

УДК 530.12 : 531.18 + 530.12 : 531.51(023)

RELATIVITY FOR THE MILLION

by Martin Gardner

Illustrated by Anthony Ravielli

MACMILLAN NEW YORK, LONDON

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ МИЛЛИОНОВ

М. ГАРДНЕР

Перевод с английского
В. И. МАНЬКО, К. В. КАРАДЖЕВА,
Ф. Е. ЧУКРЕЕВА

Под редакцией
доктора физ.-матем. наук А. И. БАЗЯ



АТОМИЗДАТ 1967 МОСКВА

О Т И З Д А Т Е Л Ь С Т В А

Атомиздат выпускает научно-техническую, учебную и научно-популярную литературу по ядерной физике, ядерным реакторам и ядерной энергетике, радиогеологии, технологии переработки радиоактивных руд, ядерной металлургии, радиохимии и радиохимической технологии, физике твердого тела и атомному материаловедению, радиоактивным и стабильным изотопам и ионизирующем излучениям, радиологии и защите от ионизирующих излучений.

Книги Атомиздата рассчитаны на широкий круг специалистов: инженеров-физиков, физиков-теоретиков и экспериментаторов; геологов, горняков, химиков и металлургов; энергетиков и экономистов; биологов, медиков и дозиметристов; на преподавателей и студентов этих специальностей.

Издательство просит читателей своевременно подавать предварительные заказы на книги в местные книжные магазины.

Предварительный заказ гарантирует приобретение нужной Вам книги и поможет установлению ее тиража.

Заказы на книги также можно направлять по адресу: Москва В-71, Ленинский проспект, 15, Союзкнига. Отдел научно-технической литературы.

АТОМИЗДАТ

Предисловие к русскому изданию

Книга Гарнера — это популярное изложение специальной и общей теории относительности, действительно рассчитанное на миллионы читателей. Увлекательно и доступно написанная, она будет понята всем, начиная со школьников старших классов. Особо следует отметить прекрасные иллюстрации. Благодаря им книга похожа на альбом под названием «Теория относительности в картинках». Впрочем, именно такой и должна быть популярная книга.

Большим достоинством книги является то, что автор довольно много говорит об истории возникновения теории относительности. Всегда приятно узнавать не только саму истину, но и то, каким образом она добыта, какие люди в этом участвовали, какие

гипотезы высказывались. Так, например, в книге довольно много говорится о «принципе Маха». Большинство ученых уже давно от него отказались, но в свое время «принцип Маха» оказывал большое влияние на умы, и без упоминания о нем история была бы неполной.

Особо следует отметить то, что автор говорит не только об уже устоявшихся, всеми принятых положениях, но и о разных спорных вопросах, на которые сейчас еще нет ответа. Поэтому, читая книгу Гарднера, читатель видит живую, развивающуюся науку, которая влечет к себе своими загадками. Уже одно это выделяет эту книгу из многих других популярных изложений теории относительности.

Популярность изложения имеет и свою теневую сторону: Гарднеру волей-неволей приходится прибегать к упрощениям, возникает много неточностей и недомолвок. Некоторые из них имеют принципиальный характер и могут привести к неправильному пониманию сути дела.

Несколько слов об этом будет сказано после того, как вы прочтете книгу.

А. И. БАЗЬ.

Предисловие автора

О теории относительности написано столько популярных книг, что читатель может спросить: «Зачем еще одна?» Мне кажется, что еще одна нужна, и вот почему.

1. Лучшие введения в элементарную теорию относительности были написаны много лет назад и сейчас устарели. Правда, в теорию относительности не были внесены какие-либо существенные изменения, но появились новые экспериментальные данные, новое отношение к некоторым проблемам, новые космологические модели. Все это должно быть отражено в современной книге по теории относительности.

2. Лично для меня очень сильным оказалось искушение попытаться еще раз объяснить сложные и важные вопросы возможно более простым образом.

3. Ни одна популярная книга по теории относительности не была столь искусно иллюстрирована. Блестящее мастерство Антони Равиелли выделяет эту книгу из всех остальных.

Я устоял против соблазна закончить книгу главой, посвященной философским следствиям теории относительности, так как считаю, что в общепринятом смысле слова «философский» теория относительности не имеет следствий. Теория относительности, очевидно, имеет значение для теории познания и философии науки, главным образом благодаря тому, что она демонстрирует невозможность определения математической структуры пространства — времени, иначе как из опыта. Но что касается великих традиционных вопросов философии — бог, бессмертие, свобода воли, добро и зло и т. д., — то здесь теории относительности абсолютно нечего сказать.

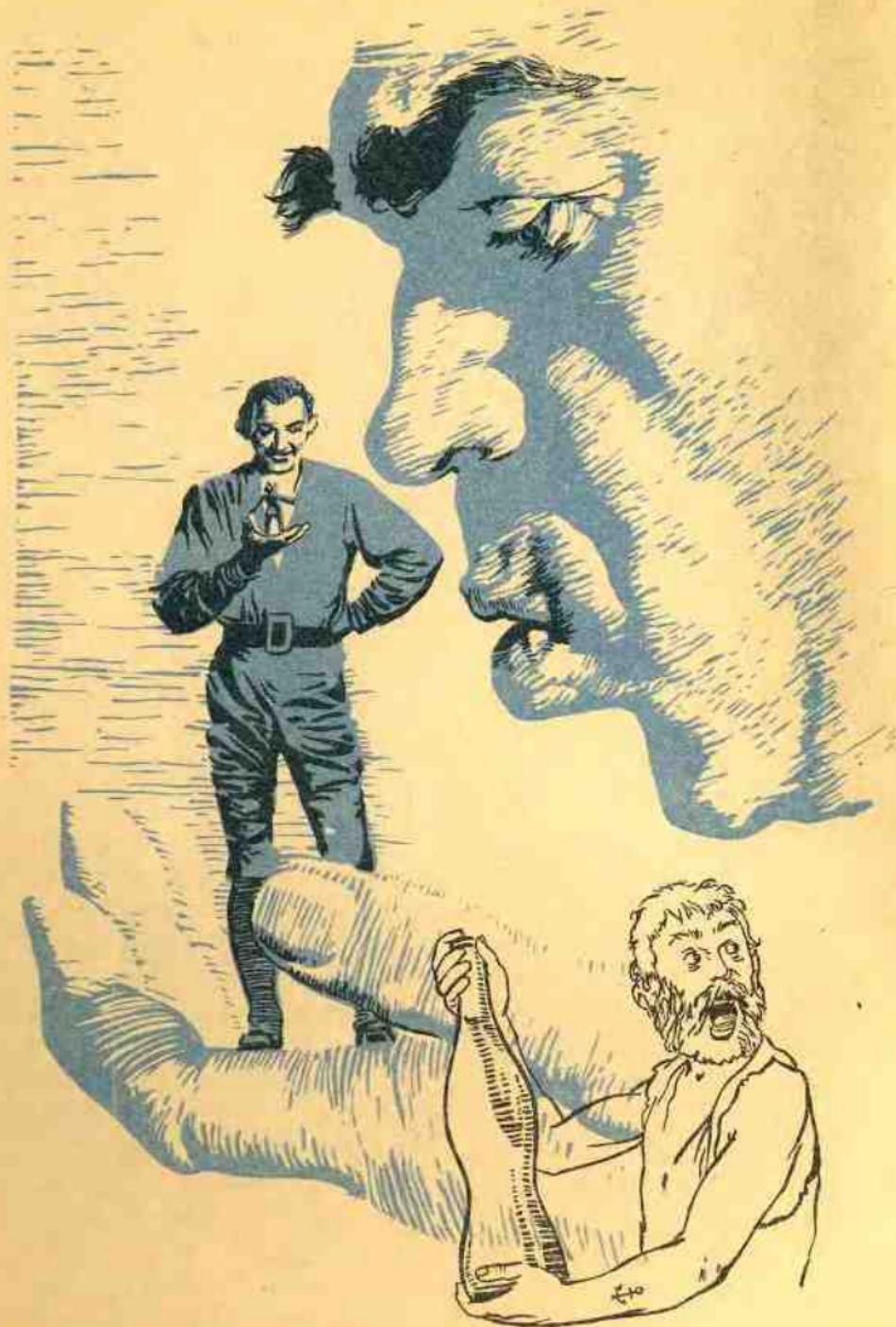
Абсурдно мнение, что из теории относительности следует относительность всего, например относительность ценности антропологии или относительность морали. На самом деле это не так, на самом деле теория относительности вводит целый ряд новых «абсолютов».

Иногда утверждают, будто из-за теории относительности труднее представить себе, что вне нас существует «огромный мир», обладающий упорядоченной структурой, которая частично может быть описана законами науки. «По мере развития этой дисциплины (теории относительности), — пишет английский астроном Джеймс Джинс в своей книге «Развитие физической науки», — становится ясно, что явления природы были определены скорее нами и нашим опытом, а не механической вселенной вне нас и независимо от нас».

Этот «субъективизм» или «идеализм», независимо от того, как его называют, чтобы отличить от «реализма» работающих ученых, в последние годы некоторые выдающиеся физики почему-то связывают с теорией относительности. Это достаточно почтенная метафизическая позиция, но она не получает ни малейшей поддержки со стороны теории относитель-

ности. Сам Эйнштейн, без сомнения, не придерживался такого взгляда, в чем вы убедитесь тотчас же, прочтя цитату, которая открывает эту книгу. Я не буду обсуждать здесь этот вопрос. Если читатель им интересуется, он найдет убедительный ответ двух ведущих современных философов науки: Адольфа Грюнбаума (в статье, опубликованной в сборнике «Философия науки») и Филиппа Франка (в гл. 7 его книги «Философия науки»).

Я признателен Джону Стэчелу, профессору физики из Питтсбургского университета, который прошел рукопись книги и внес ценные поправки и предложения. Разумеется, он не может нести никакой ответственности за мои высказывания по спорным вопросам.



1

Абсолютно или относительно?

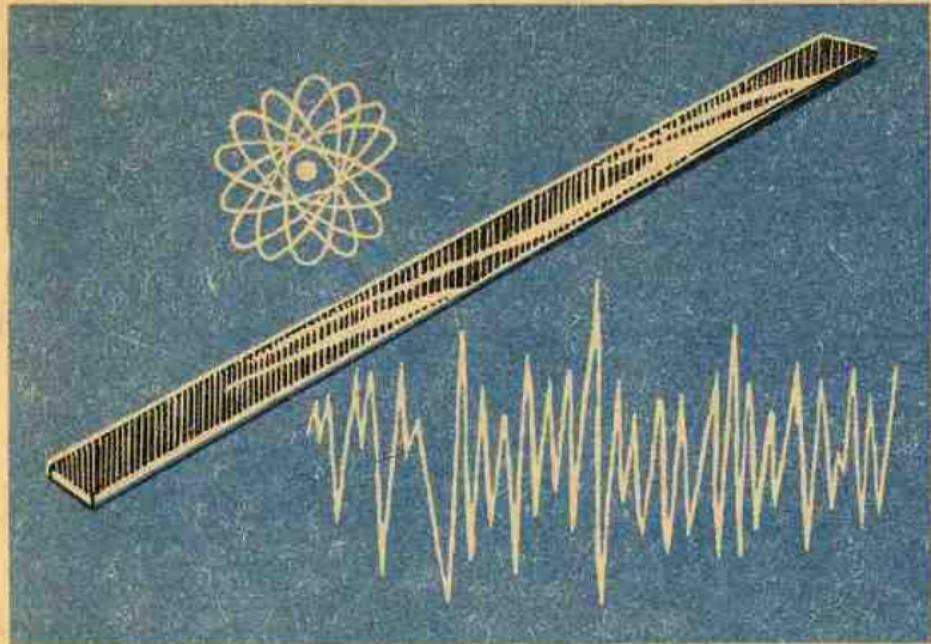
Два моряка, Джо и Мо, после кораблекрушения оказались на необитаемом острове. Прошло несколько лет. Однажды Джо нашел бутылку, которую выбросили на берег волны. Это была одна из новых огромных бутылок из-под «Кока-кола». Джо побледнел.

«Эй, Мо!» — крикнул он. «Мы с тобой уменьшились!»

Из этой шутки можно извлечь серьезный урок: судить о размерах любого объекта нельзя иначе, как сравнивая их с размерами чего-либо иного. Лилипуты считали Гулливера великанином. Жителям Бробдингнега Гулливер казался крошечным. Велик биллиардный шар или мал? Разумеется, он чрезвычайно велик по сравнению с атомом, но крайне мал по сравнению с Землей.

Жюль Анри Пуанкаре, известный французский математик девятнадцатого века, предвосхитивший многие положения теории относительности, подошел к этому вопросу следующим образом (ученые называют его способ подхода «мысленным экспериментом»: это эксперимент, который может быть воображен, но не может быть выполнен в действительности). Представьте себе, говорит он, что ночью, когда вы крепко спите, все во Вселенной стало в тысячу раз больше, чем прежде. Говоря все, Пуанкаре имеет в виду действительно все: электроны, атомы, длины волн света, самих вас, вашу кровать, ваш дом, Землю, Солнце, звезды. Сможете ли вы сказать, когда проснетесь, что произошли какие-то изменения? Можно ли провести такой эксперимент, который доказал бы, что вы изменились в размерах?



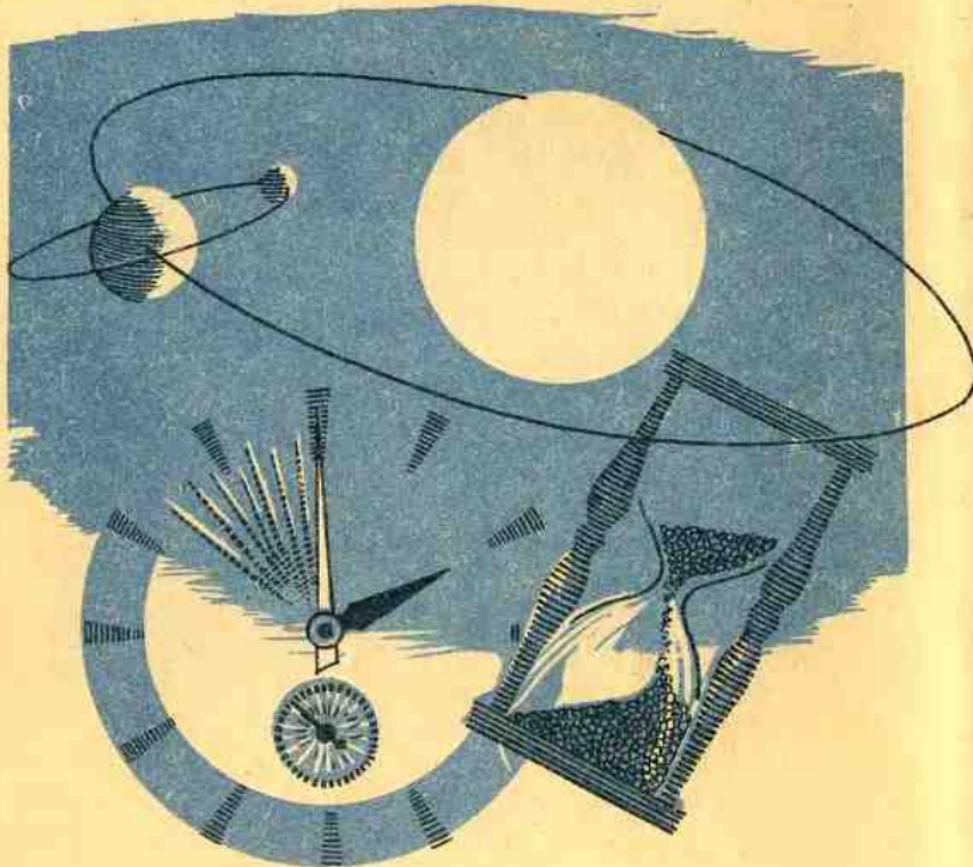


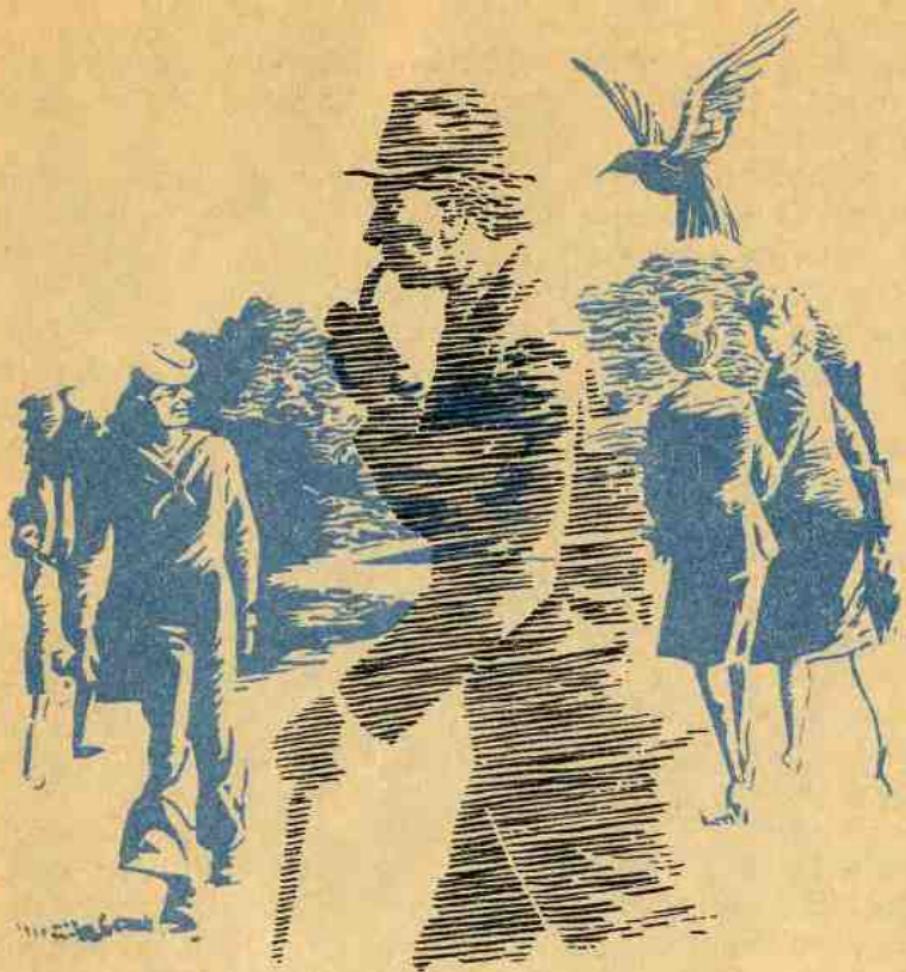
Нет, говорит Пуанкаре, такого эксперимента провести нельзя. Действительно, Вселенная оказалась бы такой же, как и прежде. Было бы бессмысленно даже говорить, что она стала больше. «Больше» — это значит больше относительно чего-то другого. В этом случае чего-то другого нет. Столь же бессмысленно было бы говорить, что вся Вселенная уменьшилась в своих размерах.

Размер, таким образом, относителен. Не существует абсолютного способа определения размеров какого-либо объекта и нельзя сказать, что он имеет такие-то и такие-то абсолютные размеры. Определить размер можно, используя другие мерки, такие, как линейка или метровый стержень. Но какова длина метрового стержня? До 1 января 1962 г. метр определялся как длина определенного платинового бруска, который хранился при постоянной температуре в подвалах Севра, во Франции. С 1 января 1962 г. новым стандартом метра служит длина 1 650 763, 73 длин волн оранжевых лучей определенного типа, испускаемых в вакууме атомом криптона-86. Конечно, если все во Вселенной, включая и длину волны этого

излучения, увеличится или уменьшится в одной и той же пропорции, то никаким экспериментальным способом не удастся заметить это изменение.

