

Ю. И. Соколовский

**НАЧАЛА
ТЕОРИИ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

**ПРОСВЕЩЕНИЕ
1970**

Ю. И. Соколовский

НАЧАЛА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

С ГРАФИЧЕСКИМИ ДОКАЗАТЕЛЬСТВАМИ

ИЗДАНИЕ 3-е
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
„ПРОСВЕЩЕНИЕ”
МОСКВА · 1970

Теория относительности Эйнштейна становится уже необходимым элементом общего образования, полезным каждому. Ведь это — физическое учение о времени и пространстве, основа ядерной техники и звездоплавания, помощница астрофизики, излюбленная тема научной фантастики. Но многих она отпугивает своей сложностью. Для них-то и написана эта книга, наглядно опровергающая «миф» о недоступности теории относительности для школьников. Все ее основные положения изложены в доходчивой и увлекательной форме, но на высоком уровне, с достаточно строгими доказательствами (без применения высшей математики). Большое внимание уделяется физическому разъяснению парадоксов: «Возможно ли помолодеть в пути?», «Как можно слетать в будущее?», «Бывает ли следствие до причины?», «Когда кривая короче прямой?», «Кто в силах обогнать свет?» и пр.

Книга является учебным пособием для факультативных занятий в средней школе. Но любознательные старшеклассники могут читать ее и самостоятельно.

Соколовский Ю. И.

С 59 **Начала теории относительности.** С графическими доказательствами. Пособие для факультативных занятий. М., «Просвещение», 1970.

158 с. с илл.

В книге изложены основы специальной теории относительности в форме, доступной для учащихся старших классов средней школы.

ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ

— Теория относительности? О чем это? — спрашивают одни.

— Теория относительности! Да это же очень увлекательно! — радуются другие.

— Теория относительности... Мне этого не постичь... — сокрушаются третьи.

Так чем же она так интересна, эта самая «теория относительности», и по плечу ли она школьникам?

Все слышали, конечно, про относительность движения: земной шар мчит нас всех в сто раз быстрее реактивного самолета, а мы этого даже и не замечаем. Уже Галилей в своих спорах с церковниками опирался на замечательный закон природы, который мы теперь связываем с его именем и называем принципом относительности: никакими опытами внутри закрытой кабины ее равномерно прямолинейного движения относительно звезд не обнаружишь.

Но вот на рубеже XIX и XX веков открывается ряд явлений, которые на первый взгляд идут вразрез с этим всеобщим принципом. Теории как бы зашли в тупик, возник «кризис физики».

26-летний Эйнштейн берется за невозможное: примирить новые факты с принципом относительности. И это ему удалось, но какой ценой? За счет пересмотра самых глубоких и основных, казалось бы, вовсе бесспорных и всем очевидных представлений о времени и пространстве. Гениальный физик не побоялся поспорить со «здравым смыслом» и вышел победителем — предсказанные им невероятнейшие явления подтверждены опытом! Увеличение массы со скоростью и инерционность энергии, продольное сжатие тел и замедление хода времени при очень быстром

движении, невозможность обогнать свет и грандиозные энергетические ресурсы крошечного атомного ядра — все это было открыто Эйнштейном «на кончике пера», без новых опытов, одной только силой логического, физического и математического анализа.

Так возникла в 1905 году теория относительности и построенная на основе ее релятивистская физика (от латинского слова *relativ* — относительный). А ту, старую физику, которая существовала еще до этого, называют теперь классической. Она сохранила значение до наших дней, ее изучают в школах, но многие важные явления ей не подведомственны.

Теория относительности Эйнштейна — это физическое учение о времени и пространстве, глубокий пересмотр традиционных, давно уже сложившихся представлений, позволивший совместить принцип относительности с независимостью скорости света от движения источника. Как бы быстро ни мчались мы навстречу свету, все равно скорость света относительно нас останется той же самой — таков один из парадоксальных выводов релятивистской физики.

Теория относительности Эйнштейна волновала умы людей уже тогда, когда она была так далека от практики, как Марс от Земли (а Марс казался в те времена таким же абсолютно недостижимым, как и... стратосфера!). Сейчас Марс и другие планеты не представляются уже нам столь далекими, а теория Эйнштейна нашла практические применения в инженерном деле. Без формул релятивистской физики не построишь ни синхрофазотрона, ни атомной электростанции, не поймешь принципа действия фотонной ракеты или молекулярного генератора. Не случайно начала теории относительности стали уже изучать — в порядке факультативных занятий — во многих школах. Пройдет несколько лет — и краткие сведения из теории Эйнштейна войдут в обязательный для всех школьный курс физики.

Распространенное мнение, будто понимание даже элементарных основ теории относительности доступно лишь людям с очень высокой подготовкой, в корне ошибочно. Наглядное опровержение — успех преподавания ее в старших классах школ Сибири, Украины и Средней Азии. Хорошее усвоение и огромный интерес со стороны учащихся сопутствовали этому педагогическому эксперименту.

Оно и понятно: кому не интересно самостоятельно разобраться в научных основах «уму непостижимых» эффектов теории относительности, описываемых в фантастических романах! Возможна ли, например, волнующая встреча почти не постаревших космонавтов со своими далекими потомками, или это только досужая выдумка фантастов, оторвавшихся от науки?

В расчете на этот естественный в наши дни интерес школьников как раз и написано данное пособие к факультативным занятиям (которое могут, конечно, с большой для себя пользой изучать самостоятельно также и учащиеся тех школ, где факультативного курса теории относительности нет).

Математический аппарат книги предельно прост: используются только элементарнейшие алгебраические операции и теоремы планиметрии. Не требуется также и обширных познаний по физике — необходимо лишь хорошо понимать механику Ньютона.

Но все это, однако, отнюдь не означает, что книга легкая: читать и прерабатывать ее нужно вдумчиво, с карандашом и бумагой, по несколько раз возвращаясь к отдельным местам, которые при первом чтении покажутся непонятными. Надо всемерно развивать в себе привычку внимательно следить за сложным развитием физических идей, не пугаясь смелых гипотез и непривычных выводов. Без этого необходимого навыка вся современная физика останется за семью печатями, а без знакомства с ней нельзя в наши дни считать себя культурным и образованным человеком.

Работая над книгой, полезно постоянно проверять себя при помощи вопросов и упражнений, приведенных в конце каждой главы. Рекомендуется делать это, не ожидая требований со стороны учителя, так как при изучении факультативных курсов нужно проявлять больше активности и самостоятельности, чем на обычных уроках.

Большое значение для правильного понимания теории имеет также решение задач. Ньютон говорил, что при изучении наук задачи важнее правил. Эйнштейн это классическое изречение оставил в силе.

Изучающий теорию относительности иногда неожиданно обнаруживает, что недостаточно хорошо понимает школьную механику. Ну что ж, это открытие, хотя оно и печально, пойдет только на пользу: увлечение новыми

идеями должно побудить желание поскорее восполнить имеющиеся пробелы. Это поможет вам лучше подготовиться к выпускным экзаменам.

Не следует отчаиваться, если вдруг в книге что-либо покажется вам совершенно непостижимым: при первоначальном ознакомлении с теорией относительности так бывает. Нужно спокойно продолжать чтение, и постепенно все непонятное станет на свое место (и тогда уже полезно будет возвратиться к трудному месту еще раз). Не забывайте также о возможности обратиться за помощью к своему школьному учителю, обсудить трудное место с товарищем, почитать дополнительную литературу, рекомендательный список которой с подробными указаниями имеется в конце книги.

Уже приступая к чтению этой книги, полезно знать, что, помимо той теории относительности, которая здесь изложена (и которую называют *частной*), Эйнштейном же спустя десять лет (в 1915 г.) была создана еще и так называемая *общая* теория относительности. Имея много точек соприкосновения, теории эти, несмотря на сходство названий, трактуют о разном. Частная (или, как ее еще называют, специальная) теория относительности изучает особенности физических явлений при очень больших скоростях движения, а общая теория относительности — природу всемирного тяготения. Хорошо усвоив изложенную в этой книге частную теорию относительности, можно будет приобщиться потом и к общей.

Теории относительности Эйнштейна посвящено уже много книг. Нужна ли еще одна? По-видимому, нужна, так как не было еще серьезной литературы на эту тему, адресованной специально школьникам, — такая задача возникла только в последнее десятилетие, чему особенно способствовали успехи в завоевании космоса. Полеты на ближайшие планеты перекочевали уже из царства фантастики в область реальных планов; фантасты же устремляют теперь свои воображаемые корабли к далеким звездам и даже внегалактическим туманностям. А такие сверхдальние перелеты потребуют уже скоростей, лишь чуть-чуть уступающих скорости света. При этом на звездолете должны наблюдаться явления, понять которые можно лишь на основе релятивистской физики. Когда школьник ставит на свою полку научно-фантастический роман, естественно поместить рядом с ним и научно-популярную

книгу по теории относительности, которая не просто в описательном плане рассказывала бы ему о том, что это за теория и чем она удивительна, а систематически излагала бы ее основные положения в элементарной форме. Даже читатели-неспециалисты хотят не только удивляться парадоксальным выводам теории Эйнштейна, но и понимать их сущность.

Факультативные занятия в средних школах проводятся на добровольных началах. Основа их — увлеченность школьников успехами и проблемами науки. Поэтому и пособие для факультативных занятий должно разумным образом сочетать в себе научность, доступность и занимательность.

Создание такого пособия — задача трудная. Насколько она удалась автору, решат читатели, которых он просит присылать свои вопросы и отзывы по адресу: Москва, ГСП-110, 3-й проезд Марьиной рощи, 41, издательство «Просвещение».

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ**1. СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА**

Растерянный железнодорожный пассажир ищет свои перчатки. «Поди на то место, где уронил», — шутливо советуют ему. Пассажир вспоминает, что выпустил из рук перчатки, прощаясь в Москве с матерью. Тогда он стоял уже на подножке поезда, а она была на перроне. «Отправимся на место потери», — говорит он себе, идет в тамбур и действительно обнаруживает на подножке свою перчатку, но лишь одну — другая осталась на далеком уже теперь перроне московского вокзала.

Не правда ли, курьезно: два предмета, уроненные в одном и том же месте и оставшиеся до сих пор там, где упали, лежат не рядом, а разделены расстоянием в несколько сот километров? И тем не менее это факт: одна перчатка лежит в Москве, другая же — в поезде, где-нибудь под Свердловском. Так где же теперь «то место», на котором произошла потеря: в Москве или на Урале?

Все это, конечно, легко объяснить двояким значением фразы «Осталась на том же месте»: одна из потерянных перчаток осталась на том же месте по отношению к Земле, другая — по отношению к вагону. Пока не сказано, по отношению к чему, выражение «на том же месте» лишено смысла: это просто-напросто фраза, недоговоренная до конца. Бессмысленно ведь добиваться ответа на вопрос: «Действительно ли 62 больше?», не указав, с чем именно следует сравнить это число.

Движение и покой относительны — эта истина знакома теперь каждому. Покоиться относительно вагона — значит двигаться вместе с ним относительно Земли; покоиться по отношению к Земле — значит мчаться вместе с ней в космических просторах относительно звезд и Солнца.

Относительность движения и покоя разъясняется в школьной физике. Но у многих остается еще все-таки подсознательное убеждение, что помимо покоя относительно, возможен еще и покой «истинный», «настоящий» (как говорят ученые, «абсолютный»), когда тело совсем не участвует ни в каком движении. Всегда хочется сказать: «Чемодан этот покоится относительно самолета, но в действительности-то он движется! Воздушным путешественникам только *кажется*, что данный чемодан неподвижен».

Но так ли это? Разумеется, относительно Земли чемодан движется, а города покоятся. Но ведь и сама Земля вращается вокруг оси, так что, пожалуй, правильнее будет признать и города движущимися. Так что же тогда «по-настоящему» неподвижно? Очевидно, при наблюдении с Земли такой «действительно неподвижный» предмет должен показаться мчащимся с востока на запад со скоростью около 1000 км/ч (в наших широтах). Но ведь именно так летит пассажирский самолет ТУ-104, совершающий очередной рейс из Владивостока в Москву! Выходит, что привилегия называться неподвижным должна быть возвращена чемодану, транспортируемому самолетом...

Однако и это решение не окончательное: можно принять еще во внимание движение Земли по ее орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/сек , движение Солнца относительно других звезд нашей Галактики, движение самой Галактики... и так далее, без конца! Словом, «покоя вообще» не найти, бывает только покой по отношению к чему-нибудь. Столь же бессмысленно говорить и о движении с определенной скоростью, не указав, относительно чего. Ведь двигаться — это значит с течением времени изменять свое положение в пространстве, а положение тела не может быть определено иначе, как по отношению к другим телам. Например, во время солнечного затмения Луна находится на прямой Земля — Солнце на расстоянии приблизительно $380\,000 \text{ км}$ от Земли. В момент другого затмения расположение Луны по отношению к Земле и Солнцу примерно то же, по отношению же к звездам — совсем другое. Бессмысленно даже говорить о каком-то определенном месте в пространстве, не указав, к каким телам условились мы в данном случае относить положения других тел (вспомним пример с перчатками!).

Выходит, что двигаться — значит с течением времени изменять свое положение по отношению к другим телам. Чтобы каждый раз не указывать — к каким, выбирается тело отсчета, по отношению к которому (в пределах данного рассуждения) определяется положение, а значит и движение других тел. В качестве тела отсчета может быть принято любое твердое тело или же группа материальных точек (не менее трех), расстояние между которыми с течением времени не меняются.

Для более точного описания положения других тел с этим телом или же группой материальных точек жестко связываются *три координатные оси*: ось x , ось y и ось z (рис. 1). Чаще всего оси эти направляют так, чтобы они были взаимно перпендикулярны, но это не обязательно. Плоскости xOy , yOz и zOx называются *координатными плоскостями*.

Положение любой материальной точки M по отношению к осям характеризуется тремя числами — *координатами* x , y , z . Координата x означает расстояние $AM=OD$ точки M от координатной плоскости yOz , измеренное вдоль прямой, параллельной оси x -ов (рис. 1).

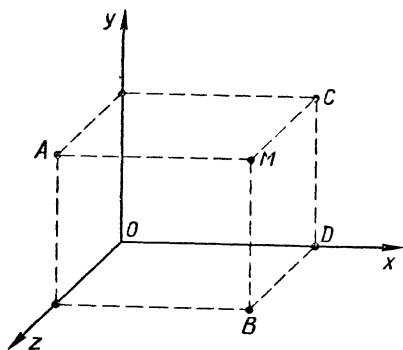


Рис. 1

Аналогично и другие две координаты (y и z) точки M — это расстояния ее MB и MC от других координатных плоскостей (zOx и xOy), измеренные по параллелям к соответствующим осям.

Система координат получает название по имени того тела, с которым она связана: например, система «Земля», система «Вагон», система «Ротор».

Для наглядности мы часто будем связывать системы координат с воображаемыми ракетами, летящими в космическом пространстве, обозначая их греческими буквами, например «Альфа». Система «Земля» именуется также *геоцентрической*, система «Вагон» — *вагоноцентрической*, система «Альфа» — *альфацентрической* и т. д.

Особенно большую роль в физике играет система «Звезды». Ее оси x , y , z пересекаются в центре самой близкой к нам звезды — Солнца и направлены на какие-нибудь три другие звезды, например Полярную, Сириус и Арктур (расстояния между звездами так велики, что относительными изменениями их видимого взаимного расположения даже на протяжении веков практически можно пренебрегать).

Выбор того или иного тела отсчета — дело удобства и вкуса; но в любом случае выбрать какую-то одну определенную систему координат необходимо: без этого многие утверждения попросту лишены смысла. Конечно, движение поршня авиационного двигателя или биение сердца летчика удобнее рассматривать в системе «Самолет», так как, например, в системе «Земля» они будут излишне осложнены движениями самого самолета. Однако это вовсе не означает, что летчик в своих рассуждениях не вправе пользоваться системой «Земля» или любыми другими системами координат, какими он найдет нужным.

Когда в данном конкретном рассуждении физик пользуется системой «Земля» или системой «Альфа», мы будем соответственно называть его гео- или альфацентристом. Это вовсе не должно означать, что он убежденный домосед или же пассажир ракеты, хотя, разумеется, при описании явлений в кабине космического корабля «Альфа» альфацентрическая система координат всего удобней.

Все изменения положений тел в пространстве происходят, как известно, во времени. Поэтому для более полного описания движения тел нужно, кроме системы координат, иметь еще и часы. Так вот, система координат плюс часы составляют так называемую *систему отсчета*.

2. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Читатели наши не станут уже, по-видимому, вступать в спор о том, покоится ли данное тело или же быстро движется, не осведомившись предварительно, в какой системе отсчета рассматриваются явления. Но все же у большинства остается еще, вероятно, подсознательное убеждение, что среди всего многообразия возможных систем отсчета имеется одна «истинная», «настоящая» система, покоящаяся, так сказать, относительно пространства. Очень трудно отделаться от представления о том,

что, помимо условного, относительного покоя (каким обладает чемодан в самолете!), возможен еще покой абсолютный, когда тело покоится «на самом деле», действительно оставаясь в одном и том же месте пространства.

Однако такое мнение столь же ложно, как и распространенное представление о «верхней» и «нижней» половинах земного шара, отделаться от которого тоже трудно (а ведь все знают, что сами понятия «верх» и «низ» обусловлены земным тяготением!). «Если бы земной шар вдруг перестал притягивать, то живущие на нем внизу и сбоку обязательно упали бы» — такое высказывание превосходно иллюстрирует живучесть некоторых глубоко укоренившихся заблуждений.

К числу их относится и представление о «том же самом месте пространства», об «абсолютном, действительном» покое и о движении отдельного тела «вообще», безотносительно к другим телам.

В действительности мы ведь всегда представляем себе движение отдельного тела по отношению к какой-нибудь неясно подразумеваемой системе отсчета. Мы можем, конечно, на опыте установить, что расстояние между Солнцем и звездой Вега с течением времени сокращается; но вот приближается ли Солнце к покоящейся Веге или, нао-

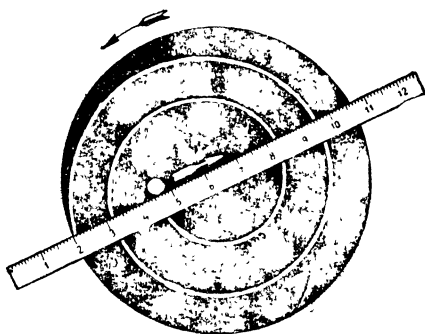


Рис. 2

борот, Вега — к покоящемуся Солнцу, об этом можно вести разговор только после указания определенной системы отсчета. Без этого необходимого условия сама постановка вопроса лишена смысла (найдутся даже такие

системы, в которых Солнце стремительно улетает от догоняющей его еще более быстрой Веги).

Характер рассматриваемого движения существенно зависит от выбранной системы отсчета. Проведем, например, по линейке мелом черту на быстровращающемся диске (рис. 2). На нем останется меловой след в форме спирали — сам мел вычертил криволинейную траекторию своего движения в системе «Диск». В системе же «Земля» мел двигался по линейке и, следовательно, прямолинейно.

Два камня брошены горизонтально с различными скоростями. По отношению к Земле они движутся с ускорением, по отношению же друг к другу — с постоянной скоростью (и только в горизонтальном направлении).

Как видим, в одной системе отсчета движение оказывается равномерно-прямолинейным, в другой же — ускоренным и криволинейным.

Какой же смысл имеет тогда первый закон Ньютона, который утверждает, что предоставленное самому себе тело сохраняет состояние покоя или равномерно-прямолинейного движения? В какой системе отсчета выполняется этот закон? (Ведь во многих других системах движение того же самого тела окажется ускоренным или криволинейным!).

Основные законы динамики установлены Ньютоном главным образом на основании математической обработки астрономических наблюдений и справедливы они в системе «Звёзды».

Однако легко понять, что эти же самые законы сохраняют силу также и во всех тех системах отсчета, которые движутся относительно звезд равномерно, прямолинейно и без вращения. Такие системы отсчета называются *инерциальными*. Инерциальную систему можно представлять себе связанной с тремя материальными точками, движущимися по инерции (т. е. в отсутствии сил) при сохранении неизменных взаимных расстояний (отсюда и название системы). Так как земной шар по своей орбите вокруг Солнца движется приблизительно равномерно и почти прямолинейно (за сутки направление движения меняется всего на 1°), система отсчета «Земля» может считаться приблизительно инерциальной.

Если тело покоится в одной инерциальной системе, то в других инерциальных системах оно движется равномерно и прямолинейно.

Так как при изменении скорости тела относительно звезд на какую-нибудь величину настолько же меняется и скорость его относительно любой другой инерциальной системы, ускорение тела во всех инерциальных системах одинаково по величине и направлению (тогда как скорости того же тела в этих системах существенно различны).

Но, поскольку в законах динамики Ньютона речь идет только об ускорениях, а не о скоростях, эти законы одинаково хорошо выполняются во всех инерциальных системах. Когда тело (в отсутствии сил) сохраняет состояние покоя в одной инерциальной системе, оно — в полном согласии с тем же самым первым законом Ньютона — сохраняет состояние равномерно-прямолинейного движения в другой. В любой инерциальной системе одинаково точно удовлетворяется и формула второго закона Ньютона

$$a = \frac{F}{m}, \quad (1)$$

так как ускорения всех тел в этих системах одинаковы и ничто не мешает нам признать силы и массы не зависящими от систем отсчета. Хотя после обрыва нити подвешенный в вагоне предмет падает относительно поезда вертикально вниз, а относительно Земли — по параболе, в обоих случаях ускорение его движения равно g , направлено вертикально вниз и удовлетворяет формуле (1) второго закона Ньютона.

Теперь мы можем понять, почему законы Ньютона, установленные в системе «Звезды», достаточно хорошо подтверждаются на опыте также и в системе «Земля» (хотя наша планета движется относительно звезд с огромной скоростью 30 км/сек — в 100 раз быстрее реактивного самолета). Дело в том, что Земля хотя и не строго инерциальная, но во всяком случае приблизительно инерциальная система: по сравнению с ускорением свободного падения ускорения Земли в ее годовом движении вокруг Солнца (в системе «Звезды») меньше в 1700 раз, а ускорение отдельных точек земной поверхности, обусловленное вращением Земли вокруг собственной оси, — по крайней мере раз в 40.

Чтобы считаться инерциальной, система отсчета должна удовлетворять трем условиям: ее движение относительно звезд должно быть равномерным, прямолинейным и поступательным (т. е. без вращения). Нарушение хотя бы одного из них делает систему неинерциальной.

Простейший пример *неинерциальной системы* — останавливающийся поезд. При резком торможении спокойно лежавшее до этого на полке вагона яблоко скатывается с нее. В системе «Земля», которую мы будем приближенно считать инерциальной, это явление легко может быть истолковано в полном соответствии с первым законом Ньютона: в отсутствие горизонтальных сил (полка гладкая!) яблоко сохраняет скорость своего движения относительно Земли, движение же самого вагона под действием сил трения замедляется, и он отстает от яблока.

Но ведь в системе «Останавливающийся поезд» все это выглядит иначе. По отношению к поезду яблоко вначале покоится, а затем приходит в движение, хотя мы и не можем указать никаких приложенных к яблоку сил, которыми это движение вызвано. Налицо явное нарушение первого (а вместе с ним и второго) закона Ньютона. Следовательно, законы динамики справедливые в системе «Земля», в системе «Останавливающийся поезд» уже не применимы.

Иначе обстояло бы дело, если бы поезд двигался по отношению к Земле равномерно-прямолинейно. Тогда никаких нарушений законов Ньютона при описании явлений в системе «Поезд» мы бы не обнаружили. Лежащее на полке вагона яблоко, сохраняя состояние равномерно-прямолинейного движения по отношению к Земле, сохраняло бы также и состояние покоя по отношению к поезду, а оба этих утверждения одинаково хорошо согласуются с законами Ньютона.

Все знают, что когда поезд идет практически равномерно (без толчков, качки и ускорений), пассажиры этого движения почти не ощущают. Они могут производить в вагоне различные механические опыты, играть в мяч, бильярд и т. д., совершенно не принимая при этом во внимание движение самого поезда, т. е. точно так, как

они делали бы это дома. Это и означает, что механические явления в системе «Равномерно идущий поезд» подчиняются тем же самым законам, что и явление в системе «Земля».

В противоположность этому неравномерное движение поезда всегда ощущается пассажирами и приборами. Внутри вагона наблюдаются явления, которые в системе «Земля» происходить не могут (и, следовательно, не согласуются с законами Ньютона). Например, без видимой причины маятник отклоняется, вода «сама собой» выплескивается из неподвижно закрепленного (относительно поезда!) стакана и т. д. (опишите самостоятельно все эти явления в системе «Земля» и убедитесь, что при таком описании они вполне согласуются с законами Ньютона).

Исключительно любопытный пример неинерциальной системы отсчета дает нам космический корабль-спутник. Опишем вначале его движение в инерциальной системе.

Притягивается ли космический корабль земным шаром? Разумеется, да: сила притяжения на высотах порядка 300 км, где летал корабль «Восток», меньше силы тяжести на поверхности Земли всего лишь на 10%. Тогда почему же корабль не падает (ведь его двигатель при полете по орбите выключен)?

Дело в том, что корабль-спутник движется по орбите с первой космической скоростью — около $7,2 \text{ км/сек}$ *. Если бы Земля не притягивала, он мчался бы по прямой линии (касательной к орбите), при этом его расстояние от центра Земли возрастало бы. Под влиянием силы тяжести корабль отклоняется от указанной прямолинейной траектории в сторону Земли (рис. 3). При малых скоростях полета v_1 приближение к центру Земли под действием силы тяжести преобладает над удалением от него, обусловленным прямолинейным движением по касательной (ОА); при больших же скоростях v_3 — наоборот (ОС). При первой космической скорости v_2 оба эффекта компенсируют друг друга, и корабль движется по окружности (ОВ), оставаясь на постоянном расстоянии от центра нашей планеты.

* Величина первой космической скорости зависит от радиуса круговой орбиты. У самой поверхности Земли она составляет около 8 км/сек

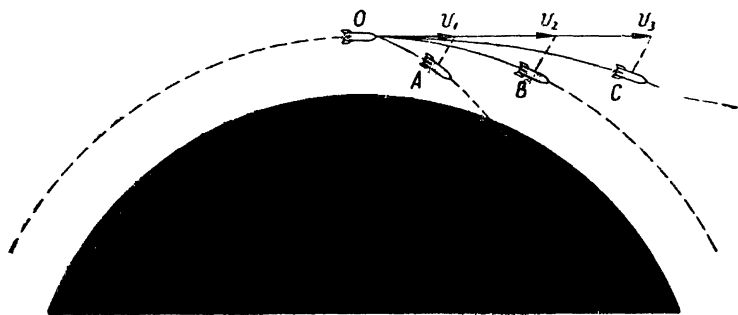


Рис. 3

Таким образом вопрос «Почему не падает?» здесь не уместен: космический корабль *повинуется* действию силы тяжести, но при этом к Земле *не приближается*. Согласно второму закону Ньютона сила тяжести сообщает всякому телу ускорение, направленное к центру Земли, но характер движения тела зависит еще и от начальной скорости. Например, движение подброшенного тела вверх не противоречит влиянию на него силы тяжести: ведь даже во время подъема тело все равно «падает» в том смысле, что ускорение его направлено вниз, к Земле.

А в случае корабля-спутника таким направленным вниз ускорением свободного падения является центро-

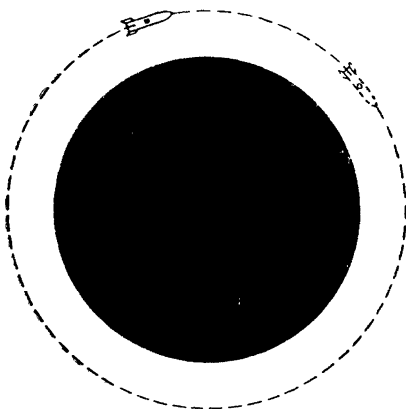


Рис. 4

стремительное ускорение. Корабль-спутник все время «падает» под действием силы тяжести в том смысле, что он летит с центростремительным ускорением, направленным к центру Земли. Приравнивая центростремительное ускорение

$$a = \frac{v^2}{R}$$

ускорению свободного падения g' на высоте полета

$$\frac{v^2}{R} = g',$$

можно определить первую космическую скорость

$$v = \sqrt{Rg'} \approx 7,2 \text{ км/сек.}$$

Представим себе теперь, что в центре космического корабля (рис. 4.) имеется шар, удерживаемый, например, рукой космонавта. Этот шар движется вместе с кораблем, т. е. покоится относительно его стенок. В системе же «Земля» шар, как и космический корабль, движется с первой космической скоростью. Если даже космонавт выпустит шар из рук, то шар, как и всякое тело, обладающее первой космической скоростью, будет вести себя подобно искусственному спутнику Земли, т. е. двигаться вокруг нее по такой же круговой орбите, как и сам космический корабль. Иными словами, относительно стенок корабля шар будет покоиться. Если космонавт поместит под шаром ладонь на расстоянии одного миллиметра от него, расстояние это с течением времени сокращаться не будет. Осторожно прикоснувшись ладонью к нижней стороне шара, космонавт не испытывает привычного ощущения его тяжести: даже малейший зазор между рукой и шаром будет все время сохранять постоянную величину.

Действует ли на шар сила притяжения его Землей? Конечно, да: именно она сообщает ему центростремительное ускорение и заставляет лететь не по прямой, а по окружности!

Все сказанное имеет смысл при описании явлений в системе «Земля». Но для космонавтов гораздо удобнее другая система отсчета — «Космический корабль». Однако в системе «Корабль» шар все время покоится и, значит, не обладает ускорением. Выходит, что, с точки зрения космонавта, сила земного тяготения, заведомо прило-

женная к шару (и ничем не уравновешенная), никакого динамического эффекта не производит — она ведь не выводит его из состояния относительного покоя. Налицо явное нарушение как первого, так и второго закона Ньютона. Это, впрочем, и не удивительно, так как система отсчета «Космический корабль» не относится к числу инерциальных (она движется относительно звезд не прямолинейно).

Как видим, хотя все предметы внутри космического корабля продолжают притягиваться Землей, обычные проявления силы тяжести в корабле отсутствуют: тела не падают на его «пол», не давят на подставки и не натягивают нитей, на которых они подвешены. В этом как раз и состоит явление невесомости, которое первым из людей испытал в течение длительного времени советский летчик-космонавт Юрий Гагарин 12 апреля 1961 года.

Но, прежде чем сделаться невесомым, он должен был выдержать значительную «перегрузку», т. е. увеличение своего веса во время взлета. Когда ракета летит вверх с ускорением a относительно Земли, всякое свободно падающее тело (внутри или вне ракеты) будет иметь относительно ракеты ускорение $g+a$, что может быть истолковано космонавтом как увеличение силы тяжести.

4. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Рассмотренных в предыдущих параграфах примеров вполне достаточно, чтобы прийти к следующим исключительно важным выводам:

1. Законы механики Ньютона справедливы не во всех системах отсчета, а только в инерциальных.

2. Находясь в закрытой кабине и производя физические опыты внутри нее, всегда можно определить, является ли она инерциальной (т. е. является ли движение ее относительно звезд равномерным, прямолинейным и поступательным). Расхождение результатов экспериментов с законами Ньютона свидетельствует о том, что кабина имеет ускорение относительно системы «Звезды».

3. Никакими опытами внутри закрытой * кабины нельзя определить, покоится ли она в системе «Звезды» или

* Предполагается, что стенки кабины не пропускают ни света, ни радиоволн, ни каких-либо иных лучей.

движется относительно звезд инерциально. Во всех инерциальных системах выполняются одни и те же законы, и, следовательно, любой опыт при одинаковых начальных условиях относительно своей кабины не может дать разных результатов в зависимости от ее скорости.

Как видим, из всего многообразия различных систем отсчета физически выделяется особая группа — инерциальные системы, так как в них, и только в них, выполняются законы Ньютона (а также и все другие законы физики, изложенные в учебниках). Конечно, и при описании явлений в других системах отсчета можно было бы обнаружить определенные закономерности и сформулировать их в виде своеобразных законов «неинерциальной физики». Однако такие законы получились бы очень причудливыми.

Какое утверждение заменило бы, например, первый закон Ньютона в системе «Поезд»? «Предоставленное самому себе тело» (скажем, яблоко на вагонной полке) сохраняет в такой системе отсчета состояние покоя только до тех пор, пока поезд идет равномерно. С началом же торможения (например, в 18 час. 48 мин.) оно (как и всякий другой незакрепленный предмет в поезде) начинает двигаться с ускорением, которое равно по величине и противоположно по направлению ускорению поезда относительно Земли. Поэтому соответствующий закон природы, справедливый в системе «Останавливающийся поезд», имел бы такую форму: «Предоставленное самому себе тело, на которое не действуют другие тела, сохраняет состояние покоя до 18 час. 48 мин., после чего само собой приобретает ускорение, имеющее такую-то величину и такое-то направление».

В такой формулировке обращает на себя внимание выделение какого-то особенного момента времени («18 час. 48 мин.»), когда нарушается покой, и особенного направления в пространстве, куда направлено ускорение. Действительно ли этот момент времени и это направление в пространстве какие-то особенные? Конечно, нет! В других неинерциальных системах отсчета они будут иными, в инерциальных же системах таких выделенных моментов и направлений совсем нет. Естественно поэтому отнести наличие их в системах неинерциальных не за счет «сложности природы», а за счет особенностей самих систем отсчета. И в самом деле, они

определяются тем, *когда* начали тормозить поезд и *куда* была направлена тормозящая сила.

Причудливая форма законов «инерциальной физики» свидетельствует не о «прихотях природы», а лишь о неудачном выборе системы отсчета для описания явлений. Инерциальные системы обладают в этом смысле огромными преимуществами: они лучше подходят для описания явлений, не вносят в них искусственных усложнений и при использовании их законы природы выступают в более чистом, незавуалированном виде.

Нельзя ли отнести это преимущество инерциальной системы отсчета перед неинерциальной за счет того, что только движение относительно инерциальной системы является истинным, а относительно других — лишь кажущимся? Иными словами, не свидетельствует ли привилегированное положение инерциальной системы о том, что она, и только она, «по-настоящему» покоится в пространстве?

Если бы дело обстояло действительно так, движение было бы относительным только в ограниченном, кинематическом смысле. А при динамическом подходе, т. е. интересуясь не только внешними проявлениями движения, но и его причинами, мы могли бы отличить «настоящее» движение от «кажущегося».

Однако в действительности все обстоит не так, потому что преимущественная в указанном только что смысле система отсчета отнюдь не единственная. Таких систем бесконечно много, а именно — все инерциальные системы, которые движутся относительно звезд с различными скоростями, постоянными по величине и направлению.

Исследование законов динамики — позволяет нам отличать инерциальные системы от неинерциальных; но сделать какой-либо выбор *между* инерциальными системами, отдать предпочтение одной из них — ни малейших оснований для этого динамика нам не дает. Ведь, как мы уже указали, законы механики одинаковы во всех инерциальных системах, и ни одна из них не обладает никакими преимуществами перед другой. Поэтому не только с кинематической, но также и с динамической точки зрения относительность движения, т. е. зависимость его характера от системы отсчета и произвол в выборе этой системы, сохраняет полную силу (но с точки зрения ди-

намики выбор следует делать между одними лишь инерциальными системами).

Именно поэтому утверждение о физическом равноправии всех инерциальных систем отсчета получило в науке название *принципа относительности*. Впервые он был выдвинут Галилеем в его борьбе против учения церкви о неподвижности земли. Как известно, главный довод церковников против учения Коперника состоял в том, что быстрое движение Земли вокруг Солнца обязательно ощущалось бы людьми, как ощущается, скажем, движение кареты. Отводя эти возражения, Галилей подчеркивал, что движение кареты ощущается седоком лишь постольку, поскольку оно неравномерно.

В современной формулировке принцип относительности Галилея мог бы быть выражен следующими словами: любые явления во всех инерциальных системах отсчета совершаются по одним и тем же законам независимо от того, с какой скоростью движется данная система отсчета относительно звезд. Отсюда сразу же вытекает принципиальная невозможность какого-либо «указателя абсолютной скорости»: любой прибор, подчиняясь одним и тем же законам физики, дает одинаковые показания, когда корабль, где он установлен, покоится или инерциально движется относительно системы «Звезды».

