы приходим к возрастанию расхождения в величине времени, прошедшего между встречаей Арнольда с Борисом и встречаей Арнольда с Вадимом, если это время определяется по часам Арнольда и по часам Бориса или Вадима. Мы принимали, что в обоих случаях результат комбинированного измерения Бориса и Вадима был равен 2 час, тогда как результат измерения Арнольда увеличился с 2 час 10 мин до 3 час 20 мин. Очевидно, чем больше взять отношение интервалов, тем длительнее станет промежуток времени, измеренный Арнольдом. Мы можем поступить и наоборот: сохранять интервал, измеряемый Арнольдом, неизменным, и тогда при увеличении отношения промежуток времени, измеренный Борисом и Вадимом, будет убывать. Чем ближе подходит к скорости света скорость Бориса и Вадима с точки зрения Арнольда, тем труднее догонять их све-

товым сигналам, и поэтому отношение интервала при приеме к интервалу при передаче возросло в наших примерах с $\frac{3}{2}$ до 3 и станет возрастать далее до бесконечности, если рассматривать все бóльшие скорости. Значит, чтобы сделать время, прошедшее с точки зрения Арнольда между его встречей с Борисом и встречей с Вадимом, постоянным, одинаковым для всех случаев, нам следует уменьшать сроки, измеренные между первой и последней встречами совместно Борисом и Вадимом. Если мы перейдем к пределу и заставим Бориса с Вадимом путешествовать верхом на световых волнах, то по их часам между этими встречами вообще не пройдет никакого времени.

Нельзя представить себе реальных людей, летающих со скоростью света, ибо, как мы увидели это раньше, не существует способа придать им такую скорость; однако можно подумать о самом свете. Можно представить себе в точке встречи Бориса с Вадимом зеркало, от которого отражается луч, посланный Арнольдом и возвращающийся назад к Арнольду. Если бы теперь этот световой луч нес с собой часы (сама по себе эта идея бессмысленна, но можно построить цепочку случаев, в пределе приближающихся к этому), то на таких часах не оказалось бы зарегистрированным никакого промежутка времени между уходом от Арнольда и возвращением к нему (сумма времени, затраченного лучом на путь от Арнольда до зеркала, а затем от зеркала обратно к Арнольду). Это можно выразить и по-другому, сказав, что свет просто не стареет, что для света время не течет. Это открытие несколько проясняет факт исключительного и универсального характера света. Свет не может измениться после того, как он был испущен, — ведь он не стареет, а значит, должен всегда оставаться одним и тем же *.

* Здесь речь идет только о поведении света в пустоте (вакууме). В материальных средах (вода, стекло и пр.) свет распространяется со скоростью, не равной 300 000 км/сек — его скорость в них нередко бывает много меньше, так что для такой среды полученные выводы неприменимы. — *Прим. перев.*

Координаты и преобразование Лоренца

До сих пор при выводе всех следствий из принципа относительности Эйнштейна мы пользовались коэффициентом k . Мы уже пришли к новым представлениям о природе времени, и, конечно, анализ с использованием коэффициента k мог бы еще успешно использоваться в дальнейшем, особенно при выводе тех следствий принципа относительности, которые могут непосредственно наблюдаться, а потому должны послужить наилучшим его подтверждением. Но, с другой стороны, в написанных до сих пор руководствах мы всегда имеем дело с координатами и с преобразованиями координат. Такой подход, конечно, совершенно равнозначен нашему, но было бы очень полезно и нам вступить в контакт с этим более обычным математическим подходом. Вот почему эта глава будет более математической по сравнению как с предыдущими, так и с последующими, но мы надеемся, что это окажется полезным — в особенности для тех читателей, которые уже раньше кое-что знали о теории относительности.

Координаты и их роль

Математик пользуется координатами для того, чтобы описать положение геометрической точки; возможно, что на примере этого метода лучше всего разобраться в смысле и значении координат. Проще всего тот случай, когда мы имеем дело с плоскостью, например с листом бумаги, классной доской или полом комнаты. Тогда положение любой точки на этой плоскости можно определить, задав расстояния от нее по перпендикулярам до двух прямых, расположенных под

прямым углом друг к другу—двух координатных осей. Обыкновенно одну координату называют x , а другую y . Та линия, на которой y равняется нулю, называется «осью x », а та, на которой x равняется нулю, — «осью y ». Если эти две оси заданы, то при указании пары чисел x и y можно сразу найти на плоскости точку, соответствующую этой паре чисел; обратно, если указана какая-либо точка на плоскости, то достаточно просто измерить расстояния от нее до осей по перпендикулярам к ним, чтобы получить ее координаты. Мы видим, что это очень простой и быстрый способ указания мест точек на плоскости; поэтому он так часто и употребляется.

Здесь имеется одно затруднение, впрочем, неизбежное: координатные оси могут быть выбраны произвольно. Каждая пара осей так же хороша, как и любая другая. Что же произойдет, если изменить координатные оси? Изменять их можно двумя разными способами. Во-первых, и это проще всего, можно переместить их, но так, чтобы они остались параллельными прежним осям — иначе говоря, направление новых осей будет точно тем же, что и направление старых, только пересекаться они будут уже в новой точке. Если взять какую-то точку на плоскости и обозначить ее новые координаты через x' и y' , то ясно, что они будут равны старым ее координатам просто плюс какие-то два (для каждой координаты свое) числа. Мы получаем имя и отчество каждой точки на плоскости в новых координатах, взяв ее старое имя (x) и отчество (y) и попросту прибавив одно число к имени, а другое — к отчеству. Эти добавочные числа будут теми же самыми, где бы наша точка не находилась, потому что они — просто координаты старого начала (точки пересечения старых осей) в новой системе координат.

Гораздо больше содержания (и притом очень для нас здесь существенного) в другом выборе новых координат — когда вместо того, чтобы произвести параллельный перенос осей, мы повернем нашу пару осей на какой-то угол. Пусть даже мы сохранили старое начало координат, ограничившись таким чистым поворотом, — мы все равно видим, что связь между старыми координатами и новыми (их преобразование) будет уже не такой простой. Нам незачем входить

в какие-то подробности, но сразу же ясно (и это главное), что новая координата x будет зависеть сразу как от старой координаты x , так и от старой координаты y ; то же самое можно сказать и о новой координате y . Другими словами, при переходе к новым координатам мы берем комбинацию старых.

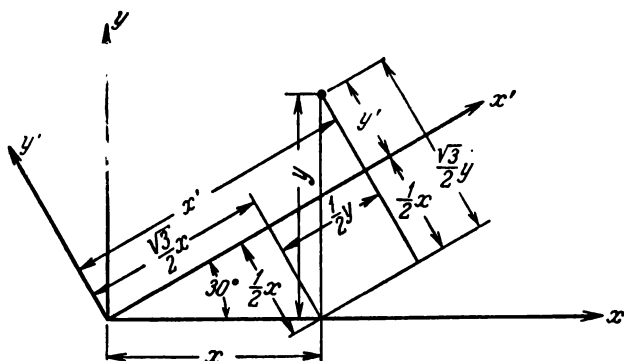
С таким усложнением мы знакомы из повседневной жизни. Глядя на дом, мы называем одну его сторону шириной, а другую — длиной, но если мы завернем за его угол и взглянем на него с другого места, то прежняя ширина может нам представиться длиной, и наоборот. Если же мы посмотрим по диагонали на сложно спланированное здание, то проекции его архитектурных комплексов могут перемешаться в наших глазах, и его новая ширина окажется какой-то комбинацией старой ширины и старой длины, которые мы видели с другого места. Вся суть здесь в том, что математики называют двумерностью плоскости. Чтобы указать положение точки на плоскости, необходимо два числа, и при повороте наших осей эти числа комбинируются друг с другом. Это свойство составляет важное отличие координат от других величин. Например, представим себе, что мы проектируем систему отопления дома, размещенную под полом. Для нас будет очень важно знать температуру в любой точке пола, и температура при расчете будет не менее важна, чем указание, на каком расстоянии от двух стен находится интересующая нас точка пола. Однако, хотя для описания каждой точки пола у нас было бы теперь три числа, а именно: ее расстояния от двух стен и температура в ней, — мы все-таки не назвали бы температуру третьим измерением. Этого мы бы не сделали именно потому, что не существует такого преобразования координат, имеющего хоть какой-нибудь смысл, при котором температура «перемешивалась» бы с двумя настоящими координатами.

Такая способность комбинироваться (перемешиваться) друг с другом и есть самое характерное свойство координат. При общем преобразовании координат мы и сдвигаем начало и поворачиваем оси координат, так что если в старой системе координат точка определялась парой чисел x и y , то в новой системе она будет определяться совершенно иной парой чисел

x' и y' . Тем не менее между этими разными системами координат существует тесная связь. Возьмем две точки: x, y и \bar{x}, \bar{y} . В новой системе координаты первой точки будут x', y' , а второй \bar{x}', \bar{y}' . Однако и в старой, и в новой системе одна величина останется без всякого изменения — это расстояние между взятыми точками. Иначе говоря, для этих четырех чисел, которые описывают положение двух точек, должна иметься такая комбинация (именно то, что мы называем расстоянием между этими точками), которая в точности одинакова как в старой, так и в новой системе координат. Величины такого сорта математики называют *инвариантами*, потому что они не варьируют, не изменяются при изменениях систем координат.

Поворот осей

Поскольку преобразование, сводящееся к параллельному сдвигу осей, весьма несложно, то мы можем пользоваться им, как захотим. Например, можно сперва перенести начало координат в одну из двух рассматриваемых нами точек — скажем, в \bar{x}, \bar{y} , — после чего приступить к повороту осей, оставляя начало в этой точке (в принципе на эти операции можно разложить любое наше преобразование). Чему же равно расстояние точки x, y от начала координат? Для того чтобы ответить на этот вопрос, следует просто применить теорему Пифагора: квадрат искомого расстояния равен $x^2 + y^2$. Если повернуть вокруг этого начала координатные оси, то расстояние точки от начала останется прежним; тем самым доказывается теорема, что при повороте координатных осей выражение $x^2 + y^2$ переходит само в себя. Его величина не изменяется ни в малейшей степени. Из этого мы заключаем, что плоскость двумерна, потому что, во-первых, для указания места точки на ней требуются две координаты; во-вторых, когда мы меняем координатные оси, эти две координаты комбинируются друг с другом; в-третьих, существует инвариант — такая конструкция, построенная из этих координат, которая не изменяется при преобразованиях. Рассмотрим пример: пусть оси (x', y') наклонены на 30°



Р и с. 22. Поворот координатных осей.

к осям (x, y) . Тогда, вспомнив основы тригонометрии, мы получим из рис. 22 закон преобразования:

$$x' = \frac{\sqrt{3}}{2}x + \frac{1}{2}y;$$

$$y' = -\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y,$$

и наш инвариант действительно не изменяется:

$$\begin{aligned} x'^2 + y'^2 &= \left(\frac{\sqrt{3}x + y}{2} \right)^2 + \left(\frac{-x + \sqrt{3}y}{2} \right)^2 = \\ &= \frac{4x^2 + 4y^2}{4} = x^2 + y^2. \end{aligned}$$

Мы говорим, что пространство, в котором мы живем, трехмерное, так как необходимы три координаты: длина, ширина и высота, или x , y и z , — для того, чтобы указать в нем положение всякой гочки. Положение точки определяется точно так же, как и в случае двух измерений. Для этого берутся три координатные оси, под прямым углом друг к другу, и расстояние по перпендикуляру от нашей точки до

плоскости, в которой лежат оси x и y , называется координатой z , и т. д. *.

Дело снова обстоит так, что имеются три числа, необходимые для указания точки, что эти числа комбинируются друг с другом, когда мы переходим к другой системе координат, и наконец, что существует инвариант (расстояние между точками), который не изменяется при преобразованиях координат. Мы имеем дело с двумя сортами преобразований координат — первым, почти тривиальным, когда только сдвигается начало координат, а к координатам всех точек добавляются три постоянных числа, и вторым, намного более сложным, когда оси поворачиваются так, что новые оси направлены косо по отношению к старым. Если, сохраняя в одной и той же точке начало, поворачивать таким образом координатные оси, то мы снова на основании теоремы Пифагора найдем, что величина $x^2 + y^2 + z^2$ остается неизменной. Существенно, что не меняется только одна эта величина — единственный инвариант, если допустить совершенно произвольные повороты осей.

Однако полезно еще немного остановиться на обсуждении этих преобразований. Предположим, что кто-то всегда направляет ось z по вертикали вверх; тогда он может позволить себе из всех преобразований лишь поворот осей x и y в горизонтальной плоскости. Неважно, как меняет он эти две оси — все равно координата z от этого не изменится. Значит, по мнению такого наблюдателя, в пространстве существует два инварианта — сама координата z и комбинация $x^2 + y^2$, не изменяющаяся при поворотах осей x и y в их плоскости. Все это звучит убедительно, пока он экспериментирует на достаточно малой площади, пока понятие вертикали остается совершенно строгим — именно, когда направления вертикали во всех точках параллельны. Однако если он захочет охватить сетью своих координат целый

* Такие системы координат, в которых оси прямолинейны и перпендикулярны друг другу, называются *декартовыми*; существуют еще сферические, цилиндрические и многие другие системы координат (например, такие, когда роль одной или нескольких координат играют угловые, а не линейные расстояния между точками). — *Прим. перев.*

материк, то столкнется, конечно, с тем фактом, что направление по вертикали в одном месте не то же, что в другом, и нет разумных оснований для того, чтобы одна из осей — ось z — всегда была направлена по вертикали. Поэтому, как только он расширит свой кругозор, ему придется расширить и заколдованный ранее круг преобразований координат и рассматривать даже такие системы, в которых ось z направлена по наклонной. Когда это произойдет, он будет считать, что существуют уже не два его инварианта z и $x^2 + y^2$, а один $x^2 + y^2 + z^2$. До того как он пришел к такому заключению, он еще мог бы провозглашать: «Высота — это нечто совсем иное, чем ширина и длина, и никак не может случиться, чтобы она смешалась с ними; это вещи, не имеющие между собой ничего общего!». Однако, научившись ценить и наклонные оси, он позже скажет: «Конечно, все они одинаковые — и x , и y , и z . Ведь они же все перемешиваются, когда я наклоняю координатные оси, да к тому же существует всего один инвариант, построенный из всех трех».