То же самое справедливо и в отношении интервалов времени. «Много» или «мало» времени требуется для одного оборота Земли вокруг Солнца? Маленькому ребенку время от одного Нового года до другого кажется вечностью. Геологу, привыкшему мыслить периодами в миллионы лет, один год кажется всего лишь одним мгновением. Интервал времени, подобно расстоянию в пространстве, невозможно измерить иначе, как сравнивая его с каким-либо другим отрезком времени. Год определяется периодом вращения Земли вокруг Солнца; день — временем, необходимым для одного оборота Земли вокруг своей оси; час — временем, за которое совершает один оборот большая стрелка часов. Всегда один интервал времени измеряется сравнением его с другим.





У Г. Уэллса есть известный научно-фантастический рассказ под названием «Новый ускоритель». Из него можно извлечь лишь такой же урок, что и из шутки о двух моряках, но только урок этот касается не пространства, а времени. Один ученый открывает способ ускорения всех процессов в своем организме. Его сердце бьется чаще, его мозг работает быстрее и так далее. Вы догадываетесь, что произойдет. Все в мире кажется ему замедлившимся почти до полной остановки. Ученый выходит погулять и двигается медленно, чтобы из-за трения о воздух не воспламенились его брюки. Улица полна людей-статуй. Мужчина застыл в тот момент, когда он подмигивал двум проходящим девушкам. В парке играет

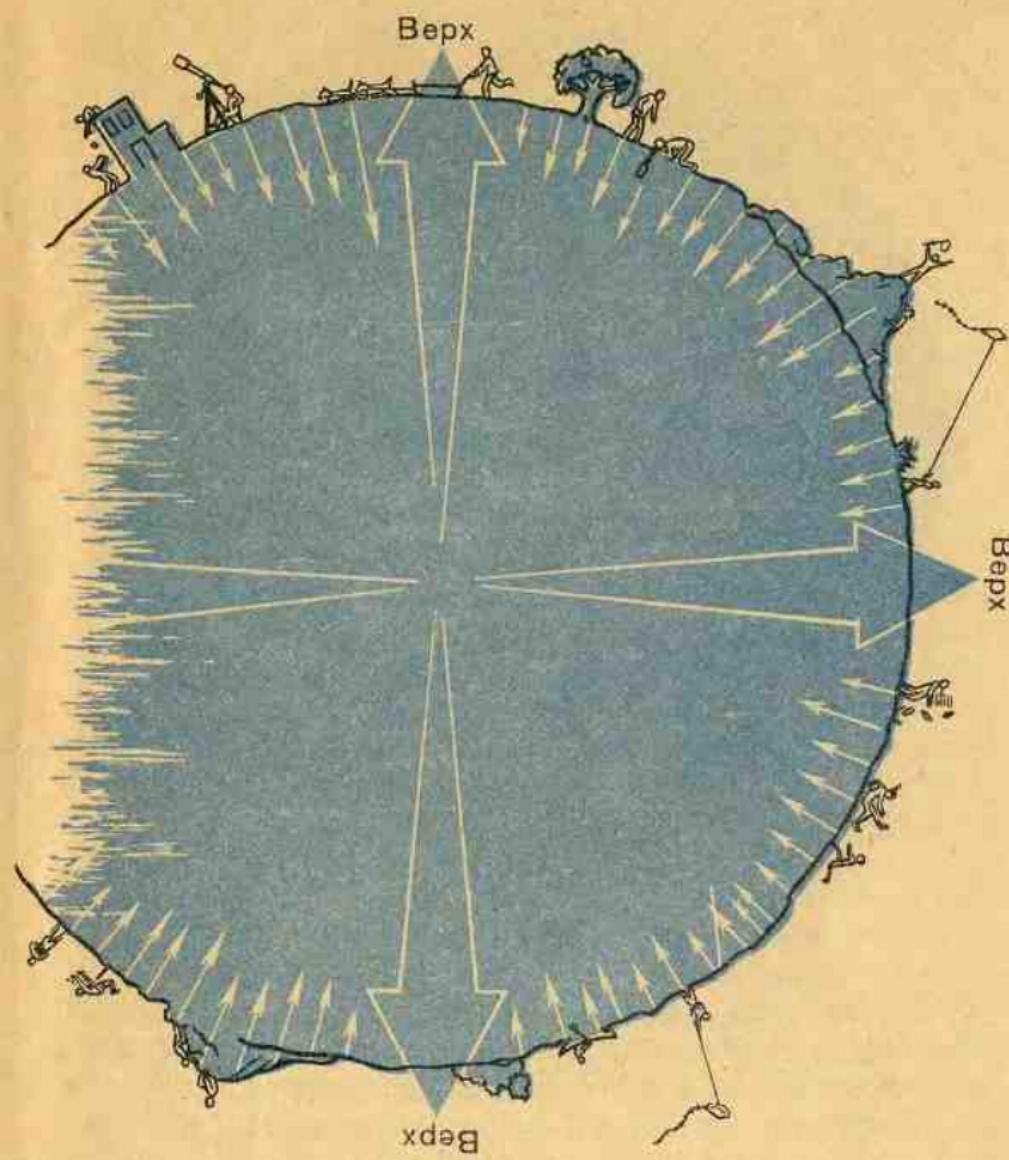
оркестр, издавая низкое, хрипящее дребезжание. Пчела жужжит в воздухе, двигаясь со скоростью улитки.

Давайте проведем еще один мысленный эксперимент. Предположим, что в определенный момент все в космосе начинает двигаться медленнее или быстрее или полностью останавливается на несколько миллионов лет, приходя затем снова в движение. Удастся ли заметить это изменение? Такого эксперимента, с помощью которого удалось бы заметить это, не существует. Время, подобно расстоянию в пространстве, относительно.

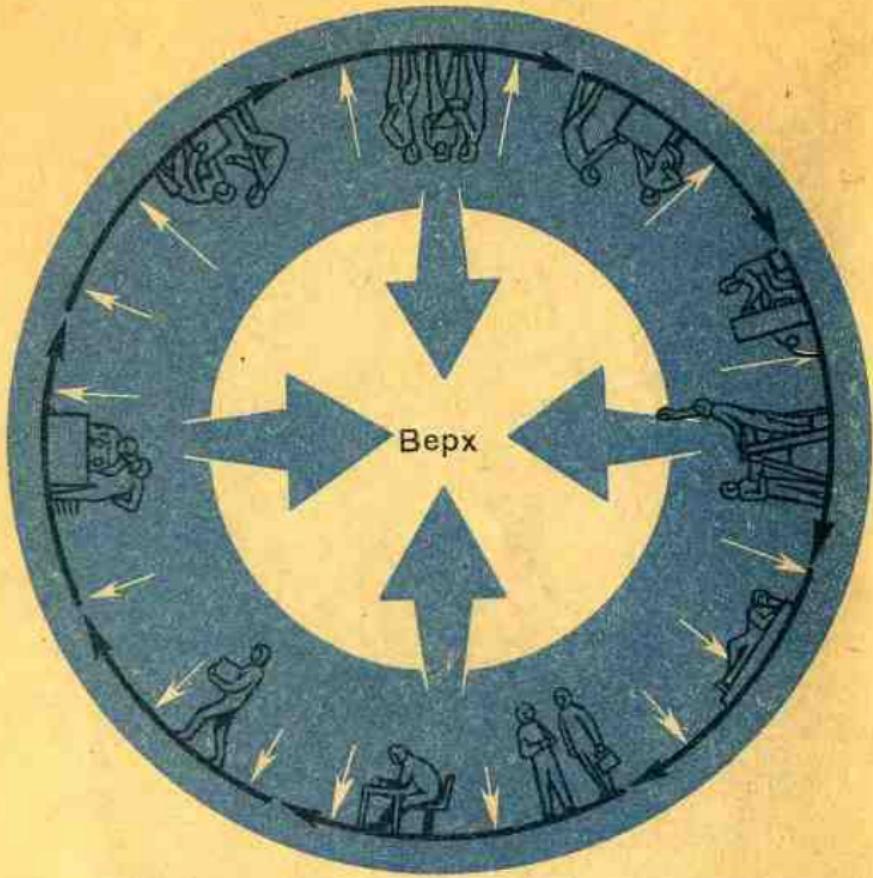
Многие другие понятия, известные из повседневной жизни, относительны. Рассмотрим понятия «вверх» и «вниз». В прошлые века людям было несложно понять, почему человек на противоположной стороне Земли висит вниз головой и вся кровь не приливает ему к голове. Дети и теперь сталкиваются с такой трудностью, узнав впервые, что Земля круглая.

Если бы Земля была сделана из прозрачного стекла и вы смогли бы взглянуть в телескоп прямо сквозь нее, вы действительно увидели бы людей, стоящих вниз головой, ногами на стекле. То есть, они казались бы стоящими вниз головой по отношению к вам. Разумеется, вы казались бы стоящими вниз головой по отношению к ним. На Земле направление «вверх» — это направление от центра Земли. Направление «вниз» — к центру Земли. В межзвездном пространстве нет абсолютного верха и низа, поскольку там нет планеты, которая могла бы служить «системой отсчета».

Представим себе космический корабль в форме огромного бублика, движущийся в солнечной системе. Он вращается, так что центробежная сила создает искусственное гравитационное поле. Находясь внутри корабля, космонавты могут ходить по наружной стенке этого бублика как по полу. Для них «вниз» — это от центра корабля, «вверх» — к центру, т. е. прямо противоположно тому, что имеет место на вращающейся планете.



Таким образом, вы видите, что во Вселенной нет абсолютного «верх» и «низа». Вверх и вниз — это направления по отношению к направлению действия гравитационного поля. Было бы бессмысленно говорить, что, пока вы спали, вся Вселенная перевернулась вверх ногами, поскольку нет ничего, что могло бы служить системой отсчета при решении вопроса о том, какое положение заняла Вселенная.



Другой тип изменения, которое также относительно,— это изменение объекта при его зеркальном отражении. Если заглавную букву R напечатать наоборот, как Я, то вы сразу же увидите, что это зеркальное отражение буквы R. Но если вся Вселенная (включая вас) внезапно станет зеркально отраженной, то у вас не будет способа обнаружить подобное изменение. Конечно, если бы только один человек превратился в свое зеркальное отражение (об этом Г. Уэллс также написал рассказ под названием «Рассказ Плэттнера»), а Вселенная осталась бы прежней, то ему показалось бы, что все стало наоборот. Чтобы прочесть книгу, он должен был бы подносить ее к зеркалу, подобно Алисе в Зазеркалье*, ухитрявшей-

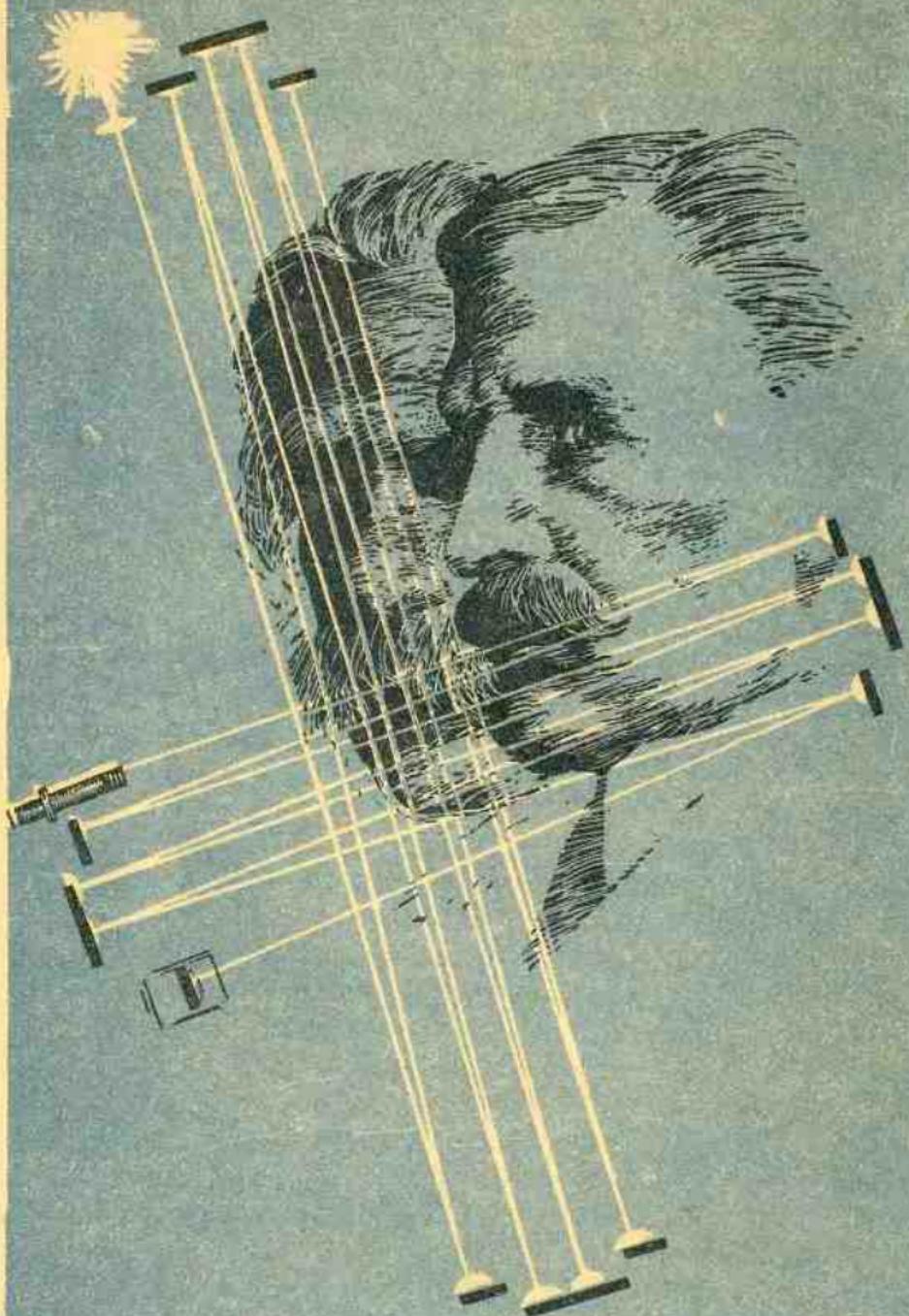
* Персонаж сказки Льюиса Кэрролла «Алиса в Зазеркалье».— Прим. перев.

ся читать напечатанную зеркально отраженными буквами поэму «Jabberwocky», держа ее перед зеркалом. Но если бы все стало наоборот, то никаким экспериментом не удалось бы обнаружить это изменение. Было бы так же бессмысленно говорить, что имело место подобное обращение, как сказать, что Вселенная перевернулась или удвоилась в размерах.

Абсолютно ли движение? Существует ли какой-либо класс экспериментов, который с определенностью показал бы, движется объект или покоятся? Является движение еще одной относительной категорией, судить о которой можно, только сопоставляя местоположение одного предмета с местоположением другого? Или же движению присуще нечто своеобразное, что делает его отличным от относительных категорий, рассмотренных выше?

Остановитесь и внимательно подумайте над этим некоторое время, прежде чем переходить к следующей главе. Отвечая именно на такие вопросы, Эйнштейн развел свою знаменитую теорию относительности. Его теория так революционна, так противоречит «здравому смыслу», что даже сегодня имеются тысячи ученых (в том числе и физиков), для которых понимание ее основных положений сопряжено с такими же трудностями, с какими сталкивается ребенок, пытаясь понять, почему люди в южном полушарии не падают с Земли.

Если вы молоды, то имеете большие преимущества перед этими учеными. В вашем мозгу еще не выработались те глубокие колеи, по которым мысль так часто бывает вынуждена двигаться. Но, каким бы ни был ваш возраст, если вы готовы поупражняться свои умственные силы, то нет причин, которые помешали бы вам научиться чувствовать себя как дома в этом новом странном мире относительности.



2

Эксперимент Майкельсона — Морли

Относительно ли движение? После некоторого размышления вы могли бы склониться к ответу: «Да, конечно!» Представьте себе поезд, движущийся на север со скоростью 60 км/ч. Человек в поезде идет на юг со скоростью 3 км/ч. В каком направлении он движется и какова его скорость? Совершенно очевидно, что на этот вопрос нельзя ответить, не указав системы отсчета. По отношению к поезду человек движется на юг со скоростью 3 км/ч. По отношению к Земле он движется на север со скоростью 60 минус 3, т. е. 57 км/ч.

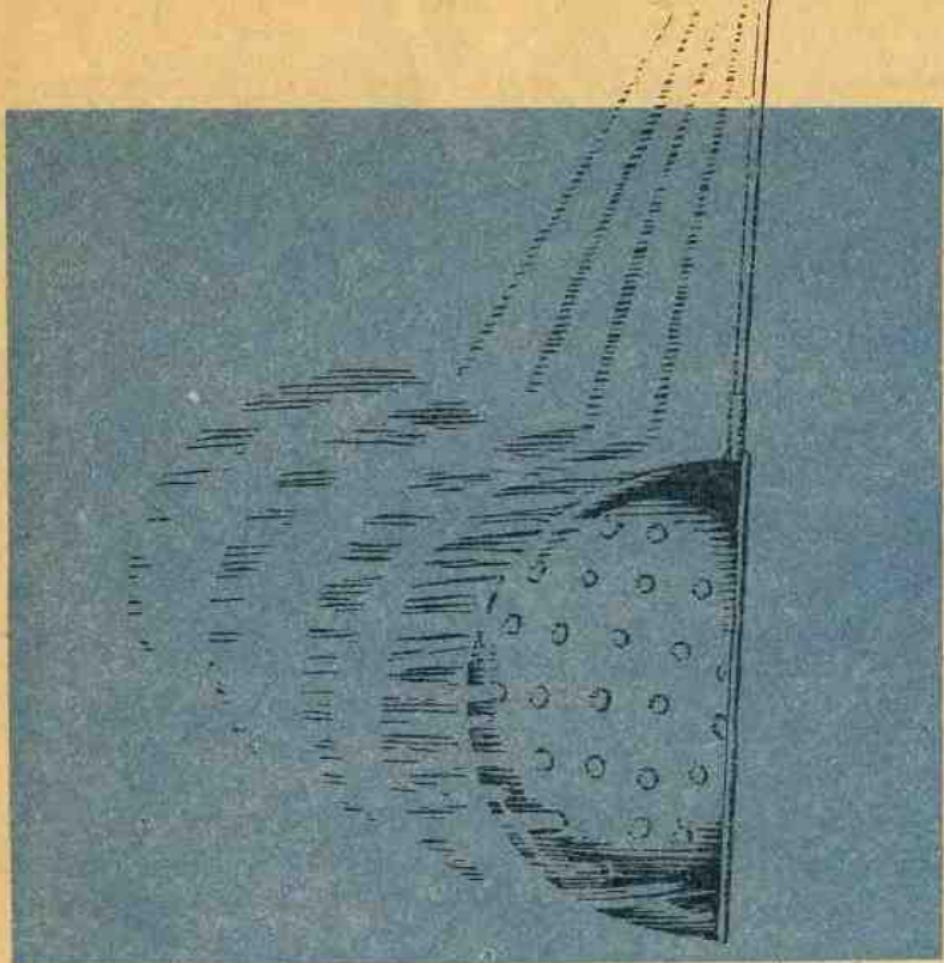
Можно ли сказать, что скорость человека по отношению к Земле (57 км/ч) является его истинной, абсолютной скоростью? Нет, потому что имеются и другие, еще более крупномасштабные системы отсче-

та. Сама Земля движется. Она вращается вокруг своей оси и в то же время движется вокруг Солнца. Солнце вместе со всеми своими планетами движется внутри Галактики. Галактика вращается и движется по отношению к другим галактикам. Галактики, в свою очередь, образуют сгустки галактик, движущиеся друг относительно друга. Никто не знает, насколько далеко на самом деле может быть продолжена эта цепь движений. Нет очевидного пути определить абсолютное движение какого-либо предмета; иными словами, нет такой фиксированной, окончательной системы отсчета, по отношению к которой можно было бы измерять все движения. Движение и покой, подобно большому и малому, быстрому и медленному, верху и низу, левому и правому, по-видимому, полностью относительны. Нет иного пути измерить движение какого-либо предмета, кроме как сравнивая его движение с движением другого предмета.