В противоположность этому, очень просто создать «указатель абсолютного ускорения», который будет измерять ускорение относительно системы «Звезды» (или, что то же самое, относительно любой другой инерциальной системы). Свидетельством ускорения может служить, например, наблюдающаяся в неинерциальной системе искусственная тяжесть или любое другое отклонение от законов механики. Простейшим измерителем ускорения может служить любое тело, подвешенное к

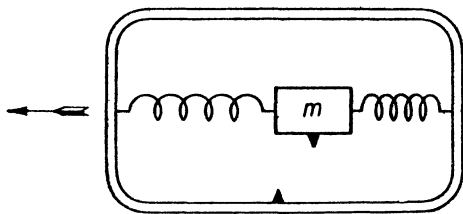


Рис. 5

стенкам кабины на пружинах (рис. 5). Одна из пружин растянута, а другая — расслаблена, так что равнодействующая приложенных к телу сил отличается от нуля, но тело все-таки остается в состоянии относительного покоя — это верный признак того, что данная система отсчета не является инерциальной. По величине результирующей силы F и массы тела m нетрудно даже определить ускорение a этой системы относительно инерциальной:

$$a = \frac{F}{m} .$$

Принцип относительности Галилея, первоначально сформулированный только для механических явлений (другие в те времена были еще недостаточно изучены), впоследствии был распространен на все без исключения физические процессы: световые, электромагнитные и т. д. Например, величина электродвижущей силы электромагнитной индукции, согласно закону Фарадея, одна и та же как при приближении магнита к покоящейся катушке, так и при приближении катушки к неподвижному магниту. Поэтому-то по результатам индукционных опытов нельзя установить, что именно находится в движении — магнит или катушка.

В конце прошлого столетия универсальная справедливость принципа относительности Галилея подверглась было сомнению, но они были решительно отброшены после убедительных опытов Майкельсона—Морли и других выдающихся экспериментаторов, безуспешно пытавшихся обнаружить хоть какое-нибудь влияние очень быстрого движения Земли по своей орбите (со скоростью 30 км/сек) на законы наблюдающихся на ней физических процессов.

В настоящее время универсальная применимость принципа относительности общепризнана. Она распространяется не только на физические, но также и на все прочие явления: химические, физиологические, психические и т. д., — так как они даже в принципе не могут быть оторваны от связанных с ними физических процессов (не может быть, например, двух разных эмоций при совершенно одинаковом расположении и движении всех элементарных частиц, входящих в состав человеческого мозга).

5. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ДИАГРАММЫ

При изучении механики большую помощь оказывает графическое изображение движений и разных других событий на пространственно-временных диаграммах. Для простоты ограничимся сперва тем случаем, когда все интересующие нас явления происходят в различных точках одной и той же прямой линии. Направим вдоль нее ось координаты x , отсчитываемой от какого-либо определенного начала координат. Тогда любое событие (например, распад радиоактивного атома), происшедшее в какой-либо точке этой прямой, может быть охарактеризовано двумя числами: пространственной координатой x той точки, где это событие случилось, и моментом времени t , когда оно произошло.

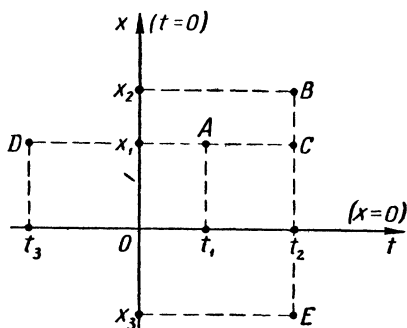


Рис. 6

Для наглядного изображения различных событий, которые произошли, происходят и будут происходить на данной прямой, проводим на плоскости две пересекающиеся оси пространственно - временной диаграммы (рис. 6): горизонтальную ось времени Ot и вертикальную ось координат Ox . Тогда произвольная точка A плоскости

будет изображать событие, случившееся в момент t_1 в точке с координатой x_1 . Другая точка B изобразит уже другое событие, происшедшее в момент t_2 в точке x_2 . На диаграмме сразу видно, что события B , C , E случились в один и тот же момент времени t_2 , но в различных точках пространства; это — *одновременные* события. События же A , C , D произошли в одной и той же точке прямой (с координатой x_1), но в разные моменты времени (событие A — раньше события C , но позже D); такие события мы будем в дальнейшем называть *одноместными* (случившимися в одном месте).

Все точки оси времени изображают различные события, которые произошли, происходят или произойдут в

одной и той же точке пространства с координатой $x=0$. Поэтому ось времени мы будем иначе характеризовать как «ось нулевого значения пространственной координаты x » (или, короче, «ось нулевого x »).

Аналогично любая точка оси Ox изображает какое-либо событие, случившееся где-либо на рассматриваемой прямой в начальный момент времени $t=0$. В связи с этим мы будем иногда называть ось x -ов «осью нулевого времени» (или «ось $t=0$ »).

Как известно, движение материальной точки всегда может быть изображено графиком, т. е. соответствующей линией на пространственно-временной диаграмме.

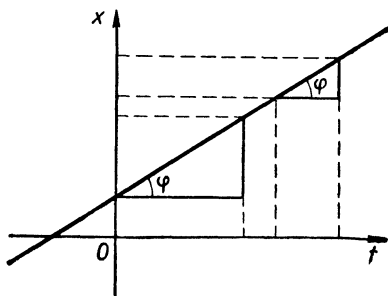


Рис. 7

Если угодно, любая точка этого графика изображает определенное событие — прохождение движущимся телом определенной точки рассматриваемой линии в определенный момент времени. Равномерное движение изображается прямолинейным графиком, причем тангенс угла наклона его к оси времени (рис. 7) определяет скорость движения:

$$v = \operatorname{tg} \varphi.$$

Разумеется, эта формула справедлива лишь при условии, что единица длины условно изображается на графике таким же отрезком, что и единица времени. В дальнейшем нам придется большей частью иметь дело с огромными скоростями (сравнимыми со скоростью света); условимся поэтому раз и навсегда, выражая промежутки времени в годах, измерять расстояния в световых годах, а выражая время в секундах, измерять расстояния в световых секундах*. Благодаря такому соглаше-

* *Световой год* и *световая секунда* — астрономические единицы длины, равные расстояниям, проходимым светом соответственно за один год или за одну секунду.

нию, скорость света всегда будет у нас численно равна единице:

$$c = 1 \frac{\text{св. сек}}{\text{сек}} = 1 \frac{\text{св. год}}{\text{год}},$$

а график движения фотона (т. е. мельчайшей частицы света) будет идти под углом 45° к обеим осям пространственно-временной диаграммы.

Впрочем, совсем не обязательно, чтобы эти оси образовывали между собой прямой угол; наряду с прямоугольной системой осей мы будем нередко использовать также и косоугольную (рис. 8). При этом значении t_A и x_A , соответствующие рассматриваемой точке A пространственно - временной диаграммы, находятся путем проведения параллелей к осям времени и координаты x .

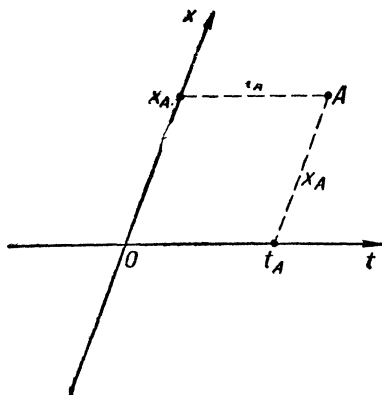


Рис. 8

На косоугольной диаграмме скорость движения не выражается уже, конечно, тангенсом угла наклона графика. Но движение со световой скоростью все равно изображается биссектрисой координатного угла, так как пройденные при этом расстояния (в световых секундах) численно равны промежуткам времени, выраженным в секундах.

Скорость v какого-нибудь тела в световых единицах определяется формулой

$$v = \frac{V}{c},$$

где V и c — скорость того же тела и скорость света, выраженные в любых, но непременно одинаковых единицах.

6. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ

Какие изменения претерпевает пространственно-временная диаграмма при переходе от одной инерциаль-

ной системы отсчета к другой? Допустим, что одна из них связана с ракетой «Альфа». Координаты точек, отсчитываемые от центра этой ракеты вдоль определенной оси, мы будем обозначать через x_α , подчеркивая индексом α тот факт, что речь идет о координате, измеренной в системе «Альфа». Пространственно-временная диаграмма для изображения событий, рассматриваемых в системе «Альфа», показана на рисунке 9.

Введем теперь в рассмотрение вторую ракету — «Бета», летящую (в системе «Альфа») вдоль оси x_α со скоростью v (которую мы будем считать положительной, если она направлена в сторону положительных значений оси x_α). С ракетой «Бета» мы вправе связать вторую инерциальную систему отсчета «Бета», причём ось x_β направим так, чтобы она при движении ракет все время скользила вдоль оси x_α . Таким образом, системы «Альфа» и «Бета» фактически имеют общую, но только различно размеченную ось x -ов. Если рассуждения ведутся в системе «Альфа», то точка $x_\alpha = 0$ неподвижна, а точка $x_\beta = 0$ движется вместе с ракетой «Бета» со скоростью v . В какой-то момент времени точки $x_\beta = 0$ и $x_\alpha = 0$ совпадут; вот от этого-то момента мы и условимся вести счет времени в обеих системах. Поэтому при $t=0$ любая материальная точка на оси x -ов имеет в обеих системах отсчета одинаковые координаты $x_\alpha = x_\beta$; в другие же моменты такого совпадения координат не будет.

На пространственно-временной диаграмме, построенной в системе «Альфа», движение ракеты «Бета» изображается прямой OM , образующей с осью t угол $\varphi = \arctg v$ (рис. 9). Возьмем какое-нибудь событие S , характеризуемое в системе «Альфа» координатой x_α и моментом времени t (рис. 9). Согласно представлениям обычной («классической») физики событие это в системе «Бета» произойдет в тот же самый момент t , но в точке с другой координатой x_β .

Следовательно, событие S случилось на расстоянии x_α от центра ракеты «Альфа» и на удалении x_β от центра ракеты «Бета» (имеются в виду положения обеих ракет в момент события). Поэтому координата x_α изображается на диаграмме отрезком AS , а координата x_β — отрезком BS . Иными словами, график OM движения ракеты «Бета» в системе «Альфа» играет на этой диаграмме роль оси нулевого значения координаты x_β , от кото-

рой и должен вестись отсчет этой координаты (вполне естественно, что ракета «Бета» в системе «Бета» всегда остается в начале координат $x_\beta = 0$).

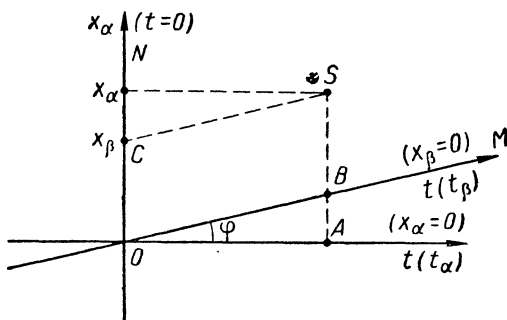


Рис. 9

Все эти соображения позволяют нам очень легко преобразовать пространственно-временную диаграмму, построенную в системе «Альфа», в пространственно-временную диаграмму, описывающую события в системе «Бета». Для этого достаточно провести новую ось нулевого x_β под углом $\varphi = \arctg v$ к оси нулевого x_α , оставив ось нулевого времени той же самой. Для определения координаты x_β и момента времени t события S на полученной таким образом пространственно-временной диаграмме следует провести параллели к ее осям:

$$SC \parallel OM; \quad SB \parallel ON.$$

Координата x_β изобразится отрезком $CO = SB$, а временная дата t — отрезком $OB = CS$.

Как видим, на одном и том же чертеже совмещаются две диаграммы, соответствующие рассмотрению событий в системах «Альфа» и «Бета». У каждой диаграммы свои оси, а точки, изображающие события, и графики, описывающие движения, — одни и те же. Пользуясь такой «совмещенной» диаграммой, можно по желанию «прочитать» на ней координату и время события как в системе «Альфа» (в прямоугольной системе координат), так и в системе «Бета» (в косоугольной системе координат). Масштаб длины по оси нулевого времени для обеих систем отсчета — один и тот же; масштабы же времени по осям нулевых значений x_α и x_β — различные, так как точки A и B

соответствуют одному и тому же моменту времени, а отрезки OA и OB имеют различную длину.

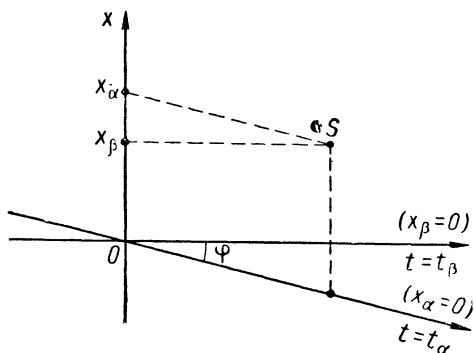


Рис. 10

Привычнее говорить не «ось нулевого значения времени», а ось x -ов, не «ось нулевого значения координаты x », а «ось t ». В случае совмещенной диаграммы ось $t=0$ является одновременно и осью x_α и осью x_β . А вот оси $x_\alpha=0$ и $x_\beta=0$ придется назвать соответственно осями t_α и t_β , хотя в классической физике момент события t от системы отсчета не зависит ($t_\alpha = t_\beta$). Значит, индексы α и β при переменной t нужны только для указания того, к какой системе отсчета относится данная ось пространственно-временной диаграммы.

Нас не должен смущать тот факт, что в системе отсчета «Бета» пространственно-временная диаграмма оказалась косоугольной, тогда как в системе «Альфа» она была прямоугольной. Никакого физического преимущества одной системы отсчета перед другой это не выражает. С таким же основанием мы могли бы принять за исходную систему «Бета» и построить для нее прямоугольную диаграмму (рис. 10); тогда диаграмма в системе «Альфа» получилась бы косоугольной. При этом ось t_α была бы повернута относительно оси t_β на тот же по абсолютной величине угол $\varphi = \arcsin v$, но не по часовой стрелке, а против часовой стрелки. Это объясняется тем, что скорость ракеты «Альфа» относительно ракеты «Бета» отрицательна и равна $-v$ (ведь в системе «Бета» ракета «Альфа» движется в направлении отрицательной полуоси x -ов).

Пространственно-временные диаграммы прекрасно иллюстрируют *относительность* таких понятий, как «в одном месте», «севернее», «южнее» (т. е. зависимость их от системы отсчета).

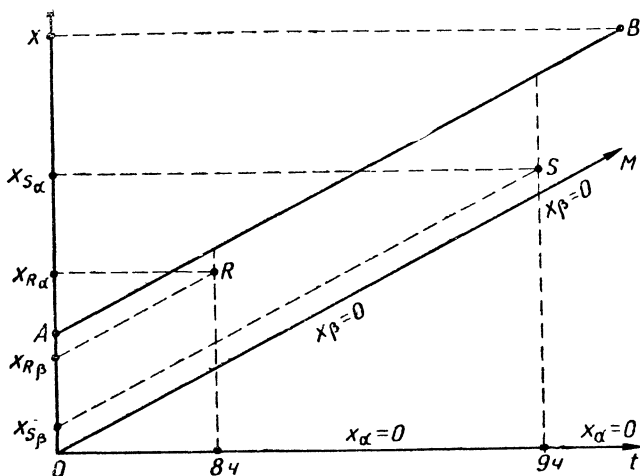


Рис. 11

Представим себе поезд, который идет, скажем, из Харькова в Москву (на нашей диаграмме, как и на географической карте, север вверх). Линия AB изображает движение локомотива, а линия OM — движение хвостового вагона (рис. 11). Линия OM может трактоваться также как ось нулевого значения координаты x_β системы отсчета «Бета», которая связана с поездом (начало координат ее — хвостовой вагон).

События A и B произошли в разных местах, если рассматривать их в системе «Земля» (она же система «Альфа»), и в одном и том же месте, если вести рассмотрение в системе «Поезд» (событие A произошло в Харькове, а B — в Москве, но оба они случились в кабине локомотива!). Графически это выражается тем, что оба события лежат на одной параллели к оси $x_\beta = 0$, но на разных параллелях к оси $x_\alpha = 0$, а такие параллели мы можем трактовать как «линии одноместных событий» в соответствующих системах отсчета. Про события A и B можно сказать, что они альфацентрически разноместны, а бета-

центрически одноместны. Одноместность событий оказывается поэтому понятием относительным. При этом одноместными может быть сделана любая пара несодновременных событий, если только связать систему отсчета с наблюдателем, который присутствовал как при первом, так и при втором событии (а это всегда возможно, так как в классической физике скорости передвижения ничем не ограничены и за промежуток времени между событиями можно успеть перелететь от места свершения первого из них ко второму).

Возможны и еще более любопытные проявления относительности одноместности. Скажем, пассажир поезда проснулся в восемь часов утра в первом вагоне поезда (событие R), а в девять часов утра позавтракал в вагоне-ресторане, находящемся в конце поезда (событие S). Какое из этих двух событий: R или S — случилось севернее?

Пространственно-временная диаграмма построена в системе «Земля», и на ней ясно видно, что событие R произошло южнее (скажем, оно произошло близ Тулы, а событие S — близ Серпухова). Но стоит перейти к рассмотрению тех же самых событий в системе «Поезд», как ситуация меняется. В системе «Поезд» ось времени идет иначе (прямая OM на рис. 11), значит, и места событий надо определять, проводя параллели к этой новой оси. Как видим, событие R произошло севернее (т. е. ближе к локомотиву), чем S .

Таким образом, понятие «южнее», «севернее» — как и понятие «в том же месте» — зависят от системы отсчета.

Вопросы и упражнения

1. Что такое тело отсчета? Система координат? Система отсчета?
2. Что такое система отсчета «Звезды»?
3. Покажите на примерах, что характер движения зависит от того, в какой системе отсчета его рассматривают.
4. Во всех ли системах отсчета выполняются законы Ньютона и другие законы физики? Поясните примерами.
5. Какие системы отсчета называют инерциальными?
6. В чем состоит преимущество инерциальных систем отсчета перед всеми прочими?
7. Почему нельзя признать «абсолютным» движение по отношению к инерциальной системе отсчета?
8. Инерциальна ли система отсчета «Земля»? Какими опытами это может быть подтверждено?
9. Укажите примеры неинерциальных систем отсчета.

10. Почему космический корабль не может служить инерциальной системой отсчета?

11. В чем состоит принцип относительности Галилея?

12. Сформулируйте хоть один закон физики в какой-нибудь конкретной неинерциальной системе отсчета.

13. Можно ли, не наблюдая движения самой системы отсчета, с помощью каких-либо приборов экспериментально отличить одну инерциальную систему от других? А одну неинерциальную систему от другой (тоже неинерциальной)?

14. Приведите пример использования принципа относительности Галилея для решения задачи по механике.

15. Утверждает ли принцип относительности Галилея, что во всех инерциальных системах отсчета одно и то же физическое явление выглядит одинаково? Поясните примерами.

16. При упругом соударении двух одинаковых шариков, движущихся навстречу друг другу, никакой передачи энергии от одного шарика к другому не происходит. А как описывается это же самое соударение в системе отсчета «Первый шарик»? Нет ли здесь противоречия с принципом относительности?

17. В системе отсчета «Земля» искусственный спутник движется по окружности. При этом центростремительное ускорение сообщается силой притяжения спутника Землей. Рассмотрите это же явление в системе отсчета «Спутник». Не обнаруживается ли при этом противоречие с принципом относительности?

18. Как строятся пространственно-временные диаграммы в прямоугольных и косоугольных системах координат?

19. Как определить скорость движения по его пространственно-временному графику?

20. В чем заключается преобразование Галилея?

21. Покажите на примере относительность понятия «в том же месте», а также и понятий «севернее», «южнее».

22. Почему расстояние от точки старта ракеты до точки ее финиша зависит от системы отсчета?

ПРОБЛЕМА ОДНОВРЕМЕННОСТИ**7. КОНФЛИКТ ДВУХ ПРИНЦИПОВ**

Согласно принципу относительности пулемет, установленный на равномерно движущемся самолете, должен сообщать пулям такую же начальную скорость относительно самолета, как и пулемет, установленный на Земле, относительно Земли. Из этого вытекает, что в системе «Земля» скорость самолета должна геометрически прибавляться к скорости пуль, вылетающих из дула пулемета, находящегося на его борту. Именно потому, что с точки зрения летчика равномерно-прямолинейное движение самолета никак не сказывается на работе авиационного пулемета, скорость пуль по отношению к Земле существенно зависит от движения пулемета.

Казалось бы, то же самое должно оставаться справедливым и применительно к фотонам света, испускаемого инерциально движущимся источником: по отношению к источнику скорость света должна всегда составлять 300 000 км/сек (закон физики, одинаково справедливый в любой инерциальной системе!), а по отношению к другим телам эта скорость должна быть увеличена или уменьшена на величину скорости самого источника.

Однако астрономические наблюдения над двойными звездами показали, что в действительности скорость света совершенно не зависит от движения источника. Допустим, что маленький, но яркий спутник какой-либо массивной звезды совершает полный оборот вокруг нее за один земной год, причем в январе движется по направлению к нам, а в июле — от нас (рис. 12). Допустим также, что свет от неподвижной звезды идет до нас ровно сто лет, а свет от ее движущегося спутника — месяца на два меньше или дольше, в зависимости от направления движения спутника (скорость которого то добавляется к скорости света, то вычитается из нее). Тогда в крайнем левом по-

ложении мы будем видеть спутник всегда в ноябре, а в крайнем правом — в сентябре, то есть одну половину своей орбиты спутник звезды описывал бы за два месяца, а другую же — за десять. Но такое нарушение законов Кеплера в действительности никогда не наблюдается. Следовательно, справедлив «принцип постоянства скорости

света»: скорость света совершенно не зависит от движения источника. В 1955 г. это было еще раз подтверждено также и прямыми опытами А. М. Бонч-Бруевича в земных условиях.

Независимость скорости света (а значит, и радиоволн) от движения источника противоречит принципу относительности.

Когда я вижу, что свет от быстро движущегося фонаря распространяется (относительно Земли) с одинаковой скоростью во все стороны, я должен заключить, что по отношению к самому фо-

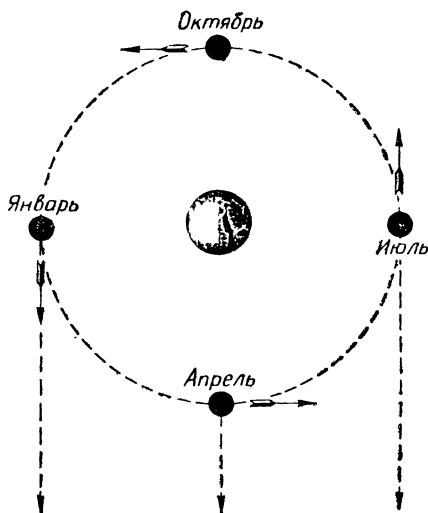


Рис. 12

нарю распространение света «вперед» происходит значительно медленнее, чем «назад». Но это как раз и означает, что законы распространения света в системе «Фонарь» иные, чем в системе «Земля»: ведь в системе «Земля» скорость распространения в вакууме света от неподвижного источника совсем не зависит от направления, а в системе «Фонарь» — зависит (т. е. не все направления в системе «Фонарь» между собой равноправны). Иными словами, в системе «Фонарь» — в отличие от системы «Земля» — различные направления в пространстве оказываются неравноправными.

Непримиримое противоречие между экспериментально установленной независимостью скорости света от движе-

ния источника и принципом относительности в классической физике обрисовывается особенно четко на следующем примере. Рассмотрим сферическую световую волну от электрической искры, проскакивающей между двумя инерциальными, но движущимися друг относительно друга ракетами α и β в тот самый момент, когда они поравнялись (рис. 13). В соответствии с независимостью скорости света от движения источника фронт этой волны через одну секунду после ее испускания будет представлять собой сферу радиуса 300 000 км с центром в той точке пространства, откуда испущена волна. Но на основе принципа относительности мы вправе считать неподвижной (и, значит, оставшейся в точке испускания волны) любую из упомянутых ракет. Однако через секунду ракеты будут уже находиться в различных точках пространства α' и β' , а сферический фронт волны не может иметь двух центров!

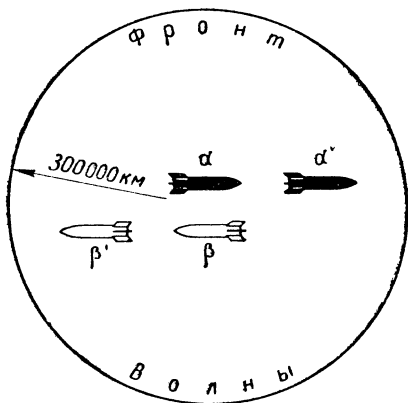


Рис. 13

Налицо беспримерное в истории физики противоречие между двумя экспериментально установленными законами: принципом относительности Галилея и принципом независимости скорости света от движения источника. Противоречие это было одной из составных частей того «кризиса», который пережила физика на рубеже XIX и XX веков.

Разумеется, никакие экспериментальные факты не могут вступать в конфликт друг с другом: противоречие может быть только между их неправильными истолкованиями. И все же, несмотря на огромные усилия, физикам-теоретикам в течение долгого времени не удавалось найти никаких ошибок в приведенных только что простых рассуждениях. Не увенчались успехом и все многочисленные попытки искуснейших экспериментаторов оп-

ровергнуть на опыте универсальную применимость хотя бы одного из двух противоречащих друг другу принципов. И только в 1905 году Альберту Эйнштейну — тогда еще никому не известному 26-летнему сотруднику патентного бюро в Берне — удалось найти гениальное решение этой проблемы, повлекшее за собой настоящий переворот в физике.

8. ЧТО ЗНАЧИТ «ОДНОВРЕМЕННО»!

В отличие от многих других, Эйнштейн не стал подвергать сомнению ни принцип относительности, ни принцип независимости скорости света от движения источника. Считая, что они надежно подтверждены опытом, Эйнштейн положил оба принципа в основу своей теории. Тем самым он взял на себя очень трудное обязательство доказать, что противоречие между этими принципами — лишь кажущееся.

Ему это удалось блестяще, так как он не остановился перед ломкой давно сложившихся и укоренившихся в сознании людей представлений, поскольку они логически не обоснованы и вступают в конфликт с новыми данными науки.

Даже теперь, когда нас ободряет бесспорный успех теории относительности, мы испытываем подчас робость и настороженность, когда следуем в своих рассуждениях за Эйнштейном. И хотя формально придраться в них не к чему, нам все же кажется, что они вот-вот приведут нас к какому-нибудь абсурду.

Но — удивительное дело! — чем глубже вникаешь в логическую ткань теории относительности, тем стройнее она становится. Казавшееся непонятным находит себе исчерпывающее объяснение, казавшееся несовместимым — прекрасно укладывается в единую последовательную систему. В конце концов приходишь к твердому убеждению, что это — логически безупречная и внутренне-вполне согласованная во всех своих частях теория. К тому же все ее удивительные предсказания блестяще оправдываются на опыте.

Не будем поэтому робеть перед самыми неожиданными предположениями и смело последуем за творцом теории относительности.

Итак, Эйнштейну надо было согласовать независимость скорости света от движения источника с принципом относительности. Поэтому он серьезно задумался над тем, что всем остальным казалось вполне ясным и вовсе не заслуживающим размышлений. Молодой ученый прежде всего спросил себя: что именно имеет в виду физик, когда он говорит, что два отдаленных друг от друга события произошли *одновременно*, т. е. в один и тот же момент времени? Что значит, например, утверждение: «данная световая волна достигла в такой-то момент всех точек определенной сферы»? А что, если понимание одновременности существенно зависит от системы отсчета — ведь тогда фронт волны, т. е. геометрическое место точек, достигаемых световой волной одновременно, в одной системе отсчета не обязательно совпадает с фронтом той же волны в другой системе, а две несовпадающие сферы могут, конечно, иметь и два разных центра.

Правда, обыденное представление об одновременности событий, используемое и в физике, кажется нам совершенно не зависящим от систем отсчета: какими бы системами отсчета собеседники не пользовались, они одинаково делят события мировой истории на прошлые, настоящие и будущие (а ведь «настоящее» для них — это все то, что совершается *одновременно* с беседой).

Но ведь и понятие «в одном и том же месте» даже применительно к событиям, разделенным большим промежутком времени, казалось когда-то абсолютным, не связанным с системой отсчета. В действительности же «вернуться на то же самое место» в системе «Поезд» означает совсем не то, что «вернуться на то же самое место» в системе «Земля»! Поэтому стремление Эйнштейна уточнить понятие «в один и тот же момент времени» применительно к удаленным друг от друга событиям заслуживает внимания.

Когда астроном одновременно замечает на небе вспышки двух переменных звезд, он знает, что в действительности эти события произошли не в один и тот же момент времени: ведь расстояние до одной звезды — десятки световых лет, а до другой — тысячи.

К сожалению, внесение необходимых поправок на время распространения требует досконального знания законов распространения света (а мы их еще только изучаем!) и, что еще важнее, расстояния до той точки, в

которой произошло событие. Но что считать «этой» точкой в момент *восприятия* вспышки света? Ответ на этот вопрос в различных системах отсчета будет неодинаковым. Соответственно различным будет и расстояние от места наблюдения до места вспышки, а значит, и вносимая наблюдателем поправка на время распространения.

Чем быстрее сигнал, тем меньше поправка на время распространения. В обычных земных условиях запаздыванием световых или радиосигналов пренебрегают. Но в случае космических расстояний или при точном наблюдении очень кратковременных процессов в лаборатории оно существенно. Возможно ли в дальнейшем изобретать все более и более быстрые сигналы или же скорость их чем-нибудь ограничена? Ответ на этот вопрос очень важен. Ведь если бы удалось когда-либо открыть мгновенно распространяющийся сигнал, установление одновременности событий даже в очень отдаленных друг от друга точках пространства не представляло бы затруднений и понятие одновременности было бы, конечно, одним и тем же во всех системах отсчета. Но тогда невозможно было бы совместить установленную на опыте справедливость двух принципов — относительности и независимости скорости света от движения источника. Поэтому Эйнштейн выдвинул гипотезу о принципиальной невозможности сигналов, которые распространялись бы от точки к точке быстрее, чем свет в вакууме.

Подобная гипотеза при всей ее неожиданности не противоречит фактам: с такими сигналами ни физики, ни инженеры действительно никогда не встречались. Создателю теории относительности достаточно было предположить, что они принципиально не могут быть найдены или изобретены также и в будущем. При этом необходимо понимать слово «сигнал» в самом широком смысле: если мы наблюдаем в точке *B* какое-то последствие явления, происшедшего в точке *A*, то это уже сигнал, пришедший из точки *A* в точку *B* (к примеру, в точке *A* нажата кнопка, а в точке *B* загорелась лампочка).

Мы скоро увидим, что гипотеза Эйнштейна о принципиальном отсутствии сигналов быстрее света не только снимает известное уже нам противоречие между двумя принципами, но и влечет за собой ряд важных и подчас чрезвычайно парадоксальных следствий. Поскольку, например, всякое движущееся тело (например, пуля) мог-

ло бы служить сигналом, все скорости движения тел также ограничиваются сверху световой скоростью, а это предполагает серьезный пересмотр законов механики Ньютона, допускавших неограниченный набор скорости под действием постоянной силы.

Однако сколь ни парадоксальны последствия гипотезы «необгоняемости света», они все были потом подтверждены опытом, что должно, разумеется, рассматриваться как самый сильный довод в ее пользу.

9. О ПРОШЛОМ, НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ

Раз нет и не может быть никаких сигналов быстрее света, постараемся найти способ определять одновременность событий посредством света. Мы можем вообразить, что в каждой точке пространства имеются точные часы, но все эти часы должны быть предварительно согласованы между собой, чтобы они, как говорят, шли *синфазно* *, т. е. чтобы в один и тот же момент времени стрелки всех часовых механизмов были в одинаковой «фазе» своего оборота, например показывали 12 часов.

Такое согласование часов возможно осуществить с помощью световых или радиосигналов, хотя они и не распространяются мгновенно. Для этой цели нужно послать сигнал как раз из середины прямой, соединяющей два часовых механизма: поскольку, согласно опыту, свет от любого источника распространяется с одинаковой скоростью во все стороны, поправка на время распространения исключается. Однако при этом очень важно, чтобы с момента излучения сигнала и до его приема часы почили (ведь если одни часы будут удаляться от источника, а другие — приближаться к нему, пройденные светом расстояния окажутся неодинаковыми). Но неподвижными часы могут быть только в определенной системе отсчета. Поэтому и предлагаемый способ согласования часов согласовывает их только в одной системе.

Таким образом, в каждой системе отсчета в понятие «согласованные часы», а значит и в понятие «одновре-

* В литературе часто употребляется в том же смысле термин «синхронно». Однако синхронизм предполагает лишь одинаковую скорость вращения, а здесь требуется также и совпадение по фазе.

менные события» вкладывается свой смысл. Одновременность, как и «однородность», событий оказывается понятием относительным, зависящим от системы отсчета. В этом коренное отличие релятивистской физики от классической.

Мы можем уже сейчас почувствовать, как сильно меняются представления о времени из-за одного только отсутствия сигналов быстрее света.

Историю вселенной мы вправе рассматривать как множество элементарных событий, которые уже произошли, происходят сейчас или еще только произойдут. Все эти события могут быть изображены соответствующими точками пространственно-временной диаграммы (рис. 14).

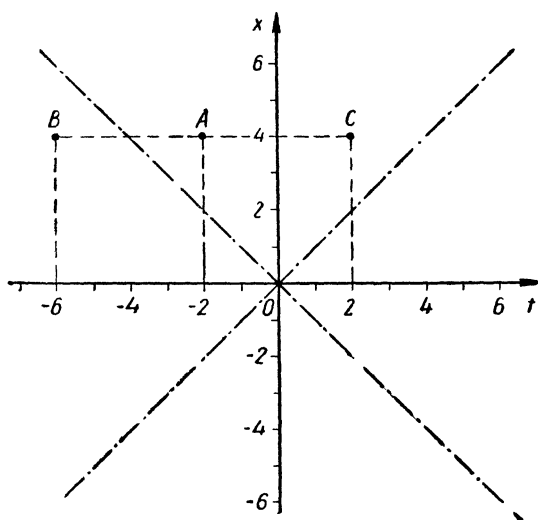


Рис 14

Начальное событие O — это как раз то, что происходит сейчас и здесь. По отношению к этому событию ось x -ов (она же «ось нулевого t ») разделяет на диаграмме все прочие события на два класса: события прошлые ($t < 0$), которые изображаются точками левее оси x -ов, и события будущие $t > 0$ (правее ее). Сама же ось нулевого t соответствует событиям настоящим, т. е. одновременным на-

чальному событию O . В классической физике все прошлые события характеризуются тем, что мы о них уже можем в принципе знать, но не можем на них никак повлиять. А о будущих событиях еще рано знать как о достоверных, свершившихся фактах, но на них еще не поздно влиять.

Гипотеза Эйнштейна о принципиальной невозможности сигнала быстрее света ломает все эти привычные представления коренным образом.

Пусть точка A (рис. 14) изображает событие, которое произошло близ звезды Проксима два года тому назад. Поскольку расстояние до Проксимы 4 световых года, никакое сообщение об этом событии к рассматриваемому моменту $t=0$ до нас еще не могло дойти. Хотя событие A уже и произошло, но мы еще принципиально не можем об этом знать. Даже если какой-нибудь астроном утверждает, что это событие (например, космическая катастрофа) должно уже было, по его расчетам, случиться на Проксиме два года назад, мы вправе смотреть на это утверждение лишь как на предвидение ученого, не более достоверное, чем всякое иное научное предсказание на несколько лет вперед. Для нас это событие еще как бы не наступило, поскольку мы не можем знать о нем, как о достоверном, свершившемся факте.

Такое событие естественно назвать *неконтролируемо прошлым*, так как фактическая проверка его для нас пока еще принципиально невозможна. Никаких последствий этого события, каким бы грандиозным оно ни было, мы в момент $t=0$ испытывать не можем. Неконтролируемое прошлое мы можем пока еще только предсказывать как будущее.

В противоположность этому о каждом событии, случившемся на Проксиме более четырех лет назад (например, B), мы можем уже иметь сведения; у нас уже могут наблюдаться его последствия. Такого рода события условимся называть *абсолютно прошлыми*. Легко понять, что область «абсолютно прошлого» на пространственно-временной диаграмме отделяется от области «неконтролируемого прошлого» биссектрисой координатного угла.

Перейдем теперь к будущим событиям. Допустим, что на космическом корабле, находящемся в районе Проксимы, запланировано провести через два года некоторый эксперимент C , причем эти планы давно уже нам извест-

ны. Но только что законченные расчеты ученых на Земле показали, что данный эксперимент опасен. Имеем ли мы хотя бы принципиальную возможность предостеречь космонавтов и предотвратить этот эксперимент? Конечно, нет; пытаться это сделать сейчас уже слишком поздно, так как планируемый эксперимент относится к области *неконтролируемого будущего*. Предотвратить его столь же невозможно, как и вчерашнее событие. Даже в принципе мы можем влиять только на те события, которые располагаются на графике правее биссектрисы координатного угла и называются *абсолютно будущими*.