Преобразование Лоренца

Как все это вписывается в теорию относительности? Вспомним, что путеводной звездой нам все время служил эйнштейновский принцип относительности, утверждающий, что все инерциальные наблюдатели равноправны. Именно этот принцип позволил нам сделать далеко идущие выводы о том, что происходит при больших скоростях (сравнимых со скоростью света). Самый важный из полученных нами выводов заключается в том, что физическое время — скорее индивидуальное, чем всеобщее, а результаты измерений времени, сделанных разными наблюдателями, не должны обязательно совпадать. Этот вывод был самым удивительным, он совершенно не соответствовал тому, что думали до Эйнштейна. На малых скоростях все времена совпадают, сливаясь во всеобщее время, и всякий, привыкший работать при малых скоростях, начинает думать, будто время — это инвариант. Все обстоит точно так же, как с тем наблюдателем, который экспериментировал на маленьком

участке Земли, где направление вверх (вертикаль) кажется несомненным, и который мог поэтому вообразить, будто координата z — это инвариант. В гл. 8 мы уже показали, что дело обстоит иначе, что время становится другим, когда мы рассматриваем большие скорости, а значит, время нельзя считать инвариантом. Как же преобразуется время и как перейти от одного инерциального наблюдателя к другому? Эти преобразования можно уже получить с помощью нашего метода коэффициента k ; они называются *преобразованиями Лоренца**.

Пусть Арнольд пользуется координатами t и x , а Борис — координатами t' и x' , так что положение Арнольда выражается как $x=0$, положение Бориса $x'=0$, а в момент встречи Арнольда и Бориса $t=t'=0$. Возьмем теперь событие, находящееся за Борисом с точки зрения Арнольда (рис. 23). Арнольд посылает радиолокационный импульс в момент t — x и получает его отражение в момент $t+x$, так что вычисленные им из этих чисел координаты t и x события равны именно t и x . Подобным же образом Борис посылает сигнал в момент $t' - x'$, а принимает его отражение в $t' + x'$. Пусть, однако, Борис посылает свой сигнал, когда сигнал Арнольда проходит мимо него, получая обратно отраженный, когда мимо проходит и отраженный сигнал Арнольда. Значит,

$$\begin{aligned} t' - x' &= k(t - x), \\ t + x &= k(t' + x'). \end{aligned} \tag{5}$$

* Лоренц получил свои преобразования, проводя теоретическое исследование законов электромагнетизма, и попытался с их помощью объяснить эксперимент Майкельсона — Морли. Ирландский физик Дж. Ф. Фитцджеральд утверждал, что отрицательного результата этого опыта следовало ожидать, если длина движущихся тел, измеренная покоящимся наблюдателем, подвергается сокращению в направлении движения. Преобразования Лоренца идеально согласуются с этой гипотезой. Эйнштейн вывел те же самые формулы преобразований, исходя, однако, из иных предпосылок. Вошло в обычай выводить это преобразование по методу, использованному Эйнштейном, и строить специальную теорию относительности, начиная с формул, связывающих пространственные и временную координаты двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно.

Отсюда сразу же следует, что

$$t'^2 - x'^2 = t^2 - x^2, \quad (6)$$

и после простых вычислений

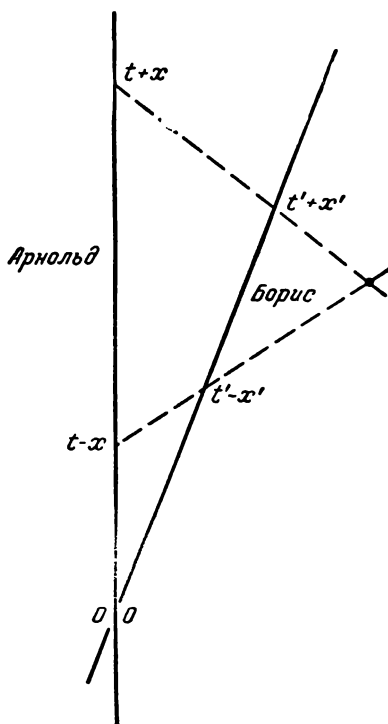
$$t' = \frac{1}{2k}(t+x) + \frac{k}{2}(t-x) = \frac{k^2+1}{2k}t - \frac{k^2-1}{2k}x; \quad (7)$$

$$x' = \frac{1}{2k}(t+x) - \frac{k}{2}(t-x) = \frac{k^2+1}{2k}x - \frac{k^2-1}{2k}t.$$

Выражая с помощью соотношения (2) на стр. 101 k через v , получим формулы преобразований Лоренца:

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t - vx}{\sqrt{1-v^2}}, \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-v^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

О чем мы можем заключить, взглянув на эти несложные формулы? Во-первых, для определения любой новой координаты каждого события требуется знать, чему равны обе старые координаты этого события. Пожелав узнать, чему равна временная координата определенного события для Бориса, нам нужно подставить в уравнение для t' (8) и пространственную, и временную координаты события с точки зрения Арнольда — и наоборот, так что при преобразованиях координаты t и x комбинируются друг с другом. Во-вторых, из формулы (6) видно, что для такого преобразования существует инвариант, и этот инвариант удивительно похож на тот, который был у нас в двумерном случае (на плоскости), только квадраты в нем вычитаются, вместо того чтобы складываться. Мы видим, что в отношении событий на схемах Арнольда и Бориса справедливы те же рассуждения, благодаря которым мы должны были сказать, что плоскость двумерна. Чтобы определить положение события, нам потребовалось два числа: t и x ; они комбинируются между собой, когда мы производим преобразование от точки зрения Арнольда к точке зрения Бориса; имеется и инвариант, построенный из них. Значит, это пространство Арнольда и Бориса следует назвать двумерным пространством, одним из измерений которого является время. ✓



Р и с. 23. Преобразование Лоренца.

Чтобы разобраться в поведении остальных пространственных координат y, z и y', z' , рассмотрим световой луч, испущенный событием, координаты которого в системе Арнольда равны t_0, x_0 , а в системе Бориса — t'_0, x'_0 . Поскольку свет распространяется со скоростью, равной единице, движение этого луча Арнольд опишет уравнением

$$(t - t_0)^2 - [(x - x_0)^2 + y'^2 + z'^2] = 0, \quad (9)$$

где квадратные скобки содержат квадрат расстояния от источника света. Борис запишет подобным же образом

$$(t' - t'_0)^2 - [(x' - x'_0)^2 + y^2 + z^2] = 0. \quad (10)$$

Однако

$$\begin{aligned}
 (t - t_0)^2 - (x - x_0)^2 &= \\
 &= [(t - x) - (t_0 - x_0)][(t + x) - (t_0 + x_0)] = \\
 &= \frac{1}{k} [(t' - x') - (t'_0 - x'_0)] \cdot k [(t' + x') - (t'_0 + x'_0)] = \\
 &= (t' - t'_0)^2 - (x' - x'_0)^2. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Поэтому из уравнений (9) и (10) следует, что

$$y^2 + z^2 = y'^2 + z'^2, \quad (12)$$

а так как подобную вспышку можно себе представить для любого события, то формула (12) должна выполняться всегда. Кроме того, заметив, что направления y и z симметричны относительно направления движения наблюдателей, мы придем поэтому к двум последним формулам преобразования Лоренца

$$y = y', \quad z = z'. \quad (13)$$

Четыре измерения

Рассмотрим вместе формулы (6) и (13). Прежде всего мы вспоминаем пространство, в котором три пространственные координаты x , y и z перемещаются друг с другом при поворотах. Скорость же при переходе от Арнольда к Борису перемещивает четвертую координату t с остальными тремя. Если взять все эти преобразования — и поворот, и переход к движению со скоростью Бориса — вместе, то мы придем к четырехмерному пространству t , x , y , z в том смысле, что для определения времени и места события требуется задать все эти четыре координаты. Кроме того, при поворотах осей либо при переходе к системе, движущейся с некоторой скоростью относительно предыдущей, все эти координаты комбинируются в новые. Наконец, существует и инвариант, а именно $t^2 - x^2 - y^2 - z^2$.

Такое использование «четырех измерений» часто ставит людей в тупик и просто пугает; они думают, будто физики и математики каким-то таинственным образом способны представить себе четырехмерный мир. Но это просто не соответствует действительно-

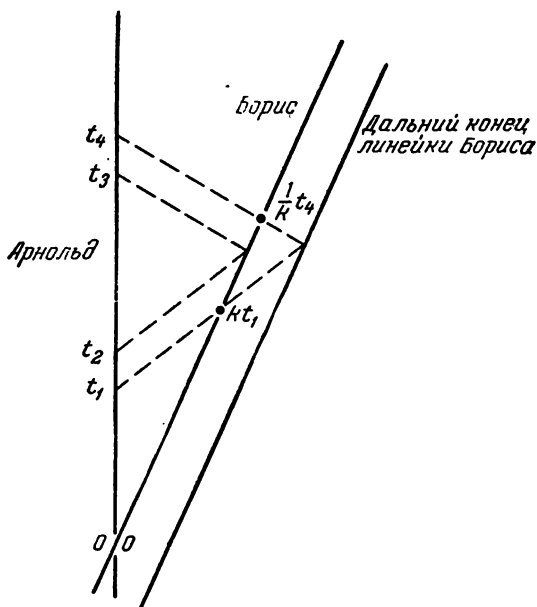
сти! Когда мы говорим о четырех измерениях, то не подразумеваем ничего, кроме того, что эти четыре величины — временная и пространственные координаты — ведут себя именно так, как только что говорилось, а значит, их можно все рассматривать как измерения в этом четырехмерном мире, точно так же, как пространственные измерения в обычном трехмерном мире. Конечно, в первый момент людей смущает, что время, прежде считавшееся инвариантом, вовсе таковым не оказалось; но ведь единственная причина того, что мы не представляли себе возможности комбинирования времени с другими координатами, — это непривычность таких больших скоростей, какие мы здесь рассмотрели. Когда скорость очень мала, то из преобразований Лоренца следует, что время не преобразуется. Однако при больших скоростях оно не остается по-прежнему неизменным!

Следствия из преобразований Лоренца

Теперь можно указать множество следствий, вытекающих из преобразований Лоренца — ведь все выводы из теории относительности являются просто результатом использования преобразований Лоренца.

Прежде всего это *относительность одновременности*. Из преобразований Лоренца сразу видно, что если два удаленных друг от друга события представляются одновременными Арнольду, то они уже не будут одновременными для Бориса. Раз эти события произошли далеко друг от друга, то хотя Арнольд и приписывает им обоим одну и ту же координату t , координаты x он дает им разные. Из формулы (8) тогда следует, что Борис должен будет приписать этим событиям разные значения временной координаты t . То, что один инерциальный наблюдатель воспринимает как происшедшее одновременно в двух пространственно разделенных точках, другой наблюдатель уже не будет считать одновременным. Это — новый пример индивидуальной природы времени, и в одной из следующих глав мы разберем это заново с помощью нашего метода коэффициентов k .

Фитцджеральдово сокращение — так называется тот факт, что в координатах Арнольда длина линейки,



Р и с. 24. Фитцджеральдово сокращение.

которую Борис держит в направлении своего движения, будет меньше, чем длина этой же линейки по измерениям Бориса. Это непосредственно следует из преобразований Лоренца. Пусть координаты концов линейки в системе Бориса будут $x' = 0$ и $x'_* = L$. Из формул (8) следует, что эти координаты в системе Арнольда будут равны соответственно

$$x = vt, \quad x_* = vt + L\sqrt{1-v^2}.$$

Если взять положения этих точек в один и тот же момент времени по Арнольду, то длина линейки, согласно измерениям Арнольда, будет равна всего лишь $L\sqrt{1-v^2}$.