Увы, это не так просто! Если бы можно было ограничиться лишь тем, что уже сказано об относительности движения, то не было бы необходимости в создании Эйнштейном теории относительности.

Причина сложности в следующем: имеется два очень простых способа обнаружения абсолютного движения. В одном из методов используются свойства света, в другом — различные явления инерции, возникающие при изменении движущимся предметом траектории или скорости. Специальная теория относительности Эйнштейна имеет дело с первым методом, а общая теория относительности — со вторым. В этой и двух следующих главах будет рассматриваться первый метод, который может служить ключом к пониманию абсолютного движения, метод, использующий свойства света.

В девятнадцатом веке, еще до Эйнштейна, физики представляли себе пространство наполненным особым неподвижным и невидимым веществом, названным эфиром. Часто его называли «светоносным» эфиром, имея в виду, что он является носителем световых волн. Эфир заполнял всю Вселенную.



Он проникал во все материальные тела. Если бы весь воздух был откачен из-под стеклянного колокола, колокол был бы наполнен эфиром. А как иначе свет мог бы пройти через вакуум? Свет — это волновое движение. Следовательно, должно быть что-то, в чем происходят колебания. Сам эфир, хотя в нем и существуют колебания, редко (если не никогда) движется по отношению к материальным предметам, скорее все предметы движутся сквозь него, подобно движению сата в воде. Абсолютное движение звезды, планеты или какого-либо другого предмета упростится (в этом физики той эпохи были уверены), если движение рассматривать по отношению к такому неподвижному, невидимому эфирному морю.

Но, спросите вы, если эфир нематериальная субстанция, которую нельзя видеть, слышать, чувство-

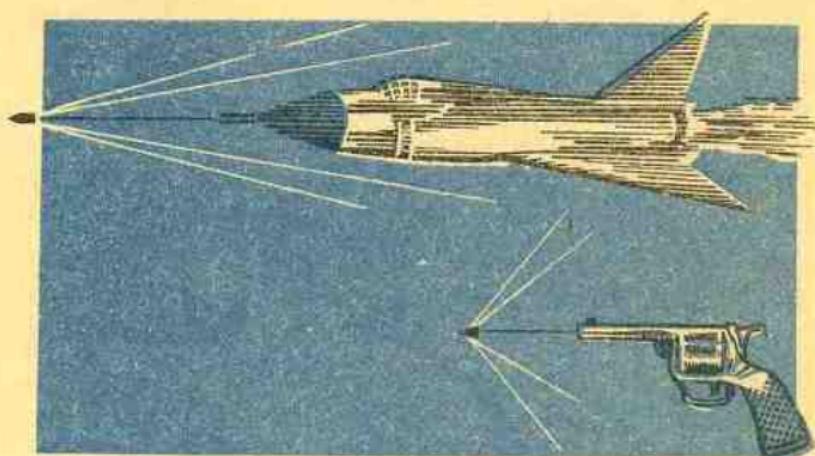
вать, обонять или пробовать на вкус, то как можно рассматривать движение, например, Земли по отношению к нему? Ответ прост. Измерения могут быть выполнены путем сравнения движения Земли с движением светового пучка.

Чтобы понять это, обратимся на время к природе света. В действительности свет — это лишь небольшая видимая часть спектра электромагнитного излучения, в состав которого входят радиоволны,

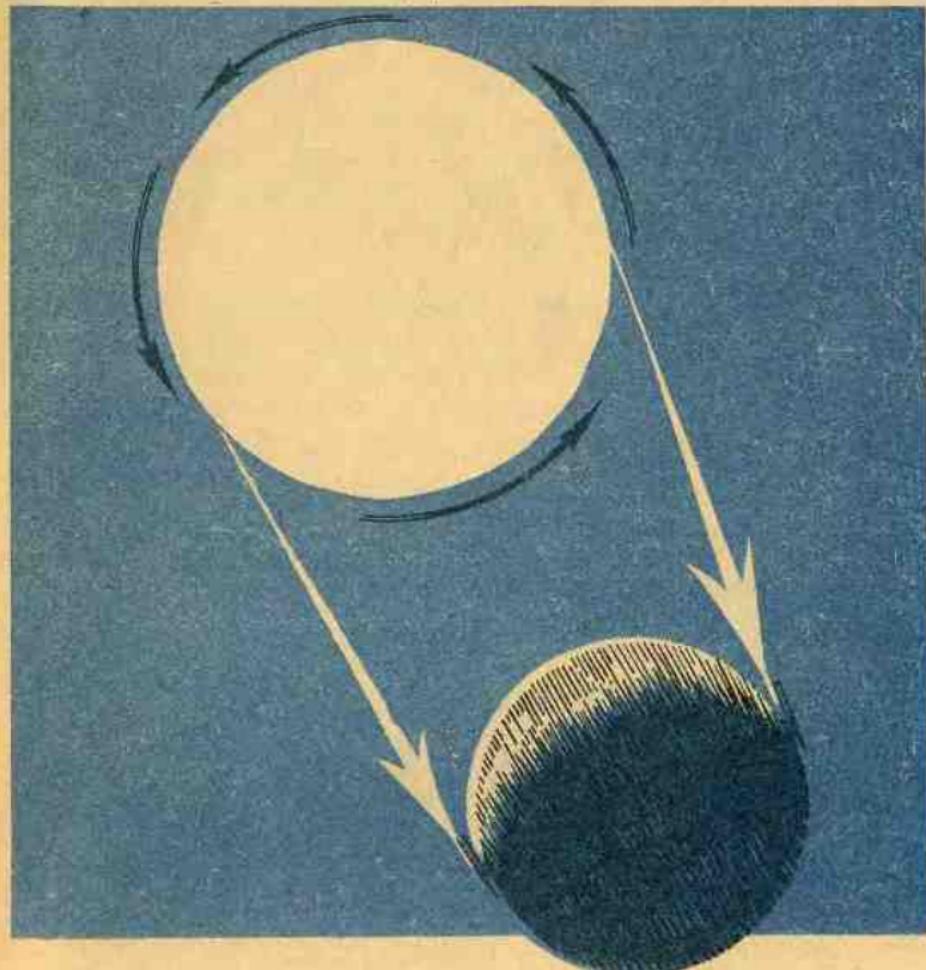


ультракороткие волны, инфракрасный свет, ультрафиолетовый свет и гамма-лучи. В этой книге мы используем слово «свет» для обозначения любого типа электромагнитного излучения, так как это слово короче, чем «электромагнитное излучение». Свет — волновое движение. Думать о таком движении, не думая одновременно о материальном эфире, казалось физикам прошлого столь же абсурдным, как думать о волнах на воде, не думая о самой воде.

Если выстрелить из движущегося реактивного самолета по направлению его движения, то скорость



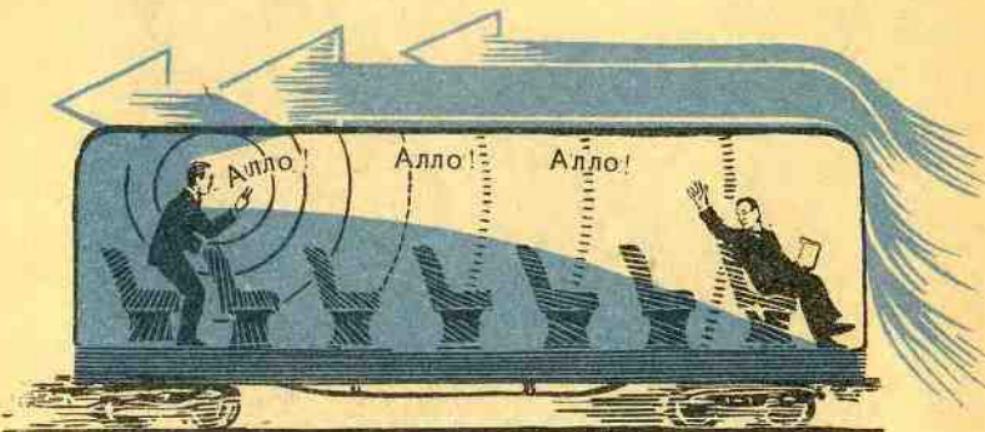
пули относительно Земли будет больше, чем скорость пули, выпущенной из ружья на Земле. Скорость пули относительно Земли получается сложением скорости самолета и скорости пули. В случае же света скорость пучка не зависит от скорости предмета, которым свет был испущен. Этот факт был убедительно доказан экспериментально в конце девятнадцатого и начале двадцатого века и с тех пор неоднократно подтверждался. Последняя проверка производилась в 1955 г. советскими астрономами, использовавшими свет от противоположных сторон вращающегося Солнца. Один край нашего Солнца всегда движется к нам, а другой — в противоположную сторону. Было найдено, что свет от обоих краев приходит к

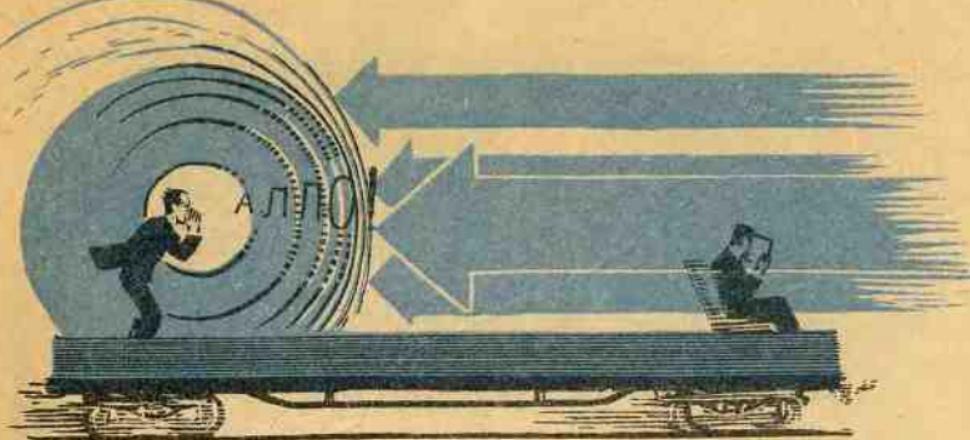


Земле с одинаковой скоростью. Подобные опыты делались и десятилетия назад со светом от вращающихся двойных звезд. Несмотря на движение источника, скорость света в пустоте всегда одинакова: она несколько меньше 300 000 км/сек.

Видите, каким образом этот факт дает способ ученому (будем называть его наблюдателем) вычислить свою абсолютную скорость. Если свет распространяется через неподвижный, неизменный эфир с определенной скоростью c и если эта скорость не зависит от скорости движения источника, то скорость света может служить эталоном для определения абсолютного движения наблюдателя. Наблюдатель, движущийся в том же направлении, что и пучок света, должен был бы обнаружить, что пучок проходит мимо него со скоростью, меньшей c ; наблюдатель, движущийся навстречу пучку света, должен был бы отметить, что пучок приближается к нему со скоростью, большей c . Другими словами, результаты измерения скорости света должны были бы изменяться в зависимости от движения наблюдателя по отношению к пучку. Эти изменения отражали бы его (наблюдателя) истинное, абсолютное движение сквозь эфир.

При описании этого явления физики часто пользуются понятием «эфирный ветер». Для понимания





содержания этого термина рассмотрим снова движущийся поезд. Мы видели, что скорость человека, идущего по поезду со скоростью 3 км/ч, всегда одна и та же по отношению к поезду и не зависит от того, в сторону локомотива или к концу поезда он идет. Это будет справедливо и для скорости звуковых волн внутри закрытого вагона. Звук — волновое движение, передаваемое молекулами воздуха. Поскольку воздух содержится внутри вагона, звук внутри вагона будет распространяться на север с той же скоростью (по отношению к вагону), что и на юг.

Положение изменится, если мы перейдем из закрытого пассажирского вагона на открытую платформу. Воздух более не изолирован внутри вагона. Если поезд движется со скоростью 60 км/ч, то вдоль платформы в обратном направлении дует ветер со скоростью 60 км/ч. Из-за этого ветра скорость звука в направлении от конца к началу вагона будет меньше нормальной. Скорость звука в обратном направлении будет больше нормальной.

Физики девятнадцатого столетия были уверены, что эфир должен вести себя подобно воздуху, дующему на движущейся платформе. Как может быть иначе? Если эфир неподвижен, то любой движущийся в нем предмет должен встретить эфирный ветер, дующий в противоположном направлении. Свет — волновое движение в неподвижном эфире. На ско-



рость света, измеренную с движущегося предмета, эфирный ветер должен, конечно, влиять.

Земля несется в пространстве по своему пути вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек. Это движение, рассуждали физики, должно вызывать эфирный ветер, дующий навстречу Земле в промежутках между ее атомами со скоростью 30 км/сек. Чтобы измерить абсолютное движение Земли (ее движение относительно неподвижного эфира), необходимо лишь измерить скорость, с которой свет проходит некоторое определенное расстояние на земной поверхности туда и обратно. Из-за эфирного ветра свет будет двигаться быстрее в одном направлении, чем в другом. Сравнив скорости света, испущенного по разным направлениям, можно было бы вычислить абсолютное направление и скорость движения Земли в любой заданный момент. Этот эксперимент был впервые предложен в 1875 г., за 4 года до рождения Эйнштейна, великим шотландским физиком Джемсом Кларком Максвеллом *.

В 1881 г. Альберт Абрагам Майкельсон, в те времена молодой офицер Военно-Морского Флота Соединенных Штатов, сделал именно такой эксперимент. Майкельсон родился в Германии, его родители — поляки. Отец его переехал в Америку, когда Майкельсону было два года. После окончания Военно-Мор-

* Это предложение было высказано Максвеллом в статье «Эфир» для девятого издания Британской Энциклопедии.

ской Академии в Аннаполисе и двухлетней морской службы Майкельсон начинает преподавать физику и химию в этой же Академии. Взяв длительный отпуск, он едет учиться в Европу. В Берлинском университете, в лаборатории известного немецкого физика Германа Гельмгольца, молодой Майкельсон впервые попытался обнаружить эфирный ветер. К его великому удивлению ни в одном направлении компаса он не обнаружил разницы в скорости, с которой свет проходил путь туда и обратно. Это было похоже на то, как если бы рыба открыла, что она может плыть в любом направлении в море, не замечая движения воды относительно ее тела; как если бы пилот, летящий с открытым колпаком кабины самолета, не заметил ветра, дующего ему в лицо.

Выдающийся австрийский физик Эрнст Мах (мы еще поговорим о нем в гл. 7) уже тогда критически относился к представлению об абсолютном движении через эфир. Прочитав опубликованный отчет Майкельсона об опыте, он немедленно заключил, что представление об эфире надо отбросить. Однако большинство физиков отказались сделать такой смелый шаг. Прибор Майкельсона был груб, было достаточно оснований думать, что эксперимент, поставленный с более чувствительной аппаратурой, даст положительный результат. Так думал и сам Майкельсон. Не найдя ошибок в своем опыте, он стремился повторить его.

Майкельсон отказался от военно-морской службы и стал профессором в Кэйсовской школе прикладных наук (теперь Кэйсовский университет) в Кливленде, штат Огайо. Поблизости, в университете Западной Территории преподавал химию Эдвард Вильям Морли. Эти два человека стали добрыми друзьями. «Внешне, — пишет Бернард Яффе в книге «Майкельсон и скорость света», — эти двое ученых являли образец контраста... Майкельсон был красивый, наряд-



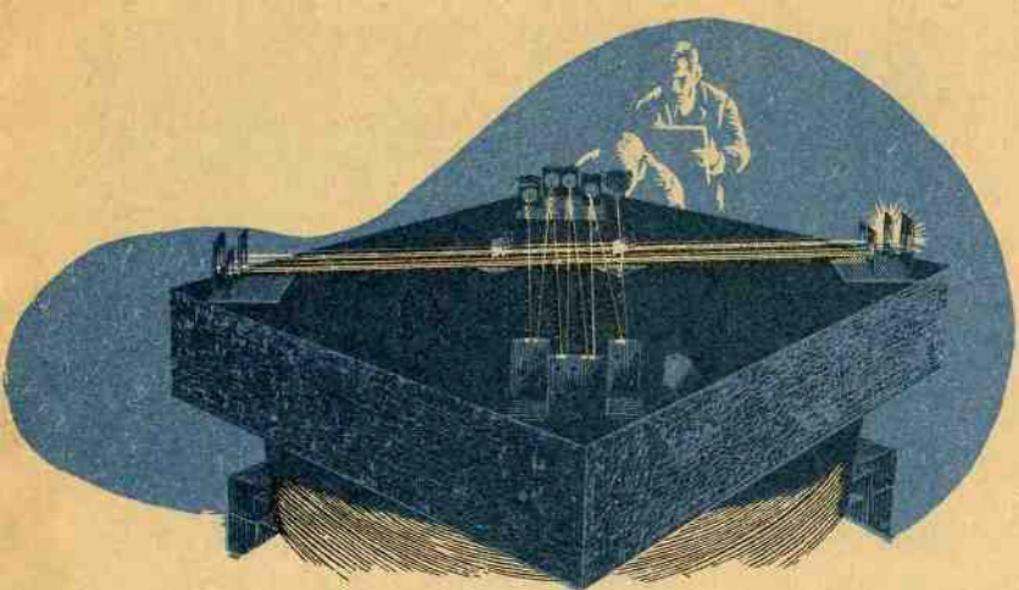
ный, всегда безупречно выбритый. Морли, мягко говоря, был небрежен в одежде и служил примером рассеянного профессора... Он позволял волосам отрастать до тех пор, пока они не начинали завиваться на плечах, и был обладателем беспорядочной рыжей щетины, доходившей почти до ушей».

В 1887 г. в подвале лаборатории Морли оба учених сделали вторую, более точную попытку найти неуловимый эфирный ветер. Их опыт, известный как эксперимент Майкельсона — Морли, — одна из великих поворотных точек современной физики.

Прибор был установлен на квадратной каменной плите со сторонами около полутора метров и толщиной более 30 см. Плита плавала в жидкой ртути. Это исключало вибрации, поддерживало горизонтальность плиты и позволяло легко поворачивать ее вокруг центральной оси. Система зеркал направляла пучок света в определенном направлении, зеркала отражали пучок туда и обратно по одному направлению так, что он делал восемь пробегов. (Это было сделано для того, чтобы максимально удлинить путь, сохранив размеры прибора такими, при которых он еще мог легко вращаться.) В то же время другая система зеркал посыпала пучок на восемь пробегов по направлению, составлявшему прямой угол с первым пучком.

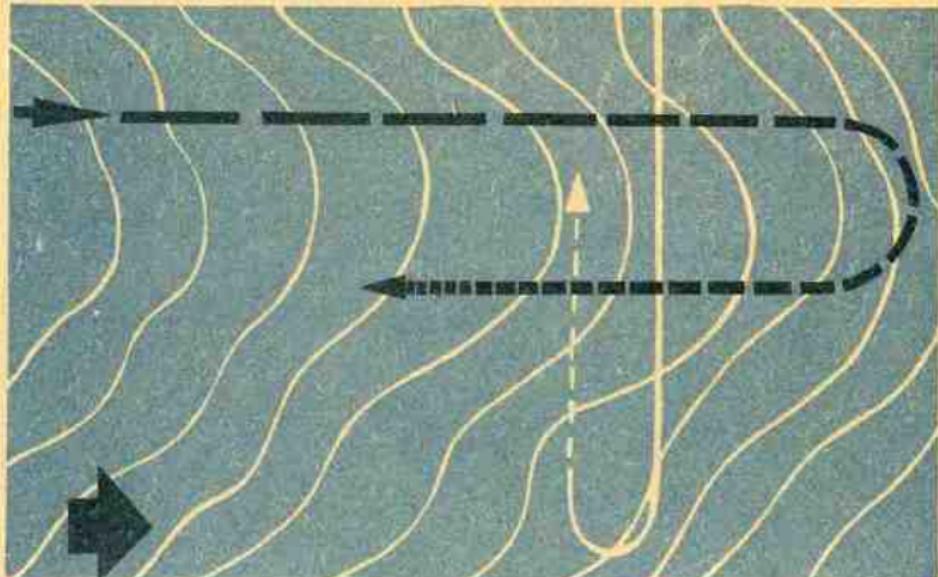
Предполагалось, что когда плита будет повернута так, что один из пучков будет пробегать туда и обратно параллельно эфирному ветру, то пучок будет делать рейс за большее время, чем другой пучок, проходящий такое же расстояние перпендикулярно ветру. Сначала кажется, что должно быть справедливо обратное. Рассмотрим свет, распространяющийся по ветру и против ветра. Не будет ли ветер увеличивать скорость на одном пути настолько же, насколько уменьшает ее на другом? Если так, то ускорение и торможение компенсировали бы друг друга и время, затраченное на весь путь, было бы точно таким же, как если бы никакого ветра не было вовсе.