Как видим, принципиальная невозможность сигналов быстрее света существенным образом меняет наши представления о времени. Если в классической физике естественно было делить все множество событий на «прошлое» и «будущее», отделенные друг от друга мгновенной прослойкой «настоящего» (рис. 15), то теперь мы должны различать абсолютно прошлое, абсолютно будущее и область неконтролируемых событий (рис. 16). Все со-

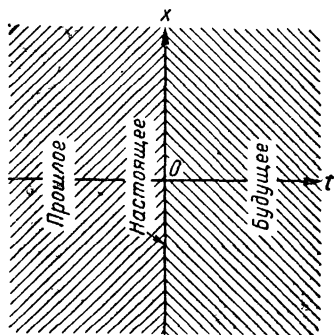


Рис. 15

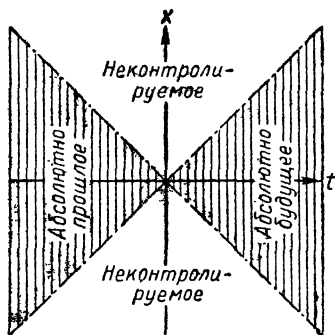


Рис. 16

бытия, о которых мы уже сейчас в принципе (по времени) можем знать, называются *абсолютно прошлыми*, а все события, на которые еще в принципе не поздно влиять, — *абсолютно будущими*. Все прочие события, о которых еще рано знать, но на которые уже поздно влиять, — *неконтролируемые*. Они принципиально не могут быть ни причинами, ни следствиями события *О*.

Различие же между *неконтролируемо прошлыми* и *неконтролируемо будущими* событиями несущественно: и те и другие для нас в данный момент как бы не существуют. Поэтому-то мы их объединяем в одну группу, причисляя туда также и настоящие события.

10. ОДНОВРЕМЕННОСТЬ ПО ЭЙНШТЕЙНУ

Поскольку нет мгновенно распространяющихся сигналов, одновременность событий должна устанавливаться с учетом времени их распространения. Как было уже показано, это приводит к зависимости понятия «одновременность» от системы отсчета. Ведь при согласовании двух часовых механизмов посредством сигнала, отправленного из середины, часы эти должны в течение всего времени его распространения покоиться, покой же — понятие относительное.

Изучим теперь указанную процедуру согласования часов детальнее, наглядно иллюстрируя все процессы пространственно-временными графиками.

Допустим, что в космосе вдоль одной прямой, но с разными скоростями летят по инерции два ракетных поезда, назовем их «Альфа» и «Бета» (рис. 17). Расстояния между ракетами одного и того же поезда сохраняются постоянными и равными между собой. Рассмотрение будем вести в инерциальной системе отсчета «Альфа», связанной с одноименным поездом.

Именно в этой системе отсчета построена пространственно-временная диаграмма, показанная на рисунке 17. На диаграмме видно, что ракеты «Альфа-1», «Альфа-2» и «Альфа-3» неподвижны, а «Бета-1», «Бета-2» и «Бета-3» равномерно движутся со скоростью

$$v = \text{tg } \varphi.$$

В момент $t=0$ одноименные ракеты обоих поездов поравнялись. В это мгновение ракеты «Альфа-2» и «Бета-2» излучают световой или радиосигнал, который будет использован для согласования часов на ракетах «Альфа-1» и «Альфа-3». Часы эти заранее установлены на нуль и заведены; задача состоит лишь в том, чтобы пустить их в ход в один и тот же момент времени; тогда в дальнейшем по

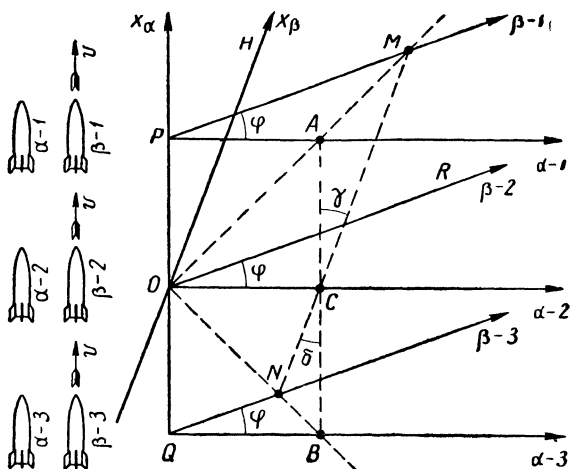


Рис. 17

показаниям этих часов можно будет безошибочно судить об одновременности или разновременности различных событий, происходящих на соответствующих ракетах.

Поскольку ракета «Альфа-2» находится ровно посередине между ракетами «Альфа-1» и «Альфа-3», а свет распространяется во все стороны с одинаковой скоростью, световой или радиосигнал с ракеты «Альфа-2» достигнет каждой из двух других ракет того же поезда в один и тот же момент времени.

Благодаря использованию световых единиц графики распространения световых сигналов в сторону ракет «Альфа-1» и «Альфа-3» (а также «Бета-1» и «Бета-3») образуют с осью t углы в 45° .

Точки A и B показывают, где и когда будут приняты световые сигналы ракетами «Альфа-1» и «Альфа-3». Эти же точки обозначают также и пуск часов на соответствующих ракетах. Как и следовало ожидать, точки A и B расположены на одной вертикали, т. е. соответствуют одному и тому же моменту времени t . После пуска часы ракет «Альфа-1» и «Альфа-3» будут идти синфазно.

Однако аналогичную процедуру согласования своих часов вправе осуществить также и пассажиры ракетного поезда «Бета». Благодаря независимости скорости света от движения источника световой сигнал ракеты «Бета-2»

будет распространяться совместно с рассмотренным уже сигналом ракеты «Альфа-2» (предполагается, что оба сигнала были посланы, когда ракеты поравнялись). Точки M и N обозначают прием этих сигналов ракетами «Бета-1» и «Бета-3» и запуск соответствующих часов.

Таким образом, с точки зрения пассажиров поезда «Альфа», часы ракеты «Бета-3», летящей навстречу световому сигналу, запущены не одновременно, а раньше часов ракеты «Бета-1», «убегающей» от него. Но в системе отсчета «Бета» все ракеты одноименного поезда считаются неподвижными и поэтому события M и N должны быть признаны одновременными (а соответствующие часы — синфазными). Как видим, на диаграмме, построенной в системе «Альфа», события M и N , одновременные в системе «Бета» располагаются не на одной вертикали, а на одной и той же наклонной прямой MN .

В системе отсчета «Бета» ракета «Бета-2» принимается за начало координат. Поэтому при описании движений в системе «Бета» прямая OR играет роль оси времени (именно от нее отсчитывается координата x). Аналогично этому прямая ON , параллельная MN , должна рассматриваться как ось x -ов системы «Бета» (одновременные события M и N располагаются на прямой, параллельной оси x -ов).

Следовательно, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой меняются не только координаты изучаемых событий (как это считалось в классической физике), но и соответствующие им моменты времени. Например, одно и то же событие S (рис. 18) в системе «Альфа» произошло в точке x_α и в момент t_α , в системе «Бета» — в точке x_β и в момент t_β . Угол φ между осями t_β и t_α определяется относительной скоростью систем отсчета:

$$\operatorname{tg} \varphi = v.$$

Нетрудно доказать, что такую же величину имеет и угол между осями x_β и x_α .

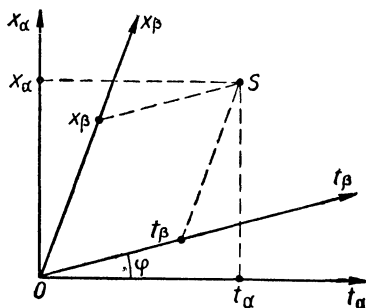


Рис. 18

Доказательство. Проведем из точки C (рис. 17), где пересекается ось t_α с прямой AB , прямые CM и CN (пока еще мы не уверены, что линия MCN — прямая, а не ломаная, но скоро убедимся в этом). Так как графики светового сигнала образуют с осями углы в 45° , отрезки

$$PA = AC = CB = BQ.$$

Треугольники AMP и AMC равны между собой по двум сторонам и углу между ними, так что

$$\angle \gamma = \angle \varphi.$$

Аналогично из равенства треугольников BNQ и BNC

$$\angle \delta = \angle \varphi.$$

Следовательно,

$$\angle \gamma = \angle \delta = \angle \varphi.$$

Тем самым доказано, что линия MCN — прямая и что ось t_β наклонена к оси t_α под тем же углом φ , что и ось x_β к оси x_α .

Необходимо обратить внимание на то, что оси диаграммы, поворачиваются *навстречу* друг другу: одна — по часовой стрелке, а другая — против часовой стрелки (ради большей ясности это еще раз показано на рис. 19). Напомним, что рисунки 18 и 19 построены нами в предположении, что новая система отсчета («Бета») движется относительно исходной («Альфа») в положительном направлении ($v > 0$). Как видим, в этом случае при переходе от старой системы отсчета к новой обе оси поворачиваются на угол φ *внутрь* первой четверти пространственно-временной диаграммы (здесь, как в тригонометрии, первая четверть соответствует положительным значениям t и x).

Нетрудно сообразить, что при движении новой системы отсчета (назовем ее хотя бы «Гамма») в отрицательном направлении поворот осей будет противоположным — наружу по отношению к первой четверти (рис. 20). Ведь ось t_γ — это не что иное, как график движения ракеты «Гамма» в системе «Альфа», а равномерное движение с отрицательной скоростью изображается прямой с отрицательным наклоном к оси времени.

В обоих случаях при переходе к новой системе отсчета перпендикулярность осей графика нарушается. Но это, разумеется, не означает какого-либо физического преимущества системы «Альфа»: просто она была взята в ка-

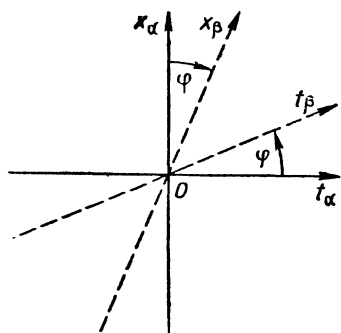


Рис. 19

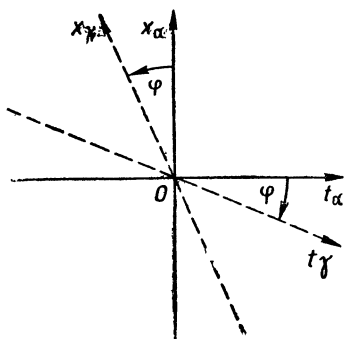


Рис. 20

честве исходной, и именно для нее начерчена была прямоугольная сетка. С таким же успехом мы могли бы начать свои рассуждения в системе «Бета», рисуя для нее взаимно перпендикулярные оси t_β и x_β , тогда график, показанный на рисунке 18, приобрел бы иной, но совершенно эквивалентный вид и система осей t_α , x_α оказалась бы косоугольной (постройте такой график самостоятельно). Иными словами, в прямоугольности осей пространственно-временной диаграммы для одной из инерциальных систем не больше физического смысла, чем в расположении северного полушария вверх глобуса.

11. ПРЕДШЕСТВУЮТ ЛИ ПРИЧИНЫ СЛЕДСТВИЯМ?

Отныне, говоря о событиях одновременных (как и о событиях одноместных), мы будем обязательно указывать, в какой именно системе отсчета считаются они одновременными.

В системе «Альфа» события A и B (рис. 21) являются одновременными (это видно из того, что они лежат на одной параллели к оси $t_\alpha = 0$, т. е. одинаково удалены от

начального момента времени). Но в системе «Бета» те же самые два события A и B отнюдь не одновременны: событие A произошло раньше, чем B (в этом легко убедиться, проведя параллели к оси $t_\beta = 0$). В системе «Бета» событию A одновременно не событие B , а собы-

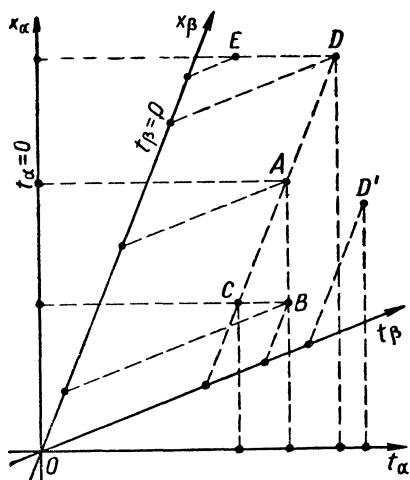


Рис 21.

тия C и D . В системе же «Альфа» событие C предшествует во времени событию A , а D следует за ним. Вот в этом-то как раз и состоит открытая Эйнштейном *относительность одновременности*, т. е. зависимость ее от системы отсчета.

Аналогично обстоит дело и с пространственным понятием «в одном месте»: события E и D одномоментны в системе «Альфа», но произошли в двух различных местах, если рассматривать их в системе «Бета». Однако

относительность одномоментности известна была и до Эйнштейна.

Наибольший «сюрприз» заключает в себе соотношение во времени между событиями D и B . «Проектируя» их соответствующими параллелями на оси t_α и t_β , приходим к выводу, что в системе «Альфа» событие B предшествует событию D , в системе же «Бета» — как раз наоборот! Не только одновременность, но даже и последовательность событий во времени (которое из них произошло раньше) оказывается относительной!

Хотя зависимость от системы отсчета таких временных соотношений, как «раньше — позже», отчасти напоминает знакомую уже нам относительность аналогичных пространственных соотношений «севернее — южнее» (стр. 31, рис. 11), она нас все-таки настораживает. А что, если одно из этих событий, например, B , — это выстрел охотника, событие же D — падение убитой этим выстрелом

птицы? В системе «Альфа» сначала раздался выстрел охотника, потом уже упала птица, в системе же «Бета» — как раз наоборот! О каком же равноправии инерциальных систем отсчета может идти речь, если в одной из них, как и должно быть, причины предшествуют своим следствиям, а в другой — пуля проникает в тело птицы и причиняет ей смерть раньше, чем вылетела из ружья?

Разумеется, никакая наука не может допустить, чтобы какие бы то ни было следствия предшествовали своим причинам. Нет этого и в теории относительности. Не нужно только забывать о тех поправках, которые внесла теория Эйнштейна в представления о прошлом и будущем (стр. 42 и рис. 16). По отношению к начальному событию O , которое происходит сейчас и здесь, все остальные события распадаются на пять групп: абсолютно прошлые, неконтролируемо прошлые, настоящие (т. е. одновременные событию O), неконтролируемо будущие и, наконец, абсолютно будущие. Ввиду относительности одновременности такое разделение имеет силу только в какой-нибудь определенной системе отсчета, например «Альфа».

Какие же изменения произойдут, если мы перейдем к системе «Бета»? Изменится прежде всего положение оси нулевого времени, отделяющей прошлое от будущего. Однако отклонение этой оси как в ту, так и в другую сторону не может превышать 45° , поэтому «ось настоящего» ($t=0$) ни для какой системы отсчета не может выйти за пределы области неконтролируемых событий системы «Альфа». Значит, при переходе к другой инерциальной системе отсчета меняется лишь разделение неконтролируемых событий на «прошлые» и «будущие», а все абсолютно прошлые и абсолютно будущие события остаются такими же в любой системе (так как биссектрисы координатных углов, т. е. графики световых сигналов, ограничивающие эти области, во всех системах отсчета одни и те же). Но причинами события O могут быть только события абсолютно прошлые, а его следствиями — события абсолютно будущие. Такими же они останутся и после перехода к любой другой инерциальной системе, и, значит, причина непременно будет предшествовать своему следствию.

Что же касается любого неконтролируемого события (например, M), то, действительно, всегда найдется и такая система отсчета, в которой оно одновременно собы-

тию O (ось времени такой системы проходит через точки OM), и множество таких систем, в которых событие M предшествует событию O , и, наконец, другое множество систем, в которых M следует за O . Но неконтролируемые события тем-то и характерны, что они не могут быть для события O ни его причинами, ни его следствиями. Поэтому относительность понятий «раньше» и «позже» для неконтролируемых событий никогда не может вступить в конфликт с законом причинности (этим только еще раз подчеркивается физическая бессодержательность и условность разделения неконтролируемых событий на прошлые и будущие). В рассмотренном нами примере (рис. 21) события B и D не могли означать выстрел охотника и падение подбитой им птицы, так как при этом скорость полета пули, изображаемая графически отрезком BD , превышала бы световую (наклон этого отрезка более 45°). При меньших же углах наклона, соответствующих досветовой скорости (как в случае отрезка BD'), событие B (выстрел охотника) в *обеих* системах отсчета предшествует событию D' (падение птицы).

Ошибочно было бы утверждать, что теория Эйнштейна провозглашает одну только относительность всех понятий. Установив относительность одновременности, она ограничила ее область неконтролируемых событий, утвердив наряду с этим представление об *абсолютно* прошлом и *абсолютно* будущем, совершенно не зависящее от выбора системы отсчета.

А в область пространственных отношений теория относительности Эйнштейна внесла даже некоторые абсолютные представления, которые совершенно чужды были классической механике. До Эйнштейна считалось само собой разумеющимся, что надлежащим выбором системы отсчета можно добиться того, чтобы любые два события (лишь бы они были неодновременны) оказались случившимися в одной точке — всегда можно в принципе «поприсутствовать» при каждом из них (стр. 31). Но в теории относительности, где быстрота передвижения ограничена скоростью света, это уже не всегда возможно (необходимо, чтобы указанные события были разделены не слишком большим расстоянием и достаточно большим промежутком времени — расстояние между ними в световых секундах должно быть меньше, чем интервал времени в секундах).

1. Докажите, опираясь на принцип относительности Галилея, что скорость движения пулемета обязательно добавляется к скорости выстреливаемой им пули.

2. Прибавляется ли скорость движения самолета к скорости распространения звука, издаваемого его двигателем? Как это согласуется с принципом относительности?

3. Каким образом наблюдения двойных звезд убеждают в независимости скорости света от движения его источника?

4. Пусть в системе отсчета «Земля» свет от движущегося фонаря распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Как при этом распространяется свет в системе отсчета «Фонарь»? Совместимо ли это с принципом относительности?

5. В начальный момент, когда ракеты «Альфа» и «Бета», движущиеся навстречу друг другу, находятся в точке O , на них вспыхивают разноцветные фонари. Нарисуйте расположение ракет и фронтов световых волн через 1 секунду, рассматривая явления а) в системе «Альфа»; б) в системе «Бета»; в) в «симметрирующей» системе «Гамма», относительно которой ракеты обладают одинаковыми по модулю скоростями. Во всех случаях исходите из того, что скорость света не зависит от движения источника.

6. Докажите, что рисунки, являющиеся ответами на предыдущий вопрос, противоречат принципу относительности.

7. Повторите построения, о которых шла речь в вопросе 5, но исходя уже не из независимости скорости света от движения источника а из справедливости принципа относительности.

8. Обнаружьте на рисунках, выполненных в соответствии с предыдущим вопросом, зависимость скорости света от движения источника.

9. Подытоживая ответы на вопросы 5—8, покажите несовместимость принципа независимости скорости света от движения источника с принципом относительности.

10. В каких случаях обыденное представление об одновременности оказывается недостаточным?

11. Почему обыденное представление об одновременности удаленных друг от друга событий не может быть простейшим образом уточнено внесением поправки на скорость распространения сигнала?

12. Как можно осуществить согласование часов с помощью сигналов, распространяющихся с конечной скоростью? Какое при этом делается молчаливое предположение о свойствах пространства?

13. Почему при согласовании часов с помощью световых или радиосигналов нужно потребовать, чтобы согласуемые часы покоились? Имеется ли необходимость в предположении о том, что покоится и источник сигналов?

14. Почему при согласовании часов посредством световых сигналов понятие одновременности оказывается относительным и что это означает?

15. Покажите на пространственно-временной диаграмме «прош-лое», «настоящее» и «будущее» в соответствии с представлениями классической физики.

16. В чем состоит различие между «абсолютно прошлым» и «неконтролируемым прошлым»?

17. Покажите на пространственно-временной диаграмме границу между «абсолютно прошлым» и «неконтролируемым прошлым».

18. Чем отличается «абсолютно будущее» от «неконтролируемого будущего» и где проходит на пространственно-временной диаграмме граница между ними?

19. В чем сходство между «неконтролируемым прошлым», «настоящим» и «неконтролируемым будущим»? Какое общее название может быть дано этим трем областям, вместе взятым, и чем они принципиально отличаются от «абсолютно прошлого» и «абсолютно будущего»?

20. Какие части пространственно-временной диаграммы называются «область причин» и «область следствий»? О причинах и следствиях какого события идет здесь речь?

21. На какие три области естественнее всего разделять историю с точки зрения релятивистской физики?

22. Поясните с помощью пространственно-временной диаграммы процесс согласования часов по Эйнштейну и вытекающую из этого относительность одновременности.

23. Изобразите тот же процесс в системе отсчета, связанной с другим ракетным поездом.

24. Докажите равенство (по модулю) углов поворота осей пространственно-временной диаграммы при переходе к другой инерциальной системе отсчета.

25. Покажите на диаграмме, как меняются координата и момент события при смене системы отсчета.

26. Отметьте на диаграмме:

а) события A и B , одновременные в системе «Альфа»;

б) события M и N , одновременные в системе «Бета»;

в) события P и Q , одномоментные в системе «Альфа»;

г) события R и S , одномоментные в системе «Бета»

Что можно сказать про каждую пару событий в другой системе отсчета?

27. Нанесите на диаграмму два события C и D , если известно, что в системе «Альфа» событие C произошло ближе к началу координат, чем D , в системе же «Бета» — как раз наоборот.

28. Укажите на диаграмме два события Z и W таких, что при смене системы отсчета последовательность их во времени меняется на противоположную.

29. Как согласуется возможность событий, описанных в предыдущем вопросе, с принципом причинности?

30. Проведите на рис. 14 оси для одной из систем отсчета, в которых событие C предшествует O

31. Проиллюстрируйте диаграммами последний абзац стр. 50.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕМАТИКА**12. ДВИЖУЩИЕСЯ ЧАСЫ**

В классической физике переход к новой инерциальной системе отсчета существенно изменял представление об одноместности, но на понятии одновременности никак не сказывался. Это выражалось графически соответствующим поворотом только одной из осей пространственно-временной диаграммы (рис. 9). В теории же Эйнштейна при изменении системы отсчета меняется понимание как одноместности, так и одновременности событий. Графически это соответствует знакомому уже нам повороту обеих осей пространственно-временной диаграммы. Осуществив такой поворот осей, мы сможем «прочитать» в новой системе отсчета тот график, который был (в старых осях) построен при рассмотрении явлений в исходной системе. Предварительно нужно, однако, выяснить, в каких масштабах получатся времена и координаты, отсчитываемые по новым осям пространственно-временной диаграммы (в классической физике, как вы помните, масштаб времени изменялся, масштаб же длины оставался прежним). Обсуждая такой, казалось бы, второстепенный вопрос и опираясь на принцип относительности, мы сумеем (вслед за Эйнштейном) теоретически предсказать два новых явления, сама мысль о возможности которых была совершенно чужда классической физике.

Рассмотрим две ракеты: «Альфа» и «Бета», которые в некоторой инерциальной системе отсчета «Гамма» летят навстречу друг другу с одинаковыми по модулю, но противоположно направленными скоростями v_0 и $-v_0$ (рис. 22). Пространственно-временная диаграмма, представленная на этом рисунке, построена в системе отсчета «Гамма». Но на нее легко нанести также и оси, соответствующие системам «Альфа» и «Бета»: как мы уже хоро-

шо знаем, оси t_α и t_β совпадают с графиками движения одноименных ракет, а оси x_α и x_β повернуты относительно оси x_γ навстречу соответствующим осям времени; при

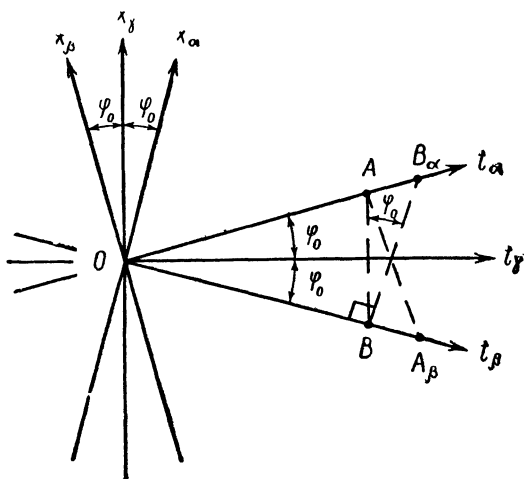


Рис. 22

этом все четыре угла между осями (обозначенные через φ_0) одинаковы по абсолютной величине и равны

$$\varphi_0 = \pm \arctg v_0.$$

Напомним, что мы пока еще ничего не знаем о том, как меняются (и меняются ли вообще) масштабы длины (или времени) на осях диаграммы при переходе к другой системе отсчета. Однако для систем «Альфа» и «Бета» они должны быть во всяком случае одинаковыми (хотя, может быть, и иными, чем для системы отсчета «Гамма») ведь в системе «Гамма», с позиций которой произведено все построение, ракеты «Альфа» и «Бета» отличаются друг от друга только направлениями скоростей движения, а в силу симметрии пространства все направления в нем совершенно равноправны. Кроме того, для любой инерциальной системы отсчета ее масштаб длины (в световых секундах) на оси x не может отличаться от ее же масштаба времени (в секундах) на оси t : иначе график распространения света не изображался бы биссектрисой координатного угла.

Представим себе, что в ракетах «Альфа» и «Бета» имеется по одинаковому «будильнику» α и β (в роли «будильника» может, конечно, выступать всякий физический объект, в котором совершается тот или иной процесс определенной длительности — наполнение сосуда газом, разряд конденсатора, распад радиоактивного препарата и т. д.). Оба «будильника» пущены в тот момент, когда ракеты поравнялись (событие O на диаграмме рис. 22 — именно время и место этой встречи принято за начальное событие в системе отсчета «Гамма»).

Допустим, что устройство будильников таково, что они зазвонят ровно через час после их пуска. Изобразим на диаграмме точкой A звон часов α . Какой же тогда точкой изобразится на ней звон часов β ? Разумеется, эта точка — обозначим ее через B — лежит где-то на графике движения ракеты «Бета», т. е. на оси t_β , но где именно?

Ответ очень прост: будильники одинаковы, заведены одновременно, ракеты движутся в системе отсчета «Гамма» совершенно симметрично (с одинаковыми по модулю скоростями) — следовательно, и звонить они должны, с точки зрения гаммацентриста, в один и тот же момент времени, т. е. прямая AB параллельна вертикальной оси x_γ .

Но посмотрим теперь на все это с позиций альфацентриста. В системе отсчета «Альфа» линия OA является осью времени t_α , а ось координаты x_α наклонена к вертикали под таким же углом $\varphi_0 = \arctg v_0$, что и ось t_α к оси t_γ , но встречным вращением (рис. 22). Проведя через событие B линию одновременности BB_α , параллельную оси x_α , обнаруживаем, что в системе «Альфа» событие B произошло позже, чем A ! Выходит, что, начав в один и тот же момент, часы β закончили отсчитывать свой час позже, чем часы α !

Но ведь будильники-то, по условию, совершенно одинаковы! За счет чего же можно отнести различие их хода? Очевидно, только за счет того, что в системе отсчета «Альфа» один из них (а именно, α) покоится, а другой (β) движется. Как видим, *движение часов замедляет их ход*.

В системе «Бета» все это выглядит по-иному: часы β покоятся, а α движутся. Однако проведем линию одновременности в смысле системы отсчета «Бета», т. е. параллельно оси x_β (которая повернута относительно вертикали против часовой стрелки — навстречу оси t_β). Тогда мы

придем к выводу, что и в системе «Бета» звон неподвижных (относительно нее) часов β (событие B) предшествует звону движущихся часов α (событие A).

Обратите еще раз внимание: в системе «Альфа» событие A предшествует событию B , в системе же «Бета» — как раз наоборот. И все же в каждой из этих систем отсчета покоящиеся (в ней!) часы звонят раньше движущихся (ведь и понятие покоя меняется при смене систем отсчета). Тем самым, несмотря на различие в описании явлений, закон физики в обеих инерциальных системах отсчета один и тот же: *движение всегда замедляет ход часов* (т. е. движущиеся часы отстают от неподвижных).

Поскольку природа и устройство часов совершенно произвольны, правильнее говорить о более медленном протекании *любых процессов* в движущихся телах по сравнению с покоящимися. Нередко также говорят об уменьшении «темпа времени».

Пространственно-временная диаграмма позволяет определить, *во сколько раз* замедляется ход времени в зависимости от скорости движения. Допустим, что в K раз. Тогда на рис. 22 отрезки OA и OB изображают промежутки времени по 1 часу

$$OA = OB = 1$$

(масштабы времени на осях t_α и t_β одинаковы, так как обе системы отсчета движутся относительно системы «Гамма» с одинаковыми по модулю скоростями). Отрезок OB_α (как и равный ему отрезок OA_β) соответствует промежутку времени K часов. Отрезок BB_α символизирует путь, пройденный ракетой «Бета» в системе «Альфа» за K часов, причем масштаб расстояний (в световых часах) такой же, как и масштаб времени (в часах). Если обозначить через v абсолютную величину скорости ракеты «Бета» по отношению к ракете «Альфа» (или ракеты «Альфа» по отношению к ракете «Бета»), то

$$BB_\alpha = vK$$

(как расстояние, пройденное ракетой «Бета» за K часов).

Треугольник $OB_\alpha B$ — прямоугольный, так как сторона BB_α наклонена к вертикали под тем же углом φ_0 , что и сторона OB — к горизонтали. По теореме Пифагора

$$K^2 = 1^2 + (vK)^2,$$

откуда

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

Во столько именно раз медленнее покоящихся идут такие же движущиеся часы при скорости их движения v (выраженной в долях от световой скорости). Величина K играет большую роль в теории относительности и называется *релятивистским коэффициентом*.

Но не противоречит ли принципу относительности зависимость хода будильника от скорости его равномерно-прямолинейного движения? Казалось бы, это идет вразрез с принципиальной невозможностью обнаружить инерциальное движение кабины какими-либо физическими опытами внутри нее. Не послужит ли замедленный ход будильника показателем того, что ракета движется, т. е. индикатором абсолютной скорости?

Заметить, что будильник стал отставать, можно только путем сравнения его с какими-нибудь другими часами, если только понимать слово «часы» в достаточно широком смысле — как любой физический или иной процесс определенной длительности. Даже определяя величину промежутка времени по субъективным ощущениям, фактически сравнивают его с длительностями различных физиологических и психологических процессов. Но если все без исключения явления на ракете замедлились в одинаковое число раз, этого не обнаружишь. Как заметить, например, что вращение мотора замедлилось в несколько раз, если и секунды стали во столько же раз длиннее? Ведь число оборотов в секунду осталось тем же самым!

По этой причине пассажир даже фантастически быстрой ракеты совершенно не ощутит никакого изменения темпа времени. В полном согласии с принципом относительности он будет чувствовать себя точно так же, как если бы ракета покоилась. Более того, наблюдая Землю, он обнаружит, что именно там часы и процессы идут медленнее (здесь сказывается уже также и специфическое для каждой системы отсчета понимание одновременности).

Как видим, очень важным условием соблюдения принципа относительности является замедление при движении всех, *решительно всех*, процессов в одинаковое число раз. Из этого правила не может быть ни одного исключения, иначе согласованность сопутствующих друг другу про-

цессов нарушалась бы, что резко выделило бы данную инерциальную систему отсчета из всех других. Вот почему, говоря о «будильнике» мы могли совершенно не касаться каких-либо деталей его устройства.

Подчеркиваем еще раз, что каждый физик, какой бы инерциальной системой отсчета он ни пользовался, может с полным основанием считать, что покоящиеся в его системе часы идут медленнее. При этом он не вступает ни в какое противоречие с коллегой, который предпочитает пользоваться иной инерциальной системой отсчета и потому признает покоящимися, а значит и более «медлительными», другие часы — как раз те, которые первый физик рассматривал как движущиеся и более «торопливые».

Очень важно уразуметь, что, по Эйнштейну, дела в природе обстоят совсем не так, как шутливо описано у Шолом-Алейхема:

«Откуда известно, Лейбуш, что мои часы спешат на полторы минуты? А может наоборот, может, Ваши часы отстают на полторы минуты? Чего только не бывает!»

Нохум — отец Шолом-Алейхема, которому приписываются эти слова, — не мог даже подозревать, что в природе при быстрых движениях бывает еще курьезнее: в системе «Нохум» отстают часы Лейбуша, а в системе «Лейбуш» настолько же отстают (да-да, отнюдь не спешат, а именно тоже отстают) часы Нохума!

Продолжительность какого-либо процесса, измеренная в системе отсчета, где весь этот процесс разыгрывается в одном и том же месте, называется его собственной длительностью t_0 . Продолжительность того же процесса в любой другой системе отсчета

$$t = K t_0,$$

где K — известный уже нам коэффициент.

На рис. 23 сопоставляются промежутки времени, измеряемые в системах отсчета «Альфа» и «Бета» (на этот раз, в отличие от рис. 22, диаграмма начерчена с позиций бетацентриста). Как видим, отрезок OA , изображающий одну секунду по движущимся часам «Альфа», не короче, а длиннее отрезка OK , который символизирует K секунд по неподвижным часам «Бета» (а ведь $K > 1$). Это свидетельствует о неодинаковости масштабов времени на осях t_α и t_β (желающие могут даже самостоятельно подсчитать, во сколько раз отличаются эти масштабы).

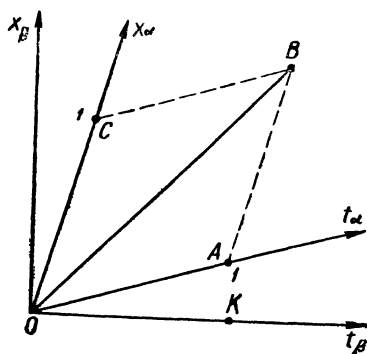


Рис. 23

Представляет интерес также и соотношение масштабов на осях x_α и x_β . Установить его нам поможет биссектриса OB — график распространения светового сигнала. Так как скорость света равняется единице во всех инерциальных системах, в том числе и в системе «Альфа», то следовательно, параллелограмм $OABC$ на рис. 23 есть ромб:

$$OC = OA = 1.$$

Это значит, что масштаб на оси x_α обязательно такой же самый, как и на оси t_α . Указанное обстоятельство позволит нам в дальнейшем при определении скоростей в различных инерциальных системах отсчета не обращать никакого внимания на различие масштабов соответствующих диаграмм (различие в масштабах времени в точности компенсируется различием в масштабах расстояний).

13. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Коэффициент

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}}$$

показывающий, во сколько раз замедляется темп времени при движении со скоростью v (выраженной в долях от световой), играет в теории относительности исключительную роль. Он фигурирует во многих формулах, определяя величину большинства релятивистских эффектов, т. е. наиболее резких отличий теории относительности от клас-

сической физики. Именно поэтому величину K мы называли *релятивистским коэффициентом*.

Как видно из формулы

$$K = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}},$$

при $v < 1$ (т. е. при скоростях меньше световой) релятивистский коэффициент K — число вещественное (подкоренное выражение положительно). При этом он всегда превышает единицу, равняясь ей только при $v=0$. Значения же v , превышающие единицу, в теории относительно-сти невозможны, так как это означало бы движение системы отсчета быстрее света.

Характер зависимости релятивистского коэффициента от скорости движения нагляднее всего выявляется на следующей номограмме* (рис. 24). Здесь ACN — четверть окружности единичного радиуса с центром O ; NP — касательная к этой окружности в точке N ; OC — произвольный радиус, продолженный до пересечения с касательной в точке M ; CB — перпендикуляр к радиусу ON (не правда ли, все это — знакомый из тригонометрии чертеж, где $\frac{CB}{OC} = \frac{CB}{1}$ — синус, а $\frac{MN}{ON} = \frac{MN}{1}$ — тангенс угла φ). Не-

трудно доказать из чисто геометрических соображений, что если отрезок CB равняется скорости v , то отрезок OM изображает соответствующее этой скорости значение релятивистского коэффициента K .

Доказательство (при первом чтении книги его можно без всякого ущерба для дальнейшего пропустить). В прямоугольном треугольнике OCB гипотенуза $OC=1$, катет $CB=v$, а потому катет

$$OB = \sqrt{1-v^2}.$$

Треугольник OMN подобен

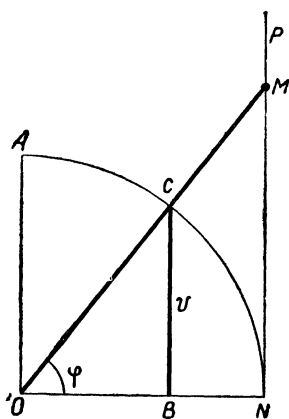


Рис. 24

* Номограммой называется чертеж, позволяющий определять значения искомых величин геометрическим путем.

треугольнику OCB . Следовательно,

$$\frac{OM}{OC} = \frac{ON}{OB},$$

или

$$\frac{OM}{1} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}},$$

откуда

$$OM = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} = K,$$

где K — релятивистский коэффициент. А это и требовалось доказать.