Этот же результат можно получить и по методу коэффициентов k . Чтобы измерить положение дальнего конца линейки, Арнольд пошлет сигнал в момент t_1 , а отраженный сигнал придет к нему в момент t_4 (рис. 24). В момент t_2 он отправит сигнал

Борису (координаты которого совпадают с координатами ближнего конца линейки) и получит назад отраженный сигнал в момент t_3 . Так как Арнольда интересует разность расстояний до ближнего и дальнего концов линейки в один и тот же момент времени по его, Арнольда, часам, то ему следует так подобрать времена посылки сигналов, чтобы удовлетворялось равенство

$$\frac{1}{2}(t_1 + t_4) = \frac{1}{2}(t_2 + t_3). \quad (14)$$

При этом, как обычно,

$$t_3 = kt_2. \quad (15)$$

Кроме того, сигнал, отправленный в момент t_1 , придет к Борису в момент kt_1 , а сигнал, который Арнольд получит в момент t_4 , пройдет мимо Бориса в момент t_4/k . Борис определяет длину линейки (измеряя ее) как L , так что промежуток времени между отправлением сигнала и его возвращением должен составить $2L$; поэтому

$$\frac{1}{k}t_4 - kt_1 = 2L. \quad (16)$$

В системе Арнольда расстояние до дальнего конца линейки определяется как $\frac{1}{2}(t_4 - t_1)$, а до ближнего — как $\frac{1}{2}(t_3 - t_2)$, так что по измерению Арнольда длина линейки равна

$$\frac{1}{2}[(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)]. \quad (17)$$

Если учесть здесь формулы (14), (15) и (16), то мы получим

$$\frac{2k}{k^2 + 1} L \quad (18)$$

или, учитывая (2),

$$L\sqrt{1 - v^2}. \quad (19)$$

Следует подчеркнуть, что главное в рассуждениях Арнольда о сравнении расстояний до ближнего и дальнего концов линейки — это требование одновременности фиксации обоих расстояний по часам Арнольда. Видит же Арнольд вовсе не это! Если бы он сделал мгновенный снимок, то изображение дальнего конца линейки относилось бы на нем к бо-

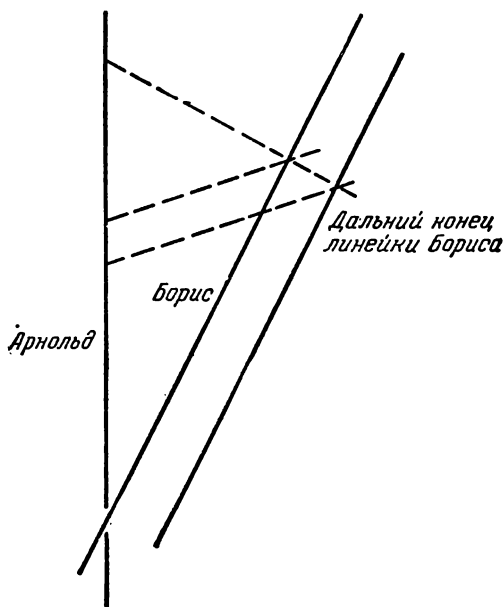


Рис. 25. Что видно на линейке Бориса.

лее раннему моменту, чем изображение ближнего конца, потому что свету приходится проходить различные пути от разных концов линейки (рис. 25). Если мы потребуем, чтобы отраженные сигналы вернулись в один и тот же момент t_3 , то для этого необходимо послать радиолокационные импульсы в разные моменты t_1 и t_2 , и они дойдут до Бориса соответственно в моменты kt_1 и kt_2 . Теперь $k(t_2 - t_1) = 2L$ по измерению Бориса, и Арнольд найдет, что длина линейки на глаз представляется равной

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(t_3 - t_1) - \frac{1}{2}(t_3 - t_2) = \\ = \frac{1}{2}(t_2 - t_1) = \frac{1}{k}L = L\sqrt{\frac{1-v}{1+v}}, \quad (20) \end{aligned}$$

а это совсем иной результат, чем формула (19).

Чтобы лучше прочувствовать смысл соотношения (20), представим себе, что на каждом конце линейки, которую держит Борис, горит огонек, и она скользит

мимо другой линейки, которая покоится относительно Арнольда. Тогда те деления, которые Арнольд видит одновременно освещенными на своей линейке, и дают разность, определяемую формулой (20). Более глубокий и ученый ответ (19) Арнольд мог бы дать, если бы он сделал поправку на дополнительное время, которое нужно потратить свету для того, чтобы пройти длину линейки.

Аберрация света

Представим себе снова Арнольда и Бориса с их прежним выбором направления осей x и x' . Пусть летящий к Арнольду световой луч достигает его как раз в тот момент, когда мимо него пролетает Борис. Определяя направление, откуда пришел этот световой луч, Арнольд находит, что это направление составляет некоторый угол θ с его осью x . Борис обнаруживает луч в тот же момент, что и Арнольд, поскольку он как раз пролетает рядом с Арнольдом; спрашивается, какой угол θ' измерит он между направлением луча и своей осью x' , которая, конечно, параллельна оси x системы Арнольда?

Предположим, что Арнольд и Борис поставили свои часы на нуль в момент встречи, а оси y и z своих систем (координаты в системе Бориса мы будем помечать штрихом) они направили так, чтобы на пути луча всегда было $z = z' = 0$. Имея в виду, что, пока луч приближался к нашим наблюдателям, как t , так и t' были отрицательны, а также что скорость распространения света равна единице и для Арнольда, и для Бориса, мы получим

$$x = (-t) \cos \theta, \quad x' = (-t') \cos \theta'; \quad (21)$$

$$y = (-t) \sin \theta, \quad y' = (-t') \sin \theta'. \quad (22)$$

Подставив x' и t' из преобразований Лоренца (8) во вторую формулу (21) и разделив получившееся при этом соотношение для x и t на первую формулу (21), найдем

$$\cos \theta' = \frac{v + \cos \theta}{1 + v \cos \theta}.$$

То же самое можно было бы получить, подставляя преобразования (8) и (13) в формулы (22).

Заметим прежде всего, что если $\theta = 0$ и $\cos \theta = 1$, то $\cos \theta' = 1$ и $\theta' = 0$, а если $\theta = 180^\circ$, $\cos \theta = -1$, то $\cos \theta' = -1$ и $\theta' = 180^\circ$. Несмотря на это совпадение, при промежуточных углах происходят значительные искажения. Для примера приведем в следующей таблице связь между θ и θ' при $v = 0,8$ (это соответствует $k = 3$, т. е. уже рассматривавшемуся случаю):

θ	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
θ'	0°	$10^\circ 12'$	$21^\circ 47'$	$36^\circ 52'$	60°	$102^\circ 25'$	180°

Отметим, в частности, что вся область между $\theta = 0$ и $\theta = 120^\circ$, составляющая для Арнольда три четверти всего неба, по мнению Бориса, втиснута в область от $\theta' = 0^\circ$ до $\theta' = 60^\circ$ и составляет только одну четверть неба.

В результате этого Борис обнаружит, что вселенная в направлении его движения сжата гораздо сильнее, по сравнению с картиной, которую видит в том же направлении Арнольд. Если Борис летит относительно Арнольда очень быстро, то большая часть неба Арнольда для него составляет лишь незначительную часть небосвода вокруг той точки, куда направлено его движение относительно Арнольда; остальная же часть неба Бориса будет для Арнольда сжата в маленький участок вокруг точки, противоположной той, к которой относительно него движется Борис. Это очень сильное искажение картины неба. Оно носит название *абберрации света* и исторически сыграло очень важную роль. Если бы Борис не двигался по инерции, а менял свою скорость, он обнаружил бы, что небо «переливается» вокруг него, и направления, в которых он видел бы звезды, все время менялись бы, не образуя постоянных углов друг с другом. Таким неинерциальным наблюдателем является наша Земля, обращающаяся вокруг Солнца — сегодня она летит по своей орбите в одном направлении со скоростью 30 км/сек, т. е. 1/10 000 скорости света, а через шесть месяцев она будет двигаться с той же скоростью в противоположном направлении, и соответственно этому изменятся углы

между направлениями на разные звезды. Такое изменение углов было открыто еще в 1725 г. Джеймсом Брадлеем*, который тогда же и назвал его абберрацией света.

Первоначально абберрацию объясняли тем, что свет пролетает, словно пуля, сквозь телескоп и все время сохраняет свое направление движения, так что под действием движения телескопа места его попадания в объектив и окуляр оказываются сдвинутыми. Хотя это объяснение дает величину эффекта, мало отличающуюся от предсказываемой теорией относительности и наблюдающейся на опыте, оно в корне неправильно. Если бы мы наполнили телескоп водой, то, согласно этому старому объяснению, абберрация должна была бы увеличиться. Дело в том, что скорость света в воде иная, чем в воздухе, и свету понадобилось бы тогда больше времени, чтобы пройти от объектива до окуляра, так что телескоп сдвинулся бы за это время сильнее (прошел бы больший путь вместе с Землей в ее движении). Однако это на самом деле не так, правда, мы знаем об этом не из прямых наблюдений**. Релятивистское объяснение, полученное с помощью формул преобразования Лоренца, очень хорошо согласуется с данными наблюдений, а кроме того, оно утверждает, что ничего бы не изменилось, если бы мы заполнили телескоп водой.

Открытие Брадлея сыграло важную историческую роль в том отношении, что оно послужило на первых порах прямой проверкой мысли Коперника о движении Земли вокруг Солнца. При этом обнаруживается, конечно, не сама скорость Земли (вещь ненаблюдаемая), но тот факт, что эта скорость изменяется, т. е. в разное время года положения звезд сдвинуты по-разному вследствие явления абберрации света. Это доказывает с полной достоверностью правильность коперниковской системы мира.

* Дж. Брайлей (1693—1762) — английский астроном, доказавший с помощью исключительно точных наблюдений в 1725—1727 гг., что явление абберрации не имеет ничего общего с годичным параллаксом (как предполагали до него), и в 1728 г. впервые объяснивший это явление. — *Прим. перев.*

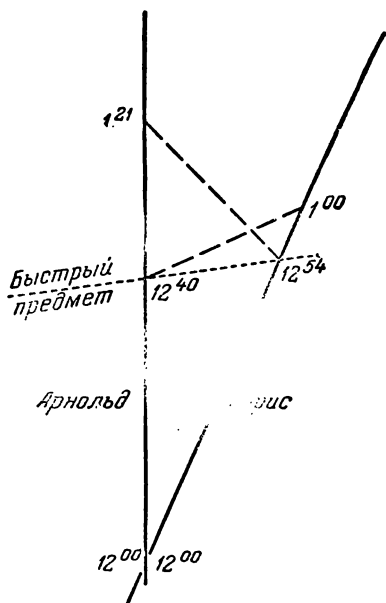
** Такого рода опыты производились и дали прямое подтверждение выводов, приведенных здесь Бонди (наблюдения английского астронома Эри в 1871 г.). — *Прим. перев.*

Быстрее света?

Мы видели, что, сколько бы скоростей, меньших, чем скорость света, мы ни сложили, мы все равно никогда не достигли бы самой скорости света, не говоря уж о том, чтобы превзойти ее. Значит, скорость света — это предел. Предметы, движущиеся медленнее света, образуют весь мир вещей, которые нам знакомы. Обнаружив эту границу, мы можем начать фантазировать о том, что могло бы оказаться по другую ее сторону и как это «что-то» выглядит. Какими должны быть свойства частиц, движущихся быстрее света? — если вообще можно назвать таким привычным словом, как «частица», такое необычайно странное «что-то».

Мы снова воспользуемся услугами Арнольда и Бориса. В 12 час дня (это показывали часы у них обоих) они встретились и стали удаляться друг от друга с постоянной скоростью, так что любой промежуток времени, измеренный Арнольдом, равняется $\frac{3}{2}$ такого промежутка, измеренного Борисом. Раньше мы уже обсуждали этот случай, а теперь возобновим наши вычисления.

Предположим, что гипотетическое «что-то», движущееся быстрее света, пролетело мимо Арнольда в 12 час 40 мин по часам Арнольда, двигаясь в сторону Бориса (рис. 26). Свет, который Арнольд зажиг в 12 час 40 мин дня по времени Арнольда, Борис принял по своим часам в 1 час 00 мин дня, потому что мы определили скорость Бориса через отношение интервалов, равное $\frac{3}{2}$. Так как мы предположили, что «что-то» движется быстрее света, то оно должно дойти до Бориса еще до того, как его часы покажут



Р и с. 26. Арнольд и Борис наблюдают предмет, летящий быстрее света.

1 час дня, скажем в 12 час 54 мин (выберем этот момент просто для определенности). Арнольд, со своей стороны, увидит, что часы Бориса показывают 12 час 54 мин дня, лишь через 54 мин, помноженные на $\frac{3}{2}$, после полудня, т. е. в 1 час 21 мин дня. Таким образом, по данным Арнольда это «что-то» побывало у него в 12 час 40 мин, а встречу «чего-то» с Борисом он видит в 1 час 21 мин, т. е. позднее. Борис же, напротив, видит приход к нему этого «чего-то» в 12 час 54 мин, а встречу «чего-то» с Арнольдом — в 1 час 00 мин по своим часам, т. е. опять позднее. Значит, по мнению Арнольда, «что-то» прошло сначала мимо него, а потом — мимо Бориса; по мнению Бориса, это «что-то» сначала прошло мимо него (теперь уже мимо Бориса!), а потом — мимо Арнольда.

Представьте себе какие-нибудь изменения, происходящие с нашим «чем-то». Если оно «старело» на пути между Арнольдом и Борисом, то Арнольд отметит

его старение с течением времени, как у всякого обычного предмета; Борис же, наоборот, увидит «что-то» непрерывно молодеющим. Как же протекает жизнь этого «чего-то»? Куда течет для него время? Ясно, что наше «что-то» — вещь весьма своеобразная, для которой направление хода времени зависит от того, кто его наблюдает. Оно явно опрокидывает все наши представления о причинности, когда одни события являются причиной других. Если с этим «чем-то» произошло какое-то изменение, когда оно повстречалось с Арнольдом, а затем это изменение вызвало другое, последующее изменение, когда «что-то» пролетало мимо Бориса, то для Арнольда причина будет предшествовать следствию, как это всегда бывает, но Борис увидит, что сначала произошло следствие, а затем уже — причина. Получится так, что для Бориса наше «что-то» живет в Зазеркалье, где побывала Алиса, где пирог сначала жуют, а потом уже режут и где — помните? — наказание всегда предшествует преступлению.