Действительно, ветер будет увеличивать скорость в одном направлении на точно такую же величину,



как уменьшать ее в другом, но — и это самое важное — ветер будет уменьшать скорость в течение большего промежутка времени. Вычисления показывают, что на преодоление полного пути против ветра затрачивается больше времени, чем при отсутствии ветра. Ветер будет оказывать замедляющее действие и на пучок, распространяющийся под прямым углом к нему. В этом также легко убедиться.

Оказывается, что замедляющее действие меньше, чем в том случае, когда пучок распространяется параллельно ветру. Если Земля движется через море неподвижного эфира, то должен возникать эфирный ветер и прибор Майкельсона — Морли должен его зарегистрировать. И действительно, оба ученых были уверены, что они смогут не только обнаружить такой ветер, но и определить (вращая плиту до тех пор, пока не найдут то положение, в котором разность времени прохождения света в обоих направлениях максимальна) в любой заданный момент точное направление движения Земли через эфир.



Надо отметить, что прибор Майкельсона — Морли не измерял истинной скорости света каждого из пучков. Оба пучка после того, как они совершали нужное количество пробегов туда и обратно, объединялись в единый пучок, который можно было наблюдать в небольшой телескоп. Прибор медленно поворачивался. Любое изменение относительных скоростей обоих пучков вызвало бы сдвиг интерференционной картины чередующихся светлых и темных полос.

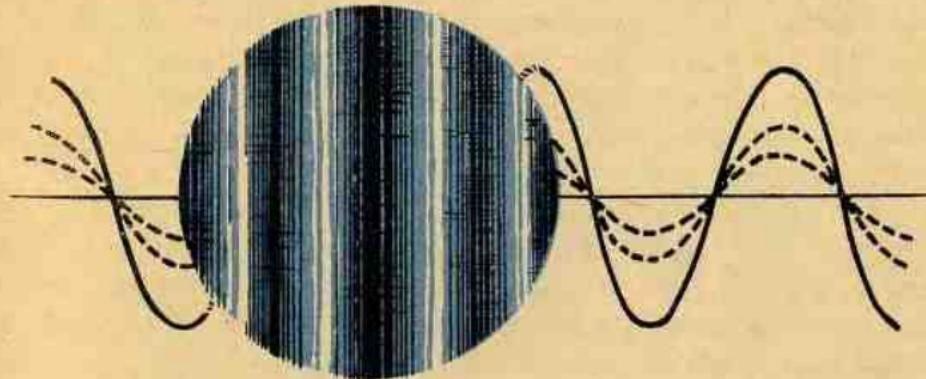
И снова Майкельсон был поражен и разочарован. Удивлены были и все физики во всем мире. Несмотря на то что Майкельсон и Морли поворачивали свой прибор, они не заметили и следа эфирного ветра! Никогда раньше в истории науки отрицательный результат опыта не был столь разрушительным и столь плодотворным. Майкельсон снова решил, что его эксперимент не удался. Он никогда не думал, что эта «неудача» сделает его опыт одним из наиболее значительных, революционных экспериментов в истории науки.

Позже Майкельсон и Морли повторили свой опыт с еще более совершенным прибором. Другие физики сделали то же. Наиболее точные опыты выполнил в

1960 г. Чарльз Таунс в Колумбийском университете. Его прибор, использующий мазер («атомные часы», основанные на колебаниях молекул), был настолько чувствителен, что мог бы заметить эфирный ветер, даже если бы Земля двигалась со скоростью, составляющей всего лишь одну тысячную истинной. Но и следа такого ветра не было обнаружено.

Физики вначале были настолько изумлены отрицательным результатом опыта Майкельсона — Морли, что начали придумывать всевозможные объяснения для спасения теории эфирного ветра. Конечно, если бы этот эксперимент был выполнен несколькими столетиями раньше, то, как отмечает Г. Дж. Уитроу в книге «Строение и развитие Вселенной», очень простое объяснение о неподвижности Земли быстро пришло бы на ум каждому. Но это объяснение опытаказалось неправдоподобным. Наилучшим объяснением была теория (значительно более старая, чем опыт Майкельсона — Морли), утверждающая, что эфир увлекается Землей, подобно воздуху внутри закрытого вагона. Так же думал и Майкельсон. Но другие опыты, один из которых Майкельсон выполнил собственноручно, исключали и это объяснение.

Наиболее необычное объяснение дал ирландский физик Джордж Фрэнсис Фитцджеральд. Возможно, говорил он, эфирный ветер давит на движущийся предмет, заставляя его сокращаться в направлении движения. Чтобы определить длину движущегося



предмета, надо его длину в состоянии покоя умножить на величину, даваемую формулой

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

где v^2 — квадрат скорости движущегося тела, а c^2 — квадрат скорости света.

Из этой формулы можно видеть, что величина сокращения пренебрежимо мала при малых скоростях тела, возрастает с ростом скорости и становится большой при приближении скорости тела к скорости света. Так, космический корабль, по форме напоминающий длинную сигару, при движении с большой скоростью приобретает форму короткой сигары.

Скорость света — недостижимый предел; для тела, движущегося с этой скоростью, формула имела бы вид

$$\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}},$$

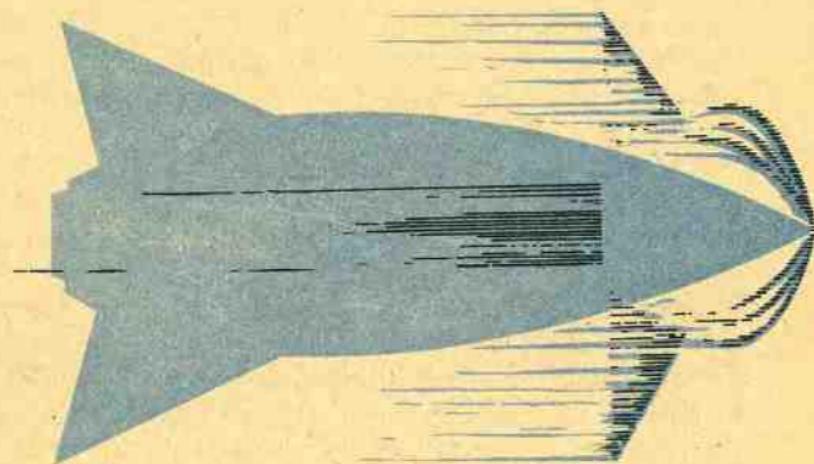
а это выражение равно нулю. Умножив длину предмета на нуль, мы получили бы в ответе нуль. Другими словами, если какой-либо предмет сможет достичь скорости света, то он не будет иметь никакой длины в направлении своего движения!

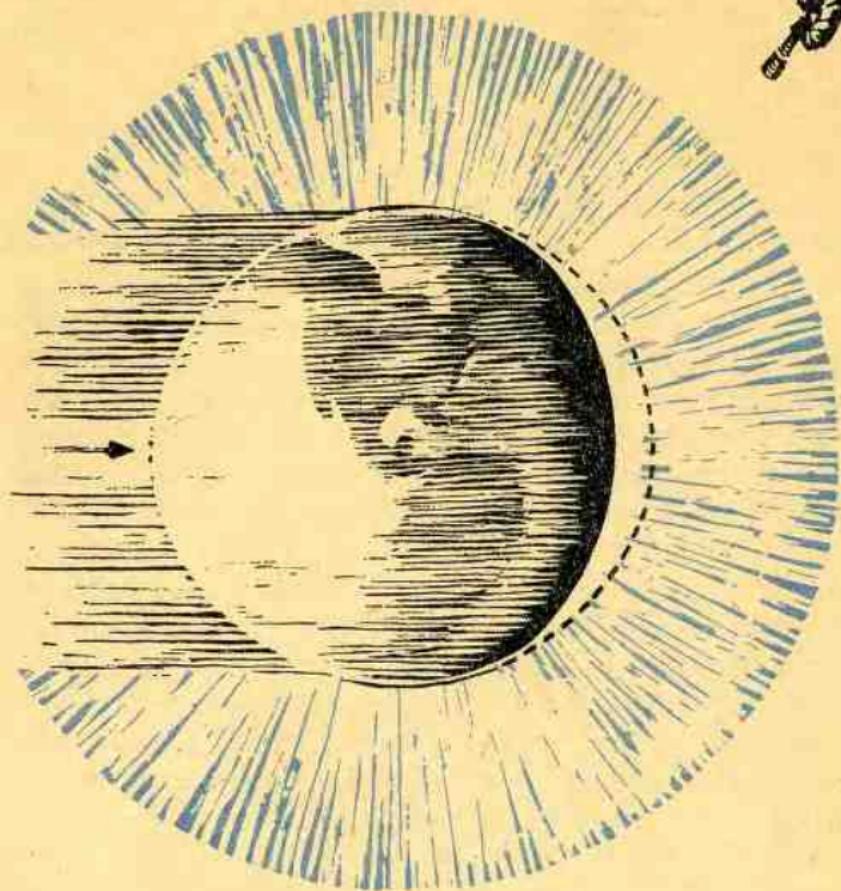
Элегантную математическую форму теории Фитцджеральда придал голландский физик Хендрик Лоренц, который независимо пришел к такому же объяснению. (Позже Лоренц стал одним из ближайших друзей Эйнштейна, но в то время они еще не были знакомы.) Эта теория получила известность как теория сокращения Лоренца — Фитцджеральда (или Фитцджеральда — Лоренца).

Легко понять, как теория сокращения объяснила неудачу опыта Майкельсона — Морли. Если бы квадратная плита и все приборы на ней немного сокращались в том направлении, в котором дул эфирный ветер, то свет проходил бы более короткий полный путь. И хотя ветер оказывал бы в целом тормозящее действие на движение пучка в прямом и обратном на-

правлениях, более короткий путь позволил бы пучку закончить это путешествие за точно такое же время, как если бы не было ни ветра, ни сокращения. Иначе говоря, сокращение было точно таким, чтобы сохранить постоянство скорости света независимо от направления поворота прибора Майкельсона — Морли.

Почему, можете спросить вы, нельзя было просто измерить длину прибора и посмотреть, происходило ли в действительности укорачивание в направлении движения Земли? Но ведь линейка тоже сокращается и в той же самой пропорции. Измерение дало бы такой же результат, как и при отсутствии сокращения. На движущейся Земле все подвержено сокращению. Положение такое же, как и в мысленном опыте Пуанкаре, в котором Вселенная внезапно становится в тысячу раз больше, но только в теории Лоренца — Фитцджеральда изменения происходят в одном-единственном направлении. Так как этому изменению подвержено все, то нет способа его обнаружить. Внутри определенных пределов (пределы устанавливаются топологией — наукой о свойствах, сохраняющихся при деформации предмета) форма столь же относительна, как и размер. Сокращение прибора, как и сокращение всего на Земле, мог бы заметить лишь тот, кто находится вне Земли и не движется вместе с нею.





Многие писатели, говоря о теории относительности, считали гипотезу сокращения Лоренца — Фитцджеральда гипотезой *ad hoc* (латинское выражение, означающее «только для данного случая»), не поддающейся проверке какими-либо другими экспериментами. Адольф Грюнбаум считал, что это не вполне справедливо. Гипотеза сокращения была *ad hoc* только в том смысле, что в то время не было пути проверить ее. В принципе она вовсе не *ad hoc*. И это было доказано в 1932 г., когда Кеннеди и Торндайк экспериментально опровергли эту гипотезу.

Рой Дж. Кеннеди и Эдвард М. Торндайк, два американских физика, повторили опыт Майкельсона — Морли. Но вместо того, чтобы стремиться сделать оба плеча по возможности равными, они постарались

сделать их длины максимально различными. Для того чтобы обнаружить разницу во времени, затрачиваемом светом на прохождение в двух направлениях, прибор поворачивали. В соответствии с теорией сокращения разность времен должна была изменяться при повороте. Ее можно было бы заметить (как и в опыте Майкельсона) по изменению интерференционной картины, возникающей при смешении двух пучков. Но такого изменения не обнаружили.

Наиболее просто проверить теорию сокращения можно было бы, выполнив измерения скорости пучков света, распространяющихся в противоположных направлениях: вдоль направления движения Земли и против него. Очевидно, сокращение пути не делает невозможным обнаружение эфирного ветра, если он существует. До недавнего открытия эффекта Мёссбауэра (о нем будет говориться в гл. 8) гигантские технические трудности мешали провести этот опыт. В феврале 1962 г. на собрании Королевского общества в Лондоне профессор Христиан Мёллер из Копенгагенского университета рассказал о том, как легко можно выполнить этот эксперимент при использовании эффекта Мёссбауэра. Для этого источник и поглотитель электромагнитных колебаний устанавливают на противоположных концах вращающегося стола. Мёллер указал, что такой эксперимент мог бы опровергнуть первоначальную теорию сокращения. Возможно, что за время печатания этой книги такой эксперимент будет выполнен.

Хотя эксперименты такого рода и не могли быть выполнены во времена Лоренца, он предусматривал принципиальную возможность их и считал вполне обоснованными предположения о том, что эти опыты, подобно опыту Майкельсона, дадут отрицательный результат. Чтобы объяснить такой вероятный результат, Лоренц сделал важное добавление к первоначальной теории сокращения. Он ввел изменение времени. Он говорил, что часы замедлялись бы под действием эфирного ветра, причем таким образом, что измеренная скорость света всегда составляла 300 000 км/сек.

Рассмотрим конкретный пример. Допустим, что у нас есть часы, достаточно точные, чтобы сделать опыт по измерению скорости света. Пошлем свет из точки А в точку Б по прямой вдоль направления движения Земли. Синхронизируем двое часов в точке А и затем передвижем одни из них в точку Б. Отметим время, когда пучок света покинул пункт А и (по другим часам) момент прибытия его в пункт Б. Так как свет двигался бы при этом против эфирного ветра, его скорость несколько уменьшилась бы, а время пробега возросло по сравнению со случаем покоящейся Земли. Вы заметили изъян в этом рассуждении? Часы, двигавшиеся из точки А в Б, также двигались против эфирного ветра.. Это замедлило часы в точке Б, они несколько отстали от часов в точке А. В результате измеренная скорость света остается неизменной — 300 000 км/сек.

То же самое произойдет (утверждает Лоренц), если измерять скорость света, распространяющегося в противоположном направлении, из точки Б в А. Двое часов синхронизируются в точке Б и затем одни из них переносятся в точку А. Пучок света, распространяясь из пункта Б в А, движется вдоль эфирного ветра. Скорость пучка увеличивается, и, следовательно, время прохождения несколько уменьшается по сравнению со случаем покоящейся Земли. Однако при перенесении часов из точки Б в А их тоже «подгонят» ветер. Уменьшение давления эфирного ветра разрешит часам увеличить скорость, и, следовательно, к моменту окончания эксперимента часы в точке А убегут вперед по сравнению с часами в точке Б. И в результате скорость света опять 300 000 км/сек.

Новая теория Лоренца не только объяснила отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли; из нее следовала принципиальная невозможность опытным путем обнаружить влияние эфирного ветра на скорость света. Ее уравнения для изменения длины и времени действуют так, что при любом возможном методе измерения скорости света в любой системе отсчета будет получаться одинаковый результат. Ясно, что физики были неудовлетворены

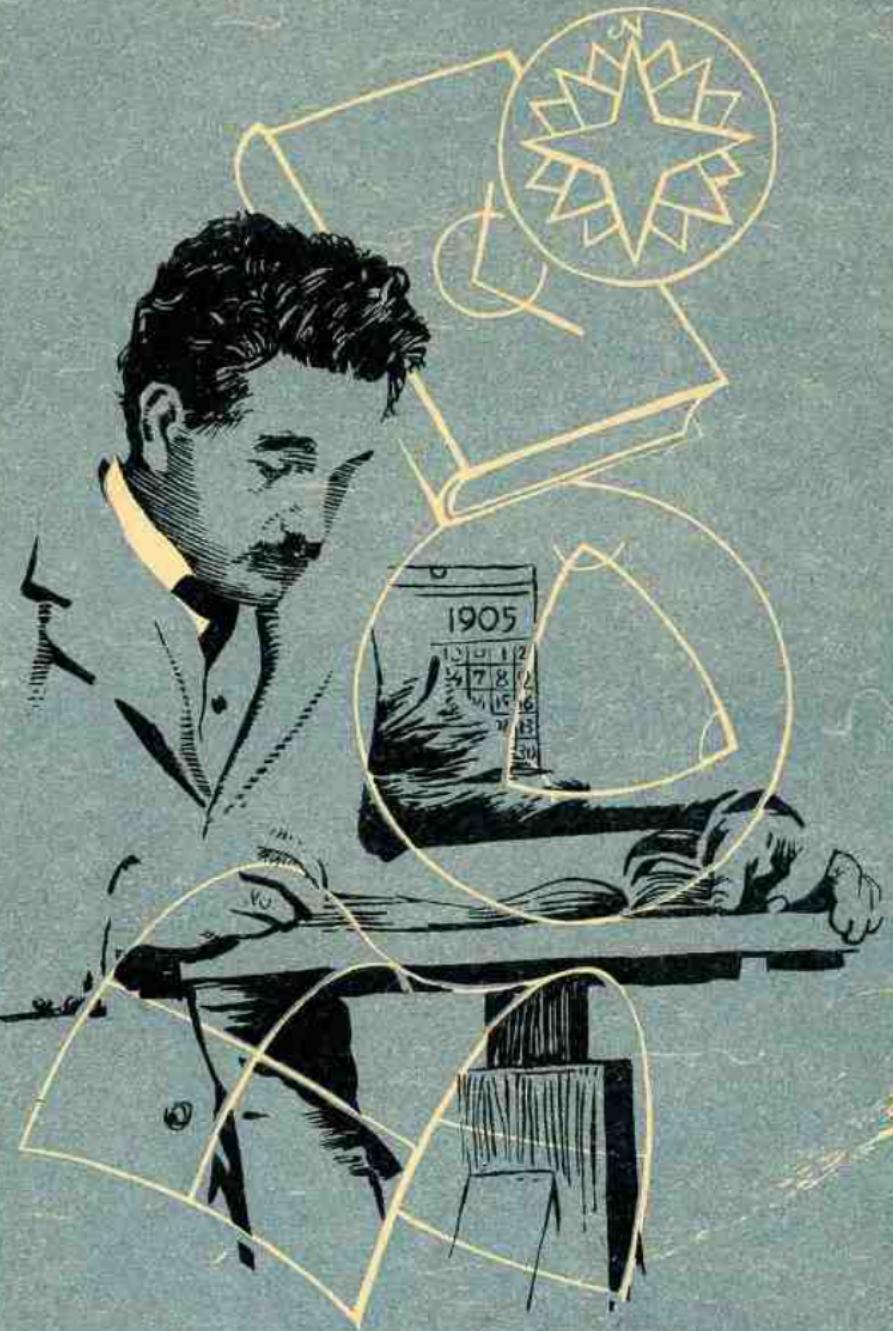


этой теорией. Она была теорией *ad hoc* в полном смысле этого слова. Оказались обреченными усилия залатать дыры, возникшие в теории эфира. Нельзя представить себе пути ее подтверждения или опровержения. Физикам было трудно поверить, что, создав эфирный ветер, природа устроила все так, что обнаружить этот ветер невозможно. Английский философ-математик Бартран Рассел позднее очень удачно цитировал песенку Белого Рыцаря из книги Льюиса Кэрролла «Алиса в стране чудес».