При малых значениях v (по сравнению со световой скоростью, принимаемой за единицу) незначителен и угол ϕ , так что коэффициент K очень слабо отличается от единицы (рис. 25). В этом случае релятивистские эффекты практически незаметны и с поразительными выводами теории относительности можно совсем не считаться, всецело полагаясь на формулы и законы классической физики (разве можно, например, обнаружить замедление процессов в 1,000 000 000 001 раза?!).

Но по мере дальнейшего увеличения v релятивистский коэффициент $K = OM_1; OM_2; OM_3; OM_4; \dots$ растет все быстрее и быстрее (рис. 25). Когда скорость движения приближается к световой ($v \rightarrow 1$), релятивистский коэффициент возрастает неограниченно ($K \rightarrow \infty$); при этом даже ничтожное повышение скорости v вызывает резкий прирост коэффициента K . Как видим, при околосветовых скоростях движения релятивистские эффекты сказываются весьма существенно; в таких условиях законы классической физики уже неприменимы и должны быть заменены релятивистскими законами теории относительности.

Приходится ли встречаться на практике с такими «релятивистскими» скоростями, которые настолько близки к световой, что необходимо уже считаться с эффектами теории относительности? В таблице на стр. 159 приведены значения коэффициента K для различных движений, наблюдаемых в природе или современной технике. Хотя земной шар движется по своей орбите вокруг Солнца раз в десять быстрее реактивного самолета и раза в два-три быстрее космической ракеты, движение это с точки зре-

ния теории относительности еще настолько медленно, что релятивистский коэффициент K практически не отличим от единицы и механика Ньютона, как и вся классическая физика, полностью остается в силе. Бесполезно поэтому

пытаться обнаружить релятивистские эффекты, путешествуя на каком-нибудь из современных нам видов транспорта.

Зато современная техника исследования атомного ядра научилась разгонять электроны, протоны и другие элементарные частицы до таких скоростей, при которых коэффициент K достигает десятков, сотен и даже тысяч. О применении формул механики Ньютона к подобным стремительно мчащимся частицам не может быть даже и речи — они движутся по законам релятивистской механики, основанной на теории относительности.

При $v > 1$, т. е. если бы одна система отсчета двигалась относительно другой быстрее света, коэффициент K стал бы мнимым; однако, как мы уже подчеркивали, в основе теории Эйнштейна лежит представление о том, что никакой материальный объект при своем движении не может обогнать свет (ведь этот движущийся объект мог бы служить сигналом!).

При $v = 1$ релятивистский коэффициент теряет смысл (как говорят физики, обращается в бесконечность), так как его знаменатель становится равным нулю.

Но двигаться со световой скоростью $v = 1$ могут только фотоны (частицы света), да, может быть, еще некоторые элементарные частицы с особыми свойствами (например, нейтрино). Из подобных частиц даже в принципе невоз-

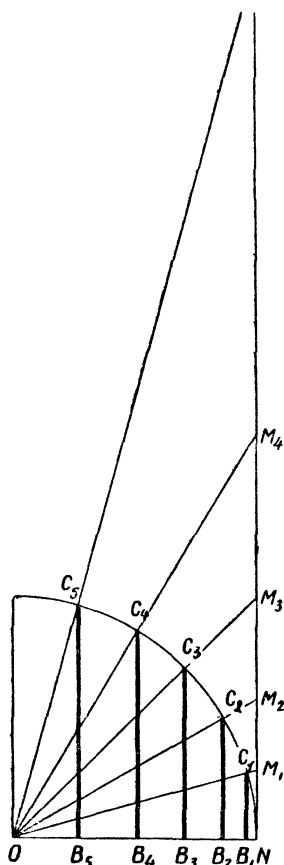


Рис. 25

можно соорудить какие-либо движущиеся «часы» — ни в отдельной частице такого рода, ни в их сколь угодно сложной комбинации никакие физические процессы во времени не протекают (это как раз и означает замедление явлений в бесконечное число раз, т. е. их полную остановку). Частица, мчащаяся с быстротой света, может только на что-нибудь «натолкнуться», и тогда она сразу же прекращает свое существование, превращаясь во что-либо другое.

Об этом сложном вопросе мы найдем еще случай поговорить подробнее; сейчас же только отметим, что с фотоном (или другой подобной ему частицей) нельзя связать систему отсчета хотя бы уже потому, что в такой системе принципиально не может быть ни покоящихся часов, ни покоящихся масштабов длины. Тем самым отпадает часто возникающее недоумение по поводу слияния обеих осей пространственно-временной диаграммы при $v=1$.

14. СОКРАЩЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ

Релятивистский коэффициент K характеризует количественно не только замедление процессов, но также и изменение размеров тел при движении их с околосветовой скоростью. Как мы сейчас увидим, теория относительности приводит к выводу, что продольные размеры любого тела в состоянии быстрого движения в K раз меньше, чем в состоянии покоя (продольным называется размер в направлении движения). Что же касается поперечных размеров, то на них даже самое быстрое движение никак не сказывается.

Но как можно измерить, скажем, длину ракеты, когда она быстро движется? Если пассажир ракеты станет измерять ее, прикладывая метр самым обычным способом, то он, конечно, никакого изменения длины не обнаружит. Ведь метр, движущийся вместе с ракетой, сокра-

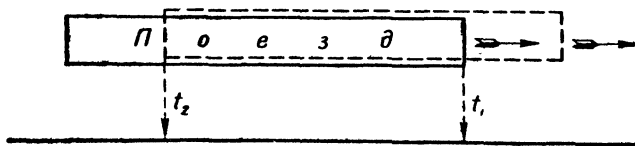


Рис. 26

щается в длине в такое же число раз, как и она сама, и если неподвижный метр укладывался вдоль неподвижной ракеты 15 раз, то и более короткий движущийся метр уложится вдоль более короткой движущейся ракеты тоже 15 раз. В полном соответствии с лежащим в основе теории Эйнштейна принципом относительности любые физические опыты и измерения внутри кабины дают одинаковый результат независимо от того, движется она или покоится (лишь бы она была инерциальной!).

Таким образом, изменение продольных размеров тела, обусловленное его движением, может быть обнаружено только путем непосредственного сравнения движущегося тела с неподвижным. Под длиной движущегося тела естественно понимать расстояние между *одновременными* положениями его концов. Например, для определения длины мчащегося поезда нужно отметить в *один и тот же момент времени* положение локомотива и хвостового вагона, а затем измерить покоящимся метром расстояние между отметками. Одновременность обеих отметок имеет принципиальное значение: если, например, положение локомотива будет «засечено» раньше, чем положение хвостового вагона, мы получим преуменьшенное представление о длине поезда (рис. 26).

Поскольку в каждой системе отсчета понятие об одновременности свое, различной будет и процедура измерения размеров движущегося тела. Удобнее всего в этом разобраться на пространственно-временной диаграмме.

Пусть в некоторой инерциальной системе «Гамма» два совершенно одинаковых стержня α и β быстро движутся навстречу друг другу с равными по модулю скоростями, как это показано на рис. 27. На этой диаграмме OA и NB — графики движения начала и конца стержня α , OB и MA — начала и конца стержня β . Событие A — это совпадение начала стержня α с концом стержня β , а событие B — совпадение начала стержня β с концом стержня α . Ввиду симметрии «опыта» события A и B одновременны в «Гамма». Поэтому отрезки OA и OB изображают (соответственно на осях t_α и t_β) одинаковые промежутки времени:

$$t_{A_\alpha} = t_{B_\beta}.$$

Если вести рассуждения в системе «Альфа» (связанной с одноименным стержнем), то в момент события B ,

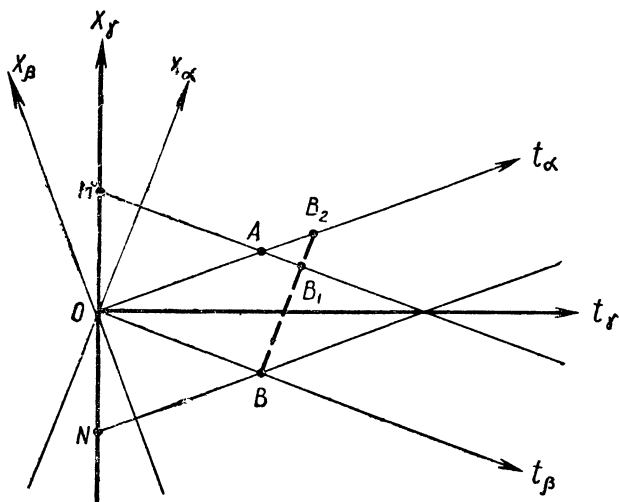


Рис. 27

когда конец стержня α совпал с началом стержня β положения их противоположных краев изображаются точками B_1 и B_2 , причем прямая BB_1B_2 параллельна оси x_r . Расстояние между одновременными положениями начала и конца каждого из стержней является, по определению, его длиной; значит, длина стержня α , измеренная в системе «Альфа», $l_{\alpha\alpha} = BB_2$, длина же стержня β , измеренная в той же системе «Альфа», $l_{\beta\alpha} = BB_1$.

Как видим, в системе «Альфа» длина движущегося (в этой системе!) стержня β меньше длины такого же, но покоящегося стержня α :

$$l_{\beta\alpha} < l_{\alpha\alpha},$$

так как $BB_1 < BB_2$.

Разумеется, аналогичные рассуждения в системе «Бета» (проведите их самостоятельно) привели бы к заключению, что $l_{\alpha\beta} < l_{\beta\beta}$. Но это как раз и соответствует тому же физическому закону: любой предмет в состоянии движения короче, чем в состоянии покоя.

Во сколько раз? Ответить на этот вопрос поможет треугольник OB_2B . Ввиду параллельности прямых MA и OB

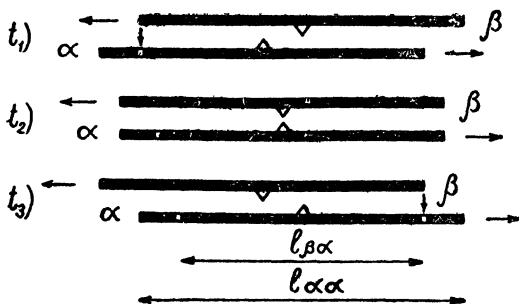


Рис. 28

$$\frac{l_{\alpha\alpha}}{l_{\beta\alpha}} = \frac{BB_2}{BB_1} = \frac{OB_2}{OA} = \frac{OB_2}{OB}$$

(так как $OA=OB$). Но отрезки OB_2 и OB изображают промежутки времени, протекшие от события O до события B , измеренные в системах отсчета «Альфа» и «Бета». Согласно предыдущему, отношение их равно релятивистскому коэффициенту K . Следовательно,

$$\frac{l_{\alpha\alpha}}{l_{\beta\alpha}} = \frac{OB_2}{OB_1} = K,$$

т. е. в состоянии покоя стержень в K раз длиннее, чем в состоянии движения.

Повторите самостоятельно аналогичные рассуждения в системе отсчета «Бета» и убедитесь, что принцип относительности действительно соблюдается.

Посмотрим с позиций гаммацентриста, как выясняют для себя альфацентрист (рис. 28) и бетацентрист (рис. 29), какой из стержней длиннее — каждый в соответствии со своим пониманием одновременности. Верхняя, средняя, и нижняя «мгновенные фотографии» соответствуют моментам времени $t_1 < t_2 < t_3$. Оба экспериментатора считают, что засекают положения начал и концов стержней в тот момент, когда середины их поравнялись. Но, по мнению гаммацентриста, альфацентрист засекает положение начала стержня β раньше, а его конца — позже, чем следовало бы (рис. 28) и приходит поэтому к заключению, что движущийся стержень β короче, чем покоящийся стержень α (и это заключение правильно в системе «Альфа», где обе засечки сделаны в один и тот же мо-

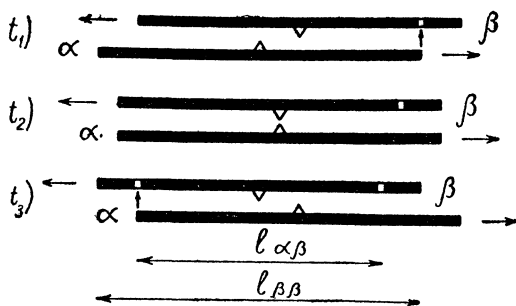


Рис. 29

мент времени). Но с точно таким же правом бетацентрист, понимая одновременность в смысле избранной им системы отсчета, отмечает положение начала стержня β раньше, а его конца—позже, чем это сделал бы гаммацентрист (рис. 29), и потому приходит к верному со своей точки зрения выводу, что короче движущейся в его системе отсчета стержень α . Как видим, между утверждениями: «В системе отсчета «Альфа» длинней стержень α » и «В системе «Бета» длинней стержень β » противоречия никакого нет. Ведь нас же давно не удивляет, что в системе «Альфа» покоится стержень α , тогда как в системе «Бета» покоится стержень β !

15. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ И СКОРОСТЬ СВЕТА

Рассмотренные нами кинематические релятивистские эффекты сокращения продольных размеров и замедления темпа времени обеспечивают неукоснительное выполнение принципа относительности даже в тех случаях, когда можно было ожидать нарушения его из-за независимости скорости света от движения источника. Особенно нагляден и прост следующий пример.

Внутри ракеты, покоящейся в системе «Звезды», установлен прожектор Π (рис. 30), оптическая ось которого перпендикулярна боковым стенкам ракеты. Кратковременная вспышка прожектора после отражения от зеркала $З$ (на противоположной стенке ракеты) и возвращения к прожектору улавливается расположенным рядом с ним фотоэлементом.

На преодоление световым импульсом ширины b ракеты затрачивается время

$$t = \frac{b}{c} = b,$$

где $c=1$ — скорость распространения света, принимаемая за единицу. Следовательно, два события — испускание и возвращение света — разделены промежутком времени $2t=2b$.

Повлияет ли на ход этого эксперимента равномерно-прямолинейное движение ракеты по отношению к звездам с большой скоростью v ? Если вести наблюдения в

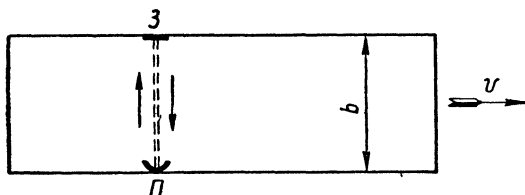


Рис. 30

системе «Ракета», то, согласно принципу относительности, никаких отличий по сравнению с предыдущим случаем не может быть (инерциальное движение системы отсчета не поддается экспериментальному обнаружению). Как бы быстро ни мчалась ракета, световой импульс все равно попадает точно в центр зеркала Z и возвратится к прожектору через промежуток времени

$$2t_p = 2b \quad (1)$$

(индекс «р» напоминает, что измерение времени производится по часам ракеты).

Но как все это может быть истолковано в системе «Звезды»?

По отношению к звездам в момент вспышки прожектор и зеркало занимают положение P и Z (рис. 31), к моменту отражения светового импульса они переместятся вместе с ракетой в положения P' , Z' , а к моменту поглощения света фотоэлементом — в положения P'' , Z'' . Следовательно, траектория светового импульса изобразится ломаной $PZ'P''$.

Какое же объяснение может дать звездоцентрист *косому* ходу светового луча PZ' от прожектора, оптическая ось которого перпендикулярна боковой стенке? Он должен указать, что направление светового луча определяется взаимным расположением источника света в *момент вспышки* и линзы прожектора во время прохождения через нее светового импульса, а к этому моменту линза успеет уже несколько сместиться вместе с ракетой по сравнению со своим первоначальным положением. Что же касается направления луча после отражения от зеркала, то оно строго повинуетя законам геометрической оптики (угол отражения равен углу падения).

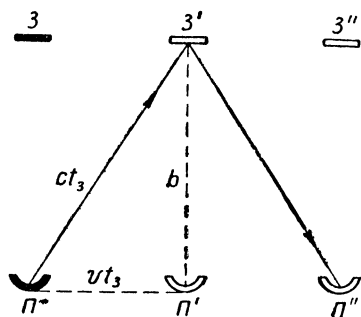


Рис. 31

Определим теперь промежуток времени t_3 между испусканием светового импульса и отражением его от зеркала, измеренный в системе «Звезды». За время t_3 ракета, летящая со скоростью v , смещается на расстояние $PP' = vt_3$, а световой импульс проходит расстояние $PZ' = ct_3 = t_3$ (ведь скорость света c , независимо от движения источника, во всех системах отсчета одинакова и принята нами за единицу скорости). На основании теоремы Пифагора из треугольника $PP'Z'$

$$t_3^2 - v^2 t_3^2 = b^2,$$

или

$$t_3^2 (1 - v^2) = b^2,$$

откуда

$$t_3 = \frac{b}{\sqrt{1 - v^2}}, \quad (2)$$

где b — та же самая ширина ракеты, что и в формуле (1) (ведь поперечные размеры при движении не меняются).

Сопоставляя формулы (1) и (2), замечаем, что промежутки времени t_p и t_3 между испусканием и отраже-

нием света, измеренные в системах «Ракета» и «Звезда», неодинаковы:

$$t_3 = \frac{t_p}{\sqrt{1-v^2}} \quad (3)$$

(это связано с тем, что при одинаковой скорости распространения световым импульсом в системе «Звезды» преодолевается большее расстояние, чем в системе «Ракета»).

Как видим, продолжительность одного и того же процесса распространения света от прожектора до зеркала в системах «Ракета» и «Звезды» оценивается по-разному. При этом оценка t_3 обязательно должна подтверждаться показаниями любых часов, покоящихся в системе «Звезды», оценка же t_p — показаниями любых часов, покоящихся в системе «Ракета». Следовательно, с точки зрения звездочентриста, любые бортовые часы, движущиеся вместе с ракетой, должны идти медленнее неподвижных. Коэффициент замедления K определяется из формулы (3):

$$K = \frac{t_3}{t_p} = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}}.$$

Но это как раз и есть знакомое уже нам «эйнштейновское» замедление процессов на движущихся объектах! Именно благодаря этому замедлению пассажиры ракеты не смогут обнаружить своего движения, даже если они будут производить описанный только что оптический эксперимент с прожектором, и пользоваться универсальным для всех систем отсчета и всех источников значением световой скорости $c = 300\,000$ км/сек.

16. КАК СКЛАДЫВАЮТСЯ СКОРОСТИ

Исходное предположение Эйнштейна «нельзя обогнать свет» встречается с недоверием: ведь разве не очевидно, что всегда можно осуществить сколь угодно быстрое движение последовательным сложением скоростей? Например, с Земли взлетает ракета с большой скоростью, с нее стартует вторая (меньших размеров) и набирает относительно первой такую точно скорость. Потом со второй ракеты осуществляется запуск третьей, еще меньшей, и так далее, пока в результате сложения скоростей не бу-

дет достигнута скорость относительно Земли, превышающая световую.

Еще проще представить себе две ракеты, летящие (в системе «Земля») навстречу друг другу с одинаковыми по абсолютной величине скоростями по $250\,000\text{ км/сек.}$ С какой же скоростью движется любая из них относительно другой? Если $500\,000\text{ км/сек.}$, то вот вам сигнал быстрее света в инерциальной системе отсчета, связанной с одной из ракет (а принципы теории относительности не должны нарушаться ни в какой инерциальной системе!).

По-видимому, теория относительности вносит какие-то поправки в привычные всем классические законы сложения скоростей, иначе она не могла бы свести «концы с концами». Значит, нужно прежде всего найти «слабое место» в логическом обосновании классических законов сложения скоростей и надлежащим образом пересмотреть их с учетом того нового, что внесла теория относительности в представления о времени и пространстве.

В инерциальной системе «Альфа» с постоянной скоростью v движется ракета «Бета», а с ней связана своя система отсчета, ось x_β которой скользит вдоль оси x_α , а ось y_β все время остается параллельной оси y_α . По отношению к ракете «Бета» летит шар M ; его скорость в системе «Бета» может быть направлена как вдоль оси x_β («сложение параллельных скоростей»), так и вдоль оси y_β («сложение перпендикулярных скоростей»). Остановимся сначала на первом случае.

Скорость шара в системе «Бета» в направлении оси x_β обозначим через u_β . Нам надо определить скорость u_α того же шара в системе «Альфа» (простоты ради мы предположим, что в начальный момент ракеты «Альфа» и «Бета», а также шар M находились в одном месте, рис. 32).

Такая задача в механике Галилея — Ньютона решалась просто. За каждую секунду ракета «Бета» удаляется от ракеты «Альфа» на v метров, а шар от ракеты «Бета» — на u_β метров (рис. 32). Геометрически очевидно, что за ту же секунду шар удалится от ракеты «Альфа» на расстояние $v + u_\beta$ метров. Но этот путь, пройденный за одну секунду, как раз и является мерой скорости u_α шара в системе «Альфа»:

$$u_\alpha = v + u_\beta.$$

Как видим, выражаемый этой формулой «галилеевский закон сложения параллельных скоростей» покоится на прочном фундаменте геометрической очевидности. И все-таки к нему следует подойти критически с позиций теории относительности.

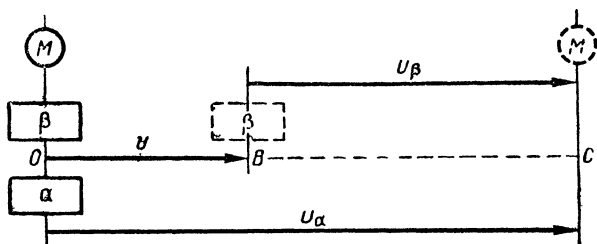


Рис. 32

Дело в том, что при определении скоростей в каждой данной системе отсчета нужно пользоваться *своими* часами, *своими* масштабами длины и *своим* пониманием одновременности.

Когда мы говорим, что скорость шара в системе «Бета» равна u_β , то это значит: за каждую секунду *по часам системы «Бета»* шар удаляется от одноименной ракеты на расстояние u_β метров — *опять таки в масштабах системы «Бета»*. При этом, конечно, еще предполагается, что все часы, по которым определяют начало и конец секундного пробега шара (а они по необходимости находятся в разных точках), согласованы между собой по всем правилам *бетацентрического* понимания одновременности.

Однако в системе «Альфа» иные секунды, другие метры и, что особенно важно, иначе согласованы между собой часы в начальной и конечной точках секундного пробега. Поэтому, ведя наблюдения в системе «Альфа», мы обнаружим, что за секунду шар удаляется от ракеты «Бета» не на u_β метров, а на совсем иное (как выяснится потом, меньшее) расстояние u' .

Величина u' может быть названа альфацентрической скоростью удаления шара от ракеты «Бета». Ее не следует смешивать со скоростью u_β , которую тоже можно охарактеризовать как скорость удаления того же самого шара от той же ракеты «Бета», но измеренную уже в системе «Бета».

Рассуждая в системе «Альфа», мы можем, разумеется, сказать, что расстояние OC (рис. 32), пройденное за секунду шаром, складывается из отрезка OB , пройденного ракетой «Бета», и расстояния BC , на которое шар успел за секунду опередить ракету «Бета». Так как все это — расстояния, пройденные за секунду по часам системы «Альфа» и измеренные в ее масштабах, мы вправе написать:

$$OC = u_{\alpha} ; \quad OB = v ; \quad BC = u' ,$$

так что из чисто геометрических соображений

$$u_{\alpha} = v + u' .$$

Но в силу разъясненного уже различия между u' и u_{β}

$$u_{\alpha} \neq v + u_{\beta} .$$

Таким образом, теория относительности отвергает галилеевский закон сложения параллельных скоростей, не вступая при этом ни в какой конфликт с геометрической очевидностью. Непосредственное (алгебраическое) сложение возможно только для скоростей v и u' , измеренных в одной системе. А нам ведь нужно выразить скорость u_{α} шара в системе «Альфа» через его бетацентрическую скорость u_{β} , а также альфацентрическую скорость v ракеты «Бета». Заранее можно предвидеть, что правильная формула «сложения» параллельных скоростей окажется посложнее.

Но прежде чем ее выводить, обратимся к другому случаю, когда складываемые скорости взаимно перпендикулярны, т. е. когда скорость шара в системе «Бета» направлена вдоль оси y_{β} (в этом случае удобнее обозначать эту скорость через w_{β} и называть поперечной). Как движется этот шар относительно системы «Альфа»?

В системе «Альфа» движение шара имеет две составляющие: «продольную» (в направлении оси x_{α}) со скоростью v (совпадающей со скоростью ракеты «Бета») и «поперечную» (в направлении оси y_{α}), скорость которой обозначим пока через w_{β} .

В классической механике считалось очевидным, что

$$w_{\alpha} = w_{\beta} .$$

Однако в теории относительности дело обстоит иначе,

потому что в системах «Альфа» и «Бета» различные единицы времени. В системе «Бета» за каждую секунду движущийся шар проходит в направлении оси u_β расстояние w_β . Но каждая секунда системы «Бета» содержит K секунд системы «Альфа», так как движущиеся часы идут в K раз медленнее неподвижных; расстояние же, пройденное за такой промежуток времени, оценивается в обеих системах одинаково (ведь поперечные размеры тел при движении не меняются). Таким образом, с альфацентрической точки зрения расстояние w_β приходится не за одну секунду, а за K секунд, что соответствует в K раз меньшей скорости. Следовательно,

$$w_\alpha = \frac{w_\beta}{K}.$$

Такова поперечная составляющая скорости шара в системе «Альфа». Полная же его скорость v'_α в системе «Альфа» может быть теперь вычислена по формуле

$$v'_\alpha = \sqrt{v^2 + w_\alpha^2},$$

вытекающей из теоремы Пифагора. Как видим, при переходе к другой системе отсчета поперечная составляющая скорости меняет свою величину.

17. «СЛОЖЕНИЕ» ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ

Весь этот параграф при первом чтении достаточно лишь бегло просмотреть.

Сложнее обстоит дело в том случае, когда скорость тела направлена вдоль той же прямой, что и движение системы отсчета. Допустим, что скорость шара u_β по отношению к системе «Бета» направлена вдоль оси x , т. е. либо совпадает по направлению с альфацентрической скоростью v самой системы «Бета», либо противоположна ей. Мы будем для определенности предполагать, что скорости u_β и v направлены в одну сторону; а чтобы охватить также и случай встречного движения шара и ракеты «Бета», достаточно будет изменить знак одной из скоростей.

Построим пространственно-временную диаграмму, рассматривая все явления в системе «Бета», т. е. считая

ракету «Бета» покоящейся, а ракету «Альфа» движущейся со скоростью $-v$. В начальный момент O обе ракеты и шар находятся в одном месте.

Пусть точка S пространственно-временной диаграммы (рис. 33) изображает положение движущегося шара через одну секунду после начала движения по времени системы «Бета» ($t_\beta = 1$); чтобы удобнее было говорить о конкретном событии, допустим, что в этот момент мы освещаем шар. К указанному моменту шаром пройден в системе «Бета» путь, численно равный скорости u_β . Поэтому абсцисса точки S , т. е. отрезок OA , равна единице, а ее ордината $SA = u_\beta$.

Чтобы определить, как будет выглядеть движение шара в системе «Альфа», проведем на той же диаграмме оси t_α и x_α . Поскольку система «Альфа» по отношению к системе «Бета» движется с отрицательной скоростью $-v$ (т. е. влево), оси t_α и x_α будут повернуты не «внутри», а «наружу» по отношению к первой четверти пространственно-временной диаграммы; угол поворота φ определяется величиной относительной скорости системы отсчета:

$$\operatorname{tg} \varphi = v.$$

Упомянувшееся уже событие S — «освещение шара» — будет характеризоваться в системе «Альфа» коор-

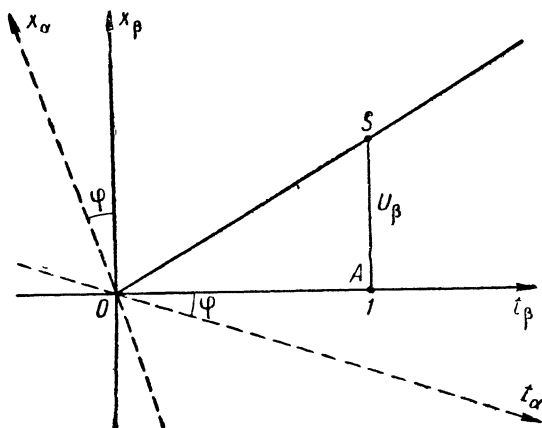


Рис. 33

динатой $x_\alpha = SD$ (рис. 34) и временем $t_\alpha = OD$ (отрезок SD должен быть проведен параллельно оси x_α).

В прямоугольном треугольнике OAC катет

$$AC = OA \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1 \cdot v = v$$

— за одну секунду система «Альфа» смещается (в отрицательном направлении) на расстояние v относительно системы «Бета». В прямоугольном треугольнике SAB катет

$$AB = SA \cdot \operatorname{tg} \varphi = u_\beta \cdot v.$$

Поэтому отрезок

$$SC = SA + AC = u_\beta + v,$$

а отрезок

$$OB = OA + AB = 1 + u_\beta \cdot v.$$

Как было уже указано, отрезок SD изображает (в масштабе альфацентрической диаграммы) путь x_α , проходимый движущимся шаром в системе «Альфа» за время t_α , выражаемое (в том же масштабе) отрезком OD .

Теперь мы уже в состоянии определить скорость шара в системе «Альфа»:

$$u_\alpha = \frac{x_\alpha}{t_\alpha} = \frac{SD}{OD}$$

(поскольку нас интересует лишь *отношение* величины x_α и t_α , не надо заботиться о масштабе, раз он одинаков для числителя и знаменателя).

Из подобия заштрихованных треугольников OBD и SCD (по двум углам)

$$\frac{SD}{OD} = \frac{SC}{OB} = \frac{u_\beta + v}{1 + u_\beta \cdot v}.$$

Следовательно,

$$u_\alpha = \frac{u_\beta + v}{1 + u_\beta \cdot v}.$$

Полученную формулу иногда называют эйнштейновским законом «сложения» скоростей, направленных одинаково. Если же скорости u и v направлены навстречу друг другу, одну из них следует считать отрицательной,

Хотя каждое слагаемое превышает половину световой скорости, результирующая получилась меньшей, чем скорость света.

2. Возьмем теперь две скорости, еще более близкие к световой, скажем $u_\beta = v = 0,9$; тогда

$$u_\alpha = \frac{0,9 + 0,9}{1 + 0,9 \cdot 0,9} = \frac{1,8}{1,81} = 0,99 < 1,$$

т. е. результирующая скорость u_α опять-таки не достигает единицы.

3. Даже и в том крайнем случае, когда одно из слагаемых — скорость света ($u_\beta = 1$), результирующая скорость

$$u_\alpha = \frac{1 + v}{1 + 1 \cdot v} = 1,$$

т. е., независимо от величины v , равняется световой. Физически это означает, что световой сигнал имеет одинаковую скорость $u_\alpha = u_\beta = 1$ как по отношению к системе «Бета», так и по отношению к системе «Альфа». Сколь быстро бы мы ни мчались навстречу свету, все равно его скорость по отношению к нам останется той же самой. Таким образом, постоянство скорости света (в смысле независимости ее как от движения источника, так и от выбора системы отсчета, в которой ее измеряют), совершенно непонятное с точки зрения *классического* принципа относительности, прекрасно укладывается в общую логическую ткань релятивистской кинематики. Разумеется, это удалось лишь потому, что Эйнштейн критически пересмотрел господствовавшее в классической физике представление об одновременности: без этого пересмотра постоянство скорости света обязательно вступило бы в конфликт с принципом относительности и построить логически последовательную и внутренне непротиворечивую теорию было бы невозможно.

Приведенные примеры подтверждают, что «обогнать свет» путем сложения скоростей нельзя. Мы можем усмотреть это и в общем виде, взглянув на построенную нами пространственно-временную диаграмму (рис. 34). В треугольнике OSD угол O всегда меньше угла S , поскольку угол φ меньше 45° (исходная скорость шара в

системе «Бета» заведомо меньше световой). Но против меньшего угла в треугольнике лежит и меньшая сторона, так что $SD < OD$ или, что то же самое, $x_a < t_a$. А это как раз и означает, что результирующая скорость

$$u_a = \frac{x_a}{t_a} < 1.$$

Но если вместо движения шара рассматривается движение фотона, то угол γ составляет ровно 45° , треугольник OSD из-за равенства двух углов оказывается равнобедренным, так что $x_a = t_a$ и

$$u_a = \frac{x_a}{t_a} = 1,$$

т. е. скорость фотона во всех системах отсчета одна и та же.

Вопросы и упражнения

1. Докажите с помощью пространственно-временной диаграммы, что любые движущиеся часы должны идти медленнее неподвижных.
2. Во сколько раз замедляется ход времени вследствие быстрого движения? Выведите формулу.
3. Не противоречит ли более медленный ход движущихся часов принципу относительности: ведь в другой системе отсчета те же часы покоятся?
4. «Все в мире относительно: я вправе считать, что твои часы отстают, а ты — что мои спешат». Почему такое «глубокомысленное» суждение совершенно не отражает положения дел в теории относительности?
5. Начертите номограмму релятивистского коэффициента и докажете ее правильность.
6. Во сколько раз замедляется ход времени при скорости движения 288 000 км/сек?
7. Возможен ли указатель скорости, основанный на измерении замедления хода часов при быстром движении?
8. Как измерить длину движущегося тела неподвижным метром?
9. Почему сокращение движущихся тел не может служить показателем истинного движения?
10. В чем состоит относительность сокращения движущихся тел и как она связана с относительностью одновременности?
11. Выведите с помощью диаграммы, во сколько раз сокращаются продольные размеры движущегося тела.
12. Сформулируйте и докажете классический закон сложения скоростей, направленных вдоль одной прямой.
13. Какие пункты в доказательстве классического закона сложения параллельных скоростей теряют силу в теории относительности?

14. Почему в теории относительности даже составляющая скорости какого-нибудь тела, перпендикулярная к относительной скорости двух систем отсчета, не одинакова в этих системах? В какой системе отсчета она самая большая?

15. Напишите и поясните формулу преобразования поперечной составляющей скорости при смене системы отсчета.

16. Напишите релятивистскую формулу «сложения» параллельных скоростей и поясните ее правдоподобие.

17 *. Выведите релятивистскую формулу «сложения» параллельных скоростей при помощи пространственно-временной диаграммы.

18 *. Постройте пространственно-временную диаграмму, иллюстрирующую «вычитание» антипараллельных скоростей, и выведите соответствующую формулу.

19. Две частицы вылетают одновременно из одного пункта в противоположные стороны со скоростями $240\,000$ км/сек. Каким будет расстояние между ними через 10 секунд?

20. Чему равна скорость первой частицы в системе «Вторая частица» (см. предыдущий вопрос)?

21. Выведите, во сколько раз изменяются масштабы на осях пространственно-временной диаграммы при переходе к другой системе отсчета.

* «Вопросы 17—18 предназначаются для полностью изучавших § 18.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА**18. МАССА КАК МЕРА ИНЕРЦИОННОСТИ**

Своеобразие релятивистского закона сложения скоростей является, конечно, прямым следствием открытых Эйнштейном свойств времени и пространства, таких, как относительность одновременности или зависимость линейных размеров и промежутков времени от выбора системы отсчета. Естественно, что все это не может не сказываться также и на законах динамики.

Законы движения Ньютона не могут оставаться справедливыми в теории относительности хотя бы уже потому, что они позволяют неограниченно разгонять тело, воздействуя на него постоянной силой, и превзойти таким путем скорость света. Поэтому классическая динамика должна быть подвергнута глубокому пересмотру с учетом идей теорий относительности. При этом, однако, нельзя упускать из виду и того факта, что справедливость динамики Ньютона надежно подтверждена опытами, точнейшими астрономическими наблюдениями и всей инженерной практикой. Поэтому не может быть даже и речи о том, чтобы полностью зачеркнуть всю старую динамику, необходимо лишь *ограничить* тот круг явлений, к которому она применима и за пределами которого теряет силу.

Как мы уже знаем, релятивистские эффекты отчетливо проявляются только при скоростях, достаточно близких к световой; вот это-то обстоятельство и определяет границы справедливости механики Ньютона. При околосветовых скоростях движения законы релятивистской динамики существенно расходятся с классическими; при малых же скоростях различие это ступшевуется и им можно практически пренебречь. По кругу охватываемых явлений механика теории относительности гораздо *шире*

классической: она пригодна как для малых, так и для больших скоростей. Иными словами, механика теории относительности *включает в себя* всю классическую механику; при этом классические законы оказываются уже не точными, а приближенными (однако почти для всех встречающихся на практике скоростей приближение это превосходное).

Из сказанного можно заключить, что необходимым условием хорошего усвоения «сюрпризов» релятивистской динамики является достаточно глубокое понимание динамики Ньютона. Не лишне поэтому внимательнее в нее погрузиться, чем это делается сейчас в школе.

К числу самых важных понятий динамики относится, несомненно, *масса*. Она фигурирует во многих механических закономерностях, и потому к определению ее можно подходить с различных сторон.