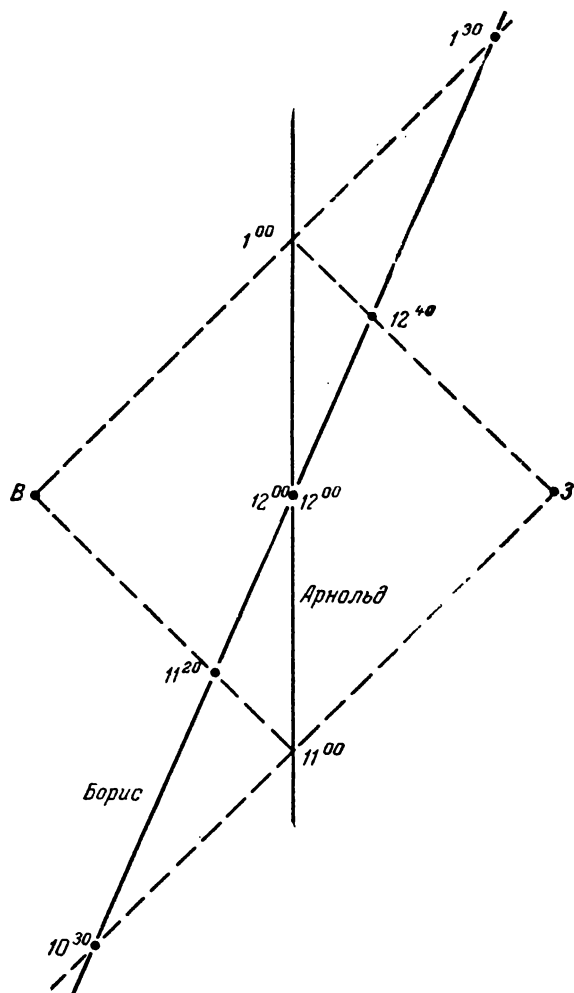
Мы не можем, конечно, начисто исключить возможность того, что такие истории наизнанку могут случаться — физику нельзя подходить к явлениям с предвзятым мнением. Но он может позволить себе с облегчением вздохнуть, когда ему подтвердят, что еще никто никогда не наблюдал никакого «чего-то», путешествующего быстрее света. Ему пришлось бы в противном случае порядочно пошевелить мозгами, чтобы приспособиться к такой жизни, хотя мы с готовностью верим в такую гибкость его ума, которая позволит ему справиться даже с этим. К счастью, как было сказано, такого забавного «чего-то» никто еще не открыл, и можно продолжать придерживаться привычных представлений о причинности — именно о том, что причина предшествует следствию.

Нужно думать, что сказанного достаточно, чтобы всем стало ясным то коренное отличие этого «чего-то» от всего знакомого нам мира вещей и явлений, благодаря которому большим счастьем является существование крепкой границы в лице скорости света, отделяющей обычные типы предметов от совершенно незнакомого «чего-то», которого, будем надеяться, мы не повстречаем как можно дольше.

Об одновременности событий, разделенных пространством

С предыдущим вопросом тесно связан другой — определение одновременности двух событий, разделенных пространством. Мы привыкли считать такую одновременность абсолютной и склонны думать, что, если два происшествия случились одновременно, как бы далеки они ни были друг от друга в пространстве, то они будут одновременными независимо от того, кто их наблюдает. Это, однако, неверно, когда речь идет о быстро движущихся наблюдателях. Обратимся снова к нашим друзьям Арнольду и Борису и для определенности предположим, что Борис движется к западу относительно Арнольда со скоростью, снова дающей отношение интервалов передачи и приема $\frac{3}{2}$. Представим себе два события, расстояние до которых по измерению Арнольда равно одному световому часу, причем оба случились в 12 час дня по времени Арнольда — одно к западу, а другое к востоку от него (рис. 27). Говоря более подробно, Арнольд отправил радиолокационные импульсы в обоих направлениях в 11 час 00 мин утра, эти сигналы отразились от одновременных событий, происшедших на расстоянии одного светового часа, и оба сигнала вернулись к нему в одно и то же время — в 1 час 00 мин дня. Из этого он и заключил, что расстояния до этих мест равны по одному световому часу каждое, а сами события случились оба в 12 час дня по его времени — одно на востоке, а другое на западе.

Посмотрим теперь, какие выводы об этих событиях сможет сделать Борис (рис. 28). В 12 час — когда, по мнению Арнольда, все произошло — Борис как раз пролетал мимо него. Прежде всего, что случилось с сигналом, который Арнольд отправил в 11 час утра в сторону восточного события? Этот сигнал прошел мимо Бориса, потому что до полудня Борис был к востоку от Арнольда, приближаясь к нему. Когда этот радиолокационный импульс проходил мимо него, по его часам до полудня оставалось $\frac{2}{3}$ час, иными словами, его часы показывали 11 час 20 мин утра. При возвращении радиоимпульса от восточного



Р и с. 27. Для Арнольда события B и Z произошли одновременно, а для Бориса событие Z предшествует событию B .

<i>Ж у р н а л Б о р и с а</i>	
<i>Время</i>	<i>Наблюдение</i>
<i>10³⁰</i>	<i>Послал Арнольду сообщение для передачи в „З“ в 11⁰⁰</i>
<i>11²⁰</i>	<i>Принял сообщение от Арнольда, идущее в „В“</i>
<i>12⁰⁰</i>	<i>Встреча с Арнольдом</i>
<i>12⁴⁰</i>	<i>Принял ответ из „З“, направленный Арнольду</i>
<i>13³⁰</i>	<i>Принял ответ из „В“, направленный Арнольду</i>
<i><u>Выводы:</u></i>	
	<i>Из „З“ ответ был послан в 11³⁵ (посередине между 10³⁰ и 12⁴⁰)</i>
	<i>Из „В“ ответ был послан в 12²⁵ (посередине между 11²⁰ и 13³⁰)</i>
	<i>Итак, по-моему, ответы посылались в разное время</i>
	<i>Борис</i>

Р и с. 28. Корабельный журнал Бориса.

события (а это было после полудня) Борис находился к западу от Арнольда, удаляясь от него. Поэтому 60-минутный промежуток между полуднем и приходом радиоимпульса по времени Арнольда должен по часам Бориса увеличиться в $\frac{3}{2}$ раза, т. е. до 90 мин. Поэтому на обратном пути сигнал, отраженный восточным событием, достиг Бориса в 1 час 30 мин дня. Иначе говоря, если бы Борис в 11 час 20 мин утра отправил радиолокационный импульс, то он достиг бы этого события, отразился от него и вернулся к Борису в 1 час 30 мин дня. Раз Борис определяет время, когда произошло событие, как средний момент между отправлением и возвращением сигнала, то по его часам восточное событие произошло в 12 час 25 мин дня; расстояние же определяется как половина разности этих времен (отправления и возвращения), так что оно равно 1 световому часу 05 световым минутам.

Перейдем к западному событию. Когда Борис должен послать свой радиолокационный импульс, чтобы он достиг его? До полудня Борис был к востоку от Арнольда, и его сигнал должен был пройти мимо Арнольда в 11 час 00 мин утра по времени Арнольда, чтобы путешествовать затем вместе с сигналом Арнольда. Пользуясь снова умножением на $\frac{3}{2}$, мы видим, что Борис должен был послать этот сигнал за 90 мин до полудня, т. е. в 10 час 30 мин утра. Когда сигнал возвращался, Борис был уже к западу от Арнольда, так что отраженный сигнал был принят сначала Борисом, а затем уже Арнольдом.

Этот 60-минутный промежуток по часам Арнольда составит лишь $\frac{2}{3}$ своей величины по часам Бориса, так что радиолокационный импульс придет к Борису обратно в 12 час 40 мин дня. Поэтому Борис определит момент свершения западного события как 11 час 35 мин утра, а расстояние до него — 1 световой час 05 световых минут. Значит, два события, одновременные по времени Арнольда, будут неодновременными по времени Бориса. Одновременность пространственно разделенных событий относительна, а не абсолютна!

Теперь мы можем немного глубже разобраться в понятии времени. В обыденной жизни мы очень привыкли к одному свойству времени — его упорядоченности. Когда происходят два события, то мы можем сказать, что то или другое из них случилось раньше, либо что оба произошли одновременно. То, что мы обнаружили сейчас, в корне меняет положение. Если одно событие произошло далеко, а другое — близко, то у разных наблюдателей сложится неодинаковое представление о времени наступления этих событий: может получиться так, что один найдет их одновременными, другой — следующими друг за другом в одном порядке, а третий — в противоположном. Так недолго и растеряться. Поэтому нашим следующим вопросом будет: имеет ли вообще смысл говорить «до» и «после»? К счастью, ответ будет: Да!

Допустим, я сделал одно дело сегодня, а другое — завтра. Представим себе наблюдателей, следящих за мной. Раз один световой луч не может перегнать другой световой луч, то свет, испущенный при моем пер-

вом действии, придет к любому наблюдателю раньше, чем свет, идущий также от меня, но излученный при втором действии. Поэтому, поскольку речь идет обо мне, все наблюдатели воспримут эти два действия происшедшими в том же самом порядке, в каком совершил их и я. Ясно, значит, что для некоторых событий понятия «до» и «после» имеют абсолютный смысл. Эти понятия здесь абсолютны, а не относительны, тогда как в других случаях, и мы обсудили это в предыдущем примере, это вовсе не так. Некоторые пары событий упорядочены во времени абсолютно в том смысле, что каждый наблюдатель назовет первым одно и то же из них. Другие же пары событий таковы, что разные наблюдатели придут к разным выводам, что произошло раньше, а что — позже. Где же проходит граница между этими двумя случаями? Ясно, что тут играет роль расстояние между событиями в пространстве. Те события, на примере которых мы установили относительность одновременности, далеко отстояли друг от друга в пространстве. Те же события, относительно порядка которых все наблюдатели согласны между собой, произошли в одном месте — там, где я.

Прошлое и будущее — абсолютные и относительные

Будем снова использовать двух наблюдателей, теперь Арнольда и Давида. Не предполагая ничего определенного об их относительных положении и движении, укажем лишь, что в течение данного опыта они находятся в разных местах. Пусть что-то случается с Арнольдом, и он сразу же отправляет световой сигнал. Эту вспышку принимает Давид, скажем, в полдень по своим часам, а еще через час он садится писать письмо. В этом примере у нас всего три события: отправление сигнала Арнольдом, затем прием его Давидом и, наконец, момент, когда Давид садится писать письмо. Раз Давид и получал сигнал, и писал письмо, то из сказанного раньше следует, что любой наблюдатель признает, что Давид еще не начинал писать свое письмо, пока он не получил сигнала от Арнольда. Более того, любой наблюдатель мог бы проследить за световым лучом в его движении

от Арнольда к Давиду; как бы он ни двигался, наблюдатель по крайней мере признает, что сначала Арнольд послал световой сигнал, а уж затем, позднее, Давид его принял. Значит, все три события строго упорядочены во времени. Не может возникнуть никаких разногласий, и все наблюдатели, как бы они ни двигались, сойдутся на том, что Давид начал писать письмо после того, как Арнольд отправил сигнал. Поэтому период написания письма можно рассматривать как абсолютно более поздний по сравнению с моментом послышки светового сигнала.

Можно пойти немного дальше. От Арнольда, считая с момента послышки сигнала, к Давиду в момент приема сигнала от Арнольда мог прийти только сигнал, распространяющийся со скоростью света, однако это ограничение уже не относится к следующему событию, связанному с Давидом, — тому, что он сел писать письмо. Какой бы относительно Арнольда ни была скорость Давида, она все же меньше скорости света, что мы доказали в гл. 9. Поэтому, хотя свет от события Арнольда мог дойти до Давида за час до того, как тот сел писать письмо, в принципе Арнольд мог в момент отправления сигнала выстрелить (речь идет, конечно, о гипотетической пуле), так что пуля могла настичь Давида лишь к моменту, когда тот начал писать. Ясно, что хотя пуля должна была лететь с чрезвычайно большой скоростью, но это все же теоретически возможная скорость, потому что она меньше скорости света! Можно поэтому сказать, что любое событие, в котором участвует Давид после прихода светового сигнала от Арнольда, произойдет абсолютно позже, чем момент отправления этого сигнала Арнольдом, и до Давида могла бы дойти выпущенная Арнольдом частица, движущаяся со скоростью, меньшей световой.

Обратимся теперь к прошлому Давида. Если когда-то в прошлом Давид отправил световой сигнал, то он мог быть принят Арнольдом в какой-то момент времени. Пусть этот сигнал дошел до Арнольда в тот момент, когда Арнольд отправлял свой сигнал, о котором мы говорили выше. Поскольку все инерциальные наблюдатели могли увидеть эту вспышку, идущую от Давида к Арнольду, то все они будут со-

гласны в том, что Давид отправил этот сигнал раньше, чем Арнольд получил его. Если до отправления этого сигнала к Арнольду Давид был чем-то занят (например, завтракал), то все инерциальные наблюдатели, как бы они ни двигались, согласятся, что он завтракал до того, как послать свой сигнал, — а значит, и до того, как Арнольд принял сигнал от Давида и послал затем свой собственный. Поэтому можно сказать, что часть истории Давида до посылки им световой вспышки предшествовала посылке Арнольдом своего сигнала, и все события, происшедшие в этот период времени, можно назвать абсолютно более ранними по сравнению с моментом посылки светового сигнала Арнольдом.