Мне хотелось бы покрасить
Бакенбарды в цвет зеленый,
В руки веер взять побольше,
Чтобы их никто не видел.

Новая теория Лоренца, в которой изменялись и время, и длина, казалась почти столь же абсурдной, как и план Белого Рыцаря. Но, несмотря на все усилия, физики не могли придумать ничего лучшего.

В следующей главе будет показано, как специальная теория относительности Эйнштейна указала на смелый, замечательный выход из столь запутанного положения.





Специальная теория относительности

Часть I

В 1905 г., когда Альберт Эйнштейн опубликовал свою знаменитую статью о том, что впоследствии стали называть специальной теорией относительности, он был молодым женатым человеком 26 лет, работавшим в качестве эксперта в Швейцарском патентном бюро. Его карьера студента физики в Цюрихском политехническом институте не была блестящей. Он предпочитал читать, думать и мечтать, а не забивать свой ум несущественными фактами ради того, чтобы на экзаменах получать высокие оценки. Несколько раз он пытался преподавать физику, но оказался неважным учителем, и вынужден был оставлять работу.

В этой истории есть и другая сторона. Еще будучи маленьким мальчиком, Эйнштейн глубоко задумы-

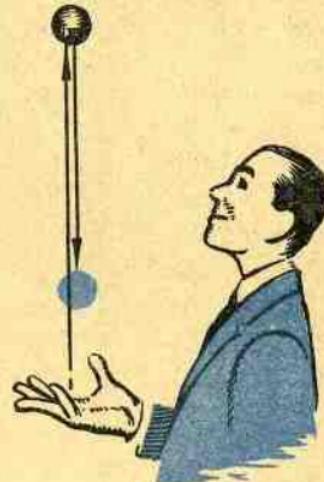
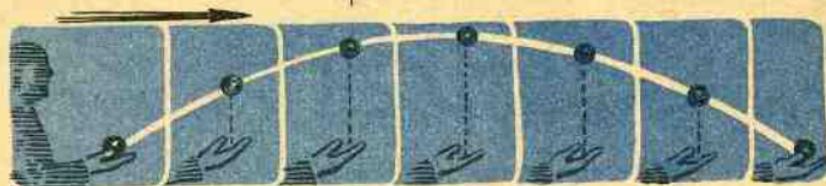
вался над фундаментальными законами природы. Позже он вспоминал о двух величайших «чудесах» своего детства: о компасе, который отец показал ему, когда он был в возрасте четырех или пяти лет, и о книге по Евклидовской геометрии, которую он прочел, когда ему было двенадцать лет. Эти два «чуда» символичны для деятельности Эйнштейна: компас — символ физической геометрии, структуры этого «огромного мира» вне нас, который мы никогда не сможем узнать абсолютно точно; книга — символ чистой геометрии, структуры, которая является абсолютно определенной, но не отражает полностью действительного мира. Уже к шестнадцати годам Эйнштейн приобрел, главным образом благодаря собственным усилиям, основательные знания по математике, включая аналитическую геометрию и дифференциальное и интегральное исчисление.

Когда Эйнштейн работал в Швейцарском патентном бюро, он читал и думал обо всех запутанных проблемах, связанных со светом и движением. Его специальная теория относительности была блестящей попыткой объяснить множество необъяснимых экспериментов, из которых опыт Майкельсона — Морли был наиболее поразительным и самым известным. Следует подчеркнуть, что было много других экспериментов, в результате которых создалось очень неудовлетворительное положение с теорией электромагнитных явлений. Если бы опыт Майкельсона — Морли и не был никогда поставлен, специальная теория относительности все равно была бы сформулирована. Позже Эйнштейн сам говорил о той малой роли, которую играл этот эксперимент в его размышлениях. Конечно, если бы Майкельсон и Морли зарегистрировали эфирный ветер, специальная теория была бы отвергнута с самого начала. Но отрицательный результат их опыта был только одним из многих фактов, которые привели Эйнштейна к его теории.

Мы видели, как Лоренц и Фитцджеральд попытались спасти теорию эфирного ветра, предположив, что давление этого ветра каким-то пока еще непонятным образом вызывает действительное физическое

сокращение движущихся тел. Эйнштейн, следуя за Эрнстом Махом, сделал более смелое предположение. Причина, по которой Майкельсон и Морли не смогли наблюдать эфирный ветер, сказал Эйнштейн, проста: эфирного ветра нет. Он не сказал, что эфира нет, а только, что эфир, если он существует, не имеет значения при измерениях равномерного движения. (В последние годы многие выдающиеся физики предложили, чтобы термин «эфир» был восстановлен, хотя, конечно, не в старом смысле неподвижной системы отсчета.)

Классическая физика — физика Исаака Ньютона — показала, что если вы находитесь внутри равномерно движущегося тела, скажем, в вагоне поезда, закрытом со всех сторон так, что не виден проносящийся мимо пейзаж, то не существует такого механического эксперимента, с помощью которого вы могли бы доказать, что вы движетесь. (При этом, конечно, предполагается, что равномерное движение происходит совершенно гладко, без толчков или раскачки вагона, которые могли бы служить показателями движения.) Если вы подбросите шарик прямо вверх, он упадет прямо вниз. Все происходит в точности так же, как если бы поезд стоял. Наблюдатель,



стоящий на земле, вне движущегося вагона, если бы он мог видеть сквозь его стены, увидел бы путь шарика кривым. Но для вас, внутри вагона, шарик движется по прямой вверх и вниз. И это очень хорошо, что тела ведут себя таким образом. В противном случае было бы невозможно играть в игры, подобные теннису или футболу. Всякий раз, когда мяч взлетал бы в воздух, земля сдвигалась бы под ним со скоростью 30 км/сек.

Специальная теория относительности — это шаг вперед от классической относительности Ньютона. Она говорит, что помимо невозможности обнаружения движения поезда с помощью механического эксперимента невозможно также обнаружить это движение с помощью оптического эксперимента, точнее, с помощью эксперимента с электромагнитным излучением. Кратко специальная теория может быть выражена так: невозможно измерить равномерное движение каким-то абсолютным способом. Если мы находимся в мягко, равномерно движущемся поезде, то, чтобы убедиться, что мы движемся, нужно выглядеть в окно и посмотреть на какой-то другой объект, скажем, телеграфный столб. И даже тогда мы не можем сказать достоверно, проходит поезд мимо столба или столб мимо поезда. Лучшее, что мы можем сделать, это сказать, что поезд и земля находятся в состоянии относительного равномерного движения.

Отметим постоянное повторение в последнем абзаце слова «равномерное». Равномерное движение — это движение по прямой линии с постоянной скоростью. Неравномерное, или ускоренное, движение — это движение, которое убывает или замедляется (когда оно замедляется, говорят, что ускорение отрицательно), или движение по пути, не являющемуся прямой линией. Об ускоренном движении специальная теория относительности не может сказать ничего нового.

Относительность равномерного движения кажется достаточно безобидной, но в действительности она немедленно погружает нас в странный новый мир, который поначалу более всего напоминает бессмыслен-

ный мир за зеркалом Льюиса Кэрролла. Ибо если не существует способа измерить равномерное движение относительно универсальной неподвижной системы отсчета, подобной эфиру, то тогда свет должен вести себя совершенно фантастическим образом, противоречащим всякому опыту.

Рассмотрим космонавта в космическом корабле, который летит вдоль светового луча. Корабль движется со скоростью, равной половине скорости света. Если космонавт произведет соответствующие измерения, он обнаружит, что луч все равно проходит мимо него со своей обычной скоростью 300 000 км/сек. Подумайте об этом немного и вы вскоре поймете, что так и должно быть, если понятие эфирного ветра отброшено. Если бы космонавт нашел, что свет движется по отношению к нему медленнее, он обнаружил бы тот самый эфирный ветер, который не удалось обнаружить Майкельсону и Морли. Теперь, если бы его космический корабль летел прямо по направлению к источнику света со скоростью, равной половине скорости света, нашел ли бы он, что луч приближается к нему в полтора раза быстрее? Нет, луч все равно двигался бы навстречу ему со скоростью 300 000 км/сек. Как бы он ни двигался относи-





тельно луча, его измерения всегда будут давать для скорости луча одну и ту же величину.

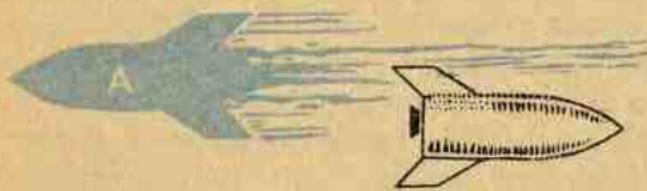
Часто можно слышать, что теория относительности делает все в физике относительным, что она разрушает все абсолюты. Ничто не может быть дальше от истины. Она делает относительными некоторые понятия, которые раньше считались абсолютными, но при этом вводит новые абсолюты. В классической физике скорость света была относительной в том смысле, что она должна была меняться в зависимости от движения наблюдателя. В специальной теории относительности скорость света становится в этом смысле новым абсолютом. Неважно, как движется источник света или наблюдатель, скорость света по отношению к наблюдателю никогда не меняется.

Представим себе два космических корабля А и Б. Пусть в космосе нет ничего, кроме этих двух кораб-

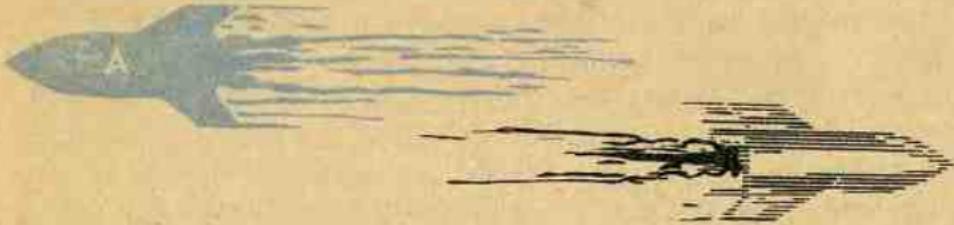
лей. Они движутся навстречу друг другу с постоянной скоростью. Имеется ли какой-нибудь способ, чтобы астронавты на любом из кораблей могли решить, какой из следующих трех случаев является «истинным» или «абсолютным»?



1. Корабль А находится в состоянии покоя, корабль Б движется.



2. Корабль Б находится в состоянии покоя, корабль А движется.



3. Оба корабля движутся.

Эйнштейн дает следующий ответ. Нет, не имеется такого способа. Космонавт на любом из кораблей может, если он хочет, выбрать корабль А в качестве неподвижной системы отсчета. Нет никаких экспериментов, включая опыты со светом или любыми другими электрическими или магнитными явлениями, которые доказали бы, что этот выбор неправилен. То же самое справедливо, если он выберет корабль Б.

в качестве неподвижной системы отсчета. Если он предпочитает рассматривать оба корабля движущимися, он просто выберет неподвижную систему отсчета вне этих кораблей, точку, относительно которой оба корабля находятся в движении. Не стоит задаваться вопросом, какой из этих выборов «правилен» и какой нет. Говорить об абсолютном движении любого из кораблей — это значит говорить о чем-то не имеющем смысла. Реально только одно: относительное движение, в результате которого корабли сближаются с постоянной скоростью.

В книге такого рода невозможно углубляться в технические детали специальной теории и особенно в детали, связанные с ее математическим аппаратом. Мы должны удовлетвориться упоминанием некоторых из наиболее удивительных следствий, которые логически вытекают из того, что Эйнштейн называет двумя «основными постулатами» своей теории:

1. Не существует способа, чтобы установить, находится ли тело в состоянии покоя или равномерного движения относительно неподвижного эфира.

2. Независимо от движения своего источника свет всегда движется через пустое пространство с одной и той же постоянной скоростью.

(Второй постулат не следует смешивать, как это часто делают, с постоянством скорости света по отношению к равномерно движущемуся наблюдателю. Это положение следует из постулатов.)

Другие физики, конечно, рассматривали оба постулата. Лоренц попытался примирить их в своей теории, в которой абсолютные длины и времена изменились в результате давления эфирного ветра. Большинство физиков посчитали это слишком радикальным нарушением здравого смысла. Они предпочитали считать, что постулаты несовместимы и по крайней мере один из них должен быть несправедливым. Эйнштейн рассмотрел эту проблему более глубоко. Постулаты несовместимы только в том случае, сказал он, если мы отказываемся отбросить классическую точку зрения, что длина и время абсолютны.

Когда Эйнштейн опубликовал свою теорию, он не знал, что Лоренц думал в том же направлении, но, подобно Лоренцу, он понял, что измерения длины и времени должны зависеть от относительного движения объекта и наблюдателя. Однако Лоренц прошел только половину пути. Он сохранил понятие абсолютной длины и времени для покоящихся тел. Он считал, что эфирный ветер искажает «истинную» длину и время. Эйнштейн прошел этот путь до конца. Эфирного ветра не существует, сказал он. Нет смысла в понятиях абсолютной длины и времени. Это ключ к специальной теории Эйнштейна. Когда он его повернул, всевозможные замки начали медленно открываться.

Чтобы наглядно объяснить специальную теорию, Эйнштейн предложил свой знаменитый мысленный эксперимент. Представим себе, сказал он, наблюдателя M , который стоит около железнодорожного полотна. На некотором расстоянии по направлению движения имеется точка B . На таком же расстоянии против направления движения имеется точка A . Пусть оказалось, что одновременно в точках A и B вспыхивает молния. Наблюдатель считает, что эти события одновременны, так как он видит обе вспышки в одно и то же мгновение. Поскольку он находится посередине между ними и поскольку свет распространяется с постоянной скоростью, то он заключает, что молния ударила одновременно в этих двух точках.

Теперь предположим, что, когда ударяет молния, вдоль полотна в направлении от A к B с большой скоростью движется поезд. В тот момент, когда происходят обе вспышки, наблюдатель внутри поезда — назовем его M' — находится как раз напротив наблюдателя M , стоящего около полотна. Поскольку M' движется в направлении к одной вспышке и удаляется от другой, он увидит вспышку в B раньше, чем в A . Зная, что он находится в движении, он примет в расчет конечность скорости света и также сделает вывод, что вспышки произошли одновременно.

Все очень хорошо. Но согласно двум основным постулатам специальной теории (подтвержденным

опытом Майкельсона — Морли) мы можем с таким же правом предположить, что поезд покоится, тогда как Земля быстро бежит назад под его колесами. С этой точки зрения М, наблюдатель в поезде, придет к заключению, что вспышка в Б действительно произошла раньше, чем в А, — в той последовательности, в какой он их наблюдал. Он знает, что находится посередине между этими вспышками и, поскольку считает себя покоящимся, вынужден заключить, что вспышка, которую он видел первой, произошла раньше, чем та, которую он видел второй.



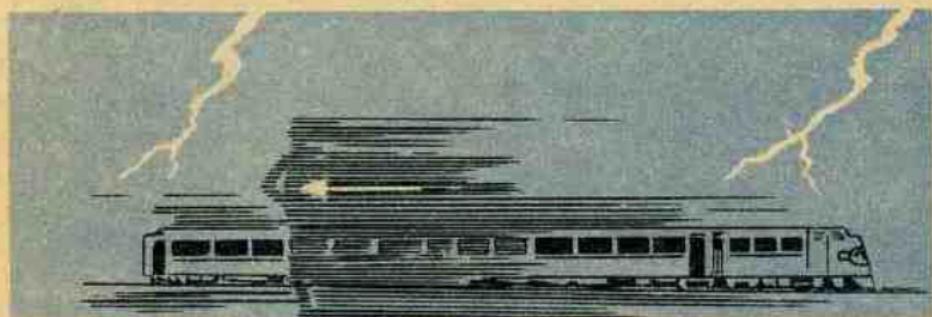
М, наблюдатель на Земле, вынужден согласиться. Правда, он видит вспышки как одновременные, но теперь он предполагается движущимся. Когда он примет в расчет скорость света и тот факт, что он движется навстречу вспышке в А и от вспышки в Б, он сделает вывод, что вспышка в Б должна была произойти раньше.

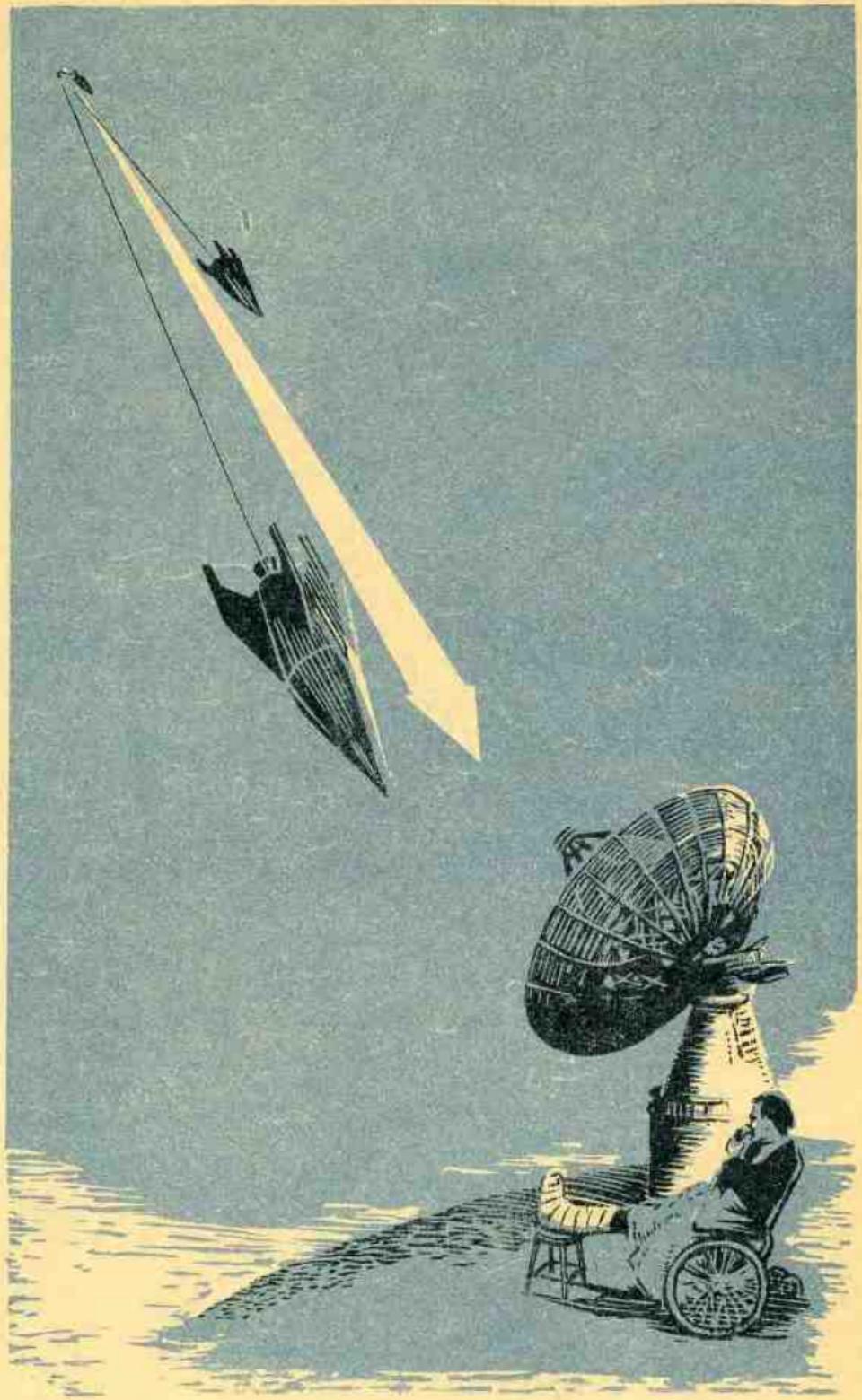
Следовательно, мы вынуждены заключить, что на вопрос, были ли вспышки одновременными, нельзя ответить каким-то абсолютным образом. Ответ зависит от выбора системы отсчета. Конечно, если два события происходят одновременно в одной и той же точке, то можно абсолютно уверенно сказать, что они одновременны. Когда два самолета сталкиваются в воздухе, нет такой системы отсчета, в которой эти са-



молеты развалились бы неодновременно. Но чем больше расстояние между событиями, тем труднее решить вопрос об их одновременности. Дело не в том, что мы просто не способны узнать истинное положение дела. Не существует реального истинного положения дела. Нет абсолютного времени для Вселенной, которым можно было бы измерить абсолютную одновременность. Абсолютная одновременность событий, происходящих в разных точках пространства, является лишенным смысла понятием.