Ньютон отождествлял массу с количеством вещества, содержащегося в данном теле. Однако само понятие «количество вещества», в свою очередь, нуждается в пояснении. Вероятно, все согласятся, что в двух одинаковых кусках железа вещества вдвое больше, чем в каждом из них в отдельности. Но как сравнить между собой количества вещества в куске железа и куске угля? В протоне и электроны? Количество вещества имело бы вполне ясный смысл, если бы все тела состояли из каких-либо универсальных, совершенно одинаковых частиц, но современная наука этого не утверждает. Поэтому в наши дни, если иногда и говорят о количестве вещества, то обязательно тут же указывают какой-нибудь конкретный способ его измерения, выбор которого в значительной степени произволен и должен быть предметом специального соглашения.

В настоящее время в науке существует два принципиально различных подхода к понятию массы. Первый из них связан с практически наиболее распространенным способом измерения массы путем взвешивания. Он приводит нас к понятию о так называемой *гравитационной** (или тяжелой) массе.

Чем больше гравитационная масса тела, тем сильнее притягивается оно Землей или каким угодно другим телом по закону всемирного тяготения (а также сильнее

* От латинского слова «гравитация» — тяготение.

притягивает их к себе). Как видим, гравитационная масса фактически является не мерой количества вещества, а мерой способности тела притягиваться к другим телам, а также притягивать их к себе (иначе говоря, вступать с ними в гравитационное взаимодействие согласно закону всемирного тяготения).

Другой, более важный для нас подход приводит к понятию *инерционной* массы. Он тесно связан со вторым законом Ньютона и с представлением об инерционности, которая присуща каждому телу и проявляется при всякой попытке изменить его скорость, воздействуя на него силой.

Приложим равные силы к двум внешне одинаковым шарам: алюминиевому и свинцовому. Алюминиевый станет двигаться с гораздо большим ускорением, чем свинцовый. Если оба они вначале покоились, то через один и тот же промежуток времени алюминиевый шар успеет набрать значительно большую скорость (по сравнению со свинцовым).

Как видим, данная сила выводит каждое тело из состояния покоя, но для набора определенной скорости свинцовому шару понадобится больше времени, чем алюминиевому. Про свинцовый шар говорят, что он *инерционнее* алюминиевого, т. е., фигурально выражаясь, он не столь «проворно» повинуетсЯ воздействию приложенной к нему силы (нужна большая сила, чтобы сообщить ему такое же ускорение, как и алюминиевому).

Инерционность тела — это присущая ему «медлительность» в наборе или потере скорости под влиянием приложенной силы. Она, конечно, проявляется не только при разгоне, но и при торможении: чем инерционнее тело, тем дольше движется оно против тормозящей его силы, прежде чем остановится.

Поскольку одно тело может оказаться инерционнее, чем другое, естественно ввести какую-то меру инерционности. Ее-то и называют массой (или, чтобы быть более точным, инерционной массой — в отличие от гравитационной). За величину массы m может быть принято постоянное для данного тела отношение приложенной к нему силы F к тому ускорению a , которое она вызывает:

$$m = \frac{F}{a} .$$

Инерционная и гравитационная массы характеризуют два физически совершенно различных свойства: инерционность тела и способность его вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами (т. е. притягиваться к ним и притягивать их к себе). Однако точнейшие опыты показали, что, несмотря на это различие, обе массы одного и того же тела равны между собой (конечно, если для измерения их берут одинаковые эталоны). Этот фундаментальный опытный факт в классической физике никакого объяснения не получил; впоследствии он лег в основу эйнштейновской теории всемирного тяготения, которая известна также как общая теория относительности. Но наша книга посвящена другой теме — специальной (или частной) теории относительности, поэтому вопрос о количественном совпадении инерционной и гравитационной массы мы здесь обсуждать не будем.

Сейчас для нас гораздо важнее, что обе массы определяются такими методами, которые в своей сущности не имеют ничего общего с понятием количества вещества. Но в рамках классической физики была возможность *условно принять* массу за меру количества вещества, так как согласно классическим представлениям увеличить массу тела можно только путем присоединения к нему другого тела, а уменьшить — не иначе, как путем отделения от тела какой-то части. Это очень важное свойство массы (обычно специально не формулируемое, а только молчаливо подразумеваемое) прекрасно подтверждалось опытами при скоростях движения, во много раз меньших, чем скорость света. Но, как мы увидим в дальнейшем, в теории относительности, когда приходится встречаться и с околосветовыми скоростями, и с очень большими запасами энергии, дело обстоит иначе, и масса не может уже рассматриваться как мера количества вещества (кто этого не усвоил, того очень смущают такие эффекты теории относительности, как зависимость массы тела от его скоростей). Вот почему, учитывая все сказанное, мы с самого начала подчеркиваем, что масса в изучаемой нами специальной теории относительности всегда понимается только в одном смысле — как мера инерционности.

Второй закон Ньютона

$$a = \frac{F}{m},$$

лежащий в основе классической динамики, целесообразно выразить еще и в иной форме, от которой удобнее переходить к законам релятивистским. Допустим, что постоянная по величине и направлению сила F действовала на тело в течение t секунд. Благодаря этому скорость тела изменилась от v_1 до v_2 , т. е. на величину $\Delta v = v_2 - v_1$. От чего зависит величина этого приращения скорости Δv ?

При равноускоренном движении (а ведь именно так движется тело при наличии постоянной силы) ускорение a может быть определено как изменение скорости за единицу времени:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} = \frac{\Delta v}{t}.$$

Подставляя это выражение в формулу второго закона Ньютона, имеем:

$$\frac{v_2 - v_1}{t} = \frac{F}{m},$$

или

$$v_2 - v_1 = \frac{Ft}{m}.$$

Как и следовало ожидать, изменение скорости тела определяется не только его массой m и величиной приложенной силы F , но также и продолжительностью t ее действия. В динамике произведение силы на продолжительность ее действия

$$q = Ft$$

называется толчком. Одинаковый по величине толчок может быть произведен на тело и кратковременным воздействием большой силы, и длительным воздействием малой силы. Результат в смысле изменения скорости будет одним и тем же: хотя меньшая сила вызывает и меньшее ускорение, но даже и при таком ускорении за достаточный промежуток времени скорость тела успеет возрасти или уменьшиться на значительную величину.

Итак, изменение скорости прямо пропорционально толчку и обратно пропорционально массе:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{Ft}{m}.$$

В этой формуле инерционный смысл массы выступает с особенной отчетливостью: чем больше масса m , тем больше должна действовать сила, чтобы изменить скорость на заданную величину (например, чтобы остановить тело с определенной начальной скоростью).

Полученную формулу мы можем переписать еще и так:

$$mv_2 - mv_1 = Ft. \quad (1)$$

Произведение mv массы тела m на скорость его движения v называлось раньше количеством движения, а теперь называется импульсом и обозначается буквой p :

$$p = mv.$$

В полученной формуле (1) $mv_1 = p_1$ — величина импульса до, а $mv_2 = p_2$ — после воздействия на тело силы F в течение t секунд. Как видим, изменение импульса тела

$$\Delta p = p_2 - p_1 = mv_2 - mv_1$$

равно толчку Ft приложенной к нему силы («закон импульсов»).

Толчок $q = Ft$ и импульс $p = mv$ — величины векторные; они направлены соответственно как сила F и как скорость v . Поэтому при использовании закона импульсов необходимо принимать во внимание не только *численные значения*, но также и *направления* всех импульсов и толчков.

Закон импульсов, представляя собой другую форму второго закона Ньютона, удобен для решения многих задач. Особенная ценность понятия «импульс» состоит в том, что его можно применить не только к отдельному телу, но и к *системе тел в целом*, понимая под импульсом системы геометрическую сумму всех импульсов ее частей. Если два тела движутся в одинаковом направлении, их импульсы складываются арифметически, а если навстречу, то вычитаются. При встречном движении двух тел с одинаковыми (по абсолютной величине) импульсами их общий импульс равняется нулю.

Нетрудно показать, что в отсутствие внешних сил **общий импульс системы ни по величине, ни по направлению** никогда не изменяется. Ведь если ни на одно тело системы не действуют извне никакие силы, то импульсы отдельных тел могут меняться лишь под влиянием тех сил, с которыми эти тела взаимодействуют друг с другом. Но согласно третьему закону Ньютона такие силы встречаются всегда попарно: с какой силой действует тело A на тело B , с такой же и тело B действует на тело A , только направления у этих сил встречные. Поскольку обе названные только что силы взаимодействия тел A и B действуют в течение одного и того же промежутка времени t , то одинаковы по абсолютной величине и толчки

$$q_1 = q_2 = Ft,$$

сообщаемые ими телам A и B ; направлены же эти толчки навстречу друг другу. Следовательно, и равные этим толчкам изменения импульсов тел A и B одинаковы по величине и противоположны по направлению. В результате **общий импульс системы тел при этом взаимодействии никак не изменяется**, потому что при суммировании равнопротивоположные изменения импульсов отдельных тел взаимно уничтожаются.

Это — очень важный в классической механике закон сохранения импульса изолированной системы тел, не подвергающейся внешним воздействиям. Из него, между прочим, вытекает, что неподвижный вначале центр тяжести, точнее, центр массы, изолированной системы тел не может сместиться под действием одних только внутренних сил (фигурально выражаясь, «нельзя поднять самого себя за волосы»). Закон сохранения импульса остается справедливым также и в теории относительности.

Применим этот закон к соударению двух тел, которые в момент соприкосновения «слипаются» в одно тело и больше уже не разъединяются (они могут быть, например, снабжены «защелками»). Ограничимся простейшим случаем, когда тела двигались по одной и той же прямой навстречу друг другу со скоростями v_1 и v_2 . Если массы тел m_1 и m_2 , то до соударения их импульсы были равны соответственно

$$p_1 = m_1 v_1; \quad p_2 = -m_2 v_2$$

(знак минус указывает на встречное направление скорости второго тела). А общий импульс системы перед соударением составлял

$$p = p_1 + p_2 = m_1 v_1 - m_2 v_2.$$

В результате соударения образуется единое тело с массой $m_1 + m_2$, которое, вообще говоря, будет двигаться в ту или иную сторону с какой-то скоростью v ; при этом его импульс будет равен

$$p' = (m_1 + m_2) v.$$

Согласно закону сохранения импульса (в отсутствие внешних сил) мы вправе приравнять значения общего импульса как до, так и после соударения:

$$p' = p,$$

или
$$(m_1 + m_2) v = m_1 v_1 - m_2 v_2, \quad (2)$$

откуда легко может быть найдена скорость v после соударения.

Но мы ее вычислять не будем. Нам важно лишь отметить, что направление движения (т. е. знак скорости) соединенного тела после соударения определяется знаком большего по абсолютной величине импульса. При равных начальных скоростях ($v_1 = v_2$) преобладает импульс того тела, у которого больше масса. Это и понятно: ведь в силу своей инерционности каждое из сталкивающихся тел стремится заставить другое изменить направление своего движения на прямо противоположное. При этом, естественно, берет верх то из них, которое более инерционно.

Если массы соударяющихся тел одинаковы, то при равных начальных скоростях соединенное тело будет после соударения покоиться. Покой после соударения может быть достигнут и при различных массах ($m_1 \neq m_2$), но тогда и начальные скорости должны быть неодинаковыми: менее инерционное тело должно обладать такой скоростью, чтобы начальные импульсы обоих тел были равны друг другу по абсолютной величине:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2. \quad (3)$$

Это дает нам новый и притом очень важный способ определения массы тела. Когда масса одного из тел (например, m_1) известна или хотя бы условно принята за

единицу, то масса другого тела m_2 может быть вычислена по формуле (3), надо только предварительно подобрать на опыте такие начальные скорости, при которых объединенное тело после соударения оказалось бы неподвижным*.

В рамках классической механики такой способ определять массу совершенно эквивалентен определению ее через силу и ускорение (ведь закон сохранения импульса вытекает математически из законов Ньютона). В противоположность этому в теории относительности такой эквивалентности не будет, и от нас самих будет зависеть отдать предпочтение тому или другому из двух способов определения инерционной массы. Решая этот вопрос, мы не преминем, конечно, воспользоваться одним преимуществом определения массы на основании закона сохранения импульса, которое весьма существенно при построении механики теории относительности. Преимущество это состоит в том, что при таком методе не требуется измерять никаких сил.

После всех этих предварительных замечаний мы можем уже вплотную заняться особенностями релятивистской динамики.

20. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МАССА

Чтобы разобраться в том, какие изменения должны быть внесены в динамику в связи с кинематическими эффектами теории относительности, вообразим три инерциальных ракеты — «Альфа», «Бета» и «Гамма» (рис. 35). Рассмотрение будем вести в системе «Гамма», по отношению к которой ракеты «Альфа» и «Бета» движутся параллельно оси x -ов навстречу друг другу с одинаковыми по абсолютной величине скоростями $\pm v_0$. В ракете «Альфа» покоится (по отношению к ней) шар A , в ракете «Бета» — такой же точно шар B .

В некоторый момент с помощью специальных механизмов шары A и B «выстреливаются» (выталкиваются) в направлении, параллельном оси y -ов и перпендикуляр-

* Разумеется, если воспользоваться формулой (2), то надобность в таком кропотливом подборе отпадает: масса может быть вычислена тогда по результату соударения при каких угодно начальных скоростях. Но практическое удобство сейчас нас не интересует, а с принципиальной стороны формула (3) нагляднее.

ном движению ракет. Выталкивающие аппараты совершенно тождественны, поэтому оба шара приобретают одинаковую относительную скорость $w = w_{A\alpha} = w_{B\beta}$ — каждый по отношению к своей ракете. По отношению

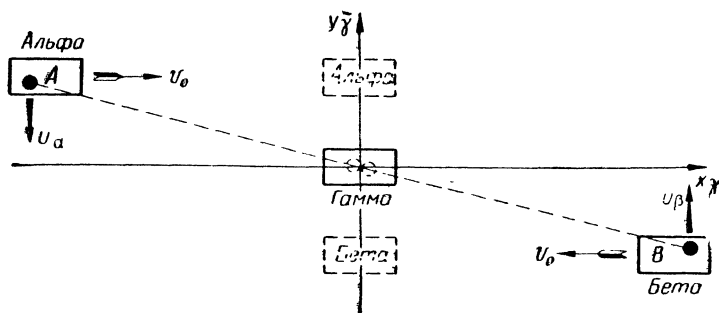


Рис. 35

же к ракете «Гамма» шары будут двигаться в косом направлении, так как каждый из них сохраняет также и скорость выбросившей его ракеты. Но y -ые составляющие скоростей обоих шаров по отношению к ракете «Гамма» ($w_{A\gamma}$ и $w_{B\gamma}$) будут одинаковыми, хотя и меньшими, чем w (обе ракеты — «Альфа» и «Бета» имеют одинаковые скорости v_0 по отношению к ракете «Гамма»):

Момент выталкивания шаров выбирается с таким расчетом, чтобы они столкнулись точно в начале координат системы «Гамма». Положение ракеты и шаров в момент соударения показано на рисунке 35 пунктиром.

Движение шаров после соударения будет существенно зависеть от их упругих свойств. Ради простоты дальнейших выкладок допустим, что они не отскакивают друг от друга, а слипаются в одно тело.

Мы будем в дальнейшем предполагать, что скорости v_0 , а значит, и результирующие скорости шаров перед столкновением велики. Поэтому мы не вправе безоговорочно применять к ним законы ньютоновской механики. Однако уже самые общие соображения о симметрии и однородности пространства показывают, что после соударения «слипшиеся» шары в системе «Гамма» не могут двигаться в какую-нибудь сторону: ведь точно такие же

основания найдутся и в пользу движения их в прямо противоположном направлении!»

Итак, шары после соударения будут, несомненно, покоиться в системе «Гамма».

Рассмотрим теперь те же события, но только в системе «Альфа» (рис. 36).

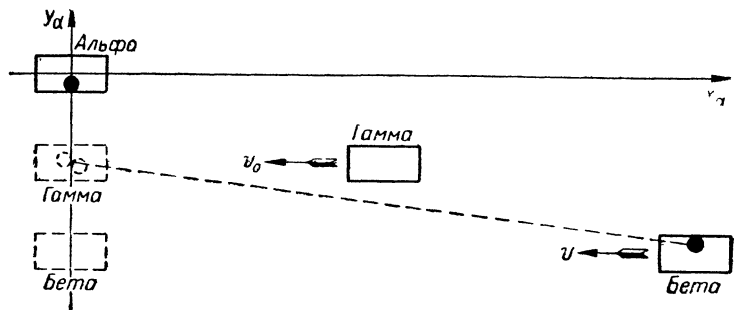


Рис. 36

В этой системе отсчета ракета «Альфа», естественно, покоится, ракета «Гамма» движется со скоростью $-v_0$, а ракета «Бета» движется со скоростью v , которая получается в результате эйнштейновского сложения альфацентрической скорости $-v_0$ ракеты «Гамма» с гаммацентрической скоростью $-v_0$ ракеты «Бета» (в классической механике скорость v равнялась бы $-2v_0$, а чему она равна в теории относительности, попробуйте написать сами).

Шар А после «выстрела» движется только параллельно оси y -ов со скоростью w . Шар В сохраняет скорость вытолкнувшей его ракеты «Бета»; y -ая составляющая скорости шара В равна w только по отношению к ракете «Бета» ($w_{B\beta} = w$), по отношению же к ракете «Альфа» она в K раз меньше:

$$w_{B\alpha} = \frac{w_{B\beta}}{K} = \frac{w}{K}.$$

Таким образом, в системе «Альфа» сталкивающиеся шары А и В неравноправны. Различие касается не только составляющих скорости вдоль оси x , но также и ее составляющих вдоль оси y : в этом направлении шар А движется быстрее, чем шар В. Тем не менее после соударения объединенное тело будет покоиться в системе «Гам-

ма». А это значит, что в системе «Альфа» оно будет двигаться только вдоль оси x (со скоростью $-v_0$), но вдоль оси y оно двигаться совсем не будет.

Подведем баланс общего импульса обоих шаров в системе «Альфа» в проекции на ось y . После соударения он явно равняется нулю (в интересующем нас направлении шары не движутся). А ведь до соударения этот импульс был, очевидно, не нулевым: при одинаковых массах (шары тождественны!) они обладали неодинаковыми скоростями

$$\omega_{A\alpha} > \omega_{B\alpha}.$$

Стало быть, в системе «Альфа» очевидным образом нарушается закон сохранения импульса в его обычной ньютоновской формулировке. Это нарушение непосредственно связано с тем, что скорость одного из шаров (B) в системе «Альфа» была близка к световой; оно еще раз свидетельствует о неприменимости при таких скоростях динамики Ньютона.

Не стоит, однако, слишком поспешно перечеркивать закон сохранения импульса: рассмотренный только что мысленный эксперимент с шарами вполне может быть истолкован также и в его рамках (но, разумеется, за счет отказа от каких-либо иных представлений классической динамики).

После соударения составляющая общего импульса системы шаров в поперечном направлении равнялась нулю. Следовательно, она обязательно равнялась нулю также и *перед* соударением, а это значит, что оба шара обладали тогда одинаковыми по величине и противоположными по направлению импульсами. И если скорости их в направлении оси y -ов были различными, то это свидетельствует о том, что более *медленный* шар обладал *большей* массой!

Такое заключение содержит уже в себе релятивистский пересмотр одного из положений механики Ньютона: факты вынуждают нас приписать разную массу тождественным между собой шарам! Единственное физическое различие между ними состоит в том, что в системе «Альфа» один из них почти покоится (поперечная скорость ω очень мала), а другой движется с околосветовой скоростью в направлении оси x -ов (именно этот шар имеет меньшую скорость в направлении оси y -ов).

Итак, поскольку в теории относительности закон сохранения импульса остается в силе, мы естественным образом приходим к релятивистскому выводу о том, что масса любого тела существенно зависит от скорости его движения. В этом — одно из основных отличий релятивистской динамики от классической.

При всей своей непривычности оно не должно нас особенно смущать, потому что во всех наших рассуждениях речь шла не о количестве вещества, а именно об инерционной массе, которая характеризует инерционные свойства тела и определяется как отношение импульса к скорости. Просто с увеличением скорости тело становится инерционнее. Обнаруженная зависимость инерционной массы от скорости исключает всякую возможность использовать массу (даже «по совместительству»!) в качестве хотя бы условной меры количества вещества (иначе пришлось бы признать, что увеличение скорости тела, в том числе и вследствие перехода к другой системе отсчета, равносильно добавлению к нему некоторого количества вещества).

Приняв, что закон сохранения импульса выполняется благодаря зависимости массы от скорости, имеем (в системе «Альфа»):

$$m_A w_{A\alpha} = m_B w_{B\alpha},$$

где m_A — масса шара A , а m_B — шара B . Но шар B имеет быстрое движение со скоростью v в направлении оси x , а шар A — нет. Поэтому, как мы уже знаем,

$$w_{A\alpha} = w; \quad w_{B\alpha} = \frac{w}{K},$$

так что

$$m_A w = m_B \frac{w}{K},$$

откуда

$$m_B = m_A K.$$

Но если поперечная скорость w очень мала (а мы вправе в наших рассуждениях ее даже стремить к нулю), то m_A — масса шара A , покоящегося (или почти покоящегося) в системе «Альфа»; m_B — масса такого же шара, но движущегося почти точно со скоростью v . Следовательно, величину m_A естественно назвать собственной массой (или массой покоя) и обозначить m_0 , а величину

m_B — релятивистской массой (или массой в движении) и обозначать m . Тогда

$$m = m_0 K = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2}}.$$

Полученная формула зависимости массы от скорости была подтверждена прямыми физическими экспериментами, а в наши дни с нею уже считаются инженеры при конструировании ускорителей элементарных частиц. Например, согласно таблице (стр. 159) для электрона с энергией 1 млрд. электрон-вольт, вылетающего из синхротрона, релятивистский коэффициент K достигает 2 000, так что масса такого электрона в движении превышает массу покоящегося протона! А Ереванский ускоритель дает электроны в 7 раз «массивнее» протонов.

Но при обычных скоростях, с какими движется современный транспорт и детали работающих машин, коэффициент K почти не отличается от единицы и зависимость массы от скорости практически совсем не сказывается.

Все это легко усмотреть на номограмме, которой мы уже раньше пользовались (рис. 24). Если радиус окружности принять за единицу масштаба, то отрезок CB изображает скорость v , а отрезок OM — соответствующее ей значение релятивистского коэффициента K . Но ведь численно этот коэффициент совпадает с величиной релятивистской массы $m = m_0 K$ такого тела, масса покоя которого равна единице. Для тела же с произвольной массой покоя m_0 релятивистская масса m будет, естественно, в m_0 раз больше, что может быть учтено соответствующим выбором масштаба массы (надо выбрать его так, чтобы радиус окружности соответствовал величине m_0). Как видим, в любом случае масса в движении m во столько же раз больше массы покоя m_0 того же тела, во сколько отрезок OM превосходит радиус OC . Поворачивая мысленно этот радиус от горизонтального положения до вертикального, можно хорошо прочувствовать характер зависимости релятивистской массы от скорости — едва заметной при медленных движениях тела и очень резкой вблизи световой скорости (рис. 25).

Иногда задают вопрос: какие именно конкретные изменения в строении быстро движущегося тела по сравнению с неподвижным обуславливают увеличение его

инерционности? Сама постановка такого вопроса неправомерна. Одно и то же тело стремительно движется в системе «Альфа» и покоится в системе «Бета». Сила, действующая на это тело, меняет его скорость. Но, благодаря своеобразию релятивистских свойств времени и пространства, изменение скорости тела по отношению к системе «Альфа» не так значительно, как по отношению к системе «Бета». Вот и выходит, что данное тело при рассмотрении его движения в системе «Альфа» проявляет себя как более инерционное, чем при рассмотрении его же в системе «Бета».

Но в обоих случаях речь идет об одном и том же теле, так что ни о каких реальных различиях его строения говорить не приходится. Увеличение инерционной массы со скоростью есть чисто кинематический эффект — прямое следствие эйнштейновского закона сложения скоростей, который, в свою очередь, вытекает из основных свойств пространства и времени, открытых теорией относительности. Тем не менее эффект этот вполне реален в том смысле, что увеличить скорость тела относительно той системы отсчета, в которой он уже быстро движется, значительно труднее, чем увеличить скорость того же тела относительно другой системы, в которой он покоится или движется очень медленно.

21. ЗАКОН ИМПУЛЬСОВ В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Зависимость массы от скорости является самым главным и по существу единственным отличием релятивистской динамики от классической, если только во всех расчетах и рассуждениях исходить не из второго закона Ньютона в обычной форме:

$$ma = m \frac{\Delta v}{t} = F,$$

а из закона импульсов:

$$\Delta p = \Delta(mv) = Ft.$$

Дело в том, что эквивалентность этих законов в теории относительности нарушена изменчивостью массы в зависимости от скорости; если в классической механике:

$$\Delta p = \Delta(mv) = mv_2 - mv_1 = m(v_2 - v_1) = m \Delta v$$

то в теории относительности:

$$\Delta p = m_2 v_2 - m_1 v_1 \neq m \Delta v.$$

В классической механике при разгоне тела его импульс $p = mv$ растет за счет одного только множителя v — пропорционально скорости. В релятивистской динамике вместе с v увеличивается также и масса m , так что импульс растет быстрее скорости. В теории относительности пропорциональность между p и v (и то лишь приближенная) соблюдается только при медленных движениях, пока масса практически постоянна.

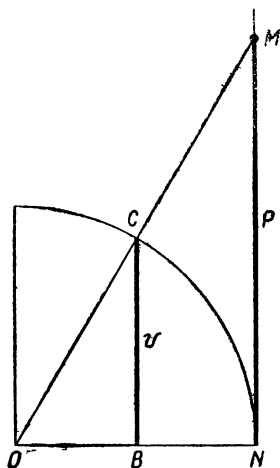


Рис. 37

Наглядное представление о характере зависимости импульса тела от его скорости (как для медленных, так и для быстрых движений) дает знакомая уже нам номограмма (рис. 37). Здесь CB — скорость v , а OM — релятивистский коэффициент K . Последний совпадает по величине с релятивистской массой такого тела, масса которого в состоянии

покоя равна единице ($m_0 = 1$). Легко доказать, что отрезок касательной MN изобразит импульс того же тела

$$p = mv = m_0 K v = 1 \cdot K v = K v.$$

Для доказательства воспользуемся подобием треугольников OMN и OCB . Их сходственные стороны пропорциональны:

$$\frac{MN}{CB} = \frac{OM}{OC}, \text{ или } \frac{MN}{v} = \frac{K}{1},$$

откуда

$$MN = K v = p$$

(ведь мы предположили, что $m_0 = 1$). Для тела же с произвольной массой покоя m_0 импульс будет, естественно, в m_0 раз больше, что очень просто учесть, выбирая масштаб для импульсов.

Поворачивая мысленно радиус OC (рис. 38), мы видим, что сначала импульс $p = mv$ растет главным образом непосредственно благодаря росту скорости, так как масса тела при медленных движениях меняется очень слабо. Но при околосветовых скоростях едва заметное повышение скорости сопровождается уже несоизмеримо большим приращением импульса, обусловленным ростом массы.

Согласно закону импульсов, который справедлив как в классической, так и в релятивистской динамике, изменение импульса тела совпадает по величине и направлению с толчком приложенной к нему силы. Если неподвижное вначале тело испытывает последовательно ряд толчков одинакового направления q_1, q_2, q_3, \dots , то за соответствующие промежутки

времени импульс тела возрастает на величину $\Delta p_1 = q_1, \Delta p_2 = q_2, \Delta p_3 = q_3, \Delta p_4 = q_4$ и т. д. Номограмма (рис. 38) показывает, что последовательные равные толчки, сообщая одинаковые приращения импульсов, вызывают все меньшие и меньшие приращения скорости: $\Delta v_1 > \Delta v_2 > \Delta v_3 > \dots$. Именно поэтому безнадежны все попытки перегнать свет.

Теперь уже легко выяснить, как движется тело под действием постоянной силы (в классической механике движение его было бы равноускоренным). Постоянная сила за равные промежутки времени сообщает телу и

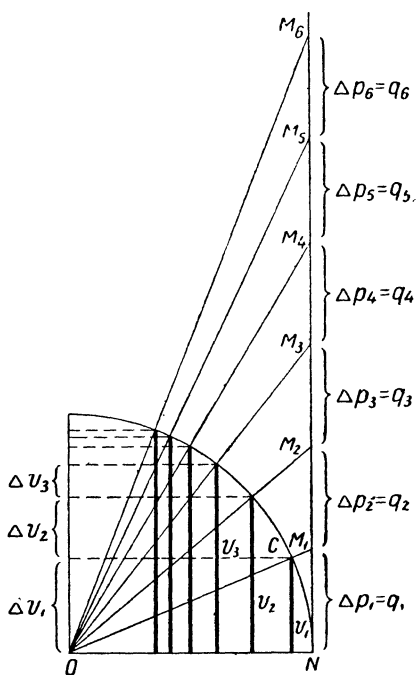


Рис. 38

одинаковые толчки. Последовательно откладывая их на оси импульсов NM_6 (рис. 38) от точки N (мы будем предполагать, что в начальный момент тело покоилось), получим значения импульса движущегося тела

$$p_1 = NM_1, \quad p_2 = NM_2, \quad p_3 = NM_3, \dots$$

через равные промежутки времени (например, через каждую секунду) и соответствующие этим моментам времени скорости v_1, v_2, v_3 и т. д.

Откладывая эти скорости как функции от времени (рис. 39), получим интересный график, иллюстрирующий закон нарастания скорости под действием постоянной силы. Как и следовало ожидать, в начале движения, пока оно еще не очень быстро, рост скорости, как и в механике Ньютона, происходит пропорционально времени (прямолинейный участок графика скорости, почти совпадающий с графиком импульса, так как в рассматриваемом случае масса покоя принята равной единице). Однако пропорциональность эта не точная, а приближенная; постепенно она все более и более нарушается, рост скорости замедляется и при околосветовых скоростях практически прекращается — «световой барьер» быстроты недостижим.

Одновременно с увеличением скорости растет и масса. На номограмме значения ее в последовательные моменты времени изображаются отрезками OM_1, OM_2, OM_3, \dots . Переносим их на график (в уменьшенном масштабе), получим кривую зависимости массы от скорости: сперва масса почти постоянна, потом начинается ее рост, все более и более быстрый. Когда скорость приближается к световой, т. е. к 1, график массы почти сливается с графиком импульса (ведь последний отличается от массы лишь множителем v).

Импульс тела, равный произведению массы на скорость, возрастает пропорционально времени, так как тело получает за равные промежутки времени одинаковые толчки; сперва этот рост идет преимущественно за счет множителя v , а потом — за счет m . Пожалуй, в теории относительности состояние движения тела наилучшим образом характеризуется именно его импульсом, а не скоростью и не массой в отдельности. В классической физике не менее выразительной характеристикой движения (наравне с импульсом) была и скорость. Но когда ско-

рость приближается к своему предельному значению $v=1$ и вступает в свои права теория относительности, изменения скорости делаются ничтожно малыми, хотя разгон тела все еще продолжается и импульс его (а значит, и способность оказывать механическое воздействие на

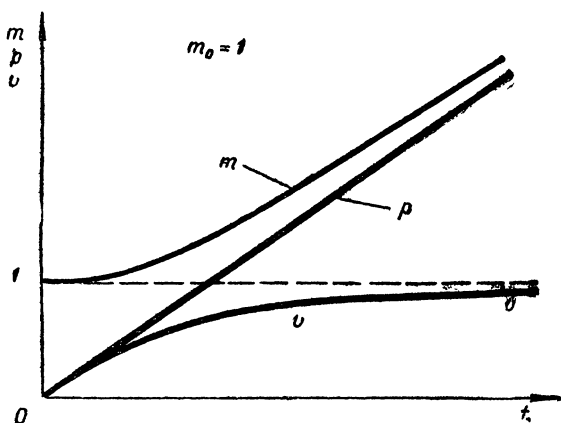


Рис. 39

другие тела, например при соударениях) по-прежнему нарастает. Что же касается релятивистской массы, то и ее величина тоже определенным образом характеризует интенсивность движения, но изменения ее становятся заметными только при околосветовых скоростях.

Разгон тела до очень больших скоростей под действием постоянной силы практически осуществляется в некоторых типах ускорителей элементарных частиц. В линейном ускорителе (рис. 40) имеется однородное электрическое поле, которое действует на электрон, протон или иную заряженную частицу с постоянной силой $F=eE$, где e — заряд частицы, а E — напряженность поля. В бетатроне (рис. 41) электрон движется по круговой траектории в электрическом поле, силовые линии которого имеют форму окружности (такое поле создается по закону электромагнитной индукции Фарадея изменяющимся магнитным потоком; электрон удерживается на круговой траектории под действием центростремительной силы магнитного происхождения). Преимущество бетатрона состоит в том, что электрон может миллионы раз пробежать по одному и тому же пути, все время набирая

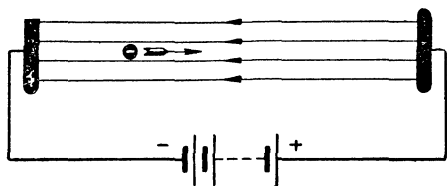


Рис. 40

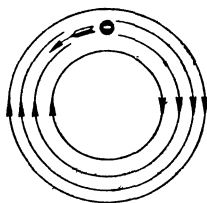


Рис. 41

импульс; таким способом удастся столь близко подойти к световой скорости, что релятивистский коэффициент K достигает нескольких тысяч и релятивистская масса электрона превосходит даже массу покоящегося протона! Разумеется такой стремительно мчащийся электрон обладает огромной кинетической энергией, но по какой формуле следует ее вычислять, учитывая релятивистские эффекты, об этом мы будем говорить в следующем параграфе.

22. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

С увеличением скорости возрастает не только импульс, но также и кинетическая энергия движущегося тела. В классической физике величина кинетической энергии E выражается известной формулой

$$E = \frac{mv^2}{2}.$$

В теории относительности эта формула должна быть заменена другой, которая как мы увидим, оказывается удивительно простой, хотя вывод ее довольно сложен (при первом чтении достаточно его только просмотреть).

Энергия — это способность производить работу. Величина кинетической энергии движущегося тела определяется количеством той работы, которую оно может произвести прежде чем остановится. И, наоборот, чтобы сообщить кинетическую энергию покоящемуся телу, необходимо совершить над ним работу, равную этой энергии. Вот это соображение, непосредственно вытекающее из самого понятия энергии, мы и положим в основу вывода релятивистской формулы кинетической энергии.

Допустим, что к покоящемуся вначале телу приложена сила F , которая выводит его из состояния покоя, а за-

тем постепенно увеличивает его скорость. За небольшой промежуток времени t эта сила производит толчок Ft и увеличивает импульс тела как раз на такую величину:

$$\Delta p = Ft.$$

В то же время эта сила совершает работу

$$A = F \cdot s = Fvt,$$

где $s = vt$ — путь, пройденный телом со скоростью v за время t (поскольку движение ускоренное, под v надо бы подразумевать среднее значение скорости за промежуток времени t , но ввиду малости этого промежутка можно приближенно брать значение v в его начале или его конце). Работа A легко выражается через приращение импульса Δp :

$$A = Fvt = vFt = v \Delta p. \quad (1)$$

Теперь следует обратиться к номограмме (рис. 42). Допустим, что к рассматриваемому моменту тело приобрело уже скорость $v_0 = C_0B_0$ и импульс $p_0 = M_0N$, а по истечении очень малого промежутка времени t скорость достигла значения $v = CB$, а импульс — значение $p = NM$, т. е. возрос на величину $\Delta p = p - p_0 = MM_0$. Какая работа A совершена была при этом силой F , действующей на тело? Она легко может быть найдена графически.

Для этого из центра O проводим дугу окружности M_0S . Ввиду предполагаемой малости Δp мала и дуга M_0S , поэтому мы вправе приближенно считать ее отрезком прямой линии. Благодаря равенству отмеченных углов SMM_0 и OCB заштрихованные прямоугольные треугольники SMM_0 и OCB подобны. Поэтому отношение катетов, прилежащих к указанным углам, равно отношению гипотенуз:

$$\frac{SM}{CB} = \frac{MM_0}{OC},$$

или

$$\frac{SM}{v} = \frac{\Delta p}{1},$$

откуда

$$SM = v \Delta p,$$

а это, согласно (1), и есть интересующая нас работа A .

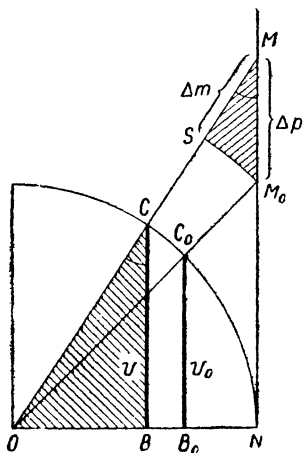


Рис. 42

Как видим, работа силы за время t , а значит, и полученное за ее счет приращение кинетической энергии ΔE графически выражается отрезком SM . Но этот же отрезок SM изображает также и приращение Δm релятивистской массы движущегося тела за тот же промежуток времени t ($OM_0 = OS$ — релятивистская масса при скорости v_0 , а OM — при скорости v).