Таким образом, мы нашли два момента в жизни Давида, выделенные относительно посылки Арнольдом его сигнала, которую мы для простоты назовем событием X . Во-первых, был момент P , когда Давид нажал кнопку своего фонарика, чтобы осветить X , и момент F , когда Давид принял вспышку, излученную в X . Вся жизнь Давида до P , как мы видели, воспринимается как более раннее время, чем X , любым инерциальным наблюдателем. Вся жизнь Давида после F будет рассматриваться как более позднее время, чем X , также любым инерциальным наблюдателем. В ощущениях Давида P сочевидностью предшествует моменту F , так что встает вопрос, будет ли отрезок времени между P и F рассматриваться как более ранний или более поздний по сравнению с X . Но нет абсолютного и универсального способа решить это. Если рассмотреть в жизни Давида событие N более позднее, чем P , но более раннее, чем F , то одному инерциальному наблюдателю представится, что N произошло до X , а с точки зрения других оно окажется после X ; третьи же найдут, что события X и N произошли одновременно. Поэтому относительно X промежуток между P (концом «абсолютного прошлого») и F (началом его) называется относительным прошлым и будущим *.

* Лучше, может быть, говорить не об «относительном прошлом и будущем», а о «безразличном времени» — периоде, который не влечет в X никаких следствий и в котором само событие X не может вызвать никаких изменений. — *Прим. перев.*

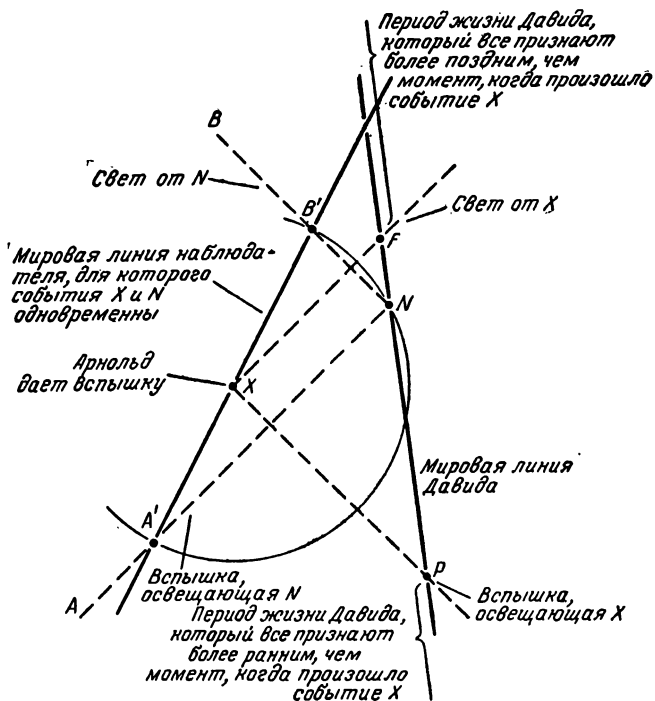


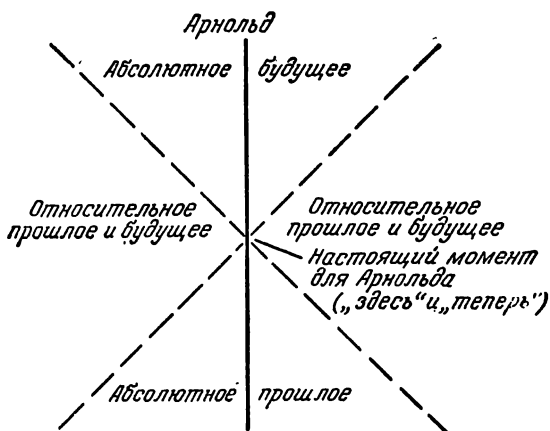
Рис. 29. Здесь не показана мировая линия Арнольда, потому что нам понадобится только событие X, лежащее на ней.

Нетрудно на нашей пространственно-временной схеме (всего с одним пространственным измерением!) изобразить инерциального наблюдателя, который нашел бы, что события X и N одновременны. Нарисуем сначала с точки зрения некоторого инерциального наблюдателя событие X и прямую, изображающую Давида (рис. 29) *. Проведем затем две пунктирные линии (обе под углом в 45° к вертикали), изображающие световые лучи, которые освещают X и исходят из X. Они пересекут прямую Давида соответственно в точках P и F. Выберем теперь некоторое событие

* Такие линии на пространственно-временных графиках обычно называют «мировыми линиями». — Прим. перев.

N на прямой Давида между P и F . После этого можно найти прямую инерциального наблюдателя, проходящую через X , для которого событие N произошло в одно время с X . Для этого мы сначала проведем световые лучи AN и NB , соответственно освещающие N и исходящие из N . Потом вычертим окружность с центром в X , проходящую через N . Эта окружность пересечет линии AN и NB в точках A' и B' . Заметим, что, поскольку угол при точке N равен 90° , все три точки (A' , X , B') лежат на одной прямой, которая с необходимостью будет проходить ближе к вертикали, чем линия светового луча. Таким образом, прямая $A'B'$, проходящая через X , изображает некоторого инерциального наблюдателя. Если этот наблюдатель пожелает осветить событие N , ему следует нажать кнопку своего фонарика в A' , дав там вспышку, и он получит ответную вспышку в B' . Поэтому он будет рассматривать событие N как случившееся точно посередине отрезка времени между A' и B' , т. е. в тот же момент, что X . Значит, для него N и X одновременны.

Тогда ясно, что мы можем отыскать других наблюдателей, для которых событие N будет предшествовать событию X (отправление светового сигнала Арнольдом), и таких, для которых порядок событий окажется прямо противоположным. Мы можем поэтому утверждать, что по отношению к X вся жизнь Давида распадается на три части. Первая часть — его жизнь до момента P , когда Давиду понадобилось отправить сигнал, чтобы осветить X , — это абсолютное прошлое. Все в равной мере придут к выводу, что любое событие, случившееся с Давидом в этом абсолютном прошлом, произошло до X . Вторая часть лежит между P , концом абсолютного прошлого Давида, и моментом F , когда Давид получил сигнал от Арнольда. Этот период не может быть абсолютно упорядочен по отношению к посылке сигнала Арнольдом, потому что любое событие на этом участке жизни Давида будет для одних людей предшествовать моменту, когда Арнольд отправил свой сигнал, для других — окажется позже его, а для третьих оба события представятся происшедшими одновременно. Поэтому мы будем говорить обо всем этом периоде



Р и с. 30. Световой конус для случая двух измерений.

как об относительном прошлом и будущем Давида, потому что для одних наблюдателей он окажется предшествующим событию X Арнольда, а для других будет позже этого события. Третья часть жизни Давида идет после F (приема сигнала от Арнольда), так как все наблюдатели согласятся, что все происшедшее в этот период с Давидом случилось после того, как Арнольд отправил свой сигнал. Мы будем говорить об этом периоде как об абсолютном будущем Давида.

Рассмотрим теперь других наблюдателей, помимо Давида, находящихся справа от X . Как и в случае Давида, на мировой линии каждого такого наблюдателя будет момент P , изображающий по отношению к событию Арнольда X конец абсолютного прошлого данного наблюдателя, и момент F , изображающий начало его абсолютного будущего. Для каждого такого наблюдателя событие P происходит, когда мимо него проходит вспышка, освещающая в дальнейшем X , а F — когда до него доходит свет, испущенный в X . Таким образом, эти две вспышки света дают границы трех областей (абсолютного прошлого, относительного прошлого и будущего и абсолютного будущего). Все замеченное нами относительно наблюдателей справа от события Арнольда X , конечно, верно и для

наблюдателей слева от Х. Поэтому световые лучи, отправленные Арнольдом, совместно с лучами, осветившими Арнольда в момент отправления тех лучей, делят все пространство и время на три разные части: на абсолютное прошлое, абсолютное будущее и относительное прошлое и будущее (рис. 30).

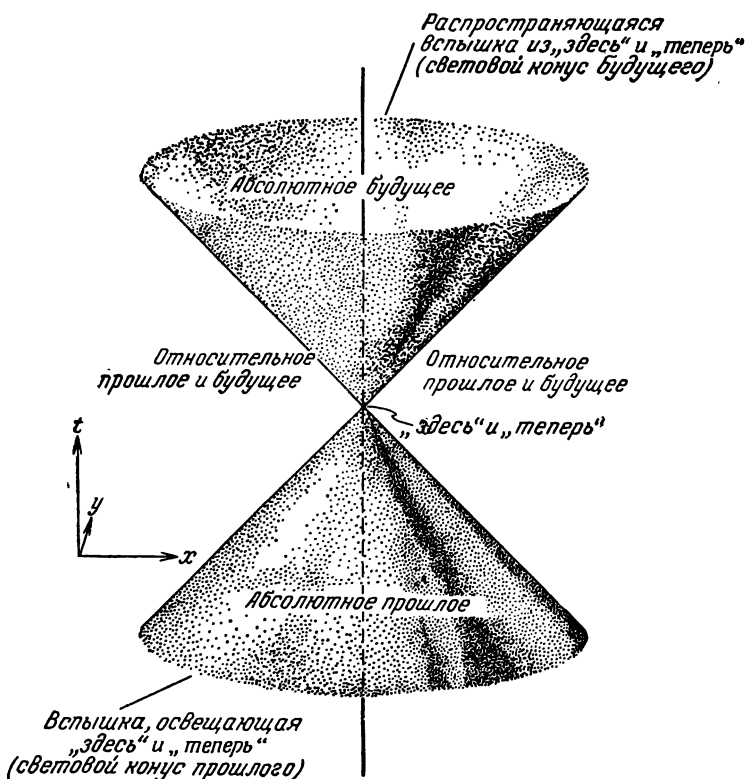
Световой конус

На рис. 30, как и на всех предыдущих схемах, отражено только одно измерение пространства, второе же измерение бумажного листа использовано для изображения времени. Дополним пространство вторым измерением; тогда придется дать изображение в перспективе (рис. 31), чтобы на нем было три измерения — два пространственных и одно временное. Световые лучи от события Арнольда образуют теперь конус с вершиной в этом событии. Подобным же образом все лучи, достигшие Арнольда как раз в тот момент, когда произошло это событие, образуют второй конус — с вершиной в том же событии, причем направляющие обоих конусов совпадают по направлению и сходятся в одной точке.

Математик, говоря о конусе, всегда имеет в виду такую двойную фигуру, а поскольку полученный нами конус изображает распространение света, то его называют «световым». Теперь нам стало ясно то, чего не смогла отразить схема на рис. 30: абсолютное прошлое заключено внутри одной половины светового конуса, абсолютное будущее — внутри другой его половины, а относительное прошлое и будущее находится снаружи конуса.

Если бы мы вознамерились представить на нашей схеме и третье измерение пространства, то нам потребовалось бы для этого четыре измерения, которые невозможно ни представить себе, ни начертить даже убедительными средствами перспективы. Остается воспользоваться языком математики и, расширяя применение теоремы Пифагора, записать уравнение светового конуса с вершиной в начале системы пространственно-временных координат как

$$t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0.$$



Р и с. 31. Световой конус для двух пространственных и одного временного измерения.

Отметим, что одно это уравнение описывает как световой конус прошлого (т. е. все световые лучи, освещающие Арнольда в момент, когда он нажал кнопку своего фонарика), так и световой конус будущего (образованный всеми лучами, испущенными самим Арнольдом). Хотя и нельзя уже сказать так на языке обычной геометрии, мы все же будем продолжать говорить о поверхности, определяемой этим уравнением, как о световом конусе, состоящем из двух половин — прошлого и будущего. При этом, с тем же основанием, что и прежде, мы будем называть внутренность светового конуса прошлого абсолютным

прошлым, внутренность светового конуса будущего — абсолютным будущим, а внешнюю его часть — относительным прошлым и будущим, которое невозможно в каком бы то ни было абсолютном смысле упорядочить относительно события в начале координат.

Вернемся теперь к понятиям причины и следствия. Если согласиться с тем, что одни предметы действуют на другие, а причина должна предшествовать следствию, то мы должны признать, что всякая причина данного следствия должна лежать внутри или на поверхности светового конуса прошлого с вершиной в точке следствия. Точно так же нам придется признать, что всякое следствие, вызванное данной (т. е. происшедшей в данном месте и в данный момент) причиной, должно лежать внутри или на поверхности светового конуса будущего с вершиной в точке причины. Если бы это было не так и связи между причинами и следствиями выходили за границы светового конуса с вершиной, находящейся в точке «здесь и теперь», то их порядок можно было бы изменить на обратный, просто подобрав соответствующим образом движущегося наблюдателя. Таким образом, мы пришли к выводу, что в рамках наших представлений о причине и следствии никакое воздействие не может передаваться быстрее света, равно как мы уже заключили прежде (говоря о наблюдении движения), что никакое тело не может лететь быстрее света.