Всю радикальность такого представления можно понять из мысленного эксперимента, в котором рассматриваются большие расстояния и огромные скорости. Предположим, что некто на планете X, в другой части нашей Галактики, пытается связаться с Землей. Он посыпает радиосигнал. Этот сигнал, разумеется, представляет собой электромагнитную волну,





которая распространяется в пространстве со скоростью света. Предположим, что Земля и планета X разделены расстоянием в 10 световых лет. Это означает, что требуется 10 лет для того, чтобы сигнал достиг Земли. За двенадцать лет до того, как радиоастроном на Земле получает сигнал, этого астронома награждают Нобелевской премией. Специальная теория позволяет нам сказать, без всяких оговорок, что он получил эту премию раньше, чем был послан сигнал с планеты X.

Через десять минут после получения сигнала этот астроном чихает. Специальная теория относительности позволяет нам сказать, также без всяких ограничений, что астроном чихнул после того, как был послан сигнал с планеты X.

Предположим теперь, что в какой-то момент времени в течение тех 10 лет, когда радиосигнал находился на пути к Земле (скажем, за 3 года до того, как сигнал был получен), астроном упал со своего радиотелескопа и сломал ногу. Специальная теория не позволяет нам сказать без ограничений, что он сломал ногу раньше или позже, чем был послан сигнал с планеты X.

Доказательство состоит в следующем. Наблюдатель, покидающий планету X в тот момент, когда посыпается сигнал, и движущийся к Земле с малой скоростью, если ее измерять по отношению к Земле, найдет (согласно своим измерениям времени), что астроном сломал ногу после того, как был послан сигнал. Конечно, он прибудет на Землю через много времени после получения сигнала, возможно, через столетия. Но когда он вычислит дату посылки сигнала согласно своим часам, она будет более ранней, чем дата, когда астроном сломал ногу. Другой наблюдатель, который также покидает планету X в тот момент, когда посыпается сигнал, но летит со скоростью, близкой к скорости света, найдет, что астроном сломал ногу до того, как был послан сигнал. Вместо того чтобы затратить столетия на свое путешествие, он сделает его, скажем, немного больше, чем за 10 лет, если измерять время на Земле. Но

вследствие замедления времени в быстро движущемся космическом корабле космонавту в этом корабле будет казаться, что он проделал свое путешествие всего лишь за несколько месяцев. На Земле ему скажут, что астроном сломал ногу немногим более 3 лет назад. Согласно часам космонавта сигнал был послан несколько месяцев назад. Он сделает вывод, что нога была сломана за несколько лет до того, как сигнал ушел с планеты X.

Если бы космонавт летел так же быстро, как свет (разумеется, это только допущение, в действительности невозможное), его часы совсем бы остановились. Ему бы казалось, что перелет произошел мгновенно. С его точки зрения, оба события, посылка сигнала и его получение, были бы одновременными. Все события, произошедшие на Земле в течение 10 лет, оказались бы ему случившимися ранее, чем был послан сигнал. Но согласно специальной теории не существует «выделенной» системы отсчета: нет никаких оснований предпочесть точку зрения одного наблюдателя, а не другого. Вычисления, проведенные быстро летевшим космонавтом, столь же законны, столь же «истинны», как и вычисления, проведенные медленно летевшим космонавтом. Нет универсального, абсолютного времени, к которому можно было бы обратиться, чтобы установить различие между ними.

Это разрушение классического понятия абсолютной одновременности является, без сомнения, самым «прекрасным неожиданным» аспектом специальной теории. Ньютон считал само собой разумеющимся, что одно универсальное время течет во всем космосе. Так же считали Лоренц и Пуанкаре. Именно это помешало им открыть специальную теорию раньше Эйнштейна. Гениальность Эйнштейна позволила ему понять, что теория не может быть сформулирована исчерпывающим, логически последовательным образом без полного отказа от понятия универсального космического времени.

Имеются, говорил Эйнштейн, только местные времена. На Земле, например, каждый летит в пространстве с одной и той же скоростью: следовательно,

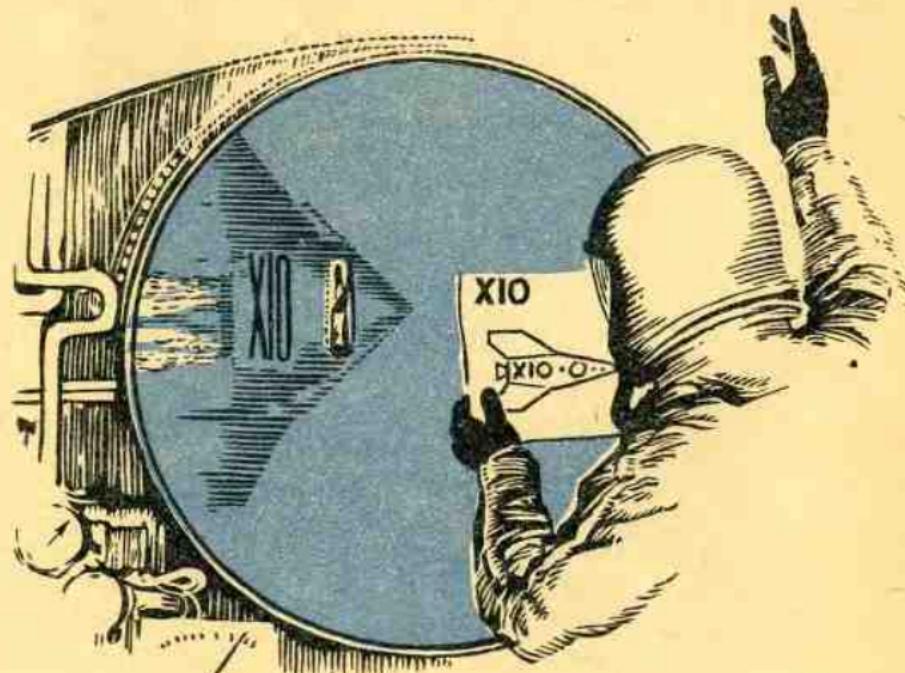
все часы показывают одно и то же «земное время». Местное время такого типа для движущихся объектов, подобных Земле, называется «собственным временем» данного объекта. Все еще имеются абсолютные «до» и «после» (очевидно, ни один космонавт не может умереть до своего рождения), но, когда события разделены большими расстояниями, имеются продолжительные временные интервалы, в пределах которых невозможно сказать, какое из двух событий произошло раньше или позже другого. Ответ зависит от движения наблюдателя по отношению к этим двум событиям. Разумеется, решение, полученное одним наблюдателем, столь же «истинно», как и другое решение, полученное другим наблюдателем. Все это с железной логикой следует из двух основных постулатов специальной теории.

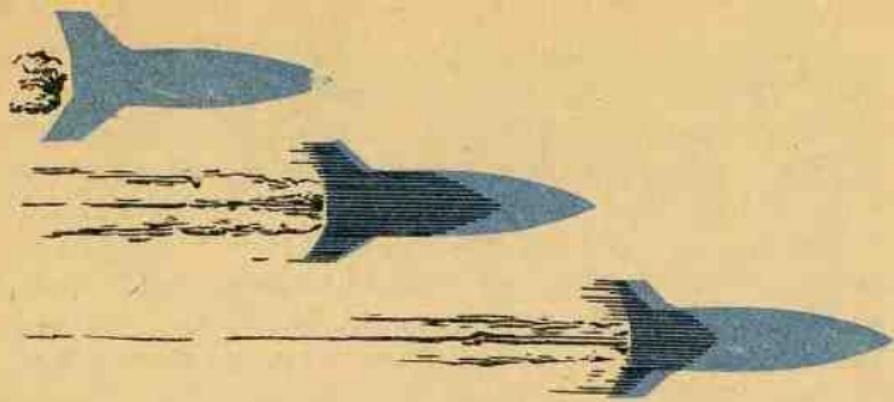
Когда понятие одновременности потеряло смысл, потеряли смысл и другие понятия. Относительным стало время, поскольку наблюдатели расходятся в оценках времени, прошедшего между двумя одними и теми же событиями. Длина также стала относительной. Длина движущегося поезда не может быть измерена, если не известно точно, где находятся его передний и задний края в один и тот же момент времени. Если некто доложит, что в 1 час 00 мин передний край поезда находился точно против него, а задний край был в 1 км от него в какой-то момент между 12 час 59 мин и 1 час 01 мин, то, очевидно, не имеется способа определить истинную длину этого поезда. Иными словами, способ установления точной одновременности существен для точных измерений расстояний и длин движущихся объектов. При отсутствии такого способа длины движущихся объектов становятся зависящими от выбора системы отсчета.

Например, если два космических корабля находятся в состоянии относительного движения, то наблюдатель на каждом из кораблей будет видеть другой корабль сократившимся в направлении своего движения. При обычных скоростях это сокращение чрезвычайно мало. Земля, которая движется вокруг

Солнца со скоростью 30 км/сек, показалась бы наблюдателю, покоящемуся относительно Солнца, сократившееся всего лишь на несколько сантиметров. Однако, когда относительные скорости очень велики, изменения становятся значительными. К счастью, оказалось, что та же самая формула для сокращения, которая была получена Фитцджеральдом и Лоренцем для объяснения опыта Майкельсона — Морли, может быть применена здесь. В теории относительности сокращение по-прежнему называется Лоренц — Фитцджеральдовым, но было бы более понятным, если бы оно носило другое имя, поскольку Эйнштейн дал этой формуле совершенно другую интерпретацию.

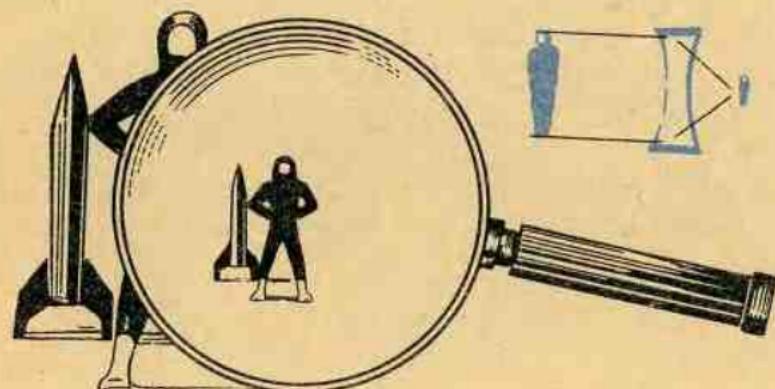
Для Лоренца и Фитцджеральда сокращение было физическим изменением, обусловленным давлением эфирного ветра. Для Эйнштейна оно было связано только с результатами измерений. Пусть космонавт на одном космическом корабле измеряет длину другого корабля. Наблюдатели на каждом из кораблей не обнаружат никаких изменений длины своего собственного корабля или длин предметов внутри него. Однако, когда они измерят другой корабль, они найдут, что он короче. Фитцджеральд все еще счи-





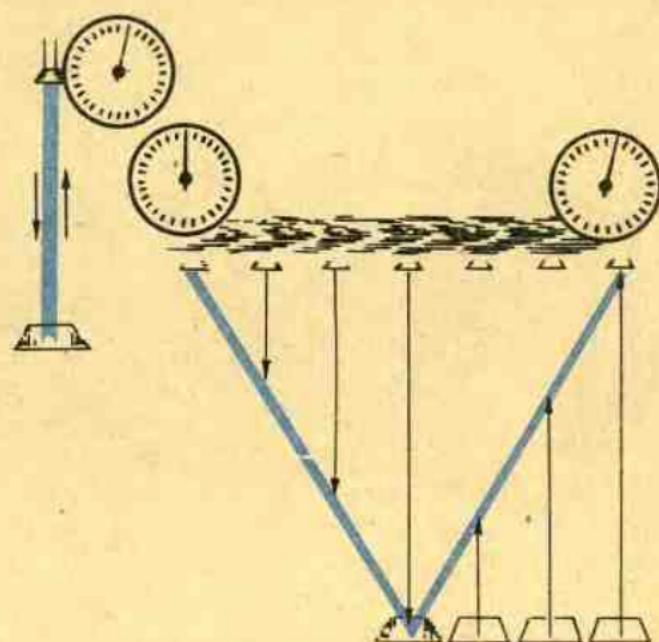
тал, что движущиеся тела имеют абсолютные «длины покоя». Когда тела сокращаются, они не имеют больше своих «истинных» длин. Эйнштейн, отказавшись от эфира, сделал понятие абсолютной длины лишенным смысла. Осталась только длина, полученная в результате измерения, и оказалось, что она меняется в зависимости от относительной скорости объекта и наблюдателя.

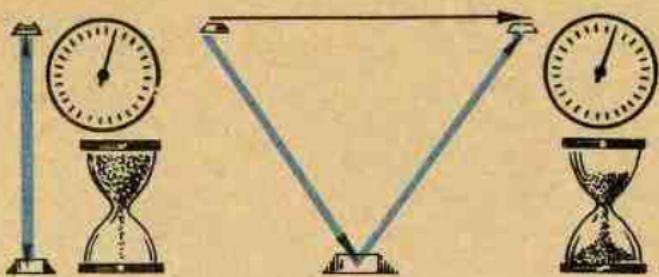
Вы спросите, как это возможно, чтобы каждый корабль был короче другого? Вы задаете неправильный вопрос. Теория не говорит, что каждый корабль короче другого. Она говорит, что космонавт на каждом из кораблей при измерении найдет, что другой корабль короче. Это совсем разные вещи. Если два человека станут по разные стороны огромной двояковогнутой линзы, то каждый из них увидит другого меньше себя; но это не то же самое, что сказать, будто каждый из них меньше другого.



Помимо кажущихся изменений длины имеются также кажущиеся изменения времени. Космонавты на каждом из кораблей найдут, что часы на другом корабле идут медленнее. Простой мысленный эксперимент показывает, что это действительно так. Представьте себе, что вы смотрите через бортовое отверстие одного корабля в отверстие другого корабля. Оба корабля пролетают один мимо другого с постоянной скоростью, близкой к скорости света. В момент, когда они проходят рядом, на том корабле посыпают луч света от потолка к полу. Там он падает на зеркало и отражается обратно к потолку. Вы же увидите путь этого луча в виде буквы V. Если бы у вас были достаточно точные приборы (конечно, такие приборы сейчас не существуют), вы могли бы засечь время, которое требуется лучу, чтобы пройти этот V-образный путь. Разделив длину на время, вы получили бы скорость света.

Теперь предположим, что, когда вы засекаете время прохождения лучом его V-образного пути, космонавт внутри другого корабля делает то же самое. С его точки зрения, его корабль является неподвижной системой отсчета и свет просто идет вниз и вверх вдоль одной и той же прямой, проходя, очевидно, более короткое расстояние, чем вдоль V-образного пути, который наблюдаете вы. Когда он разделит это расстояние на время, которое требуется лучу, чтобы пройти вниз и вверх, он тоже получит скорость света. Так как скорость света постоян-

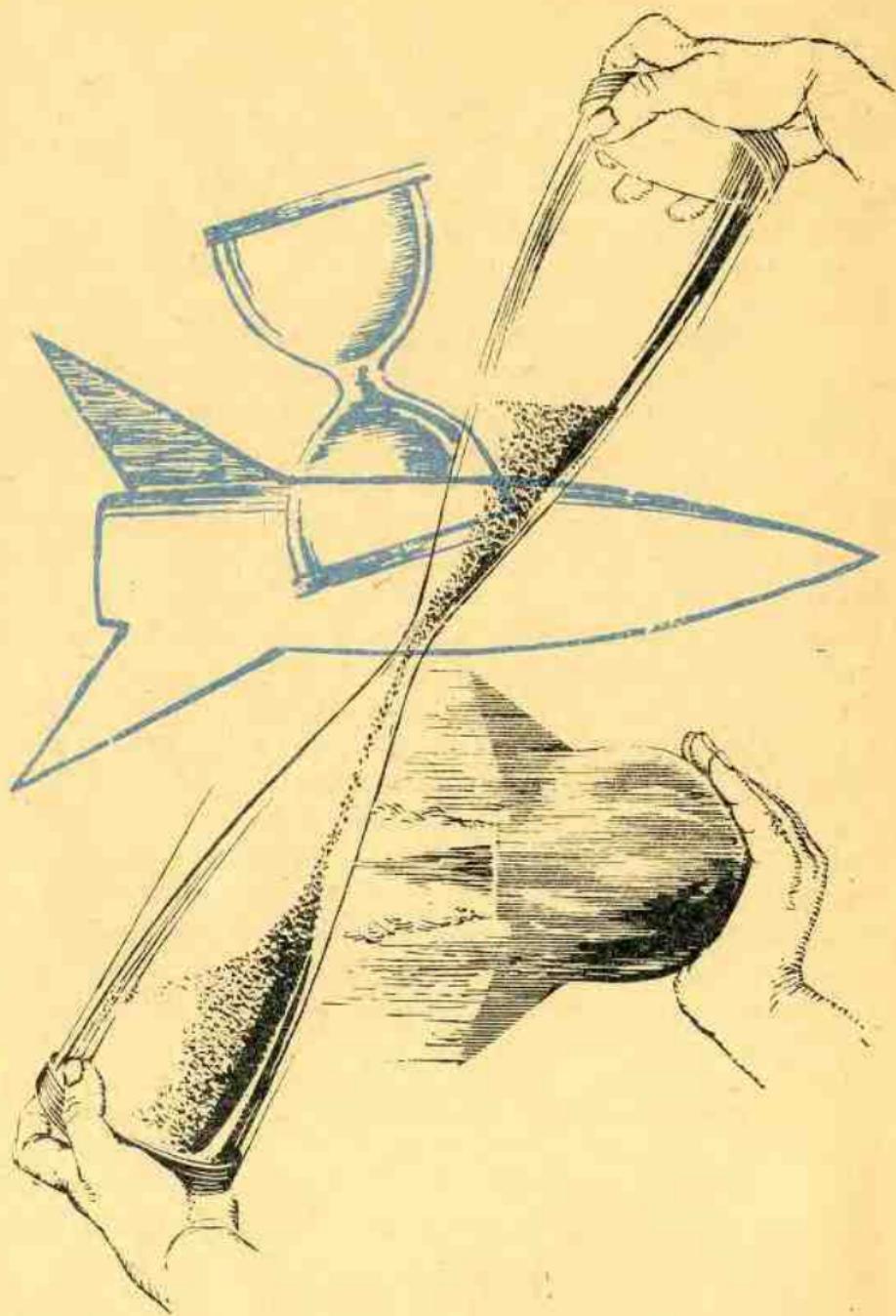




на для всех наблюдателей, он должен получить в точности тот же самый результат, что получили вы: 300 000 км/сек. Но у него путь, пройденный светом, короче. Как может его результат быть тем же самым? Имеется только одно объяснение: его часы идут медленнее. Разумеется, эта ситуация совершенно симметрична. Если вы пошлете луч вниз и вверх внутри вашего корабля, то космонавт будет видеть его путь V-образным. Он придет к заключению, что ваши часы отстают.