Таким образом графический расчет привел нас к довольно неожиданному выводу: приращения массы и энергии при изменении скорости тела равны между собой (у нас они имеют одинаковую размер-

ность, так как скорость $v = \frac{V}{c}$ — величина безразмерная). Конечно, мы знали и раньше, что в теории относительности увеличение кинетической энергии тела сопровождается также и возрастанием его массы (инерционность тела растет со скоростью!), но вряд ли кто-либо из читателей подозревал, что связь между Δm и ΔE сведется к простому равенству!

Пока тело покоится, кинетической энергии у него нет, а масса покоя m_0 существует. Поэтому при увеличении скорости тела от нуля до v его масса меняется от m_0 до m , а кинетическая энергия — от 0 до E . Следовательно, приращение массы при этом составляет $\Delta m = m - m_0$, а приращение кинетической энергии.

$$\Delta E = E - 0 = E$$

(т. е. попросту совпадает с накопленным телом запасом кинетической энергии). Ввиду доказанного только что равенства приращений энергии и массы ($\Delta E = \Delta m$), мы вправе написать

$$E = m - m_0,$$

или

$$m = m_0 + E.$$

Установленное только что равенство приращений энергии и массы могло бы показаться случайным и уж во всяком случае относящимся только к энергии одного вида — кинетической. Однако Эйнштейну удалось это замечательное равенство обобщить и показать его более глубокий смысл и всеобъемлющий характер. Он высказал и обосновал следующее положение: при *любом* изменении энергии какого-нибудь тела на некоторую величину ΔE его масса изменяется на величину

$$\Delta m = \Delta E,$$

что имеет место для всех видов энергии и всех тел.

Чтобы убедиться в справедливости такой гипотезы, обсудим следующий мысленный эксперимент. В закрытой лаборатории, способной перемещаться без трения в горизонтальном направлении, имеются две совершенно одинаковые пары массивных дисков A_1 , A_2 и B_1 , B_2 (рис. 43). Центр тяжести, или центр масс, этой лаборатории (с учетом дисков) находится в точке M . Приведем теперь правые диски в быстрое вращение (один — по часовой, а другой — против часовой стрелки). Масса их возрастет, и центр масс системы сместится вправо (например, в точку N), хотя извне на данную систему материальных тел никакие силы не действовали.

Налицо как будто бы явное противоречие с законом движения центра масс. Однако оно тотчас же устраняется, если принять только что сформулированное положение Эйнштейна. Ведь привести диск в быстрое вращение — значит сообщить ему некоторое количество энергии ΔE . Эта энергия может быть заимствована от какого-нибудь тела, расположенного рядом с диском (например, от закрученной пружины, баллона со сжатым газом, заряженного аккумулятора и т. д.). Но, согласно гипотезе

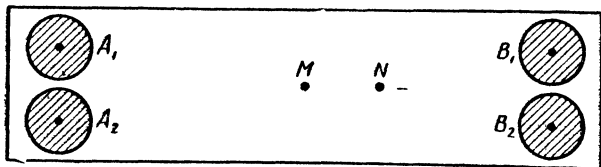


Рис. 43

Эйнштейна, после отдачи данного количества энергии масса указанного тела должна уменьшиться на величину $\Delta m = \Delta E$, т. е. как раз настолько, насколько увеличилась масса диска вследствие его вращения. Таким образом, никакого изменения общей массы в правой части лаборатории не происходит, и центр масс не смещается.

Можно принять все меры к тому, чтобы в процессе раскрутки дисков никаких других явлений в космической лаборатории не происходило; однако заведомо нельзя добиться того, чтобы увеличение энергии дисков происходило без затраты энергии каким-либо другим телом.

Можно, конечно, предположить, что необходимая энергия тем или иным способом передается из другой (левой) части лаборатории, например, с помощью световых волн, испускаемых прожектором P и улавливаемых приемником лучистой энергии R (рис. 44). Однако здесь на сцену выступают новые явления — световое давление и световая отдача.

Испуская световой импульс, прожектор P испытывает отдачу, подобно орудью при выстреле. Вследствие этого космическая лаборатория приобретает движение влево. Когда же световой импульс достигнет приемника лучистой энергии R , он окажет на него световое давление, в результате чего движение лаборатории прекратится. Однако за время распространения импульса лаборатория успеет сместиться на некоторое расстояние влево.

Это было бы непостижимым для механики смещением центра масс в отсутствии внешних сил, если бы оно не компенсировалось знакомым уже нам точно таким же по величине смещением его в противоположную сторону, обусловленным изменением масс приемника и источника энергии.

Явления светового давления и световой отдачи были теоретически предсказаны Максвеллом и экспериментально обнаружены Лебедевым еще до создания теории относительности. Однако только теория относительности, установив связь массы и энергии, позволила согласовать эти явления с принципами механики.

Дальнейший шаг состоит в признании равенства не только между приращениями энергии и массы, но также и между полным запасом энергии тела и его полной массой:

$$E = mc^2,$$

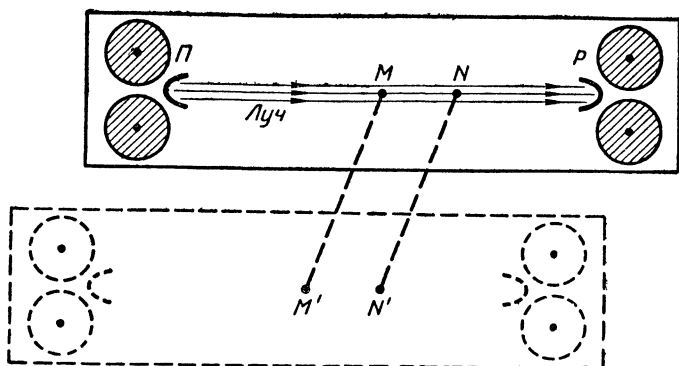


Рис. 44

(где E обозначает уже не кинетическую энергию, а полную). Тем самым высказывается предположение, что величина массы покоя m_0 характеризует полный запас энергии E_0 покоящегося тела. Запас этот включает в себя энергию теплового движения и взаимодействия молекул тела, кинетическую и потенциальную энергию атомов в молекулах, энергию взаимодействия и движения частей атома, а также и собственную энергию элементарных частиц, входящих в состав атома. Кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$ тела может быть вычислена как разность между полными энергиями в состоянии движения и в состоянии покоя:

$$E_{\text{кин}} = E - E_0 = m - m_0 = m_0 K - m_0 = m_0 (K - 1) = E_0 (K - 1).$$

По аналогии с кинетической энергией величину $m - m_0$ естественно было бы назвать «кинетической массой» (ведь это не прирост массы, обусловленный движением). Тогда релятивистская масса $m = m_0 + m_{\text{кин}}$ подобно тому как полная энергия $E = E_0 + E_{\text{кин}}$.

До сих пор мы пользовались «релятивистской» системой единиц, особенно удобной для теории относительности: выражая время в секундах, измеряли расстояния в световых секундах. Благодаря этому скорость света равнялась единице, а любая другая скорость v фактически выражалась отношением $\frac{V}{c}$, где V — значение этой же

скорости в произвольных единицах, а c — скорость света в таких же единицах:

$$v = \frac{V}{c}.$$

Таким образом, скорость v — величина безразмерная, и потому кинетическая энергия при малых скоростях в релятивистских единицах:

$$E_{\text{рел}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \frac{V^2}{c^2} \quad (1)$$

имеет размерность массы, например выражается в килограммах.

В обычных (нерелятивистских) системах единиц скорость света c отличается от единицы (например, в системе СИ $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек), и, следовательно, энергия выражается не в единицах массы, а в специальных, «энергетических» единицах, скажем, в джоулях.

Величина кинетической энергии в обычных единицах

$$E_{\text{обычн}} = \frac{1}{2} m V^2, \quad (2)$$

(если подставить m в килограммах, а V — м/сек, то энергия получится в джоулях). Сопоставляя выражения (1) и (2), легко устанавливаем количественное соотношение между значениями энергии в обычных и релятивистских единицах:

$$E_{\text{обычн}} = E_{\text{рел}} \cdot c^2. \quad (3)$$

В частности, одному килограмму энергии ($E_{\text{рел}} = 1$ кг) соответствует

$$\begin{aligned} E_{\text{обычн}} &= 1 \cdot c^2 = (3 \cdot 10^8)^2 \text{ джоулей} = 9 \cdot 10^{16} \text{ джоулей} = \\ &= 25 \cdot 10^9 \text{ киловатт-часов.} \end{aligned}$$

Разумеется, соотношение (3), зависящее только от единиц измерения, справедливо не только для энергии кинетической, но также и для энергии любого вида.

Учитывая соотношение (3), мы можем записать равенство энергии и массы ($E_{\text{рел}} = m$) в более универсальной форме, пригодной также и при использовании обычных единиц:

$$E_{\text{обычн}} = E_{\text{рел}} \cdot c^2 = m c^2$$

или

$$E_{\text{обычн}} = m c^2.$$

Индекс «обычн» в этой формуле, как правило, опускается, так как она не теряет силу также и при использовании релятивистских единиц, достаточно только положить $c=1$. Поэтому в дальнейшем мы будем писать просто

$$E=mc^2 \quad (4)$$

и говорить не о равенстве, а о пропорциональности между энергией и массой. Исключительная по своему теоретическому и практическому значению формула (4) справедливо носит имя создателя теории относительности Эйнштейна.

24. ВЗАИМОСВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Открытое Эйнштейном соотношение

$$E=mc^2$$

не без оснований считается одним из важнейших выводов теории относительности; оно имеет огромное принципиальное и практическое значение.

Энергия и масса — это две физические величины, характеризующие материальное тело или систему тел с совершенно различных сторон: энергия есть мера способности тела производить работу, а масса — мера его инерционности. Формула $E=mc^2$ показывает, что эти два различных по существу свойства, которые раньше считались нисколько не связанными между собой, в действительности всегда сопутствуют друг другу и количественно пропорциональны.

Никакими средствами нельзя увеличить энергию тела, не увеличивая одновременно и его массу. И, наоборот, всякое увеличение массы тела обязательно сопровождается ростом его энергии.

Следовательно, формула $E=mc^2$ является математическим выражением открытого Эйнштейном закона взаимосвязи (или пропорциональности) энергии и массы.

К сожалению, иногда «для красного словца» говорят, что эта формула выражает возможность превращения энергии в массу (или даже в материю) и массы (или материи) в энергию. Но это совершенно неправильно. Если бы, например, энергия действительно могла превращаться в массу, то при этом масса должна была бы

увеличиваться, а энергия — убывать (ведь масса образуется за счёт превращающейся в нее энергии!). Но этого-то как раз и не допускает формула $E=mc^2$. Она ведь требует, чтобы при возрастании массы во столько же раз возрастала бы и энергия. А это как раз и означает, что масса не может возникать *за счет* исчезновения энергии. Ни с философской, ни с физической точки зрения о превращении массы (а тем более материи) в энергию не может быть даже и речи.

Как же следует тогда трактовать известные из ядерной физики превращения электронов и позитронов в гамма-лучи, а также обратные превращения гамма-лучей в электроны и позитроны? Ведь прямыми опытами установлено, что при столкновении обычного (отрицательного) электрона e^- с положительным электроном (иначе называемым позитроном) e^+ обе частицы исчезают, а в месте их встречи возникают гамма-лучи. Такое превращение описывается формулой

$$e^- + e^+ = 2\gamma,$$

где буквой γ обозначен фотон (или квант) гамма-лучей.

Не менее хорошо знакомы физикам также и обратные превращения, при которых один или два фотона гамма-лучей исчезают, а на их месте образуется электрон и позитрон, что может быть выражено формулой

$$2\gamma = e^- + e^+.$$

Первую реакцию называют аннигиляцией (т. е. исчезновением), а вторую — рождением пары частиц электрон — позитрон. Но нужно иметь в виду, что в результате реакции аннигиляции электрон и позитрон исчезают не бесследно, а превращаясь в не менее материальные фотоны гамма-лучей. При этом соблюдаются законы сохранения массы и сохранения энергии: масса возникающих фотонов равна массе исчезнувшей пары электрон — позитрон, а энергия фотонов — энергия электрона и позитрона.

Как видим, никакого превращения массы (а тем более материи) в энергию не происходит.

Точно так же и при второй реакции

$$2\gamma = e^- + e^+$$

один вид материи — электромагнитное поле (фотоны) превращается в другой вид материи — вещество в форме электрона и позитрона. При этом масса электромагнитного поля (фотонов) переходит в массу частиц вещества, а энергия электромагнитных волн — в энергию частиц вещества. Здесь опять-таки нет никакого возникновения материи из чего-либо нематериального, как нет и превращения энергии в массу.

Однако, имея дело с обычным веществом и его частицами, мы гораздо чаще сталкиваемся с проявлениями его инерционности, чем его способности совершать работу. Масса частицы вещества обнаруживается почти в каждом физическом явлении, тогда как запас ее внутренней энергии никак не проявляется и не может быть использован без разрушения самой частицы.

Поэтому частица вещества в наиболее знакомых каждому физических процессах выступает прежде всего как носитель инерционной массы; наличие же у нее пропорционального этой массе запаса «внутренней» энергии обнаруживается главным образом в явлениях, изучаемых ядерной физикой.

В противоположность этому гамма-лучи, свет и другие виды электромагнитных волн чаще всего используются нами именно как носители энергии, способной легко превращаться в другие виды. Инерционность же электромагнитных волн (в тех концентрациях, с какими нам приходится иметь дело в земных условиях) по сравнению с обычными телами настолько мала, что ее проявления можно обнаружить только весьма тонкими экспериментами (например, общая масса света в большой освещенной комнате сравнима с массой одного атома).

Вот почему, говоря о фотонах, мы делаем обычно акцент на их энергии, а рассматривая частицы вещества, — на их массе.

В свете сказанного можно понять (но, конечно, не оправдать), почему реакция

$$e^{-} + e^{+} = 2\gamma$$

воспринимается некоторыми как «превращение массы в энергию». Выделяя шрифтом акцентируемое свойство физического объекта, эту реакцию можно схематически изобразить так:

М А С С А частиц вещества → м а с с а фотонов
Э н е р г и я частиц вещества → Э Н Е Р Г И Я фотонов

Рассмотрим еще термоядерную реакцию, которая происходит в водородной бомбе, а в дальнейшем будет использоваться в термоядерных электростанциях:



здесь D — дейтерий (тяжелый водород), T — тритий (сверхтяжелый водород), He — гелий, а n — нейтрон.

Проверим баланс масс, заимствуя из таблиц соответствующие значения масс (в атомных единицах):

<u>$D + T$</u>	<u>$He + n$</u>
2,015	4,003
+ 3,016	+ 1,009
<hr/> 5,031	<hr/> 5,012

Как видим, баланс явно не сходится: справа недостает 0,019 ат. единицы (такую «недостачу» физики называют дефектом массы). Как иногда неаккуратно говорят, это количество массы при данной реакции «превращается в энергию».

Не нужно, однако, упускать из виду, что в результате ядерной реакции получаются не покоящиеся, а стремительно движущиеся частицы, настолько быстрые, что их релятивистские массы значительно отличаются от «масс покоя», величины которых приводятся в таблицах. Если подставить в уравнение реакции не табличные значения масс покоя, а фактические релятивистские массы исходных и образующихся частиц, баланс сойдется — никакого исчезновения массы в действительности не происходит.

В дальнейшем стремительно движущиеся продукты термоядерной реакции, взаимодействуя с окружающими телами, отдадут им свою кинетическую энергию и остановятся. Если измерить их массу *тогда*, она окажется меньше массы исходных ядер, но ведь зато ровно настолько же увеличилась (вследствие приобретенного движения) масса тел, которым была передана энергия.

Таким образом, хотя масса и не превращается в энергию, количество энергии ΔE , освобождающееся при ядерной реакции, пропорционально дефекту массы Δm ,

т. е. разности между массами покоя исходных частиц и продуктов реакции:

$$\Delta E = c^2 \Delta m.$$

В частности, дефекту массы 0,019 г соответствует энергия в 1,7 миллиарда килоджоулей, т. е. приблизительно полмиллиона киловатт-часов. Именно такое количество энергии освобождается в результате взаимодействия одного грамм-атома (двух граммов) дейтерия с одним грамм-атомом (тремя граммами) трития. Можно также сказать, что при термоядерной реакции некоторая часть массы покоя превращается в «кинетическую массу» (а значит, и соответствующая часть энергии покоя превращается в кинетическую энергию).

Итак, знаменитая формула Эйнштейна

$$E = mc^2$$

имеет самое непосредственное отношение к открытию и использованию внутриядерной энергии. Именно на основании этой формулы было установлено существование огромных запасов энергии в ядре атома и намечены пути ее «высвобождения».

Сам Эйнштейн, предвидя значение формулы

$$E = mc^2,$$

еще в 1905 году писал: «Не исключена возможность того, что проверка теории может удасться для... солей радия» (искусственных радиоактивных веществ и ядерных реакций тогда не знали).

Вопросы и упражнения

1. Поясните физическое содержание понятия «инерционная масса» и укажите несколько способов ее измерения.
2. Как можно в условиях невесомости измерить массу тела, располагая рычажными весами и гириями?
3. Что называется в механике толчком и импульсом?
4. В чем заключается «закон импульсов»?
5. Как вывести закон импульсов из законов Ньютона? Какое значение имеет при этом постоянство массы?
6. Опишите мысленный эксперимент для вывода зависимости массы от скорости в симметрирующей системе отсчета «Гамма».
7. Как выглядит тот же эксперимент в системе отсчета «Альфа»?
8. В системе отсчета «Альфа» ракеты «Бета» и «Гамма» движутся с примерно одинаковыми (почти световыми!) скоростями v и v_0 (рис. 36). Как же получается, что они одновременно прибывают к ракете «Альфа»?

9. Сопоставляя рисунки 35 и 36, можно заметить, что при соударении шаров их линии центров наклонены к оси ракеты «Гамма» под разными углами. Не противоречит ли это принципу относительности?

10. Рассматривая мысленный эксперимент в системе отсчета «Альфа», выведите формулу зависимости массы от скорости.

11. При какой скорости движения протон имеет такую же массу, как и покоящееся ядро атома гелия?

12. Как согласуется установленная Эйнштейном зависимость массы от скорости с принципом относительности Галилея?

13. Каким отрезком изображается релятивистская масса на номограмме?

14. Почему в релятивистской динамике при справедливости закона импульсов нет простого аналога второго закона Ньютона?

15. Каким отрезком изображается импульс на номограмме? Докажите это.

16. Тело движется при наличии приложенной к нему постоянной силы. Покажите графически, как меняется его скорость, релятивистская масса и импульс в зависимости от времени.

17. Выведите с помощью номограммы величину кинетической энергии движущегося тела (в теории относительности).

18. Рассматривая мысленный эксперимент с вращающимися дисками в изолированной космической лаборатории, покажите, что всякий вид энергии должен обладать массой, и дайте обоснование формулы Эйнштейна о взаимосвязи энергии и массы.

19. Почему в мысленном эксперименте рассматриваются не два диска, а две пары дисков?

20. Переходя от релятивистских единиц энергии к обычным, получите формулу $E=mc^2$.

21. Раскройте смысл формулы $E=mc^2$ на примере аннигиляции и рождения электрон-позитронных пар.

22. Поясните смысл формулы $E=mc^2$ на примере термоядерной реакции.

23. Почему нельзя говорить, что «масса переходит в энергию» или «энергия переходит в массу»?

РАЗОБЛАЧЕНИЕ ПАРАДОКСОВ

25. БЫСТРЕЕ СВЕТА

Многие положения теории относительности настолько поразительны и странны, что иногда кажутся даже противоречащими «здравому смыслу». Однако нас это не должно смущать: наука потому и называется наукой, что она смело ломает веками сложившиеся предрассудки. Разве в свое время люди не склонны были называть «противоестественным» и «нелепым» все то, что в действительности лишь непривычно, например существование айтиподов или вращение Земли?

Вот почему нас никогда не должна отпугивать необходимость отказа хотя бы и от очень привычных, но научно ничем не обоснованных положений. Если этого требует наука, мы должны быть готовы заменить их новыми, более правильными положениями, какими бы удивительными они на первый взгляд нам ни представлялись.

Иное дело, когда в новой теории обнаруживаются внутренние противоречия или ее выводы расходятся с твердо установленными данными других наук. Пока такие противоречия не устранены, теория не может, конечно, рассчитывать на признание.

В наличии внутренних противоречий не раз пытались уличить также и теорию относительности (пожалуй, она подвергалась таким нападкам почаще других учений). Однако при более внимательном анализе предполагаемые противоречия всегда оказывались лишь *парадоксами*, т. е. мнимыми, кажущимися, иллюзорными.

Разбор парадоксов не только укрепляет позиции теории Эйнштейна, но также и способствует более глубокому пониманию ее сущности. Поэтому мы сейчас уделим анализу их значительное внимание.

Большая группа парадоксов основана на том, что какой-нибудь из выводов теории относительности приводит-ся в кажущееся противоречие с самим принципом относительности, положенным в ее основу. Иными словами, используя релятивистские эффекты, «обнаруживают» абсолютное движение инерциальной системы. Сюда относятся «парадокс транспортера», «парадокс колеса» и наиболее известный из всех «парадокс близнецов». Все они в этой главе будут подробно проанализированы и полностью разоблачены.

Не начнем мы с парадоксов другой группы. Они состоят в том, что приводятся очевидные для всех и неопровержимые примеры скоростей, превышающих световую — ведь о таких «сверхсветовых» скоростях всерьез говорится даже в самых солидных книгах по современной технике. Но этим-то уже якобы вполне «опровергается» теория Эйнштейна, отрицающая всякую возможность «обогнать свет».

Чтобы понять, в чем дело, достаточно только уточнить, о каких именно скоростях идет речь в известном релятивистском положении: «не может быть скоростей, превышающих световую».

Прежде всего, в этой формулировке (как и вообще в книгах по теории относительности) под «световой скоростью» понимается скорость c распространения света в пустоте, приблизительно равная $300\,000\text{ км/сек}$ (а точнее, $299\,776\text{ км/сек}$). В различных же веществах свет распространяется медленнее, например в алмазе со скоростью $125\,000\text{ км/сек}$. Поэтому даже с точки зрения теории относительности нет ничего удивительного в том, что в таких веществах электроны и другие частицы могут обогнать свет, хотя при этом скорость их все-таки меньше c (именно при таких условиях наблюдается свечение Черенкова). Однако в физике и технике приходится иногда говорить и о скоростях, превышающих скорость света в пустоте, т. е. больше $300\,000\text{ км/сек}$; примером может служить так называемая фазовая скорость распространения радиоволн внутри металлических труб (волноводов) или в ионизированных слоях атмосферы. Суть дела заключается в том, что теория относительности накладывает свои ограничения не на любые скорости.

Она только утверждает, что скорость распространения сигнала какой угодно природы относительно любой

инерциальной системы отсчета не превышает световой скорости, так как в противном случае могло бы иметь место нарушение закона причинности. Этим уже, между прочим, сказано, что никакие физические тела не могут двигаться быстрее света и что такой предел не может быть превзойден также и скоростью передачи энергии в пространстве (хотя бы потому, что указанные процессы могли бы служить сигналами).

Все же остальные скорости в теории относительности принципиально ничем не ограничены и при известных условиях могут быть больше световой. Но какие же это «другие» скорости?

Во-первых, скорость *сближения* двух тел (сигналов или скоплений энергии) или *удаления* их друг от друга,

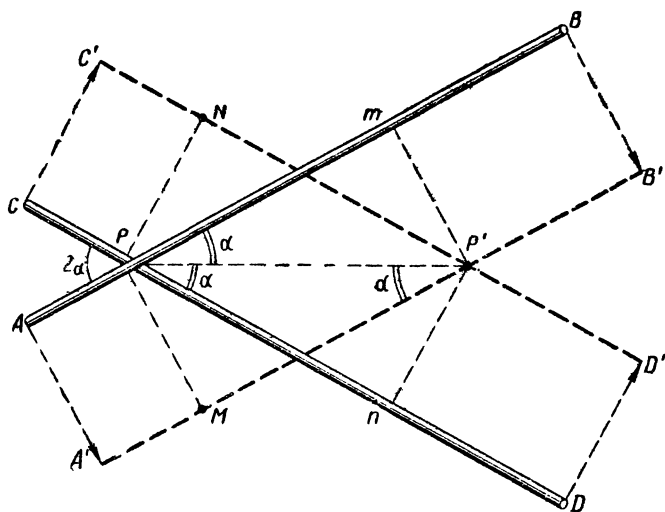


Рис. 45

т. е. быстрота изменения расстояния между ними. Однако, если с одним из тел связать систему отсчета, относительная скорость другого тела в этой системе окажется меньше c .

Во-вторых, скорости всякого рода мысленных объектов, геометрических образов и т. д. Для пояснения этой

наиболее интересной категории приведем несколько примеров.

Стержень AB (рис. 45) равномерно движется в направлении стрелок со скоростью $V=200\,000$ км/сек, все время оставаясь параллельным своему первоначальному положению. Пунктирная прямая $A'B'$ изображает положение стержня через одну секунду.

Аналогично движется и второй стержень CD , образующий с первым угол 2α .

Обозначим буквой P точку пересечения обоих стержней. С какой скоростью перемещается она в пространстве? Через одну секунду она займет положение P' , пройдя расстояние PP' , которое, очевидно, больше, чем расстояние PM или PN , проходимое каждым стержнем. Из прямоугольного треугольника $PP'M$ видно, что

$$PP' = \frac{PM}{\sin \alpha}.$$

Но поскольку все указанные на чертеже перемещения происходят за единицу времени, они численно совпадают с соответствующими скоростями. Следовательно, точка пересечения P движется со скоростью

$$V_P = \frac{V}{\sin \alpha} > V.$$

Формула показывает, что при достаточно малом угле α скорость точки пересечения V_P может в любое число раз превышать скорость V каждого из стержней. В частности, при $V=200\,000$ км/сек и $\alpha=30^\circ$.

$$V_P = \frac{200\,000 \text{ км/сек}}{\sin 30^\circ} = 400\,000 \text{ км/сек}.$$

Движение точки пересечения двух стержней быстрее света не противоречит теории относительности потому, что такая точка является лишь геометрическим образом, а не физической частицей. Участки стержней, которые находились в начальный момент в точке P , через секунду займут положение M и N (рис. 45), т. е. перестанут иметь что-либо общее с точкой пересечения. Новая точка пересечения P' образуется благодаря встрече других участков стержней, за секунду до этого занимавших положения m и n . Как видим, все участки стержней перемещаются со скоростью меньше c и ни один из них не обладает скоростью V_P .

Однако видоизменим опыт: наденем на стержни в точке их пересечения маленькое проволочное кольцо K (рис. 46). При движении стержней оно как будто бы вынуждено будет следовать за точкой их пересечения, а значит, двигаться быстрее света со скоростью V_P . Но этого, разумеется, не произойдет. При постепенном ускорении

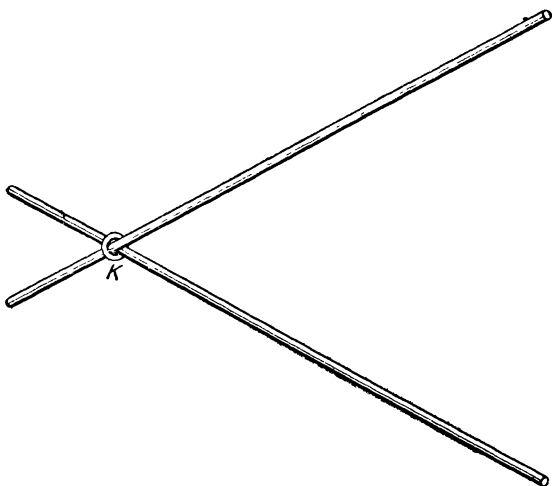


Рис. 46

стержней, едва лишь скорость кольца приблизится к световой, масса его резко возрастет, и оно будет препятствовать дальнейшему ускорению стержней. Любые по величине силы, приложенные к стержням, не смогут, преодолевая инерцию кольца, заставить его двигаться быстрее света.

А это значит, что скорость самих стержней, тормозимых кольцом, ограничена еще меньшей величиной $c \cdot \sin \alpha$.

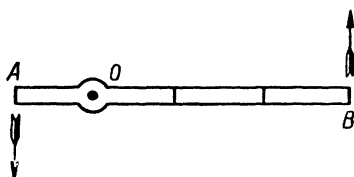


Рис. 47

Подобное же ограничение скорости за счет неограниченного возрастания массы наиболее быстрой детали ка-

кого-нибудь механизма можно проиллюстрировать также на примере рычага, одно плечо которого втрое длинней другого (рис. 47). Как бы велико ни было вращающее усилие, приложенное к точке A , оно не заставит ее двигаться быстрее $100\,000$ км/сек, потому что при этом скорость точки B приближается к световой и масса правого конца рычага, а значит, и инерционность всей системы неограниченно возрастают*.

Легко понять, что точка пересечения двух стержней (рис. 45) не может быть использована также и в качестве сигнала. Предположим, что в момент окончания некоторого важного опыта точка пересечения P проходит как раз мимо экспериментатора. Может ли он использовать сверхсветовое движение точки пересечения, чтобы поскорее известить своего коллегу, находящегося в P' , о результатах проделанного эксперимента? Конечно, нет! Пересечение стержней одинаково пройдет мимо коллеги экспериментатора независимо от исхода опыта, а сделать «на точке пересечения» какую-нибудь «пометку» экспериментатор не в состоянии. Что бы он ни проделал со стержнями в точке P (скажем, покрасил их), результаты этого через секунду скажутся не в точке P' , а в точках M и N , т. е. на расстоянии V , а не V_P от точки P . Никакое воздействие, произведенное в точке P , не может через одну секунду иметь в точке P' каких бы то ни было последствий. Даже если экспериментатор задержит в точке P движение стержней при помощи какого-нибудь препятствия, участки m и n будут продолжать еще двигаться в течение некоторого времени, пока до них не дойдет волна механической деформации; распространяющаяся вдоль стержней намного медленнее, чем свет.

26. ГРЕБНИ ВОЛНЫ И «ЗАЙЧИК»

Другим, не менее любопытным примером движения быстрее света может служить световой «зайчик». Вообразим себе фантастический, но в принципе вполне возможный опыт. В центре сферы очень большого радиуса вращается прожектор (рис. 48), узкий луч которого пада-

* Занимательное обсуждение относящихся сюда вопросов читатель найдет в книге В. П. Маковского «Смотри в корень. Сборник любопытных задач и вопросов», «Наука», 1969, стр. 124—132.

ет на внутреннюю поверхность сферы, образуя на ней яркое пятно — «зайчик». За один оборот прожектора «зайчик» описывает на сфере полную дугу большого круга. Длина этой дуги $2\pi R$ может быть как угодно велика, так как радиус сферы R принципиально ничем не ограничен. Следовательно, и скорость движения «зайчика» может быть какой угодно, в том числе и больше 300 000 километров в секунду.

Другой аналогичный опыт может быть произведен в гигантской электронно-лучевой трубке. В современных трубках электронный луч движется по экрану со скоростями, достигающими 10 000 км/сек. Достаточно увеличить расстояние от катода (электронного прожектора) до экрана в 50 раз, чтобы скорость перемещения луча по экрану достигла 500 000 км/сек.

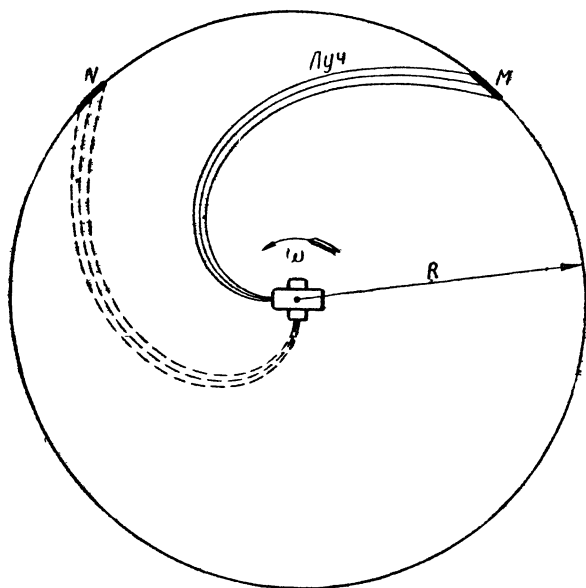


Рис. 45

Как видим, указанными способами, по крайней мере в принципе, возможно заставить световой «зайчик» или светящееся пятно на экране электронно-лучевой трубки

двигаться быстрее света. Но можно ли назвать это движением *физического тела*, передачей *энергии* или распространением *сигнала*?

Физическим телом световой «зайчик», бесспорно, никто не назовет. Но ведь в любом элементе светового луча содержится запас энергии? Конечно, но он отнюдь не перемещается вместе с «зайчиком» вдоль поверхности освещенной сферы в направлении от M к N ! Порция световой энергии, пришедшая в точку M (рис. 48), не переходит оттуда со сверхсветовой скоростью в точку N , а тратится на нагревание участка M . А в точку N поступает от прожектора новая порция энергии. Здесь нет движения энергии по сфере со скоростью, большей скорости света c , световая энергия движется *вдоль луча* с присущей ей скоростью 300 000 км/сек.

Но нельзя ли использовать световой «зайчик» в качестве «обгоняющего свет» сигнала? Ни в коем случае! Желая отправить из M в N некоторое сообщение не может написать *его* на световом «зайчике». Нельзя также из точки M управлять движением самого «зайчика», изменять его цвет или яркость иначе, как связавшись с «персоналом» (людьми или автоматами), обслуживающим прожектор.

Что бы ни произошло в пункте M в момент прохождения «зайчика», это не может никак повлиять ни на прохождение «зайчика» через N , ни на события, которые будут при этом разыгрываться в точке N .

Разобранные два примера: пересечение стержней и световой зайчик — могут показаться искусственными. Но они не только иллюстрируют принципиальную возможность скоростей, превышающих световую и все же не противоречащих частной теории относительности, но также и подводят нас к более глубокому пониманию исключительно важного для физики явления распространения волн.

Процесс распространения волн нередко противопоставляют в физике движению частиц (хотя между ними, конечно, немало общего). Частица при своем движении действительно *переходит* из одной точки пространства в другую, сохраняя при этом свою индивидуальность; волна же, говоря образно, «исчезает» в одном месте и «возрождается» в другом.

Стоит только бросить щепку на поверхность волнуемой воды (в достаточно глубоком водоеме*), чтобы убедиться, что частицы воды в отличие от гребней волны не движутся в горизонтальном направлении. Они лишь периодически колеблются вверх и вниз**, в результате чего каждый гребень, опускаясь, постепенно превращается во впадину, а на месте соседней впадины формируется новый гребень. Но процессы эти так ловко согласованы между собой во времени, что мы-то воспринимаем только что возникший на наших глазах гребень как новое положение исчезнувшего.

Еще видней это на волне *изгиба*, распространяющейся по длинной веревке (рис. 49). Изогнутый участок ее *AB* со временем распрямляется, соседний же *BC* — изгибается, а нам кажется, что это «изгиб веревки» переместился из положения *AB* в положение *BC*. Но ведь такое «перемещение» изгиба вдоль веревки совсем не означает перемещения молекул в этом же направлении — перемещающийся «изгиб» это не материальное тело, а *состояние* веревки.

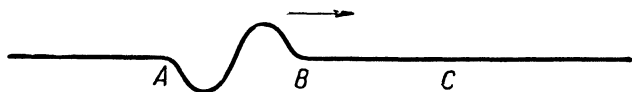


Рис. 49

Распространение волн — это видимое перемещение состояний, обусловленное поочередным переходом в данное состояние различных тел (или участков тела) с последующим выходом из этого состояния. Чтобы получилась видимая картина распространения волн, такие изменения состояний в различных точках пространства должны быть строго согласованы между собой во времени.

Здесь будет уместно вспомнить «бегущие огоньки» световой рекламы (рис. 50, верхний ряд). Когда лампочка *a* тухнет, *e* загорается (нижний ряд); нам же кажется, будто светящийся участок *ad* перемещается в положение *be*. На самом же деле лишь изменились состоя-

* На более мелких местах волна «опрокидывается»; при этом некоторая часть воды движется горизонтально, увлекая с собой плавающие предметы (морской прибор).

** Кругообразными движениями.

ния лампочек a и e . Само собой разумеется, что рекламные огоньки могут «бежать» таким образом с любой скоростью, хотя бы даже и превышающей световую, надо только включать и выключать каждую очередную лампочку с достаточно малым запаздыванием τ по сравнению с предыдущей.