Однако было бы неверным думать, будто ничто не может превзойти скорость света. Если между событиями нет причинно-следственных связей и речь не идет о движении материального тела, то движение быстрее света вполне может осуществляться, и это легко показать. Возьмем две длинные прямые линейки, приставленные концами друг к другу так, чтобы их направления составили очень малый угол; поворачивая одну из линеек, мы заметим, что воображаемая точка их пересечения будет двигаться вдоль линеек. При заданной скорости вращения линейки, как бы мала эта скорость ни была, можно заставить точку пересечения бежать со сколь угодно большой скоростью — достаточно сделать угол между линейками достаточно малым. Тогда оказывается, что мы всегда можем подобрать такой малый угол, что

скорость движения точки пересечения будет превышать скорость света. Это ничуть не противоречит теории относительности, ведь быстрее света здесь «движется» не материальная частица и не воздействие, а просто геометрически определяемая точка, неспособная что-либо сдвинуть или вообще произвести какое бы то ни было действие.

В качестве другого примера скорости больше световой можно представить себе также невероятно мощный прожектор, установленный на Земле. Повернем прожектор — и его луч пересечет небо так далеко, что заденет планеты, а может быть, даже звезды. Конец луча будет двигаться со скоростью, неизмеримо превышающей световую, благодаря своей громадной длине, когда мы без труда изменяем направление этого луча здесь, на Земле, просто вращая сам прожектор. Однако это опять-таки не движение материальной точки и не воздействие, перескакивающее от планеты к планете много быстрее света. Это — просто последовательность событий, которые оказались связаны друг с другом лишь потому, что мы не потрудились отключить прожектор на время, пока производится поворот. Важно другое, и мы это твердо установили: между причиной и следствием не может быть связи, соединяющей их быстрее света — точно так же, как никакой предмет не может двигаться быстрее света, что мы также уже доказали.

Ускорение

Когда в предыдущих главах мы рассматривали трех наблюдателей, Арнольда, Бориса и Вадима, то Борис и Вадим двигались по отношению к Арнольду с одинаковыми, но противоположно направленными скоростями. Встреча Вадима и Арнольда происходила после встречи Бориса и Арнольда, но при этом длительность промежутка времени между этими встречами, измеренная Борисом и Вадимом, оказывалась меньше, чем та же длительность, измеренная Арнольдом. Мы лишь кратко упомянули тогда о том, что случилось бы, если бы Борис, пролетая мимо Вадима, перебросил ему своего маленького сына, и Вадим поймал бы его. Но этот вопрос требует гораздо более глубокого и подробного рассмотрения.

До сих пор, если не считать нескольких слов об этом мальчике, мы все время говорили лишь об инерциальных наблюдателях, т. е. о таких наблюдателях, которые движутся с постоянной скоростью. Принцип относительности касался только таких инерциальных систем, так что все наши выводы ограничивались этими системами. Принцип относительности утверждает, что отличить одного инерциального наблюдателя от другого с помощью внутренних опытов невозможно. Теперь же нашей целью будет исследование ускоренно движущихся систем, другими словами, систем неинерциальных.

Можно сказать, что принцип относительности устанавливает несущественность скорости; такое утверждение является полным и всеобъемлющим. Напротив, ускорение существенно, хотя и не столь просто установить, какую именно роль оно играет. Сказать,

что нечто не играет роли, — значит, полностью описать это нечто, но признать, что нечто играет какую-то роль, — это сказать слишком мало, и необходимо дальнейшее уточнение.

Важность ускорения очевидна нам из повседневной жизни. Когда вы сидите в автомобиле, который движется с ускорением — например, быстро набирает скорость, — вы чувствуете, как вас сильно откидывает назад. Мы чувствуем это потому, что автомобиль передает ускорение и нам, т. е. прилагает к нам силу. Поэтому невозможно отрицать абсолютное значение ускорения. Насколько именно оно существенно, зависит от его величины, а действие ускорения любой величины зависит от строения того предмета, который подвергается ускорению.

Ускорение и часы

Мы уделяли много внимания вопросу измерения времени, и поэтому мы рассмотрим здесь действие ускорения на часы. На обычные ручные часы жестикуляция при разговоре практически не влияет. Вы размахиваете часами вместе с вашей рукой, но это ускорение слишком мало, чтобы подействовать на их механизм — по крайней мере, заметно оно на него не действует. Если уронить те же часы на пол, то при столкновении с ним они испытывают гораздо более сильное ускорение, и такое ускорение (вспомним, что любое изменение как величины, так и направления скорости — это ускорение) обычно разбивает их. Значит, для каждой марки часов существует какое-то предельное ускорение. Если возникают лишь небольшие ускорения, такие, как при жестикуляции, ничего страшного не будет, но при большом — часы разобьются. Часы с противоударным устройством выдерживают большие ускорения — они могут падать со стола на пол, но если их бросить, скажем, с вершины Эйфелевой башни, да к тому же привязав к солидному грузу, чтобы не сказывалось сопротивление воздуха, то можно не сомневаться, что они разлетятся вдребезги при ударе о землю. Значит, и для часов с противоударным устройством есть предельное уско-

рение, хотя и большее, чем для обычных, но тем не менее конечное.

Обратимся к еще более прочным часам. Вероятно, самым прочным механизмом, измеряющим время и имеющимся в готовом виде, являются радиоактивные вещества, например радий. Радий самопроизвольно распадается, и время его полураспада составляет около 1620 лет, иначе говоря, через эти 1620 лет распадется половина вашего запаса радия. Еще через 1620 лет распадется половина того, что осталось, и так далее. Для любых целей измерения времени можно подобрать подходящее радиоактивное вещество с большим или меньшим временем полураспада. Скорость этого распада в широких пределах совершенно не зависит от того, что происходит с самим веществом. Можно ударять по нему молотом, положить в динамитный заряд и подорвать его, остудить почти до абсолютного нуля — до самых низких температур, которые нам доступны, — но время полураспада останется все тем же. Благодаря этому его можно использовать в качестве меры времени, пригодной в весьма разнообразных условиях и работающей с громадной точностью. Другими словами, мы можем подвергать радиоактивное вещество очень большим ускорениям, не повредив и не изменив механизм измерения времени, заключенный в атомном ядре. Но мы можем обратиться к действительно гигантским ускорениям; это удастся сделать с помощью бомбардировки ядер чрезвычайно быстрыми частицами. Их и только их одних можно применить для получения гигантских ускорений; и, если падающие частицы будут достаточно быстрыми (т. е. будут обладать достаточно большими энергиями), они смогут разбить даже ядро атома радия. Значит, и для этих часов можно указать предельное ускорение, хотя оно и чрезвычайно велико.

Необязательно иметь в виду только физические часы — с тем же успехом можно было бы воспользоваться биологическими. Можно взять смену поколений у кроликов или цикл размножения у морских ежей. Подвергая кроликов таким небольшим ускорениям, как обычные для езды в автомобиле, мы повлияем на них не так сильно, однако если подействовать

на них по-настоящему большими ускорениями, то они могут погибнуть; то же будет и с морскими ежами.

Для измерения времени можно использовать и нас самих. Мы стареем — и это является мерой времени; кроме того, можно следить, как часто нам «подводит живот» от голода. Но поскольку наши индивидуальные особенности бывают велики, из нас едва ли получатся хорошие часы, хотя какие-то часы все же получатся. Здесь опять имеются предельные ускорения, потому что если нас подвергнуть ускорению в 1 или 2 g^* , то с нами ничего особенного не случится, хотя, возможно, мы ощутим морскую болезнь, но если нас заметное время ускорять с 20 g , то мы погибнем, а с нами останутся и наши «часы». Отметим, что пока любой из этих механизмов для измерения времени движется с постоянной скоростью (т. е. является инерциальным наблюдателем), он показывает то же самое время, что и все другие, движущиеся вместе с ним. Ведь если бы этого не было, то нарушился бы принцип относительности, потому что у нас появился бы способ отличать разные инерциальные системы друг от друга. Но принцип относительности гласит, что различить их невозможно, и поэтому отношение времен, которые показывают эти наши разные часы, должно быть одним и тем же у всех инерциальных наблюдателей.

„Парадокс“ близнецов

В опыте с Арнольдом, Борисом и Вадимом все эти три наблюдателя являются инерциальными, но им не является мальчик, переброшенный Вадиму Борисом. Он испытал период ускорения; если это произошло так быстро, как требовали рассмотренные тогда обстоятельства, то нет сомнения, что мальчик был бы мгновенно убит. Однако, если вместо своего сына Борис перебросил бы кусок подходящего радиоактивного вещества, то характеристики его распада смогли бы послужить Вадиму идеальным

* Напомним, что g — это ускорение силы тяжести на поверхности Земли. — *Прим. перев.*

устройством для измерения времени, несмотря на сильные ускорения, испытанные этим грузом при переброске. Если бы в этом опыте мы заменили минуты на годы, то переход от Бориса к Вадиму мог быть осуществлен постепенно, т. е. с меньшими ускорениями, и можно было бы добиться того, чтобы ускорение стало переносимым для живого существа. Пример, с которым мы сейчас знакомимся, обычно называют «парадоксом близнецов»*. Предположим, что Арнольд и Борис — близнецы, жившие вместе; затем Борис стал двигаться с таким ускорением, какое только он мог выдержать, развил большую скорость, сменил ее на обратную при встрече с Вадимом под действием того же ускорения и, наконец, после еще одного периода ускорения остановился рядом с Арнольдом.

Как мы видели, время, измеренное Борисом вместе с Вадимом, короче, чем время, измеренное Арнольдом. Значит, когда Борис возвратился к Арнольду, возраст Арнольда оказался больше, чем возраст Бориса. Получились близнецы разных возрастов! Называть это парадоксом, конечно, нелепо — ведь в этом нет никакого парадокса, потому что Борис за свою жизнь испытал несколько периодов ускорения, тогда как Арнольд все время двигался по инерции. Но бывало, что люди удивлялись, как это при относительно коротких периодах действия ускорения Борис мог «потерять» столько времени. Куда могло провалиться столько времени, спрашивали они, за такие небольшие сроки действия ускорения? Но ведь этот довод совершенно ложен. Выдвигая его, неявно предполагают, что Борис как-то «потерял» время. Ничего подобного не было: Борис измерял свое время, а Арнольд — свое, и нет никакого резона думать, будто оба эти времени должны быть одинаковыми. Ведь универсального времени нет; время — это величина, зависящая от пути.

Это как две капли воды похоже на путешествие из одного города в другой на автомобиле. Самый короткий путь — это прямая линия, но если ехать по

* Его часто называют также «парадоксом часов». — *Прим. перев.*

длинному пути, состоящему из двух прямых, соединенных короткой и сильно изогнутой кривой, то шофер на втором пути намерит больший километраж вследствие того, что на его пути встретился криволинейный участок; хотя километраж на спидометре вовсе и не исчерпывается этой кривой, он все же обязан своим существованием только ей. Существует всего одна кратчайшая дорога, потому что между двумя точками проходит всего одна прямая, и на любой другой линии должен быть по крайней мере один поворот. Избыточный километраж вызван как раз этим поворотом, хотя тот вовсе не обязан занимать заметную часть пути. Подобно этому, более короткое время между первой и последней встречами наших наблюдателей, полученное в измерениях Бориса, обязано тому, что Борис испытал периоды действия ускорения, но мы никак не можем сказать, будто для него время стояло (или шло назад) в течение этих периодов ускорения.

Пройти от первой встречи к последней без ускорения можно лишь одним способом, а именно при инерциальном движении вместе с Арнольдом. Любой другой «путь» от первой встречи к последней требует ускорения, а это значит, что наблюдатель, избравший такой путь, потратит меньше времени, чем то, которое измерит инерциальный наблюдатель.

Далеко ли мы можем улететь в космосе?

Удовлетворим теперь естественное любопытство: как далеко можно залететь в космосе в пределах биологически возможного? Мы оставим без внимания все сложнейшие технические преграды, стоящие на пути космических путешествий даже в наш век высокого развития техники. Но, с другой стороны, мы не будем превышать тех ускорений, которые мы способны вынести, и той длительности путешествия (измеренной путешественником), которую допускает продолжительность нашей жизни. Допустим, что мы летим на космическом корабле, ускорение которого все время равно 1 g , т. е. точно такое же, как ускорение силы тяжести, создаваемое гравитационным полем

Земли вокруг нас. Значит, жизнь в этом корабле будет самой удобной. Через несколько лет мы достигнем весьма порядочной скорости, очень близкой к скорости света, а это значит, что такой способ путешествовать нам вполне подойдет.

Предположим, что мы вылетели с Земли с ускорением $1 g$ на определенный срок — скажем, на 10 лет по нашим часам. Потом мы меняем направление движения своей ракеты на обратное и летим с тем же ускорением, но в обратном направлении, в течение 20 лет по нашим часам. В момент перемены направления мы можем почувствовать себя неуютно, но ведь мы знаем, что это не может принести нам никакого серьезного вреда. Развив по отношению к исходной точке (Земле) за первые 10 лет полета некоторую скорость, мы должны будем потратить следующие 10 лет при противоположно направленном ускорении для того, чтобы остановить нашу ракету по отношению к исходной точке, а в дальнейшие 10 лет мы достигаем прежней скорости, направленной уже назад. Вновь переключив направление ускорения, мы обнаружим, что нужно еще 10 лет для такой же плавной посадки на Землю. Итак, мы постарели в течение нашего путешествия на 40 лет, примерно на столько же, на сколько стареем за нашу трудовую жизнь.