Тот факт, что эти, сбивающие с толку, изменения длины и времени названы «кажущимися», не означает, что имеется «истинная» длина или время, которые разным наблюдателям просто «кажутся» разными. Длина и время являются относительными понятиями. Они не имеют смысла вне связи объекта с наблюдателем. Вопрос не стоит так, что одна система измерений «истинна», а другая система «ложна». Каждая система истинна относительно наблюдателя, производящего измерения: относительно его собственной системы отсчета. Нельзя считать одно измерение более правильным, чем другое. При этом все это отнюдь не оптические иллюзии, которые должны быть объяснены психологом. Измерения могут быть записаны приборами. Они не требуют присутствия живого наблюдателя.

Масса также является относительным понятием, но мы должны отложить этот и другие вопросы до следующей главы.



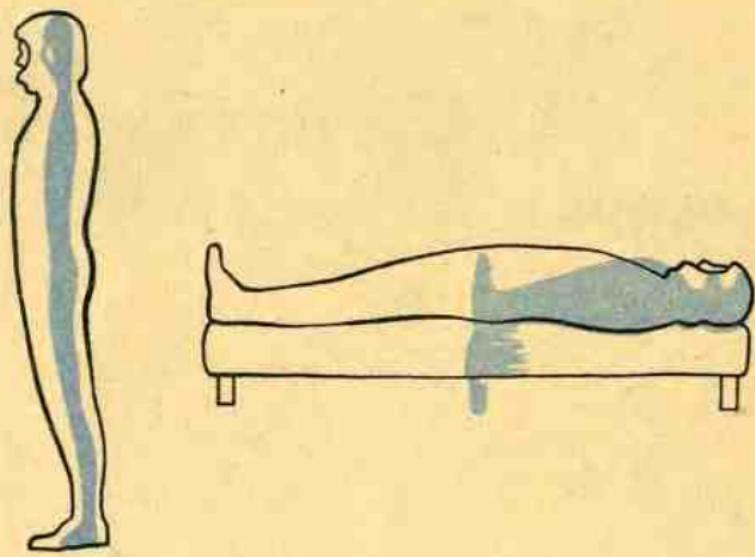
4

Специальная теория относительности

Часть II

Длина и время, как было показано в предыдущей главе, являются относительными понятиями. Если один космический корабль пролетает мимо другого с постоянной скоростью, то наблюдатели на каждом из кораблей найдут, что космонавты на другом корабле похудели и передвигаются медленнее. Если их относительная скорость достаточно велика, то движения их коллег будут напоминать движения актеров в замедленной кинокартине. Все явления с периодическим движением будут казаться замедленными: движение маятника и балансира в часах, пульсация сердца, колебание атомов и т. д. По словам Артура Стэнли Эддингтона, выдающегося английского астронома, который стал одним из самых первых и наиболее ревностных последователей

лей Эйнштейна, будет казаться, что даже сигары на другом корабле тлеют дольше. Космонавт ростом в два метра, стоящий в горизонтально движущемся корабле, по-прежнему будет выглядеть двухметровым, но его тело будет казаться тоньше в направлении движения. Когда же он ляжет, вытянувшись в направлении движения корабля, восстановится нормальная ширина его тела, но теперь будет казаться,



что его рост уменьшился в направлении от головы до пят.

Если бы два космических корабля действительно смогли двигаться один относительно другого со скоростью, достаточно большой, чтобы сделать подобные изменения существенными, то всевозможные трудности технического характера не позволили бы наблюдателям на каждом корабле увидеть эти изменения. Писатели любят пояснить теорию относительности упрощенными эффектными примерами. Эти цветистые иллюстрации не описывают изменений, которые действительно можно было бы наблюдать либо человеческим глазом, либо с помощью любых приборов, известных в настоящее время. О существовании этих изменений космонав-

ты смогли бы в принципе узнать на основе измерений, если бы были достаточно хорошие измерительные приборы.

В дополнение к изменениям длины и времени имеется также релятивистское изменение массы. Масса, грубо говоря, — это мера количества вещества в теле.

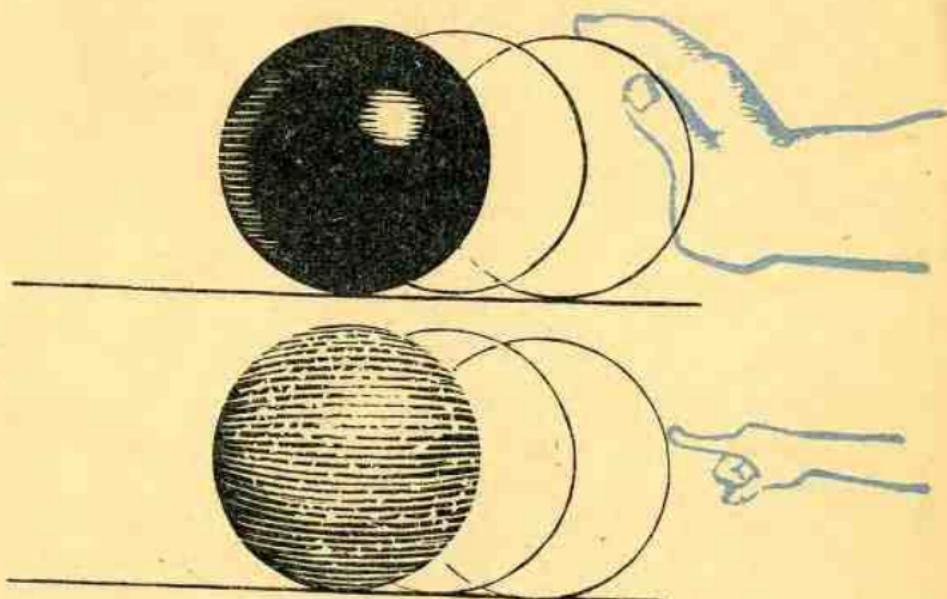
Свинцовый и пробковый шары могут иметь одинаковые размеры, но свинцовый шар более массивен. Концентрация вещества в нем выше.

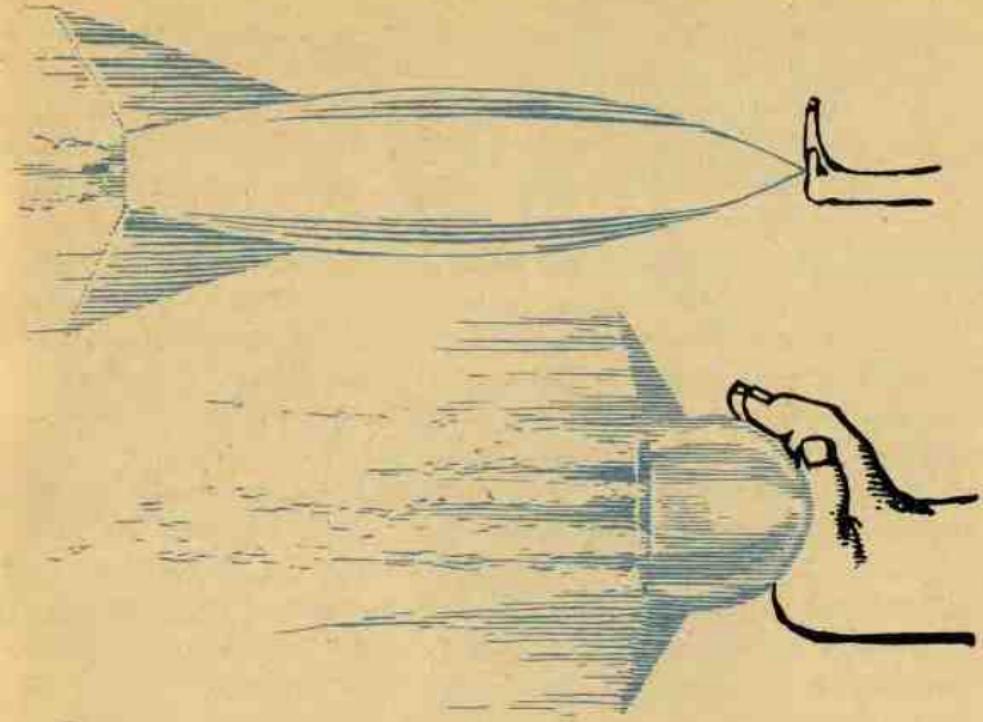
Существует два способа измерения массы тела: либо взвешиванием, либо по тому, насколько велика сила, необходимая, чтобы сообщить этому телу определенное ускорение. Первый метод не очень хорош, поскольку получаемые результаты зависят от силы тяжести в данном месте. Свинцовый шар, поднятый на вершину высокой горы, будет весить несколько меньше, чем у ее подножия, хотя его масса останется в точности той же самой. На Луне его вес был бы значительно меньше, чем на Земле. На Юпитере же его вес оказался бы значительно больше.

Второй метод измерения массы дает одинаковые результаты независимо от того, проводились они на Земле, на Луне или на Юпитере; однако при использовании этого метода сразу же возникают курьезные вопросы. Чтобы определить этим методом массу движущегося тела, нужно измерить силу, которая необходима для сообщения ему определенного ускорения. Ясно, что для того, чтобы заставить катиться пушечное ядро, необходим более сильный толчок, чем для пробкового шара. Масса, измеренная таким методом, называется *инертной массой* в отличие от *гравитационной массы* или веса. Подобные измерения не могут быть выполнены без измерений времени и расстояний. Инертная масса пушечного ядра, например, выражается через величину силы, необходимой для увеличения его скорости (расстояние в единицу времени) на столько-то в единицу времени. Как мы видели ранее, измерения времени и расстояний меняются с изменением относительной скорости тела и наблюдателя. Как след-

ствие этого меняются также результаты измерений инертной массы.

В гл. 6 мы вернемся к понятию гравитационной массы и ее связи с инертной массой. Здесь же пойдет речь только об инертной массе, полученной в результате измерений, выполняемых каким-либо наблюдателем. Для наблюдателей, покоящихся относительно предмета, например для космонавтов, везущих в космическом корабле слона, инертная масса предмета остается одной и той же независимо от скорости корабля. Масса слона, измеряемая подобными наблюдателями, называется его собственной массой или массой покоя. Инертная масса того же самого слона, измеренная каким-либо наблюдателем, движущимся относительно этого слона (например, наблюдателем на Земле), называется релятивистской массой слона. Масса покоя тела никогда не меняется, а релятивистская масса изменяется. Оба измерения являются измерениями инертной массы. В этой главе будет идти речь только об инертной массе; когда употребляется слово «масса», его следует понимать именно в этом смысле.





Все три переменные — длина, время, масса — охватываются одним и тем же выражением для лоренцевского сокращения $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Длина и скорость хода часов меняются по одному и тому же закону, так что формула для этих величин одна и та же. В то же время масса и длина временных интервалов меняются по обратным законам, а это означает, что формулу здесь следует написать так:

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

Масса любого тела, измеренная наблюдателем, движущимся равномерно относительно этого тела, получается умножением массы покоя тела на приведенное выше выражение (где v — относительная скорость объекта; c — скорость света).

Например, если относительная скорость двух космических кораблей составляет 260 000 км/сек,

наблюдатели на каждом из кораблей будут считать, что другой корабль вполовину короче, часы на нем идут в два раза медленнее, продолжительность часа в два раза длиннее и масса корабля в два раза больше. Конечно, эти космонавты на своем собственном корабле найдут все совершенно нормальным. Если бы эти корабли смогли достичь относительной скорости, равной скорости света, наблюдатели на каждом из кораблей считали бы, что другой корабль сократил свою длину до нуля, приобрел бесконечную массу и что время на другом корабле замедлилось до полной остановки!

Если бы инертная масса не менялась указанным выше образом, то непрерывное действие силы, такой, например, как сила, развивающаяся ракетными двигателями, могло бы поддерживать возрастание скорости корабля до тех пор, пока эта скорость не превысила бы скорости света. Но этого не произойдет, поскольку по мере того, как корабль движется все быстрее и быстрее (с точки зрения, скажем, наблюдателя на Земле), его релятивистская масса все время возрастает в той же пропорции, в которой уменьшается его длина и замедляется время. Когда корабль сократится до одной десятой своей первоначальной длины, его релятивистская масса увеличится в десять раз. Он окажет в десять раз большее сопротивление своим ракетным двигателям; следовательно, потребуется в десять раз большая сила, чем в случае покоящегося корабля, чтобы обеспечить одно и то же увеличение скорости. Скорость света никогда не может быть достигнута. Если бы она была достигнута, внешний наблюдатель нашел бы, что корабль сократил свою длину до нуля, приобрел бесконечную массу, а его ракетные двигатели действуют с бесконечно большой силой. Космонавты внутри корабля не обнаружили бы у себя никаких изменений, но они видели бы все в космосе проносящимся назад со скоростью света, космическое время — остановившимся, каждую звезду — сплющенной до диска и бесконечно массивной.



Только у авторов научно-фантастических произведений хватает отваги размышлять на тему о том, что смогут увидеть космонавты, если удастся каким-либо образом пробить световой барьер. Возможно, космос показался бы вывернутым наизнанку и превратившимся в свое собственное зеркальное изображение, звезды приобрели бы отрицательную массу, а космическое время пошло бы назад. Спешу добавить, что ни одно из этих явлений не следует из формул специальной теории относительности. Если скорость света превышена, эти формулы дают такие значения длины, времени и массы, которые являются, как говорят математики, «мнимыми числами»: числами, которые содержат квадратный корень из минус единицы. Кто знает? Может быть, корабль, преодолевший световой барьер, влетел бы прямо в Страну волшебника Гудвина!

Выучив, что ничто не может обогнать свет, студенты, начинающие изучение теории относительности, часто оказывались сбитыми с толку, встретив упоминание о скоростях, больших скорости света. Чтобы ясно понять, что должна дать теория относительности в этом случае, лучше всего будет ввести термин «инерциальная система отсчета». (Более ранние авторы трудов по теории относительности называли ее «инерциальной системой», или «галилеевой системой».) Когда какое-либо тело вроде космического корабля движется равномерно, то говорят, что это тело и все прочие объекты, движущиеся вместе с ним в том же направлении и с той же скоростью (как, например, все объекты внутри корабля), связаны с одной и той же инерциальной системой отсчета. (Инерциальная система отсчета есть декартова система координат, с которой связан этот космический корабль.) Вне связи с определенной инерциальной системой отсчета специальная теория относительности более не применима, и существует много возможностей наблюдать скорости, превышающие скорость света.

Рассмотрим, например, такой простой случай. Космический корабль, движущийся со скоростью в три четверти скорости света, пролетает над вами, двигаясь точно на восток. В тот же момент другой космический корабль, двигающийся с такой же скоростью, пролетает над вами, направляясь прямо на запад. В вашей системе отсчета, связанной с инерциальной системой отсчета Земли, эти два корабля пролетают один мимо другого с относительной скоростью, равной полутора скоростям света. Они сближаются с этой скоростью и разлетаются с этой скоростью. Ничто в теории относительности не запрещает этого. Однако специальная теория относительности настаивает на том, что если вы летите в одном из кораблей, то, вычислив относительную скорость этих кораблей, вы должны получить значение меньше скорости света.

Мы приложили все усилия, чтобы избежать применения математического аппарата теории относи-

тельности в этой книге, но, подобно формуле лоренцевского сокращения, даваемая ниже формула слишком проста, чтобы ее не привести. Если x — скорость одного корабля относительно Земли, а y — скорость другого корабля относительно Земли, то скорость этих кораблей друг относительно друга, как она представляется с Земли, будет, конечно, равна x плюс y . Но, оказавшись на месте наблюдателя на любом из этих кораблей, мы должны складывать скорости по следующей формуле:

$$\frac{x+y}{1 + \frac{xy}{c^2}},$$

В этой формуле c — скорость света. Легко видеть, что, когда скорости кораблей малы сравнительно со скоростью света, эта формула дает результат, почти совпадающий с тем, что получается при сложении двух скоростей обычным способом. Но если скорости кораблей очень велики, эта формула дает совершенно отличный результат. Возьмем предельный случай и предположим, что вместо космических кораблей имеются два луча света, проходящих над нами в противоположных направлениях. Земной наблюдатель увидит их разлетающимися со скоростью $2c$, т. е. с удвоенной скоростью света. Но если бы он двигался вместе с одним из этих лучей, то, вычислив относительную скорость в соответствии с приведенной выше формулой, он получил бы

$$\frac{c+c}{1 + \frac{c^2}{c^2}},$$

что, конечно, приводит к значению, равному c . Иными словами, он увидел бы другой луч двигающимся от него со скоростью света.

Предположим, что луч света проходит у нас над головой в тот же момент, что и космический корабль, двигающийся в противоположном направлении со скоростью x . В инерциальной системе отсчета

Земли корабль и свет проходят друг мимо друга со скоростью с плюс x . Читатель может доставить себе удовольствие, вычислив значение скорости света, которое получится, если измерять ее в инерциальной системе отсчета, связанной с космическим кораблем. Конечно, в результате должно опять получиться c .

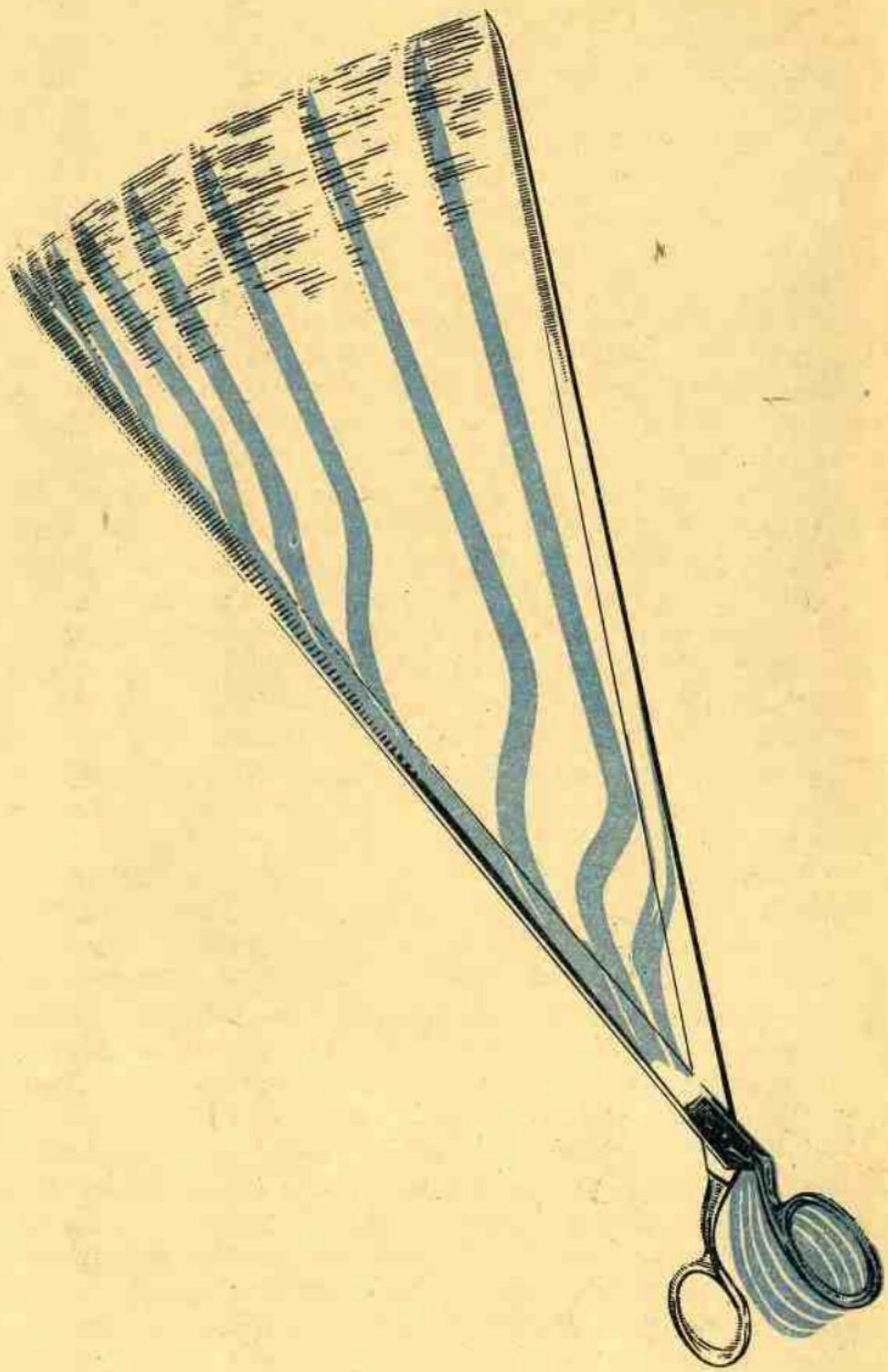
Вне сферы действия специальной теории относительности, имеющей дело только с инерциальными системами, все же можно говорить о скорости света как о некоем абсолютном пределе. Однако теперь это следует выразить по-иному: нет такого способа, который позволил бы отправить сигнал от одного материального тела к другому со скоростью, превышающей световую. Понятие «сигнал» используется здесь в широком смысле этого слова. Оно включает в себя любой тип причинно-следственной связи, позволяющей переслать какое-либо сообщение: посыпка физического объекта, например, или передача любого типа энергии, такой, как энергия звуковых волн, электромагнитных волн, ударных волн в твердом теле и так далее. Нельзя отправить сообщение на Марс со скоростью, превышающей скорость света. Этого нельзя сделать, написав письмо и отправив его в ракете, поскольку, как мы видели ранее, относительная скорость ракеты всегда должна быть меньше скорости света. Если сообщение закодировать и отправить с помощью радио или радара, то оно дойдет со скоростью света. Никакой другой тип энергии не сможет обеспечить более быструю передачу этого кода.