Если расстояние между соседними лампочками Δ , то скорость движения «огонька»

$$V = \frac{\Delta}{\tau}.$$

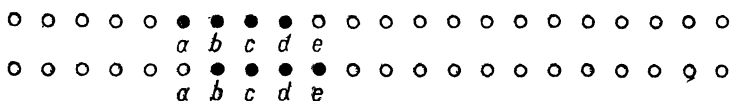


Рис. 50

Ничто в принципе не ограничивает малости τ , а значит, и величины V : ведь включение каждой лампочки в заранее заданные моменты может производиться своим, автоматически действующим выключателем с автономным, заблаговременно отрегулированным часовым механизмом. В таких условиях включения отдельных лампочек совершенно *независимы* друг от друга — какая-либо причинная связь между ними отсутствует. Перегорание одной из лампочек или отказ ее часового механизма на «поведении» других лампочек никак не скажется

А вот если бы мы пожелали, чтобы каждая следующая лампочка включалась не часовым механизмом, а по сигналу, посланному предыдущей лампочкой в момент своего включения (например, с помощью фотореле, реагирующего на свет предшествующей лампочки), то скорость движения «огонька» была бы уже ограничена световой скоростью.

В связи с такими особенностями при изучении волн естественно различать два случая:

1) когда согласованные изменения состояния в различных точках волны физически *независимы* друг от друга и

2) когда они между собой *причинно связаны*.

В первом случае скорость распространения волны ничем не ограничена, во втором же она не может превышать световой скорости.

В качестве дополнительного примера волны первого типа может быть приведен рассмотренный уже в начале параграфа «световой зайчик». Ведь по внутренней поверхности сферы «скользит» не какое-нибудь тело, а *состояние* освещенности. Освещенные участки со временем становятся темными, а темные — освещенными; эти согласованные между собой во времени изменения освещенности как раз и создают картину движения светового «зайчика». Поскольку каждый последующий участок сферы получает освещение независимо от предыдущих, скорость движения зайчика не ограничена.

Ко второму типу относятся волны на поверхности жидкости, звуковые и световые волны. При распространении этих волн каждый последующий участок возбуждается от предыдущего, так что скорость распространения волны не может превышать $300\,000\text{ км/сек.}$

(Дальнейшую часть параграфа при первом чтении можно пропустить).

Помимо указанных двух крайних типов волн, возможен еще и *промежуточный*, когда явления в соседних точках, фигурально выражаясь, «полунезависимы» между собой, т. е. в какой-то мере их можно считать независимыми, а в какой-то — причинно связанными. Чтобы понять суть дела, возвратимся к знакомым уже нам бегущим огням рекламы, только пусть теперь движение их носит периодический характер, а каждая лампочка управляется своим «полунезависимым» выключателем. Устройство этого выключателя таково, что он может в течение некоторого времени самостоятельно включать и выключать лампочку, но для этого его нужно предварительно «раскачать». Раскачка же осуществляется по световому сигналу предыдущей лампочки (читатель волен здесь нарисовать в своем воображении какую-нибудь подходящую схему с использованием фотореле).

Применение такого «полунезависимого» выключателя сообщает волне бегущих огней любопытнейшие свойства. Так как «раскачавшийся» выключатель может включать следующую лампочку со сколь угодно малым запаздыванием относительно предыдущей, скорость распространения волны ничем не ограничена. Но это относится только к *уже установившимся* волнам, когда выключатели *уже* раскачаны.

При пуске же рекламной установки, когда бежит только первая волна огней и выключатели еще не раскачаны, дело обстоит иначе. Граница между выключателями, *уже* вступившими в работу и *пока еще* бездействующими, передвигается со скоростью передачи соответствующего сигнала — заведомо не быстрее света. Стоит взглянуть в это время на ряд лампочек, как нашему взору откроется своеобразная картина: в левой части огни бегут слева направо со сверхсветовой скоростью, но, не добегая до правого конца, они угасают в некоторой промежуточной точке M , которая с течением времени тоже перемещается вправо, но медленнее (со скоростью $V_M \leq c$). И только после того, как точка M достигнет правого конца ряда лампочек, в нем будет наблюдаться уже «простая» картина волн, распространяющихся быстрее света.

Если же мы попытаемся прекратить распространение волн, вывернув несколько первых лампочек, нам это, конечно, удастся, однако не сразу: «раскачанные» выключатели будут еще в течение некоторого времени продолжать свою работу. При этом сперва прекратится волна в левой части ряда, и лишь потом — в правой, граница N между этими частями будет перемещаться слева направо со скоростью сигнала, которая не может превышать световой скорости.

Естественные механизмы, равносильные системе описанных здесь «выключателей с раскачкой», нередко встречаются в природе. Не нужно поэтому удивляться существованию различных волн, распространяющихся быстрее света. Но если попытаться использовать такие волны для передачи сигнала (посылая их, например, прерывисто, в соответствии с телеграфной азбукой), то обязательно обнаружится, что в действительности такой сигнал передается не со скоростью распространения волн, а медленнее и уже заведомо не быстрее света (а именно со скоростью перемещения точек M и N , о которых мы только что говорили).

Одним из практически наиболее важных примеров подобного рода волн являются радиоволны, распространяющиеся в волноводах и верхних, ионизированных слоях атмосферы. Как видим, способность некоторых типов волн обгонять свет отнюдь не противоречит никаким принципам теории относительности.

Транспортер представляет собой бесконечную ленту из гибкого материала, которая движется по направляющим с помощью двух шкивов, укрепленных на станине AB (рис. 51). Приведем этот транспортер в действие с таким расчетом, чтобы скорость движения ленты приблизилась к световой. Тогда длина ее горизонтальных частей уменьшится в K раз, хотя расстояние между центрами шкивов останется без перемены. Если вначале лента свободно провисала, она натянется. А при недостаточном запасе длины материал ленты подвергнется растяжению. При этом в нем возникнут соответствующие напряжения, которые в принципе могут быть обнаружены динамометром и могут даже привести к обрыву.

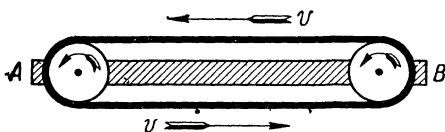


Рис. 51

Наоборот, станина AB под влиянием натяжения ленты подвергается деформации сжатия, что также может быть определено динамометром.

Так будут описываться явления в системе «Станина».

Если, однако, систему отсчета связать не со станиной, а с лентой, то покоящейся придется считать ленту, а станину — движущейся с большой скоростью. Тогда сократиться должна уже не лента, а станина, результатом чего будет уже не тугое натяжение, а свободное провисание ленты.

Но этот вывод явно противоречит принципу относительности: рассуждения, касающиеся одного и того же явления, приводят в двух разных системах отсчета к взаимно исключаящим результатам. Производя соответствующий опыт, можно будет опровергнуть один из них и подтвердить другой. А это позволит определить, который из двух объектов (лента или станина) находится в «истинном», а какой — только в «кажущемся» движении.

Таким образом, мы сталкиваемся с парадоксом: в данном конкретном случае применение теории относи-

тельности приводит к отрицанию одной из ее собственных основ — принципа относительности Эйнштейна.

Правда, от этого парадокса можно было бы отмахнуться: ведь скользящие по шкивам участки ленты движутся криволинейно, а частная теория относительности приложима только к инерциальным системам отсчета.

Но это не ответ на парадокс, а только попытка уклониться от его действительного анализа (вроде следующего «объяснения»: «Получить вечный двигатель, соединив электромотор с динамо-машиной ремнем и проводами, разумеется, не удастся, потому что в конце концов ремень обязательно перетрется»).

Можно, конечно, предположить, что криволинейные участки ленты не укорачиваются, а удлиняются как раз настолько, что компенсируется основной эффект. Но достаточно увеличить расстояние между осями шкивов, например в 10 раз, чтобы компенсация нарушилась: основной эффект укорочения прямолинейных участков возрастет вдесятеро, тогда как предполагаемый маскирующий эффект криволинейных частей останется тем же самым.

Действительное разъяснение парадокса состоит в невозможности связать инерциальную систему отсчета со всей лентой. А если система связана только с одним из ее участков, то он не инерциален: ведь каждый участок ленты (можно представлять его себе окрашенным в особый цвет) периодически меняет направление своего движения на противоположное.

Можно, конечно, воспользоваться инерциальной системой отсчета, которая все время движется относительно станины в том же направлении и с той же скоростью, что и нижняя часть ленты. В этой системе станина движется со скоростью v влево, нижняя часть ленты, естественно, неподвижна, а верхняя движется в ту же сторону, что и станина, но с «релятивистски удвоенной» скоростью

$$v' = \frac{2v}{1 + v^2}.$$

При этом станина укорачивается в K раз, нижняя часть ленты сохраняет натуральную длину, но зато верхняя сокращается значительно сильнее, чем в K раз. В результате общая длина ленты уменьшается настолько, что она, несмотря на укорочение станины, натягивается, а не провисает.

Как и следовало ожидать, рассмотрение в любой действительно инерциальной системе отсчета приводит к одинаковому результату (лента натягивается). Тем самым парадокс полностью снимается: в данном опыте станина и лента физически неравноправны, так как в отличие от станины лента не может считаться покоящейся ни в одной инерциальной системе (потому что ее части движутся относительно друг друга). По этой именно причине укорачивается лента по сравнению со станиной, а не наоборот.

Рассмотрим еще один довод, который мог бы быть выдвинут в подкрепление парадокса противниками теории относительности. Ровно половина ленты не работающего еще транспортера окрашена в черный цвет. Выберем такой момент времени, когда окрашенная часть ленты находится внизу, а неокрашенная — вверх (рис. 52).

В системе «Станина» обе части ленты, сокращаясь в одинаковое число раз, всегда будут оставаться равными по длине, как это и показано на рисунке 52.

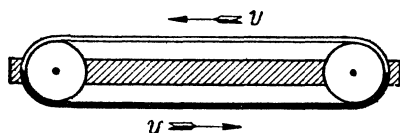


Рис. 52

В противоположность этому в инерциальной системе «Нижний участок ленты» уменьшение общей длины ленты происходит только за счет ее верхней части, тогда как нижняя часть ленты по сравнению со станиной даже удлиняется в K раз. Поэтому некоторая часть окрашенной «половины» неизбежно перейдет вверх, так что расположение ленты на шкивах будет соответствовать не рисунку 52, а рисунку 53.



Рис. 53

Казалось бы, достаточно одного взгляда на работающий транспортер, чтобы установить, который из двух противоречащих друг другу выводов соответствует действительности, и тем самым выделить преимущественную систему! Но это совсем не так. Чтобы установить, который из двух рисунков (52 или 53) подтверждается на опыте, нужно определить, одновременно ли проходят обе границы окрашенной «половины» ленты через крайнее правое и крайнее левое положение. А ведь в каждой системе отсчета понятие одновременности свое. Поэтому нет ничего невозможного в том, что в одной системе отсчета будет «наблюдаться» картина, показанная на рисунке 52, а в другой — показанная на рисунке 53.

28. КРИВАЯ КОРОЧЕ ПРЯМОЙ!

Вообразим большое колесо, которое может вращаться относительно системы «Звезды» (рис. 54). Вначале колесо неподвижно, а затем приводится в столь быстрое вращение, что линейная скорость его краев приближается к световой. При этом участки обода AB , BC , CD и т. д. сокращаются в K раз, тогда как радиальные «спицы» OA , OB , OC и т. д. сохраняют свою длину (ведь релятивистское укорочение испытывают только продольные размеры, т. е. размеры в направлении движения).

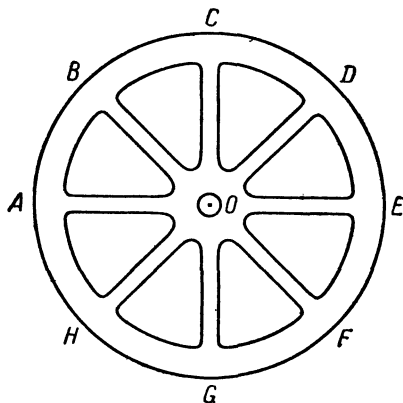


Рис. 54

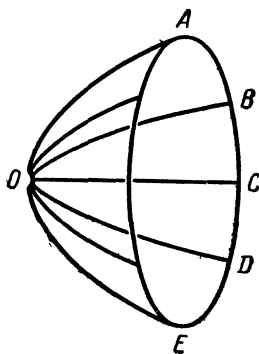


Рис. 55

Выходит, что при неизменном диаметре длина окружности уменьшается в K раз. Если $K=10$, то окружность станет приблизительно втрое короче своего диаметра — прямая перестанет служить кратчайшим расстоянием между точками!

Как справится теория относительности с такой геометрической несообразностью?

Чтобы лучше разобраться в деталях физических процессов, сопутствующих быстрому вращению, представим себе сначала, что мы резко охлаждаем покоящееся колесо. Допустим, что его обод изготовлен из материала с большим коэффициентом температурного расширения и сжатия, тогда как длина спиц почти не меняется с температурой. Тогда в результате охлаждения в колесе возникнут механические напряжения: участки обода, стремясь сократиться, будут надавливать на спицы.

В зависимости от механической прочности и упругих свойств, после охлаждения колеса либо его обод останется в растянутом состоянии, либо же укоротятся спицы (а вернее сказать, всегда будет в какой-то мере иметь место и тот и другой эффект). Во всяком случае никакого «укорочения окружности при неизменном диаметре» не будет.

Такое напряженное состояние колеса механически неустойчиво: малейшее отклонение в сторону — и оно примет форму сферического сегмента (рис. 55). Тогда действительно длина окружности обода будет меньше чем $2\pi r$, где r — длина изогнутой спицы. Однако изгибанию колеса можно воспрепятствовать, придав ему достаточную жесткость на изгиб или поместив его между двумя прочными пластинами.

Нечто аналогичное происходит и тогда, когда неподвижное вначале колесо приводится в быстрое вращение: его обод стремится сократиться, а спицы — сохранить неизменную длину. Какая из этих тенденций возьмет верх, всецело зависит от механических свойств обода и спиц; но никакого укорочения обода без пропорционального ему укорочения спиц не будет (разве что колесо примет форму сферического сегмента). Очевидно, что с принципиальной точки зрения ничто не изменится также и в том случае, если колесо со спицами будет заменено сплошным диском.

Итак, никакого неразрешимого противоречия с гео-

метрий не возникает. Нужно только иметь в виду, что в теории относительности даже при рассмотрении чисто кинематических вопросов не всегда допустимо пользоваться абстракцией абсолютно недеформируемого тела (впрочем, представление об абсолютно жестком стержне неприемлемо уже и потому, что с помощью его можно было бы мгновенно передавать сигнал: благодаря неизменности длины оба его конца смещались бы одновременно).

Однако предположим теперь, что колесо изготовлено (например, отлито) внутри быстро вращающейся мастерской. Это значит, что именно в состоянии быстрого вращения относительно системы «Звезды» оно свободно от внутренних напряжений. Если его остановить, обод будет стремиться к удлинению, а спицы — к сохранению своей длины. При этом возникают напряжения противоположного характера по сравнению с предыдущим случаем: в частности, колесо не будет проявлять никакой тенденции к превращению в сферический сегмент, наоборот, оно будет образовывать по краям складки.

Рассмотрим теперь те же явления в системе «Вращающаяся мастерская». Тогда нам придется считать, что отлитое в этой мастерской колесо, о котором только что шла речь, сперва покоилось, а потом — пришло в быстрое вращение. Но при этом в нем возникли внутренние напряжения, ведущие к образованию краевых складок, а не сферического сегмента. Налицо резкое расхождение с результатом такого же эксперимента в системе «Звезды»; позволяющее отличить ее от системы «Вращающаяся мастерская».

На этот раз возможность отличить одну систему отсчета от другой не мнимая, а действительная. Однако это ничуть не противоречит частной теории относительности, так как только одна из этих систем является инерциальной. При этом неинерциальность системы отсчета, вращающейся относительно неподвижных звезд, могла бы быть еще проще обнаружена и по другим, нерелятивистским эффектам (например, центробежному).

В так называемой общей теории относительности (которую мы в этой книге рассматривать не будем) Эйнштейном была сделана попытка сформулировать принцип относительности таким образом, чтобы он охватывал не только инерциальные, но также и неинерциальные систе-

мы. Однако, как показал акад. В. А. Фок, это могло быть достигнуто только за счет выхолащивания из самого принципа относительности всего его физического содержания. В действительности же, как показывает уже центробежный эффект, никакого физически содержательного «общего принципа относительности» не существует, а так называемая «общая теория относительности» в действительности является не расширением частной, а теорией всемирного тяготения.

Это не значит, конечно, что нельзя пользоваться вращающимися и вообще неинерциальными системами отсчета. Необходимо лишь помнить, что с инерциальными они не равноправны и физические явления в них подчиняются иным законам.

Более детальное исследование показывает, что своеобразие неинерциальных систем распространяется не только на физические, но даже и на геометрические соотношения. Когда экспериментатор, пользующийся вращающейся системой отсчета, измеряет длину окружности, он располагает метр в направлении движения. Поэтому, с точки зрения неподвижного * наблюдателя, он получает преувеличенное значение длины окружности, ибо пользуется сокращенным метром. Когда же вращающийся * наблюдатель измеряет диаметр, он располагает свой метр перпендикулярно к направлению движения и потому получает результат, с которым безоговорочно согласится также и неподвижный наблюдатель. Но при правильной длине диаметра и преувеличенной длине окружности отношение их уже не может равняться π .

29 ПАРАДОКС БЛИЗНЕЦОВ

Особенно много споров, не смолкнувших и до сих пор (хотя вопрос давно уже полностью решен), велось вокруг так называемого парадокса близнецов (или парадокса часов), указанного еще самим Эйнштейном. Сейчас эта проблема опять волнует умы в связи с проектами фотонных и ионных ракет и открываемой ими возможностью путешествовать во времени.

Сущность парадокса близнецов может быть лучше

* Относительно некоторой инерциальной системы отсчета «Альфа».

всего пояснена на следующем (пока еще совершенно фантастическом) примере.

Представим себе, что какой-нибудь межзвездный корабль (скажем, фотонная ракета) отправляется с Земли в сторону звезды Альдебаран, расстояние до которой (в круглых числах) 50 световых лет. Ракета летит со скоростью, очень мало отличающейся от световой, например такой, что коэффициент $K=10$. На путешествие «туда», естественно, затрачивается около 50 лет и столько же — на возвращение «обратно».

Однако, как мы уже хорошо знаем, все процессы на движущейся ракете протекают в K раз медленнее, чем на Земле. Следовательно, астронавтам покажется, что их путешествие продолжалось всего лишь пять лет туда и столько же обратно. И это будет, конечно, не только обманчивое впечатление заблуждающихся людей — такая именно длительность полета подтвердится вполне объективными данными: показаниями хронографов, расходом пищи, распадом радиоактивных препаратов, износом машин старением организмов и т. д.

Итак, с момента отлета космического корабля и до его возвращения по земным часам пройдет около ста лет, а по часам, установленным на самой ракете, — всего только десять лет. Поэтому отважный астронавт возвратится на родину постаревшим на десять лет, но его брат-близнец, оставшийся на Земле, едва ли сможет дожить до этого радостного события.

И как ни удивительна встреча 35-летнего путешественника со своим 70-летним внуком, невозможного в этом решительно ничего нет. Все это может быть разумно объяснено законами релятивистской физики. Наблюдая с помощью телескопа или телевизионной установки за теми физическими явлениями, которые происходят внутри быстро мчащегося звездолета (и сделав, разумеется, необходимые поправки на время распространения сигнала), находящиеся на Земле физики, знакомые с теорией относительности, не нашли бы в них ничего необыкновенного.

Кто уже знает, что релятивистская масса любого тела увеличивается с его скоростью, легко поймет, что колебания пружинного маятника часов, установленных на ракете, должны совершаться в более медленном темпе, чем такого же маятника на Земле. Ведь период колебания пружинного маятника увеличивается с его массой.

Вследствие увеличения массы электронов замедляются электрические процессы и разряд конденсатора длится дольше. Из-за увеличения массы атомов и молекул замедляются химические реакции, а значит, и жизнедеятельность организмов, неразрывно связанная с биохимическими процессами.

Такое объяснение может быть дано явлениям в ракете, *если их описывать в системе отсчета, связанной с Землей.*

Так как решительно все процессы замедляются в одинаковое число раз, путешественники на фотонной ракете этого не замечают. Ведь даже присущее каждому субъективное «чувство времени» основано на протекающих в нервных клетках биохимических и биофизических процессах, исключить которые из сферы действия законов релятивистской физики значило бы открыто встать на позиции витализма*.

Вот если бы замедление затрагивало не все, а только лишь некоторые явления или если бы они замедлялись не в одинаковое число раз — это легко могло бы привести к разрушению аппаратуры и гибели живых существ.

Целесообразно напомнить, что еще до теории относительности известны были различные способы замедления некоторых процессов. Например, простое охлаждение существенно замедляет и даже совсем приостанавливает химические реакции и жизнедеятельность организмов, так что надлежащим образом «замороженный» организм может быть совсем молодым «перенесен» в будущее. Но теория относительности указала нам новый и притом совершенно неожиданный способ «консервации» организмов — с помощью быстрого движения.

Однако знаменитый парадокс близнецов, о котором мы собрались говорить, состоит вовсе не в том, что возможность «поездки в будущее» с обывательской точки зрения представляется несуразной. Никаким принципам науки такая возможность не противоречит (тогда как, скажем, поездка в прошлое вступает в конфликт с прин-

* Витализм называется идеалистическое направление в биологии, отрицающее самую возможность естественнонаучного объяснения явлений жизни. Виталисты утверждали, что процессы, происходящие в живых организмах, обусловлены особой жизненной силой и потому не подчиняются законам физики и химии, справедливым якобы лишь для неорганической природы.

ципом причинности: приехавший в прошлое мог бы, например, в принципе случайно послужить причиной гибели своей матери еще до своего рождения!)

Действительный парадокс возникает при попытке описать результаты межзвездного путешествия в системе отсчета, связанной со звездолетом. Ведь в этой системе отсчета ракета остается неподвижной. Следовательно, время должно течь замедленно вовсе не на ракете, а на быстро движущейся Земле! И если астронавты чувствуют себя постаревшими за время экспедиции на десять лет, то их товарищи на Земле должны к моменту встречи состариться всего на год.

В пику принципу относительности Эйнштейна системы отсчета оказываются неравноправными, так что открывается принципиальная возможность отличать «действительное» движение от «кажущегося». Конечно, пока путешественники не возвратились, можно без конца спорить о том, кто движется: ракета удаляется от Земли или Земля с такой же скоростью удаляется от ракеты. Но после возвращения астронавтов сомнения уже нет: в покое находился тот, кто более постарел, а двигавшийся с большей скоростью должен был сохранить молодость.

Таким образом, рассуждая о замедлении часов в духе теории относительности, мы как будто бы неизбежно приходим к отрицанию ее самых существенных основ. Вот в этом-то и заключается парадокс близнецов.

Решение этой проблемы указано самим Эйнштейном (и впоследствии подкреплено более детальными расчетами других ученых). Суть дела в том, что, по крайней мере, одно из двух тел, участвующих в описанном эксперименте (Земля или ракета), не является инерциальным. Если бы оба тела двигались равномерно-прямолинейно, то, встретившись один раз, они бы уже никогда более не повстречались, так что нельзя было бы на опыте установить, кто «постарел» сильнее. Можно было бы, конечно, потом и на расстоянии сравнить «возрасты» в один и тот же момент времени, но ведь не существует единого для всех систем понимания одновременности.

Как видим, хотя бы одна из двух систем, участвующих в парадоксе близнецов, обязательно не инерциальна. И это является решающим: рассуждения в неинерциальной системе отсчета лишены доказательной силы. По-

этому к моменту новой встречи сильнее должны постареть жители Земли, которых можно считать приблизительно покоящимися в одной из инерциальных систем. Наоборот, ракета с астронавтами в процессе своего движения испытывала ускорения и потому не может считаться покоящейся ни в одной инерциальной системе.

Действительное неравноправие «Земли» и «Ракеты» в качестве систем отсчета может быть еще ярче проиллюстрировано следующими соображениями. Допустим, что при изменении направления своего полета на противоположное ракета испытывает ускорение порядка 200 g (где $g=9,8\text{ м/сек}^2$ — ускорение свободного падения у поверхности Земли). В это время внутри ракеты будет проявляться искусственная тяжесть, в 200 раз превышающая естественную тяжесть на поверхности Земли. Под гнетом указанной тяжести погибнут все живые существа и многие аппараты. К такому заключению мы придем, рассуждая в системе «Земля», и оно, без всякого сомнения, будет подтверждено на опыте.

Но если связать систему отсчета с ракетой и считать её равноправной, то нам пришлось бы признать, что не ракета, а земной шар испытывает ускорение 200 g , что неизбежно должно было бы привести к гибели всего населения Земли — невредимыми должны были бы остаться одни только «покоящиеся» астронавты! Разумеется, опыт не мог бы подтвердить такого чудовищного умозаключения, чем раз и навсегда отменяются любые притязания насчет равноправия ускоренно движущихся систем с инерциальными.

Заметим, в скобках, что некоторые защитники «здорового смысла» используют иногда тот факт, что в интересующем нас опыте часть времени ракета движется с ускорением, с целью подвергнуть сомнению сделанный ранее вывод о принципиальной возможности «поехать в будущее». «Когда ракета движется неравномерно, хотя бы с очень большой скоростью, на основании одной только частной теории относительности мы ничего определенного не можем сказать о ходе часов на ней. Совсем не исключена возможность, что влияние ускорения компенсирует ожидаемое нами влияние скорости!».

Но на примере транспортера мы уже научились опровергать подобные возражения. Увеличим участок равномерного движения ракеты во много раз, оставив движе-

ние ее на участках разгона и торможения без перемен. Тогда интегральный (итоговый) эффект замедления часов значительно возрастет, а предполагаемый компенсирующий его эффект ускорения часов из-за неравномерности движения останется тем же самым! Предполагаемая компенсация эффектов нарушится, и «здравому смыслу» все равно придется привыкать к возможности «путешествовать во времени».

Расчет по более точным формулам общей теории относительности приводит, разумеется, к тому же самому результату, но с некоторыми количественными уточнениями.

30. ЕЩЕ О ПАРАДОКСЕ БЛИЗНЕЦОВ

Принципиальная возможность полета в будущее (но без возвращения обратно) является, может быть, одним из самых поразительных выводов частной теории относительности. Прежде ведь время рассматривалось как независимая переменная, единственная, может быть, действительно ни от чего не зависящая величина. Теперь же открывается перспектива в каком-то смысле управлять ходом времени.

Чтобы лучше понять суть дела, нужно обязательно рассмотреть одни и те же явления в различных системах отсчета. Тогда нам станет гораздо яснее сравнительная роль скоростей и ускорений.

Назовем тот звездолет, который совершает межзвездный рейс с возвращением на Землю, ракетой «Альфа». Как мы уже хорошо знаем, с нею нельзя связать инерциальную систему. Пусть поэтому одновременно с ракетой «Альфа» в ту же сторону и с такой же скоростью отправляется в полет другая ракета — «Бета», которая, однако, не возвращается на Землю, а в течение очень длительного срока движется равномерно и прямолинейно. Вот с этой второй ракетой может уже быть связана инерциальная система отсчета «Бета».

В системе «Бета» земной шар движется с постоянной скоростью v в одном и том же направлении (движением Земли по орбите, ничтожно медленным по сравнению с околосветовыми скоростями, мы, разумеется, пренебрегаем). Что же касается ракеты «Альфа», то по отношению к системе «Бета» она сначала довольно длительное время

остаётся в покое (это соответствует путешествию «туда»), а затем движется в сторону Земли с «релятивистски удвоенной» скоростью $v' = \frac{2v}{1+v^2}$ и, наконец, догоняет Землю. Если скорости v соответствует значение коэффициента $K=10$, то для релятивистски удвоенной скорости v' элементарный расчёт даёт значение $K'=199$ *.

Более детально это путешествие ракеты «Альфа» в системе «Бета» описывается следующим образом (рис. 56).

В течение десяти лет собственного времени ракета «Альфа» покоится, так что показания её часов тождественны с показаниями часов ракеты «Бета». Но часы на движущейся Земле за это время отсчитают всего один год (т. е. в $K=10$ раз меньше). Затем ракета «Альфа» устремляется вдогонку Земле с «релятивистски удвоенной» скоростью v' . По часам стремительно мчащейся ракеты «Альфа» погоня продолжается десять лет, по неподвижным часам ракеты «Бета» — 1990 лет (в $K'=199$ раз дольше), а по земным часам — 199 лет (в $K=10$ раз меньше, чем на ракете «Бета», но больше, чем на ракете «Альфа», так как Земля движется медленнее её).

Хотя истолкование явлений в системе «Бета» по сравнению с системой «Земля» иное, все доступные опытной проверке результаты тождественны. В частности, за время «разлуки» астронавты состарятся на двадцать лет ($10+10$), а жители Земли — на двести ($1+199$). Такой же точно результат получится, конечно, и в какой угодно другой системе отсчёта, лишь бы она была инерциальной, в частности и в такой, где Земля и ракета все время летят в одинаковую сторону, но ракета сперва опережает, а потом (после уменьшения скорости) позволяет догнать себя равномерно движущейся Земле.

Можно даже каждую «половину» путешествия рассматривать в своей инерциальной системе: удаление ракеты от Земли — в системе «Бета», а их сближение — в другой инерциальной системе «Гамма», в которой покоится возвращающаяся ракета «Альфа». Нужно только учесть, что при смене системы отсчёта меняется и понятие одновременности.

* См., например, Ю. И. Соколовский. Теория относительности в элементарном изложении, «Наука». М., 1964, Дополнение Д (стр. 178).

По существу, мы именно так и поступали, когда пытались связать систему отсчета непосредственно с ракетой «Альфа», но тогда мы считали, что это одна система, и потому вынуждены были принимать во внимание ее неинерциальность. Теперь же мы будем поочередно пользоваться двумя различными инерциальными системами отсчета (сперва одной, а потом — другой); в связи

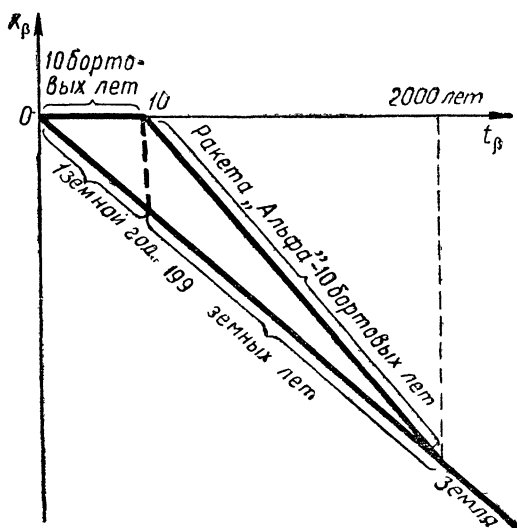


Рис. 56

с этим нам надо будет учитывать неизбежные последствия смены системы отсчета в середине рассуждения.

Поясним все это на пространственно-временной диаграмме, построенной в системе «Земля» (рис. 57). Точка O соответствует отправлению ракеты «Альфа», точка A — ее развороту, точка B — возвращению на Землю.

Прямые OA и OM служат осями системы «Бета» — инерциальной системы, в которой звездолет «Альфа» покоится на этапе удаления от Земли. Прямые OF и ON представляют собой оси инерциальной системы «Гамма», в которой звездолет «Альфа» покоится на этапе сближения его с Землей ($OF \parallel AB$).

Точки C, D, E изображают события на Земле, которые в системах «Земля», «Бета» и «Гамма» считаются

одновременными с разворотом ракеты «Альфа» ($CA \parallel OP$, $DA \parallel OM$, $EA \parallel ON$). Дальнейшие рассуждения проведем дважды: один раз в системе «Земля», а второй — в системах «Бета» и «Гамма».

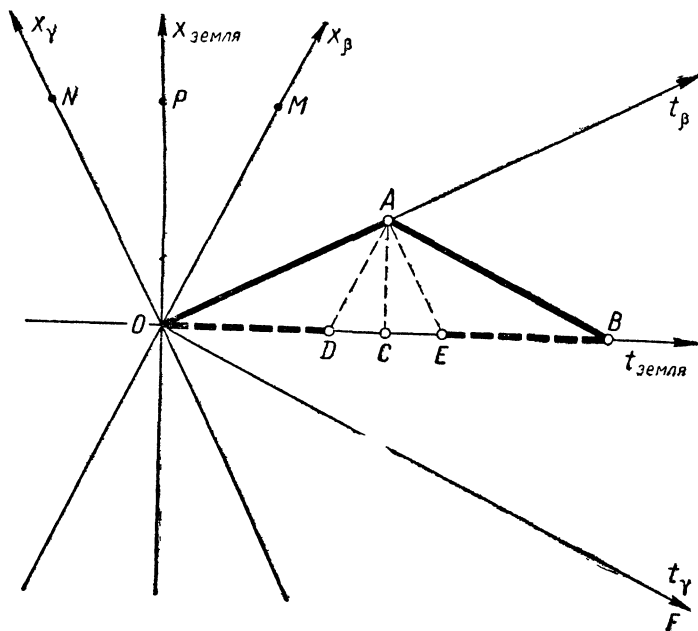


Рис. 57

В СИСТЕМЕ «ЗЕМЛЯ»

В системе «Земля» покоящиеся часы от события O до события C отсчитывают в K раз больше лет, чем движущиеся часы на ракете «Альфа» от того же события O до поворота A , геоцентрически одновременного с событием C .

Точно так же между событиями C и B земные часы отсчитают в K раз больше лет, чем часы на ракете «Альфа» между событиями A и B .

Следовательно, за время путешествия (от взлета O и до возвращения B) по земным часам пройдет в K раз больше времени, чем по часам ракеты «Альфа», — результат, хорошо известный нам из предыдущего.

Рассуждая в системе «Бета», нужно признать, что покоящиеся часы ракеты «Альфа» от события O до события A отсчитают в K раз больше лет, чем движущиеся часы на Земле от того же события O до события D , которое в системе «Бета» считается одновременным с A .

Рассуждая аналогичным образом в системе «Гамма», приходим к выводу, что от события A до события B покоящиеся часы ракеты «Альфа» отсчитывают в K раз больше лет, чем движущиеся часы на Земле от события E до события B (в системе «Гамма» событие E считается одновременным с A).

Таким образом, общее количество лет, отсчитанное часами «Альфа» за все путешествие, в K раз больше суммарного числа лет, протекших на Земле от O до D и от E до B . Но ведь надо принять во внимание еще и то время, которое протекло на Земле между событиями D и E : оно выпало из нашего рассмотрения из-за смены систем отсчета в середине рассуждения. Ведь эта смена системы изменила понятие одновременности; она как бы внезапно «перебросила» нас от события D , которое мы вначале считали одновременным с поворотом A , к гораздо более позднему событию E , которое мы стали считать одновременным тому же событию A после изменения системы отсчета.

Как видим, хотя промежутки времени OA и AB , измеренные по часам ракеты «Альфа», в K раз больше соответствующих промежутков времени OD и EB по часам Земли, весь промежуток времени от взлета O до возвращения B по земным часам дольше, а не короче, чем по часам путешественников.

Вот так мы еще раз убедились, что рассуждения в любых инерциальных системах отсчета приводят к совершенно одинаковому выводу — замедленному старению тех людей и машин, которые не могут считаться покоящимися в какой-либо инерциальной системе; тем самым кажущееся противоречие в данном вопросе полностью устранено. Но при этом истолкование одного и того же эффекта в различных системах отсчета оказывается неодинаковым, подобно тому, как один и тот же дом по-разному выглядит с севера и с востока. Поэтому если мы интересуемся действительной причиной обсуждаемого эф-

фекта, кроющейся в самой природе вещей, а не ее частными «преломлениями» в различных системах отсчета, то ее следует искать лишь в коренных свойствах времени и пространства релятивистской физики.

Замедленное течение времени в движущейся системе подтверждается практическими наблюдениями над мю-мезонами, возникающими в очень высоких слоях атмосферы под влиянием космических лучей.

Хорошо известно, что «продолжительность жизни» мю-мезона составляет около двух микросекунд (по истечении этого срока 63% всех наличных мю-мезонов распадается с образованием других частиц). Однако на пролет атмосферы мю-мезоны затрачивают значительно больше времени и тем не менее благополучно достигают поверхности Земли. Единственное объяснение такого необыкновенного «долголетия» мезонов при полете их сквозь атмосферу состоит в замедлении хода времени вследствие быстрого движения.

Техника наших дней не располагает еще столь быстрыми средствами передвижения, которые позволили бы провести аналогичные опыты с живыми существами, ведь даже скоростям космических ракет соответствует значение релятивистского коэффициента, почти не отличающееся от единицы ($K=1,000\,000\,000\,000\,8$). Однако не так давно была высказана идея фотонного звездолета — космической ракеты, отбрасывающей назад не струю раскаленных газов, а луч света (видимого или невидимого), т. е. поток фотонов*. Возможны также ракеты ионные с отбрасыванием назад потока заряженных частиц, разогнанных в ускорителе.