Однако, если на нас глядеть с Земли, то мы неслись с ужасной скоростью, настолько большой, что почти все время путешествия наша скорость была почти равна световой. Оказывается, что с точки зрения земных наблюдателей самая дальняя точка нашего путешествия отстоит от Земли на 24 000 световых лет. Конечно, люди на Земле пережили гораздо более длительный промежуток времени, чем мы, летевшие с такой большой скоростью относительно Земли. Мы вернулись в совершенно новый мир — на Землю, которая стала на 48 040 лет старше, чем мы ее покинули. Вероятно, немногие из нас согласились бы стать жертвами такого опыта, но тем не менее он показывает рамки того, что возможно с точки зрения биологии. Значит, таким способом мы можем путешествовать до точек космоса, лежащих от нас на расстоянии около 24 000 световых лет — где-то вблизи ядра нашей

Галактики, хотя еще и не так далеко, как отстоят от нас самые близкие другие галактики.

Если мы сможем перенести действие ускорения в $5 g$ в течение 40 лет, то мы сможем посетить далекие галактики, отстоящие от нас более чем на 600 миллионов световых лет, и тогда мы вернулись бы на Землю, на которой прошло 1200 миллионов лет... То, что мы сможем сообщить о наших открытиях лишь самым далеким своим потомкам, конечно, факт немаловажный, равно как и тот факт, что даже наши лучшие ракетостроители не могут и мечтать о создании ракеты, которая могла бы обеспечивать такое ускорение в течение таких периодов времени. Это ограничение, однако, относится к технике, а вовсе не к биологии.

Масса возрастает

Исходным пунктом наших рассуждений была ньютоновская механика, которая и привела к принципу относительности Ньютона. Когда мы присовокупили к этому оптику, а тем самым представление о свете как о фундаментальном и исключительно своеобразном явлении, то мы пришли к теории относительности Эйнштейна. Затем, постоянно пользуясь методами световой сигнализации, мы изучили разнообразные следствия этой теории. В настоящей главе мы вернемся к механике и посмотрим, как следует изменить ньютоновскую механику, справедливую, как известно, при малых скоростях, для того чтобы она согласовалась с теорией относительности, рассматривающей и большие скорости.

Замедление хода времени

Сначала нам следует более внимательно подойти к понятию времени. Вернемся снова к нашим друзьям Арнольду и Борису, которые оба являются инерциальными наблюдателями и находятся в одном и том же месте в 12 час дня по их часам, показывающим в этот момент одно и то же время. Относительно же друг друга они движутся с такой скоростью, что отношение между интервалами приема и передачи сигналов после их встречи равно $3/2$. Значит, световой сигнал, отправленный Арнольдом через 40 мин по его часам после их встречи, достигнет Бориса, когда его часы отметят, что после встречи прошло 60 мин. Борис сразу же посылает ответный сигнал, который приходит к Арнольду через 90 мин после их встречи.

Если Арнольд захочет теперь определить тот момент, когда Борис посылал ему сигнал, то ему следу-

ет найти среднее время между 40 и 90 *мин*, что дает 65 *мин*. Хотя по часам Бориса этот момент был лишь на 60 *мин* позднее их встречи, по часам Арнольда он позднее встречи на 65 *мин*. Здесь важно не то, что Арнольд видит, как часы Бориса показывают 60 *мин* после их встречи, т. е. 1 *час* дня, когда на часах Арнольда 1 *час* 30 *мин* дня, а то, что для Арнольда существует лишь один способ учесть срок, потребовавшийся свету для того, чтобы преодолеть его путь, а именно взяты среднее между временем посылки и временем возвращения сигнала, в результате чего он получил 1 *час* 05 *мин* дня. Даже это время не согласуется с временем Бориса, и даже теперь, учтя поправку на время распространения света, он все равно обнаруживает, что часы Бориса отстают — ведь на них прошло всего 60 *мин*, когда по его, Арнольда, часам, минуло 65 *мин*. Естественно, что когда Борис движется быстрее, этот эффект становится заметнее.

Так, если мы снова, как делали это раньше, приемом отношение интервалов передачи и приема равным 3/1, то найдем, что сигнал, достигший Бориса в 1 *час* дня по его часам, должен быть отправлен по часам Арнольда в 12 *час* 20 *мин* дня. Ответный сигнал должен вернуться к Арнольду в 3 *час* дня по его часам. Средним для этих двух моментов, т. е. для 12 *час* 20 *мин* и 15 *час*, будет 1 *час* 40 *мин* дня. Это момент по времени Арнольда, когда, согласно его определению, Борис ему отвечал, т. е. 1 *час* дня по часам Бориса. Итак, в системе Арнольда после учета времени, затраченного светом на весь путь, снова оказывается, что часы Бориса отстают — ведь они «прошли» всего 60 *мин* за 100 *мин* (от 12 *час* дня до 1 *час* 40 *мин*) по часам Арнольда. Это и есть замедление времени или замедление хода часов, оказавшееся во втором случае, которого мы будем продолжать придерживаться до конца этой главы, равным отношению 100/60, или 5/3.

Пусть теперь у Бориса есть линейка с метровыми делениями, которую он держит под прямым углом к направлению, в каком он видит Арнольда; пусть такая линейка есть и у Арнольда, и держит он ее параллельно линейке Бориса, т. е. тоже под прямым углом к направлению, в каком он видит Бориса. Тогда 1 *м*

на линейке Арнольда выглядит так же, как 1 м на линейке Бориса, и наоборот, потому что когда Арнольд продвинется на 1 м вдоль своей линейки, т. е. перпендикулярно направлению Бориса, то напротив него окажется очередная метровая отметка на линейке Бориса. Значит, нет никакого труда переводить друг в друга расстояния, измеренные вдоль этих линеек — они просто равны друг другу.

Пусть теперь у Бориса вдоль его линейки движется частица со скоростью, которая, по измерениям Бориса, равна 60 км/час. Какой будет эта скорость для Арнольда? За выбранный промежуток времени по часам Бориса частица пройдет некоторое расстояние вдоль линейки Бориса, и Арнольд измерит точно тот же путь. Но тот промежуток времени, который по часам Бориса равен 60 мин, по часам Арнольда составит целых 100 мин!

В результате Арнольду покажется, что эта частица вместо того, чтобы двигаться со скоростью 60 км/час, будет делать всего 36 км/час, потому что те 60 мин, за которые эта частица по часам Бориса проходит 60 км, представляются Арнольду уже 100 мин, и пройти 60 км за 100 мин — это как раз означает движение со скоростью 36 км/час. Таким образом, если скорость движения вдоль линейки, измеряемую Борисом, принять за 100%, то скорость, найденная Арнольдом, будет равна 60%, так как длины в рассматриваемом направлении одни и те же для обоих наблюдателей, а времена Арнольда и Бориса разные.

Возрастание массы

Однако в механике основной величиной является не скорость, а импульс. Полезно вспомнить, что это важное понятие ньютоновской механики представляет собой произведение скорости на массу и подчиняется закону сохранения. Для наших целей лучше определять величину импульса попроще. Можно, например, измерять импульс пули той наибольшей толщиной брони, которую она способна пробить. Предположим для простоты, что процесс пробивания брони пулей, ударяющейся в нее под прямым углом, целиком зависит лишь от импульса пули, и оставим в стороне такие ус-

ложняющие дело вещи, как форма пули и материал, из которого она сделана. Когда Борис стреляет определенным типом пули с определенной скоростью, то он может измерить ту наибольшую толщину брони, которую может пробить такая пуля. Если, с точки зрения Бориса, слой брони располагается перпендикулярно направлению полета пули, то и толщину пробитого слоя ему нужно измерять под прямым углом к поверхности этого слоя, и раз Арнольд смотрит на броню с торца, то результат его измерения толщины будет тот же, что и у Бориса.

Таким образом Арнольд может определить импульс пули Бориса и получить точно тот же результат, что и Борис. Напротив, измеряя скорость пули Бориса, движущейся в поперечном направлении, Арнольд получит всего 60% той величины скорости, которую отметил Борис. Значит, для того, чтобы получить требуемое значение импульса — то же, какое получил Борис, — Арнольд должен принять, что масса пули равна для него $\frac{5}{3}$ массы, которую измерил Борис. Очевидно, это возрастание массы связано с замедлением времени, которое, в свою очередь, вызвано движением Бориса относительно Арнольда с данной скоростью. Значит, скорость движения Бориса привела, с точки зрения Арнольда, к увеличению массы пули Бориса. Благодаря этому эффекту увеличатся массы всех предметов, принадлежащих Борису, — ведь все их можно было бы исследовать на манер пуль, либо просто мы могли бы воспользоваться пулями для того, чтобы промерить все массы у Бориса.

Такой рост массы, т. е. инертности, нетрудно связать с другим фактом. С точки зрения Арнольда, если Борис движется по отношению к нему, то и сам Борис и все сопутствующие ему предметы имеют значительную энергию движения (кинетическую энергию). Разделив эту энергию на квадрат скорости света, мы придем к этой добавочной массе для каждого предмета Бориса. В наших единицах, когда скорость света равна единице, а скорости умеренны, так что справедлива механика Ньютона, эта добавочная масса точно равна ньютоновской кинетической энергии $\frac{1}{2}mv^2$. Поэтому разумно предположить, что в этом, как и в

любом другом случае, теория относительности должна дать закон, распространенный на случаи больших скоростей и продолжающий законы Ньютона, и добавочная масса должна всегда равняться кинетической энергии, если взяты наши единицы. Чтобы перевести этот результат в привычные единицы, заметим, что энергия выражается через массу, длину и время как произведение массы на квадрат скорости. Поэтому в тех единицах, в которых скорость света равна не 1, а, скажем, c , добавочная масса будет равна кинетической энергии, деленной на c^2 . Значит, наш вывод с одинаковым успехом можно выразить как возрастание массы со скоростью либо как наличие массы у энергии, и в этом втором случае добавочная масса пули рассматривается как инертность энергии ее движения.

Согласно первому подходу, масса, вместо того чтобы быть постоянной, как этого требовала теория Ньютона, в теории относительности превращается в нечто, зависящее от скорости, и легко понять, что эта масса делается сколь угодно большой, когда скорость стремится к скорости света. Впрочем, стоит отметить, что если взять «собственную скорость», которую мы ввели в гл. 9, то импульс получается при умножении ее на массу, уже не зависящую от скорости.

Когда частица движется со скоростью ненамного меньше скорости света, то ее масса немного превышает ее массу при покое — так называемую *массу покоя*. Если мы теперь передадим этой частице еще дополнительную энергию, чтобы она стала обладать большей пробивной силой, то мы сможем увеличить ее скорость лишь очень ненамного. Значит, энергия и пробивная сила частицы увеличиваются теперь за счет роста ее массы, и этот рост не имеет предела. Этот эффект наблюдается, он подробно изучен и в точности подтвержден, и, вероятно, это служит лучшей проверкой теории относительности.

Ускорение протонов

Для примера можно обсудить движение протонов в гигантском ускорителе Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) в Мейерне, близ Женевы

(Швейцария). Когда этот крупнейший ускоритель работает на полную мощность, он придает протонам энергию в 28 *Бэв*, выражаясь на языке физиков-ядерщиков*. При такой энергии масса протона круглым счетом в 30 раз превышает его массу покоя. При этом он движется со скоростью, лишь на 160 *км/сек* меньшей, чем скорость света (300 000 *км/сек*). Развивая этот пример, посмотрим, что происходит при ускорении протонов до такой скорости. Когда их энергия достигает 95% окончательной величины, то их скорость отличается от указанной конечной величины скорости лишь на $\frac{1}{18\,000}$ скорости света, т. е. на каких-нибудь 17 *км/сек*. Такая разность скоростей лишь ненамного больше скорости космических ракет, запускаемых в последнее время, и дальнейший этап ускорения поэтому относительно мало увеличивает скорость протонов. Главное значение его в увеличении их массы. Таким образом, на этом этапе добавление энергии почти не повышает скорости, но все же увеличивает пробойную силу за счет роста массы.

Когда мы отметили, что энергия этих частиц проявляется себя в виде массы, у нас должны были возникнуть следующие два вопроса:

1. Все ли формы энергии (такие, как свет и другие виды излучения, ядерная энергия и пр.) связаны с массой — или это качество связано лишь с энергией движения?

2. Пусть часть массы этих частиц соответствует энергии; соответствует ли тогда энергии и их масса покоя (та масса, которой они обладают в состоянии покоя)?

Что касается первого вопроса, то ясно, что с массой связана любая форма энергии, потому что самым характерным свойством энергии является ее способ-

* Электрон-вольт (*эв*) — это энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов в 1 *в*. Свечение телевизионной трубки (кинескопа) вызывается падением на ее экран электронов с энергией около 10 000 *эв*. 1 *Бэв* — это 1 000 000 000 *эв*, причем 6 *Бэв* равняются приблизительно 1 ватт-секунде — иначе говоря, каждый протон при всей своей мизерности (а в 1 *г* содержится 540 тысяч миллионов миллионов протонов) несет на выходе ЦЕРНовского ускорителя столько же энергии, сколько излучает ее в форме тепла и света в секунду одна маленькая электрическая лампочка в 5 *вт*.

ность переходить от объекта к объекту и из одной формы в другую (вспомним, например, такую цепь: химическая энергия угля — тепловая энергия пара на электростанции — электрическая энергия в проводах — энергия движения электропоезда). Если бы при переходе энергии из одной формы в другую масса изменялась (не сопровождала бы энергию), то не осталось бы камня на камне и от закона сохранения импульса, который выведен непосредственно из опыта и совершенно не зависит от внутренних изменений физической системы.

Представьте себе космический корабль с выключенными двигателями, летящий с постоянной скоростью. Его пассажиры используют энергию (запасенную, скажем, в аккумуляторах) то для приготовления пищи, то для работы стиральной машины. Согласно закону сохранения, эти внутренние превращения не могут изменить импульса системы в целом. Значит, если наш корабль покоился относительно одного инерциального наблюдателя до потребления в нем энергии, то он должен продолжать покоиться и после этого. Поэтому он не должен изменить своей скорости и относительно другого инерциального наблюдателя. Так как при этом не изменился и импульс, то масса должна оставаться постоянной и, следовательно, энергия должна обладать одной и той же массой, будь она заключена в аккумуляторе или имей она форму энергии движения стиральной машины (либо тепловой энергии кипятильника и пр.).

Уравнение Эйнштейна

Итак, каждая форма энергии обладает массой, которая равна, как и в случае энергии движения,

$$E = mc^2,$$

или

$$(\text{Энергия}) = (\text{Масса}) \times (\text{Скорость света})^2;$$

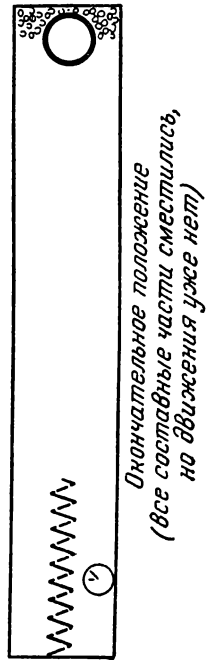
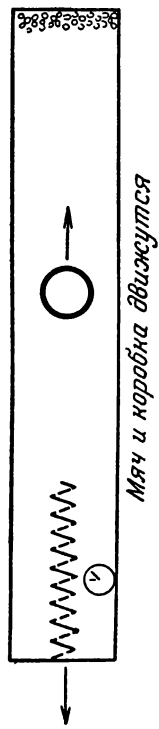
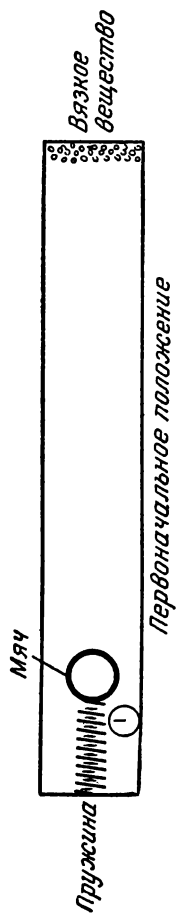
это и есть знаменитая формула Эйнштейна.

Сам Эйнштейн в одной из своих первых работ по теории относительности воспользовался другим способом для того, чтобы доказать наличие массы у энергии. Подумаем сначала, как заметить наличие массы,

а не веса (вызванного условиями нашей жизни в поле силы тяжести Земли). В основном масса проявляет себя при действии силы, и в гл. 2 мы видели, как эта взаимосвязь массы и силы привела к понятию импульса. Важность понятия импульса следует из того, что оно применимо к системе в целом — независимо от того, что может происходить внутри этой системы (вспомним рассуждения о ребенке и коляске в гл. 2). В частности, если на систему не действуют никакие внешние силы, то ее импульс не может измениться, что бы ни происходило внутри этой системы. А раз импульс характеризует движение центра массы системы (ее центр тяжести), то, если этот центр первоначально находился в покое, он останется неподвижным и при всех переменах внутри системы, если снаружи на эту систему не действуют никакие силы. Сказанное представляет собой только более точное выражение той мысли, что невозможно поднять самого себя за волосы.

Приведем конкретный пример: пусть на гладком горизонтальном столе лежит длинный ящик (рис. 32). Если никто этот ящик не толкает, а его центр массы первоначально покоился, то этот центр будет оставаться неподвижным и впредь, что бы внутри ящика ни происходило. Это, однако, совсем не значит, что наружные стенки ящика никогда не будут двигаться! Если массы, находящиеся внутри ящика, сдвигаются, то изменяется и положение центра масс относительно его стенок — а коль скоро центр масс должен сохранять одно и то же положение, то сдвинется сам ящик. Предположим теперь, что в одном конце ящика лежит шар, а за ним — сильная сжатая пружина, которую в определенный момент отпускает часовой механизм. Когда часовой механизм сработал и пружина освободилась, она отбросила шар в другой конец ящика, где лежит какое-то вязкое вещество, останавливающее попавший в него шар. Что же произойдет с ящиком?

Этот опыт подобен выстрелу из ружья. Происходит отдача — ящик начинает двигаться в направлении, противоположном направлению движения шара. Центр же системы в целом (ящик + шар), хотя и будет двигаться относительно ящика, останется неподвижным в пространстве, так что сам ящик станет двигаться



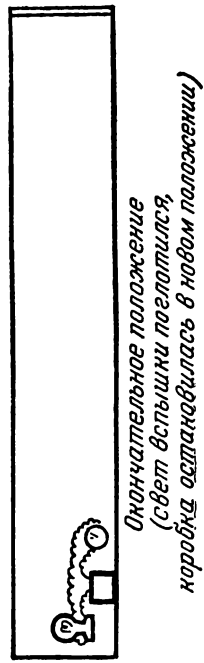
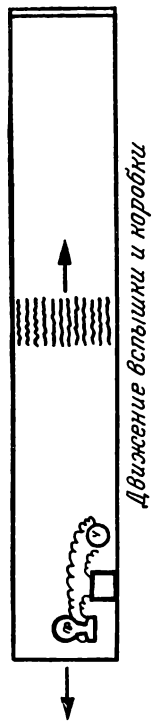
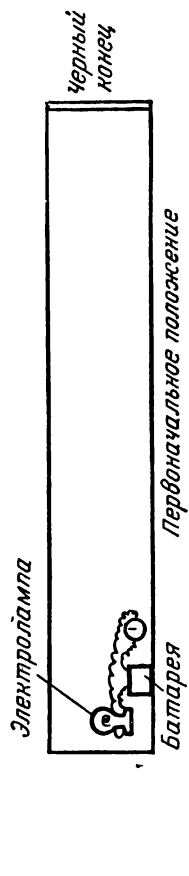
Окончательное положение
(все составные части сместились,
но движения уже нет)

Р и с. 32.

в сторону, противоположную шару. Это движение будет продолжаться, пока шар не ударится в вязкое вещество у противоположной стенки, и это столкновение остановит ящик. Внешний наблюдатель лишь отметит, что ящик, неподвижный вначале, внезапно пришел в движение и так же неожиданно опять остановился; его окончательное положение при этом отличается от первоначального. Если он знаком с законом сохранения импульса, то признает, что центр масс всей системы в целом (ящик + его содержимое), покоившийся вначале, должен был оставаться неподвижным все время, потому что не действовало никакой внешней силы. Он должен будет поэтому прийти к выводу, что сдвиг ящика, заметный снаружи, вызван сдвигом масс внутри ящика (сдвиг шара). Если ему сообщить, на какое расстояние передвинулся шар и чему равна масса ящика, включая пружину и часовой механизм, то он может на основании величины сдвига самого ящика определить величину массы шара.

Этот пример — прямое следствие пьютоновской механики, и такие вычисления не затрудняли и самого Ньютона. Новый вывод, к которому пришел Эйнштейн, получается, если заменить в этом примере шар световой вспышкой. Необходимым свойством света в опыте Эйнштейна является тот факт, что свет оказывает давление на предметы. Падая на черную поверхность и поглощаясь на ней, он передает этой поверхности толчок; падая на зеркало и отражаясь от него, он передает ему двойной толчок. При любых практически достижимых интенсивностях света это давление весьма мало, но его существование непосредственно следует из максвелловской теории света, созданной еще за 40 лет до теории относительности, и его удастся обнаружить, поставив опыт достаточно тонко.

Предположим, что мы взяли тот же ящик, но часовой механизм включает теперь в цепь батареи мощную лампу-вспышку, дающую короткий и очень сильный световой импульс (рис. 33). Пусть все стенки ящика светлые и хорошо отражающие свет, за исключением дальней (от лампы) стенки, окрашенной в черный цвет. Когда лампа включилась, она испускает свет во все стороны; если она ближе к одному концу ящика, то там отражается половина излучаемого



Р и с. 33.

лампой света, и на эту стенку действует давление, заставляющее ящик двигаться. Когда немного позднее свет дойдет до черного конца ящика (а ведь свету требуется некоторое время, чтобы пройти через длинный ящик!), то теперь свет здесь полностью поглотится, оказав на стенку такое давление, что ящик остановится.

Для внешнего наблюдения картина будет в принципе та же, что и в опыте с шаром. Ящик, бывший сначала неподвижным, внезапно приходит в движение, а потом останавливается в новом месте. Поэтому наблюдатель будет вынужден признать, что была перенесена масса из конца, где находится лампа, в зачерненный конец ящика, и величину этой массы он сможет сосчитать, зная сдвиг ящика. Из максвелловской теории света следует, что давление света на черную поверхность равно его интенсивности, деленной на скорость света. Учитывая это соотношение совместно с длительностью распространения света в ящике и продолжительностью вспышки, Эйнштейн обнаружил, что величина передвинутой массы равна энергии вспышки, деленной на квадрат скорости света.

Бесспорно, что энергия была здесь перемещена из конца ящика, где была лампа (и где первоначально эта энергия была запасена в батарее), в зачерненный конец, который нагрелся вследствие поглощения в нем света. Значит, этот мысленный эксперимент Эйнштейна показывает, что такой перенос энергии E сопровождается переносом массы m , и эти две величины связаны друг с другом соотношением

$$E = mc^2.$$

Итак, энергия света, точно так же, как энергия движения, обладает массой. И снова, опираясь на этот вывод, мы можем, как и прежде, заключить, что всякая энергия должна обладать массой и должна быть связана с ней этим соотношением.

Переходя теперь к вопросу о том, соответствует ли энергии масса покоя, мы должны обратиться к ядерной физике. Все атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Масса сложного ядра меньше (иногда

почти на 1%), чем сумма масс тех протонов и нейтронов, из которых оно состоит. Эта разность вызвана освобожденной (и излученной при этом) энергией, когда протоны и нейтроны, объединившись, составили это сложное ядро. В этом вся суть ядерной (атомной) энергии (атомные бомбы, атомные электростанции), и это же — доказательство эквивалентности массы и энергии. Таким образом, теория Эйнштейна не только объединила оптику и механику и не только выяснила смысл времени и пространства, но и объединила понятия массы и энергии.

Теория и наблюдения

На этом заканчивается наша короткая экскурсия в теорию относительности. Надеюсь, что мне удалось показать, как эта теория, казавшаяся на первых порах такой таинственной, на самом деле естественно и понятно вытекает из наших обычных представлений, являясь их продолжением в область больших скоростей. И то, что в ней непривычно для нас, непривычно только потому, что непривычны сами эти большие скорости. Но ведь нет никакого другого способа, который сделал бы мир больших скоростей таким простым и понятным для нас, кроме теории относительности Эйнштейна.

Однако главной целью любой научной теории является не просто простота и понятность — и не только обогащение нашего опыта и приведение разных наблюдений во взаимосвязь. Теория должна также соответствовать фактам, и в этом отношении можно смело сказать, нет, наверное, другого раздела физики, который был бы так проверен, изучен и опять проверен опытами, как теория относительности. Конечно, не был проверен на опыте ни один из тех мысленных экспериментов, на примере которых мы обсуждали эту теорию ради простоты, но точек соприкосновения этой теории с наблюдаемыми фактами настолько много, что и в тех примерах, о которых мы говорили, можно быть уверенными, что эта теория правильно описывает все случившиеся там происшествия.

Где бы ни проявлялись большие скорости — в ускорителях элементарных частиц или в оптике, — теория относительности неизменно выдерживала с честью опытную проверку. В ее лице к нашим представлениям о природе добавился такой раздел, которому, как мы верим, обязаны соответствовать все физические теории. И если нам удалось здесь показать, что эта теория не трудна и не таинственна, то можно сказать, что цель этой книги достигнута.

Оглавление

Здравый смысл и теория относительности 5

Предисловие 9

1. «НА ПЛЕЧАХ ГИГАНТОВ» 11

2. ИМПУЛЬС 17

3. ВРАЩЕНИЕ 24

4. СВЕТ 34

5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУ-
КОВЫХ ВОЛН 43

6. ОСОБОЕ ПОЛОЖЕНИЕ
СВЕТА 53

7. О ЗДРАВОМ СМЫСЛЕ . . . 63

8. ПРИРОДА ВРЕМЕНИ . . . 71

9. СКОРОСТЬ 91

10. КООРДИНАТЫ И ПРЕОБ-
РАЗОВАНИЕ ЛОРЕНЦА . . . 106

11. БЫСТРЕЕ СВЕТА? 124

12. УСКОРЕНИЕ 141

13. МАССА ВОЗРАСТАЕТ . . . 149

Г. БОНДИ

**Относительность
и здравый смысл**

Редактор *В. А. Пантаева*

Художник *К. П. Сиротов*

Художественный редактор *Е. И. Вескова*

Технический редактор *Т. А. Мирошина*

Корректор *Е. В. Кочегарова*

Сдано в производство 26/VIII 1966 г.

Подписано к печати 20/XII 1966 г.

Бумага 84×108¹/₃₂. = 2,56 бум. л.,

печ. л. усл. 8,61. Уч.-изд. л. 7,46

Изд. № 27/3471. Цена 37 коп. Зак. 326.

(Темплан 1967 г. изд-ва «Мир»,

пор. № 119)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2

имени Евгении Соколовой

Главполиграфпрома

Комитета по печати при Совете

Министров СССР.

Измайловский проспект, 29,

37 коп. 1