В принципе при наличии достаточно мощных источников энергии с помощью фотонной или ионной ракеты могут быть достигнуты скорости, сколь угодно близкие к световой. Технические же трудности создания таких ракет настолько велики, что практическое преодоление их если и возможно, то только в далеком будущем. Тем не менее уже и сейчас интересно подробнее ознакомиться с

* Подробнее о фотонной ракете можно прочитать в популярной брошюре Ю. И. Соколовский и В. И. Шилов. Фотонный звездолет. Изд-во Харьковского ун-та, Харьков, 1960, а также в несколько более сложной книжке: Р. Л. Перельман. Двигатели галактических кораблей, Изд-во АН СССР, М., 1962.

некоторыми релятивистскими эффектами, которые должны обязательно наблюдаться при столь больших скоростях движения.

Строго говоря, частная теория относительности предсказывает лишь эффекты, обусловленные быстрыми равномерно-прямолинейными движениями, в частности влияние скорости на ход «часов» и протекание других процессов во времени. Что же касается влияния ускорений, то этот вопрос выходит за рамки частной теории относительности и может быть строго решен только методами общей теории относительности.

Академик В. А. Фок указывает, что в общем случае влияние ускорений на ход часов нельзя определить, не входя в детали устройства часового механизма (большие ускорения могут попросту вывести часы из строя). Однако можно с полной уверенностью утверждать, что влияние ускорений, лишь в несколько раз превышающих ускорение свободного падения (10 м/сек^2), ничтожно: например, аналогичная величина на Солнце в 28 раз больше, но никакого изменения хода времени, которое обязательно сказалось бы на частоте излучаемого света, практически мы не замечаем.

31. ЛЕТОСЧИСЛЕНИЕ АСТРОНАВТОВ

Замедление темпа времени, как и другие релятивистские эффекты, заметно лишь при скоростях, приближающихся к световой. Для достижения таких скоростей звездолет должен в течение долгого времени двигаться с ускорением.

Но при движении с ускорением в ракете ощущается «искусственная тяжесть». Чтобы пассажиры чувствовали себя в привычных условиях обычной «земной» тяжести, длительный полет должен совершаться с ускорением около 10 м/сек^2 (в отсутствие ускорения наблюдалась бы «невесомость»).

По правилам механики Ньютона для достижения световой скорости при ускорении 10 м/сек^2 требуется примерно год (а за два года при том же ускорении можно было бы достичь и скорости в $600\,000 \text{ км/сек!}$). Но теория относительности вносит существенную поправку и заставляет рассмотреть этот вопрос подробнее. В механике

Эйнштейна ускорение тела в различных инерциальных системах неодинаково: например, в тех системах, где скорость тела близка к световой, оно заведомо очень мало.

Когда выбирают величину ускорения, с которым должен лететь космический корабль, заботятся прежде всего о самочувствии астронавтов. А оно определяется ускорением, измеренным не в какой-нибудь произвольно выбранной инерциальной системе, а именно в той, по отношению к которой пассажиры звездолета (а значит, и сам звездолет) находятся в покое.

С другой стороны, величина ускорения ракеты определяется интенсивностью работы ее двигателя. При этом речь идет опять-таки об ускорении, измеренном в инерциальной системе отсчета, в которой покоится ракета.

Но с ускоренно движущимся звездолетом принципиально нельзя связать никакую инерциальную систему, а пользоваться иными системами мы не в праве. Поэтому берут такую инерциальную систему, по отношению к которой в *данный момент времени* скорость космического корабля равняется нулю. Такую инерциальную систему, «мгновенно связанную» с кораблем, условимся называть *квасисобственной*. В последующие моменты времени по отношению к этой системе корабль будет уже двигаться, но с малой скоростью, например при ускорении 10 м/сек^2 через одну секунду — со скоростью 10 м/сек , через две секунды — со скоростью 20 м/сек и т. д. Когда же эта скорость станет уже значительной, меняют систему отсчета, выбирая другую инерциальную систему, тоже «мгновенно связанную» с ракетой, но в новый момент времени.

Благодаря такому выбору системы отсчета, как бы быстро ни мчалась сама ракета, при рассмотрении явлений внутри нее можно пользоваться механикой Ньютона и вообще классической физикой с таким же правом, с каким мы делаем это на Земле.

Ускорение звездолета по отношению к квасисобственной системе условимся называть собственным ускорением. Оно может быть измерено самым обычным инерционным акселерометром (измерителем ускорения — стр. 22, рис. 5); при полете в пустоте оно всецело определяется работой двигателя и в свою очередь определяет самочувствие пассажиров и условия работы различного оборудования. Поэтому мы будем предполагать, что именно это

собственное ускорение в течение всего полета остается постоянным и равным 10 м/сек^2 .

Это значит, что за каждую секунду (по бортовым часам) скорость звездолета по отношению к квазисобственной системе увеличивается на 10 м/сек (тоже в бортовых единицах). Однако по отношению к Земле дело обстоит иначе.

Предположим, что в рассматриваемый момент ракета, а значит, и мгновенно-связанная с ней квазисобственная инерциальная система «Каппа» уже обладают по отношению к Земле околосветовой скоростью v . Через некоторое время ракета приобретает по отношению к системе «Каппа» еще дополнительную скорость u . Но скорость ракеты по отношению к Земле увеличится не на u , а на значительно меньшую величину u' — в соответствии с эйнштейновским законом сложения скоростей. Поэтому земной наблюдатель будет считать, что скорость звездолета нарастает не равномерно (как это было бы при постоянном ускорении), а все медленнее и медленнее, неограниченно приближаясь к световой, но ее не достигая. В этих условиях удобнее характеризовать быстроту движения не величиной скорости, только в далеких десятичных знаках отличающейся от c , а релятивистским коэффициентом K .

Как видим, для набора скорости, достаточно близкой к световой, при ограниченных ускорениях, космическому кораблю нужно немало времени. Значительная часть этого времени (пока скорости еще невелики) протекает почти одинаково в системах «Ракета» (точнее «Каппа») и «Земля». Поэтому длительность межзвездного путешествия не может быть сделана сколь угодно малой, даже если измерять ее по часам ракеты.

Наиболее краткое для астронавтов и в то же время самое «комфортабельное» для них путешествие к далеким звездам должно протекать так.

Весь путь «туда» (т. е. от Земли к звезде) делится на две равные части; точно так же делится и путь обратно (так что все путешествие складывается из четырех этапов).

На первом этапе происходит непрерывный набор скорости с ускорением 10 м/сек^2 . Ровно на полпути между Землей и звездой ракета разворачивается на 180° (соплом или «прожектором» вперед) и в течение второго эта-

па летит с таким же по абсолютной величине замедлением — 10 м/сек^2 . В момент достижения цели скорость корабля оказывается полностью погашенной. Возвращение от звезды на Землю совершается сходным образом.

Такая схема полета обеспечивает максимальную скорость движения при заданном ускорении. Если разгон прекратить раньше, будет набрана меньшая скорость, при более же длительном ускорении удастся достичь большей скорости, но ее нельзя будет без перегрузки погасить на остающемся участке пути.

Если собственная длительность такого путешествия (т. е. длительность его по часам ракеты) меньше года, то почти точно такой же будет и длительность его по земным часам: ведь корабль не успеет еще набрать околосветовой скорости. Но чем больше собственная дли-

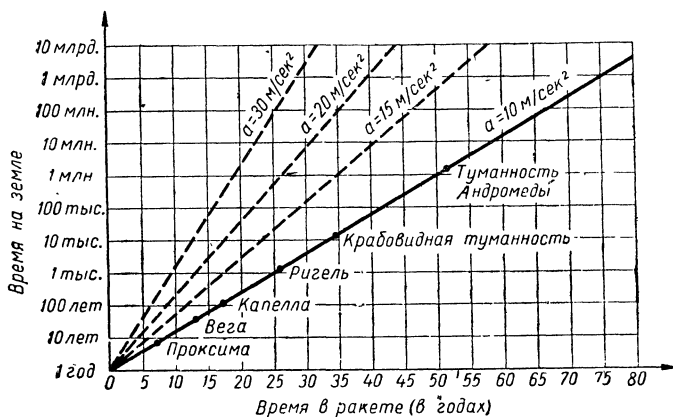


Рис. 58

тельность путешествия, тем большие скорости полета достигаются в результате разгона и тем резче различие между собственной и «земной» длительностью.

На основании расчета построен любопытный график зависимости длительности такого путешествия в оба конца в системе «Земля» от его собственной длительности (рис. 58).

Как показывает расчет, с увеличением бортовой длительности полета в арифметической прогрессии его «земная» длительность возрастает примерно в геометриче-

ской. Поэтому на графике земная длительность отложена в логарифмическом масштабе, а собственная — в линейном.

Из графика видно, что астронавт, отдавший путешествию десять лет своей жизни, по возвращении на Землю найдет своих соотечественников постаревшими на 20 лет. Но проведя в пути двадцать лет, он возвратится на Землю, «состарившуюся» в его отсутствие на 300 лет.

Как и следовало ожидать, с увеличением длительности космической экспедиции обостряется и различие между собственным и земным временем. 25-летнее путешествие позволило бы увидеть будущее, отдаленное от нас на 10 веков, а 50-летнее — на миллион лет! Полет же продолжительностью в 75 лет дал бы возможность совершить «прыжок в грядущее» на целый миллиард лет!

Как видим, полет в отдаленное будущее потребует от человека затраты значительной части его жизни. Сроки эти можно и сократить, если, отказавшись от комфорта, лететь с ускорениями больше 10 м/сек^2 , но при этом придется мириться со значительным увеличением тяжести. Пунктирные кривые на графике как раз и соответствуют ускорениям 15 и 20 м/сек^2 , т. е. полуторному и двукратному увеличению силы тяжести.

Преодолеваемые при таких путешествиях расстояния определяются очень просто. Ведь в системе «Земля» звездолет почти все время летит со скоростью, лишь незначительно отличающейся от световой. Поэтому продолжительность путешествия в годах является в то же время и приблизительной мерой пройденного расстояния, выраженного в световых годах. Это значит, например, что при продолжительности экспедиции по бортовым часам 18 лет, а по земным часам 100 лет, можно достичь звезды Капелла, удаленной от нас на расстояние около 50 световых лет, и возвратиться назад. Точки и надписи, нанесенные на графике, как раз и показывают, какие небесные светила могут быть достигнуты в ходе соответствующей космической экспедиции.

Интересно вообразить себя участником межзвездной экспедиции, мчащейся на фотонной ракете, скажем, со скоростью $v=0,98$, которая соответствует значению релятивистского коэффициента $K=5$. Постараемся выяснить, в каком виде представится звездоплавателям ход исторического процесса на их родной планете, если они

будут иметь возможность наблюдать за ним при помощи оптических или телевизионных средств (или хотя бы периодически получать с Земли краткие сообщения).

Сперва мы будем вести все рассуждения в системе «Земля».

В тот самый день (*геоцентрически* «тот самый» день!), когда на Земле празднуют столетний юбилей начала экспедиции, ее участники торжественно отмечают двадцати-

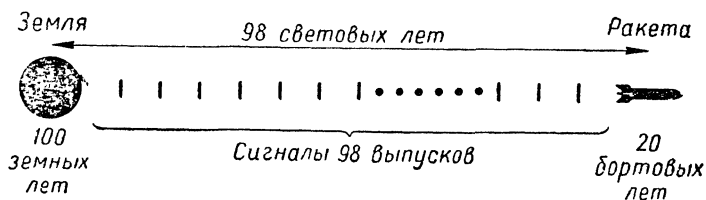


Рис. 59

летие этого же события. В этот торжественный момент звездолет находится на расстоянии 98 световых лет от Земли (летя с быстротой света, он удалился бы ровно на 100 световых лет; но он движется чуть медленнее — со скоростью $v=0,98$).

Ежегодно с Земли специально для астронавтов передавался по радио краткий обзор важнейших событий за год. Но из ста переданных обзоров до звездолета успели дойти лишь два первых, а остальные 98 находятся еще «в пути» (рис. 59). Таким образом, по мнению жителей Земли, астронавты получают выпуски последних известий в 50 раз реже, чем они отправляются с Земли (за сто лет — два годовых обзора!).

Однако сами астронавты оценивают промежутки времени по бортовым часам, которые идут в пять раз медленнее земных. Поэтому они считают, что указанные два обзора получены ими в течение не ста, а только двадцати лет. Таким образом, астронавты действительно наблюдают ход земной истории в замедленном темпе, но не в пятьдесят, а лишь в десять раз.

Рассмотрим теперь те же явления в системе «Ракета». Они получают уже иное истолкование: замедленно развиваются события не на неподвижной ракете, а на

быстро движущейся Земле. Поэтому, с точки зрения астронавтов, в день празднования ими двадцатилетнего юбилея по бортовым часам на Земле отмечается лишь четвертая (а не сотая) годовщина старта. Никакого противоречия с ранее сказанным здесь нет: ведь в системах «Ракета» и «Земля» одновременность понимается по-разному! Значит, в течение двадцати бортовых лет путешествия с Земли было отправлено лишь четыре ежегодных обзора новостей. Дошло же из них лишь два. В итоге астронавты получают сведения о новых событиях в 10 раз реже, чем эти события случаются на Земле.

Так будет происходить при удалении космического корабля от Земли. На обратном же пути будет иметь место повышение видимой частоты событий. Ведь в момент своего возвращения на Землю астронавты отметят сорокалетие, а встречающие их жители Земли — двухсотлетие со дня вылета. Значит, за все время экспедиции было передано 200 годовых обзоров, из которых только два догнали ее на пути «туда». С остальными же 198-ю экспедиция повстречается на пути «обратно», т. е. за 20 лет бортового времени. А это означает увеличение частоты наблюдаемых событий почти в 10 раз. Если бы передача телевизионных сообщений велась непрерывно, а не раз в год, кадры на экране телевизора сменяли бы друг друга так часто, что рассмотреть их было бы очень трудно.

При организации связи с межзвездной экспедицией придется принять во внимание, что меняется не только частота следования наблюдаемых исторических событий, но также и частота колебания электромагнитных волн. А ведь в результате значительного повышения частоты длинные радиоволны превращаются в короткие, короткие — в видимый свет, а видимый свет — в рентгеновские лучи. Наоборот, вследствие такого же понижения частоты происходят обратные превращения. Следовательно, при полете от Земли видимый свет придется, может быть, улавливать с помощью радиоприемников, а возвращаясь на Землю, наблюдать в телескоп сигналы радиостанций.

Ознакомление наше с частной теорией относительно-сти подходит к концу. Но это было, конечно, только первоначальное ознакомление. По необходимости осталось в тени очень многое, без чего эта увлекательная теория сильно проигрывает и в стройности, и в своем философском значении, и в практических применениях. Но ведь это, надо надеяться, не последняя ваша встреча с теорией Эйнштейна!

Что следует считать самым главным из рассказанного в этой книге? Мы узнали, прежде всего, что классическая механика Ньютона является лишь приближенной и что применима она не ко всем явлениям. Мы знаем теперь, какими релятивистскими законами и формулами должны быть заменены привычные нам положения классической механики. Законы теории относительности одинаково справедливы как для самых быстрых, так и для медленных движений, но практически применение их оправдано только тогда, когда нам приходится иметь дело с околосветовыми скоростями. При обычных же скоростях движения (включая и полет современных космических ракет) законы классической механики выполняются с такой скрупулезной точностью, которая далеко превосходит возможности эксперимента. Какой же смысл усложнять расчеты и рассуждения заменой классических понятий и формул релятивистскими, если точность результатов при этом фактически не повышается!

Иное дело в тех, сравнительно редких пока еще областях науки и техники, где хотя бы некоторые скорости сравнимы со световой. Классические законы движения оказываются там вовсе негодными, полагаться на них нельзя и единственным инструментом теоретического исследования оказывается теория относительности. При этих-то именно условиях и проявляются в полной мере так поражающие наше воображение релятивистские эффекты — своеобразное «сложение» скоростей, продольное сжатие тел, замедление всех процессов, увеличение инерционности тел как следствие быстрого движения и пр. Еще один замечательный вывод теории Эйнштейна — инерционность энергии — дает себя знать лишь при участии в процессах колоссальных (по нашим обычным масштабам) количеств энергии.

Характерной и само собой разумеющейся особенностью релятивистских эффектов (которая тем не менее иногда упускается неспециалистами из виду) является принципиальная невозможность обнаружить с их помощью равномерно-прямолинейное движение системы отсчета, т. е. определить, какая из двух инерциальных систем отсчета движется, а какая — покоится. Непростительно забывать, что теория относительности Эйнштейна основана на принципе относительности — ведь именно ради сохранения этого принципа, несмотря на якобы противоречащие ему экспериментальные данные о независимости скорости света от движения источника, и был предпринят Эйнштейном глубокий пересмотр таких основных понятий всей физики, как одновременность.

Возможно, что не все читатели одинаково хорошо уловили всю ту довольно сложную и извилистую цепь логических рассуждений, которая неуклонно вела нас от первых недоумений по поводу кажущейся несовместимости двух твердо установленных на опыте физических принципов к таким общим и далеко идущим выводам, как взаимосвязь массы и энергии, зависимость массы от скорости и т. д. Чтобы легче было восстановить эту цепочку в памяти, мы даем здесь (на стр. 155) «Логическую канву», которая поможет вам лучше ориентироваться в материале при втором чтении (а такого рода сложные теории не усваиваются за один раз!). Очень полезно будет также обратиться и к другим книгам, в которых проблемы теории относительности освещаются под несколько иными углами зрения. Рекомендательный список литературы приведен на странице 156.

В этой книге теория относительности излагалась главным образом как новая механика и физика околосветовых скоростей. При этом осталось в тени огромное общенаучное и даже философское значение этой теории как физического учения о времени и пространстве.

С философской точки зрения пространство и время — это формы существования материи: «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени», — писал Ленин.

С развитием науки представление людей о пространстве существенно менялось. Достаточно вспомнить, что всего шесть-семь веков назад различие между «верхом»

и «низом» казалось одним из коренных свойств самого пространства. Большинство людей полагало, что тела падают вниз не потому, что именно там находится Земля, которая их притягивает, а просто потому, что у самого пространства есть, так сказать, своя «нижняя половина», куда все предметы стремятся двигаться; Земле же не отводилось при этом никакой роли. Дальнейшее развитие науки показало, что у пространства, как такового, никакого «верха» и «низа», конечно, нет, что все направления в пространстве физически равноправны, а падение тел в определенном направлении определяется не пространством, самим по себе, а расположенными в нем телами большой массы.

Этот исторический пример убедительно показывает, что нельзя некритически полагаться на стихийно сложившиеся у людей представления о свойствах пространства и времени и что свойства эти находятся в более тесной связи с закономерностями физических явлений, чем это могло бы показаться на первый взгляд. Пространство (а с ним и время) может быть предметом изучения не только геометрии, но и физики.

Все столь поражающие наше воображение релятивистские эффекты обусловлены в конечном итоге тем, что пространство и время, в которых происходят любые явления, обладают в действительности иными свойствами, чем это представлялось людям в эпоху классической физики.

Классически мыслящий физик вполне допускал возможность (хотя бы в принципе) представить всю нашу Галактику такой, какой она существует в определенный момент времени. Любые происходящие в этот момент события находятся между собой в тех или иных пространственных отношениях: разделены определенными расстояниями, располагаются на одной прямой или в вершинах куба и т. д. Принципиальная возможность такой (единой для всех!) «мгновенной фотографии» Галактики казалась в классической физике само собой разумеющейся, хотя тот же самый классически мыслящий физик отнесся бы весьма скептически к любому разговору о «единой для всех» истории событий, происшедших в такой-то точке. Он не преминул бы указать, что понятие «та же точка, но в другой момент времени» зависит от системы отсчета и без указания ее лишено смысла. Как видим, в

классической физике существовал различный подход ко времени и пространству: время — единое для всех, абсолютное; пространство же — относительное.

Мы уже не раз говорили о представлении истории вселенной — как ее прошлого, так и будущего — в виде непрерывного множества событий. Каждое из них имеет «соседей» во времени и пространстве. «Соседи в пространстве» — это те события, которые случились поблизости в тот же самый момент времени. «Соседи во времени» — это события в одной и той же точке, происшедшие одно чуть ранее или чуть позже другого.

«Соседи в пространстве», в свою очередь, делятся на соседей с севера и юга, соседей с запада и востока, соседей сверху и снизу. Но всем ясно, что эта классификация несущественна: ведь можно с таким же основанием противопоставлять соседей с юга-востока соседям с северо-запада.

Существуют, конечно, в мире событий еще и соседи, так сказать, «по диагонали» (в пространственно-временном смысле), например события, случившиеся чуть позже и при этом чуть севернее.

В классической физике считалось очевидным, что как бы мы ни изменяли систему отсчета, соседи в пространстве (т. е. одновременные события) останутся соседями в пространстве и ни в коем случае не станут соседями по пространственно-временной диагонали (а тем более во времени). Вот это как раз и означает, что пространство и время рассматривались в классической физике как две отдельные, самостоятельные формы существования материи.

Теория относительности изменила эти представления коренным образом. Как нам теперь уже хорошо известно, при изменении системы отсчета меняется и одновременность, а это как раз и означает, что соседи в пространстве (события одновременные) становятся соседями по диагонали (событиями разновременными). Поскольку выбор системы отсчета произволен, теория относительности не может признать выделение чисто пространственного соседства как особой категории физически обоснованным. Релятивистская физика говорит не о пространстве и не о времени в отдельности, а об едином пространственно-временном многообразии событий. «Мгновенная фотография», т. е. множество одновременных событий,

есть лишь своего рода «сечение» этого многообразия, существенно зависящее от системы отсчета.

Промежуток времени t между двумя событиями, как и пространственное расстояние r между ними, в релятивистской физике зависит от системы отсчета — это не абсолютные, а относительные величины. Однако при переходе к другой инерциальной системе они меняются независимо друг от друга, а во вполне определенной связи. При этом образованная из них сложная величина

$$s = \sqrt{t^2 - r^2}$$

всегда остается постоянной (поскольку речь идет о двух фиксированных событиях). Величина s называется *интервалом* между событиями. Если одно из них по отношению к другому является абсолютно прошлым или же абсолютно будущим, то интервал — величина вещественная, а если неконтролируемым, то — мнимая (подкоренное выражение отрицательно, так как $t < r$).

Используя понятие интервала и пространственно-временные диаграммы, удастся придать теории относительности своеобразную «геометризованную» форму, которая приобретает особенно большое значение в так называемой общей теории относительности. В отличие от частной теории относительности, рассматривающей законы физики в инерциальных системах отсчета, общая теория допускает использование каких угодно (даже деформирующихся) систем отсчета; это позволило Эйнштейну построить очень интересную по своим идеям «геометризованную» теорию всемирного тяготения (необходимо лишь уточнить, что речь идет не о геометрии одного только пространства, а об единой геометрии всего пространственно-временного многообразия). Более подробные сведения об этом читатели найдут в последней главе книги А. И. Жукова «Введение в теорию относительности».

Как видим, идеи теории относительности гораздо шире, чем можно было изложить в этой книге. Но и рассказанного здесь вполне достаточно, чтобы обогатить читателя более общими законами и представлениями, чем те, которые находятся в горизонте классической физики, показать ему физику не как законченное уже здание, а как никогда не прекращающийся процесс познания природы, некоторые пути которого особенно хорошо уясняются на примере теории Эйнштейна.

1. Что следует разумеать под парадоксом?
2. Какие скорости не могут быть больше световой?
3. Может ли точка пересечения двух стержней двигаться быстрее света? Почему это не противоречит теории относительности?
4. Почему движение точки пересечения двух стержней не может быть использовано как сигнал для согласования часов?
5. Ограничена ли скорость движения светового «зайчика»? Почему движущийся световой зайчик нельзя рассматривать как перемещающийся в пространстве запас энергии или распространяющийся сигнал?
6. В чем сущность процесса распространения волн? В каких случаях скорость распространения волн неограниченна, а в каких — лимитируется световой скоростью?
7. В чем заключаются «парадоксы транспортера» и как они разъясняются?
8. Какие геометрические несообразности возникают из-за релятивистских эффектов при быстром вращении колеса и как они разъясняются?
9. Одинаковы ли эффекты при раскрутке колеса в системе отсчета «Звезды» и в системе «Вращающаяся (относительно звезд) лаборатория»? Как это согласуется с принципом относительности Галилея?
10. В чем сущность парадокса близнецов и почему это только парадокс, а не действительное внутреннее противоречие в теории относительности?
11. Проанализируйте парадокс близнецов в различных системах отсчета и сопоставьте результаты.
12. Возможны ли, хотя бы в принципе, «прыжки в будущее», если удастся летать в космосе с околосветовыми скоростями?
13. Как скажется на самочувствии космонавта полет с ускорением 10 м/сек^2 и скоростью $0,999999$ от световой скорости?
14. Каким будет представляться космонавту, летящему с околосветовой скоростью, наблюдаемый им в телескоп или по телевидению ход земной истории? Рассмотрите этапы полета от Земли и возвращения на Землю.
15. В каком соотношении находятся теория относительности Эйнштейна и классическая механика Ньютона?
16. Где находит сейчас теория относительности практическое применение?
17. Что такое пространство и время с философской точки зрения?
18. Выражается ли основное в теории относительности Эйнштейна кратким изречением «Все в мире относительно»?
19. В каком отношении находится теория относительности Эйнштейна к принципу относительности Галилея?
20. В чем состоит связь пространства и времени, открытая Эйнштейном?
21. Что называется интервалом между двумя событиями?
22. Что означают вещественные и мнимые значения интервала между двумя событиями?

1. Принцип относительности (т. е. физическое равноправие всех без исключения инерциальных систем отсчета) надежно подтвержден опытом и сомнений не вызывает (§ 4).

2. Принцип независимости скорости света от движения источника тоже очень хорошо подтвержден экспериментально (стр. 33—34).

3. В рамках классических представлений о времени и пространстве эти два принципа кажутся совершенно несовместимыми, хотя оба они подтверждены опытами (стр. 34—35).

4. Чтобы устранить противоречие между двумя принципами, достаточно предположить, что принципиально не может быть сигналов быстрее света, и потому одновременность удаленных друг от друга событий — понятие относительное, т. е. зависящее от системы отсчета (стр. 36—39).

5. Поскольку понятие одновременности зависит от системы отсчета, принцип относительности может выполняться лишь при условии, что все процессы на быстро движущихся телах протекают медленнее, чем на неподвижных, а продольные размеры тел сокращаются при движении (§ 12—14).

6. Относительность одновременности, а также изменение темпа времени и продольных размеров тел при их быстром движении приводит к новому — релятивистскому — закону «сложения» скоростей. (§ 15—16).

7. Релятивистский закон «сложения» скоростей делает скорость света недостижимой для тел с ненулевой массой покоя, что может быть истолковано как неограниченное возрастание их массы со скоростью по мере ее приближения к световой (§ 19).

8. Прирост массы со скоростью пропорционален приобретенной телом кинетической энергии. Так как центр масс системы тел сам собой не смещается при превращении кинетической энергии в другие виды, необходимо признать, что масса тела пропорциональна содержащемуся в нем запасу всех видов энергии: $m = \frac{E}{c^2}$ или $E = mc^2$ (§ 21—22).

Что читать по теории относительности

Мы надеемся, что наш читатель не ограничится этой книгой, потому что всякое изложение по необходимости односторонне. Он будет читать дальше, чтобы познакомиться с новыми сторонами теории Эйнштейна или глубже понять уже усвоенные. Он будет также приобщать к теории относительности своих товарищей, по-разному подготовленных по физике. Поэтому мы назовем здесь для интересующихся книги самого различного уровня, чтобы каждому легко было выбрать литературу по своему вкусу.

Начнем с наиболее простых книг, гораздо более элементарных, чем та, которую вы держите сейчас в руках (но разве чтение простого после более сложного не помогает иногда увидеть тот «лес» основной идеи, который скрывается подчас за «деревьями» мелких подробностей?). Вероятно, наименьшей подготовки требует брошюра:

Ю. И. Соколовский. Сюрпризы окосветовых скоростей. (Диалог о теории относительности). М., «Знание», 1963, 22 стр. (значительная часть этого диалога напечатана также в журнале «Знание — сила», 1962, № 9, под заглавием «Рядом со светом»).

Следующей по трудности является замечательная популярная книжка, написанная двумя выдающимися советскими физиками-теоретиками:

Л. Д. Ландау, Ю. Б. Румер. Что такое теория относительности. М., «Советская Россия», 1963, 74 стр.

Далее следуют общедоступные книги:

М. Гарднер. Теория относительности для миллионеров. М., Атомиздат, 1967, 190 стр.

Дж. Шварц. Как это произошло? Иллюстрированный рассказ о том, как теория относительности устанавливает связи причин и следствий. М., «Мир», 1965, 157 стр.

Книга Дж. Шварца могла бы служить своего рода введением к «Началам теории относительности», которые вы сейчас читаете. Хорошо же дополнением к ним, помогающим глубже понять трудные вопросы, служит книга:

Г. Бонди. Относительность и здравый смысл, М., «Мир», 1967, 163 стр.

Немного сложнее, но и содержательнее «Начал» другая книга того же автора:

Ю. И. Соколовский. Теория относительности в элементарном изложении. М., «Наука», 1964, 198 стр.

Еще больше увлекательных вопросов не только частной, но также и общей теории относительности освещается в превосходно написанных книгах:

А. И. Жуков. Введение в теорию относительности. М., Физматгиз, 1961, 171 стр.

К. Дьюрелл. Азбука теории относительности. М., «Мир», 1964, 164 стр.

М. Борн. Эйнштейновская теория относительности. М., «Мир», 1964, 452 стр.

Заслуживают внимания своеобразные подходы к изложению основ частной теории относительности в следующих переводных книгах:

Д. Бом. Специальная теория относительности. М., «Мир», 1967, 285 стр.

В. Курганов. Введение в теорию относительности. М., «Мир», 1968, 180 стр.

Э. Гейлор. Дж. Уилер. Физика пространства-времени. М., «Мир», 1969, 256 стр.

Имеется немало книг, в которых достаточно глубоко и под различными углами зрения освещаются отдельные принципиальные вопросы как частной, так и общей теории относительности. Но по-настоящему понять их можно только после изучения теории по ранее указанным пособиям. Сюда относятся:

Б. Г. Кузнецов. Беседы о теории относительности. М., Изд-во АН СССР, 1963, 223 стр.

М. В. Мостепаненко. Материалистическая сущность теории относительности. М., Соцэкгиз, 1962, 227 стр.

А. А. Фридман. Мир как пространство и время. М., «Наука», 1965, 110 стр.

А. З. Петров. Пространство-время и материя. Элементарный очерк современной теории относительности. Изд-во Казанского университета, 1961, 80 стр.

Х. Х. Ыйглане. В мире больших скоростей. Очерк о теории относительности. М., «Наука», 1967, 263 стр.

Р. Неванлинна. Пространство, время и относительность. М., «Мир», 1966, 228 стр.

Особое место занимают произведения научно-художественного жанра, в которых история создания теории относительности встает перед читателями как своего рода «драма идей», но по которым *научиться* теории относительности нельзя.

Д. С. Данин. Неизбежность странного мира. М., «Молодая гвардия», 1966 (теории относительности в этой книге посвящена только первая часть, содержащая 164 стр.).

В. П. Смилга. Очевидное? Нет, еще неизведанное... М., «Молодая гвардия», 1966, 350 стр.

Биографию создателя теории относительности Альберта Эйнштейна (которая, разумеется, не может быть изложена в отрыве от его главнейших идей) интересующиеся найдут в книгах:

Б. Г. Кузнецов. Эйнштейн. М., «Наука», 1967, 432 стр.

В. Е. Львов. Жизнь Альберта Эйнштейна. М., «Молодая гвардия», 1959, 380 стр.

К. Зелиг. Альберт Эйнштейн. М., Атомиздат, 1966, 231 стр.

О межзвездных полетах на фотонных или ионных ракетах и наблюдающихся при этом релятивистских эффектах рассказывается в следующей литературе:

Ю. И. Соколовский, В. И. Шилов. Фотонный звездолет. Изд-во Харьковского университета, 1960, 47 стр.

Р. Г. Перельман. Двигатели галактических кораблей. М., Изд-во АН СССР, 1962, 199 стр.

А. Лебедев. Парадоксы околосветовой скорости. «Наука и жизнь», 1963, № 2.

С. М. Рытов. О некоторых релятивистских явлениях в астронавигации. Сб. статей «Новые проблемы физики». М., «Знание», 1961, 14 стр. (напечатано также в журнале «Природа», 1960, № 4).

Об ускорителях элементарных частиц, при конструировании которых используются законы теории относительности, можно узнать из популярной книги:

Б. С. Ратнер. Ускорители заряженных частиц. М., «Наука», 1966, 152 стр

По-настоящему понять теорию относительности нельзя при пассивном чтении. Необходимо сопровождать его систематическим решением специально подобранных задач. Для школьников — читателей этой книги печатается сейчас сборник примерно восьмидесяти задач с решениями:

Ю. И. Соколовский. Элементарный задачник по теории относительности. М., «Наука», 1970.

Только самостоятельное решение задач позволяет действительно проникнуть в самую суть теории, предотвращает превратные толкования, знакомит с практическими применениями и раскрывает немало тонкостей и красот учения Эйнштейна, которые могли бы без этого остаться и незамеченными.

Т а б л и ц а

Релятивистский коэффициент
(для скорости света принято округленное значение
 $c=300\ 000\text{ км/сек}$)

Движущийся объект	Скорость		Релятивистский коэффициент K
	в $\frac{\text{км}}{\text{сек}}$	в долях световой	
Звук или реактивный самолет	0,3	0,0001 %	1,0000000000005
Земля по орбите	30	0,01 %	1,000000005
Электрон с энергией:			
25 эв (в радиолампе)	3000	1 %	1,0005
2500 эв (в кинескопе)	30 00	10 %	1,005
Протон с энергией;			
15 Мэв (в циклотроне)	150 000	50 %	1,15
500 Мэв	225 000	75 %	1,5
1 Гэв	260 000	87 %	2
4 Гэв	294 000	98 %	5
10 Гэв (в синхротроне)	298 500	99,5 %	10
70 Гэв (в Серпуховском ускорителе)	299 970	99,99 %	70
Электрон с энергией;			
100 Мэв	299, 997	99,999 %	224
300 Мэв (в бетатроне)	299 999, 7	99,9999 %	700
Гэв (в синхротроне)	299 999, 97	99,999 99 %	2000

Сокращения: 1 эв = 1 электронвольт, 1 Мэв = 10^6 эв, 1 Гэв = 10^9 эв.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Вместо предисловия	3
------------------------------	---

Глава первая

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ

1. Система отсчета	8
2. Инерциальные системы	11
3. Неинерциальные системы	15
4. Принцип относительности Галилея	19
5. Пространственно-временные диаграммы	24
6. Преобразование Галилея	26
Вопросы и упражнения	31

Глава вторая

ПРОБЛЕМА ОДНОВРЕМЕННОСТИ

7. Конфликт двух принципов	33
8. Что значит «одновременно»?	36
9. О прошлом, настоящем и будущем	39
10. Одновременность по Эйнштейну	43
11. Предшествуют ли причины следствиям?	47
Вопросы и упражнения	51

Глава третья

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕМАТИКА

12. Движущиеся часы	53
13. Релятивистский коэффициент	59
14. Сокращение продольных размеров	63

15. Релятивистские эффекты и скорость света	67
16. Как складываются скорости?	70
17. «Сложение» параллельных скоростей	74
Вопросы и упражнения	79

Глава четвертая

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА

18. Масса как мера инерционности	81
19. Толчок и импульс	85
20. Релятивистская масса	89
21. Закон импульсов в теории относительности	95
22. Кинетическая энергия	100
23. Формула Эйнштейна	103
24. Взаимосвязь массы и энергии	107
Вопросы и упражнения	111

Глава пятая

РАЗОБЛАЧЕНИЕ ПАРАДОКСОВ

25. Быстрее света	113
26. Гребни волны и «зайчик»	118
27. Загадочный транспортер	125
28. Кривая короче прямой	128
29. Парадокс близнецов	131
30. Еще о парадоксе близнецов	136
31. Летосчисление астронавтов	142
Заключение	149
Вопросы и упражнения	154
Логическая канва курса	155
Что читать по теории относительности	156

Юрий Иосифович Соколовский
НАЧАЛА ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Редактор *Т. В. Михалкевич.*
Художественный редактор *Л. Ф. Малышева*
Технический редактор *М. И. Смирнова.*
Корректор *Н. М. Данковцева.*

* * *

Сдано в набор 30/VII 1969 г. Подписано к печати 17/II 1970 г. 84×108¹/₃₂. Бумага для глубокой печати. Печ. л. 5,0. Усл. печ. 8,40. Уч.-изд. л. 8,03
Тираж 100000 экз. (пл. 1970 г.) № 292 № А03664

* * *

Издательство «Просвещение» Государственного комитета по печати при Совете Министров РСФСР
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Типография № 2 Росглавполиграфпрома,
гор Рыбинск, ул. Чкалова, д. 8.

Заказ 2441
Цена 20 коп.