Хотя сигналы не могут быть посланы со скоростью, превышающей скорость света, но можно наблюдать определенные типы движений, которые будут иметь по отношению к наблюдателю скорости больше световой. Представьте себе гигантские ножницы, лезвия которых таковы, что достигают планеты Нептун. Ножницы начинают закрывать с постоянной скоростью. По мере того как это происходит, точка, в которой пересекаются режущие края лезвий, будет двигаться к концам ножниц со все

возрастающей скоростью. Представьте, что вы сидите на неподвижном стержне, скрепляющем оба лезвия. По отношению к вашей инерциальной системе отсчета эта точка пересечения лезвий скоро будет удаляться от вас со скоростью, большей скорости света. Конечно, здесь происходит движение не материального тела, а геометрической точки.

Возможно, вам придет в голову такая мысль: предположим, что кольца ножниц находятся на Земле, а точка пересечения лезвий — на Нептуне. Если вы слегка закрываете ножницы, а затем открываете, повторяя это многократно, то точка пересечения будет ходить вперед — назад. Нельзя ли теперь передать сигналы на Нептун почти мгновенно? Нельзя, поскольку импульс, приводящий в движение лезвия, должен передаваться от молекулы к молекуле, а скорость этого процесса должна быть меньше световой. В общей теории относительности нет абсолютно жестких тел. Иначе вы могли бы просто взять жесткий стержень протяженностью от Земли до Нептуна и передавать сообщения мгновенно, приводя в движение один конец. Не существует способа, который позволил бы использовать гигантские ножницы или любой другой тип так называемых абсолютно твердых объектов для передачи сигнала со скоростью больше скорости света.

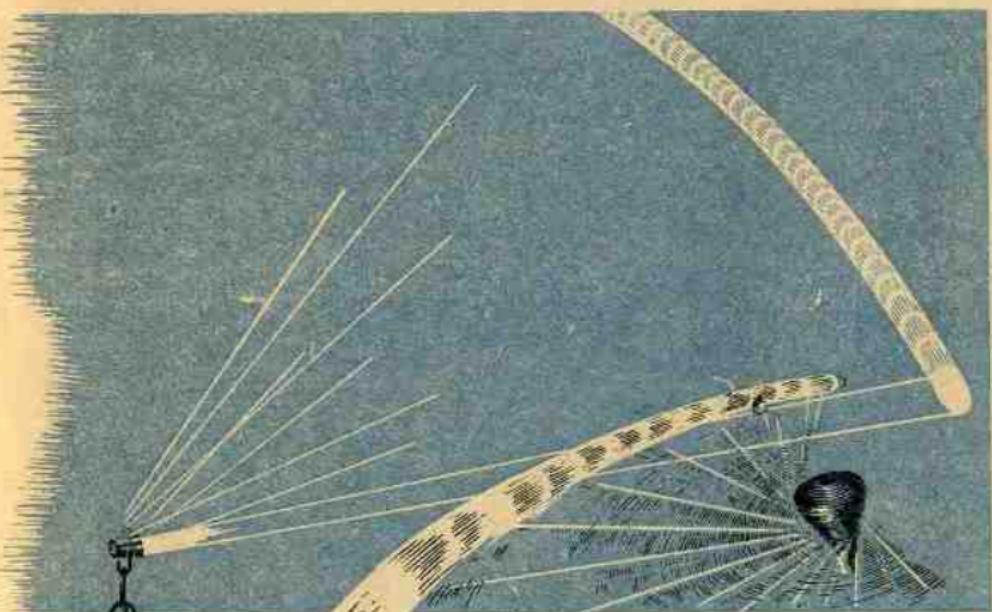
Если направить луч прожектора на экран, который достаточно велик и достаточно далеко расположен, то можно, поворачивая прожектор, сделать так, что пятно на экране будет двигаться по нему быстрее света. Здесь опять никакой материальный объект не движется, движение на самом деле является иллюзией. Если прожектор направить в пространство и начать его вращать, то удаленные части луча будут нестись в пространстве со скоростью много больше скорости света. В гл. 5 будет показано, что можно считать Землю невращающейся системой отсчета. С этой точки зрения скорости вращения звезд вокруг Земли будут много больше скорости света. Как отметил один астроном, звезда, удаленная всего лишь на 10 световых лет, имеет



круговую скорость относительно Земли, в двадцать тысяч раз превышающую скорость света. При этом геометрическом способе преодоления светового барьера даже нет необходимости следить за звездами. Вращая волчок, ребенок может сообщить Луне круговую скорость (по отношению к системе координат, связанной с волчком), которая много больше 300 000 км/сек.

В гл. 10 говорится о том, что в соответствии с одной популярной теорией о Вселенной далекие галактики могут удаляться от Земли со скоростью, превышающей скорость света. Ни один из этих примеров не противоречит утверждению, что скорость света является барьером при посылке сигналов от одного материального тела к другому.

Важным следствием специальной теории относительности, которого мы кратко коснемся, является то, что при определенных условиях энергия переходит в массу, а при некоторых других условиях масса переходит в энергию. Физики раньше считали, что полное количество массы во Вселенной никогда не изменяется и что никогда не меняется полное коли-



чество энергии. Это выражалось законами «сохранения массы» и «сохранения энергии». Теперь оба эти закона объединены в один простой закон «сохранения массы — энергии».

Когда ракетные двигатели ускоряют космический корабль, часть энергии идет на увеличение релятивистской массы корабля. Когда энергия сообщается кофейнику путем нагревания (при этом ускоряются его молекулы), содержимое кофейника действительно весит немного больше, чем прежде. Когда кофейник остывает, его масса уменьшается. Заводя часы, мы сообщаем им энергию, и они в то же время приобретают дополнительное небольшое количество массы. Когда завод кончается, часы теряют эту массу. Эти увеличения и уменьшения массы так бесконечно малы, что они никогда не учитываются в обычных физических расчетах. Однако это превращение массы в энергию совсем не ничтожно, когда взрывается водородная бомба!

Взрыв бомбы — это мгновенное превращение в энергию части массы материала бомбы. Энергия, излучаемая Солнцем, имеет подобное происхождение. Вследствие огромной силы тяжести на Солнце газообразный водород внутри него находится под столь большим давлением и нагревается до столь высокой температуры, что атомы водорода сливаются, превращаясь в гелий. В этом процессе некоторое количество массы превращается в энергию. Формула, выражающая соотношение между массой и энергией, как это известно теперь каждому, такова:

$$e = mc^2,$$

где e — энергия; m — масса; c^2 — квадрат скорости света. Эйнштейн получил это выражение из своей специальной теории относительности. Из этой формулы видно, что чрезвычайно малое количество массы способно освободить чудовищное количество энергии. Жизнь на Земле не существовала бы без солнечной энергии, так что в известном смысле жизнь зависит от этой формулы. Может оказаться,



что конец жизни на Земле также будет связан с этой формулой. Не будет преувеличением сказать, что научитьсяправляться с ужасным фактом, выражаемым этой простой формулой, — самая важная проблема из тех, которые когда-либо стояли перед человечеством.

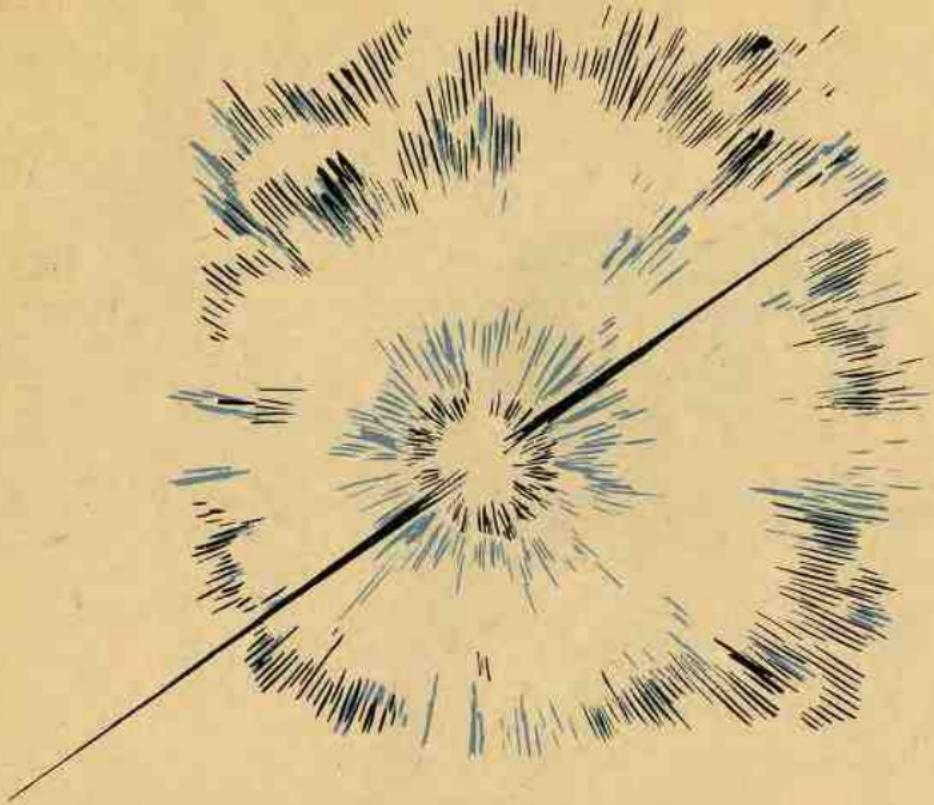
Однако бомба — это только один наиболее впечатляющий факт из многих фактов, подтверждаю-

щих специальную теорию относительности. Экспериментальные доказательства начали накапливаться, едва только высохли чернила на статье Эйнштейна, написанной в 1905 г., и сейчас это одна из наиболее хорошо подтвержденных теорий современной физики. Она каждый день подтверждается в лабораториях учеными-атомниками, работающими с частицами, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Чем быстрее движутся подобные частицы, тем большая сила необходима, чтобы увеличить их скорость на заданную величину; иными словами, тем больше их релятивистская масса. Именно по этой причине физики продолжают строить все большие и большие машины для ускорения частиц. Нужны все более сильные поля, чтобы преодолеть массу частиц, растущую по мере того, как их скорость становится ближе и ближе к скорости света. Электроны теперь могут быть ускорены до скорости в 0,999999999 скорости света. При этом каждый электрон приобретает массу (относительно инерциальной системы отсчета Земли), которая примерно в сорок тысяч раз больше его массы покоя!

Когда какая-либо частица сталкивается со своей античастицей (частицей, имеющей точно такую же структуру, но противоположный электрический заряд), происходит полная и взаимная их аннигиляция.

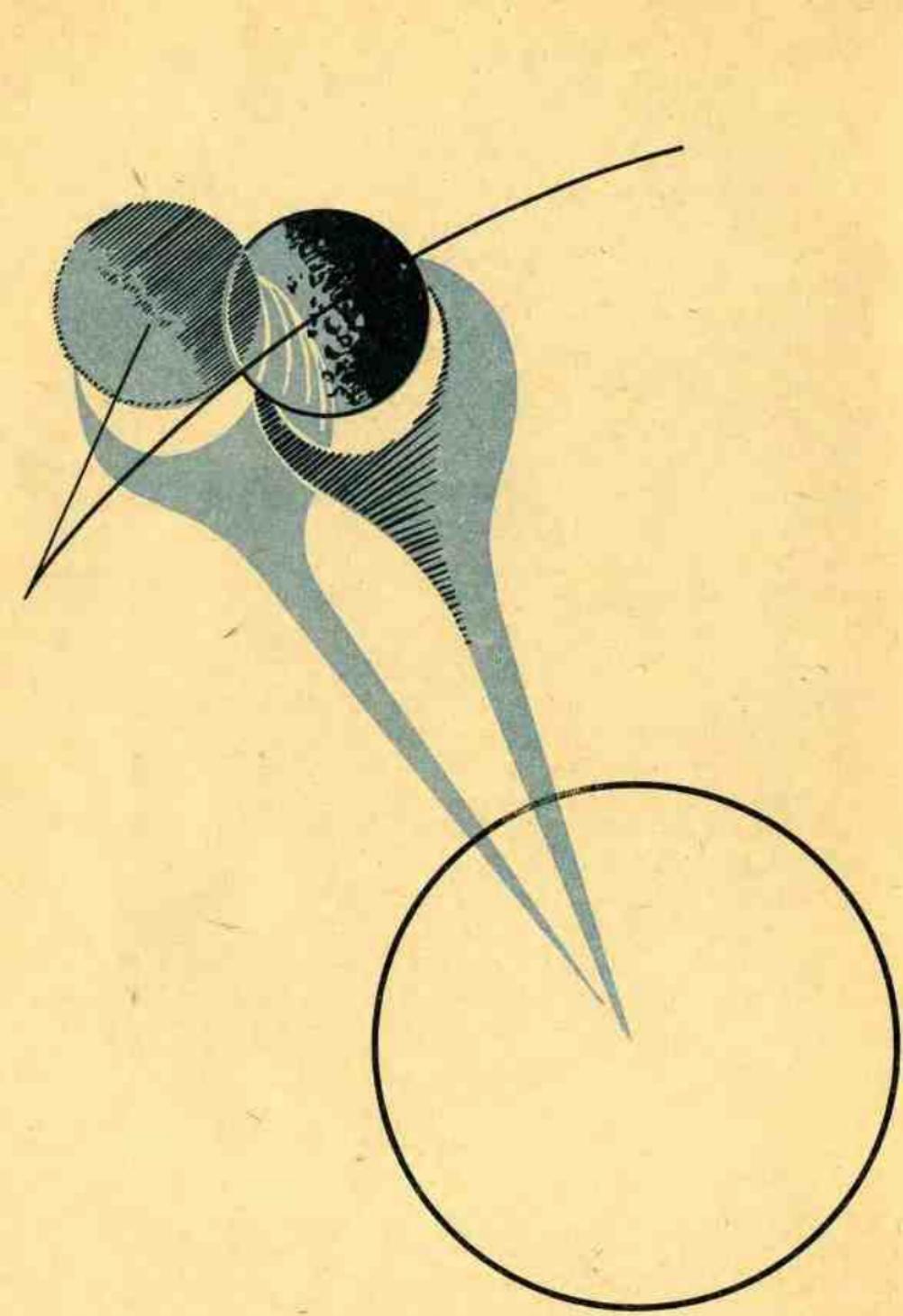
Вся масса обеих частиц целиком превращается в энергию излучения. В лаборатории этот процесс пока проводится только с отдельными частицами. Если физикам когда-либо удастся создать антивещество (вещество, построенное из античастиц), то они смогут достичь предела в использовании атомной энергии. Очень небольшое количество антивещества на космическом корабле, поддерживающее магнитными полями во взвешенном состоянии, можно соединять понемногу с веществом, что обеспечит корабль движущей силой, достаточной, чтобы нести его к звездам.

Специальная теория относительности настолько полно подтверждена экспериментом, что теперь бы-



ло бы трудно найти физика, который сомневается в правильности этой теории.

Равномерное движение относительно. Но прежде чем можно будет сказать, что всякое движение относительно, нужно преодолеть последнее препятствие: это препятствие — инерция. Что это именно за препятствие и как Эйнштейн преодолел его, описано в гл. 5.



5

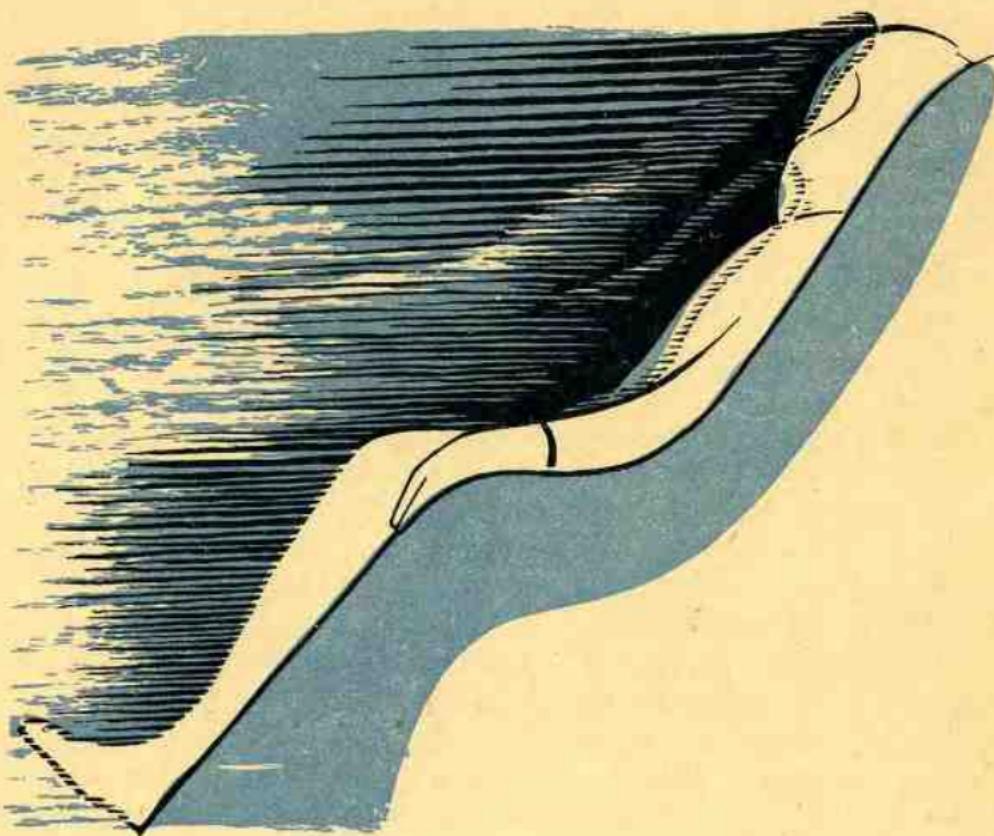
Общая теория относительности

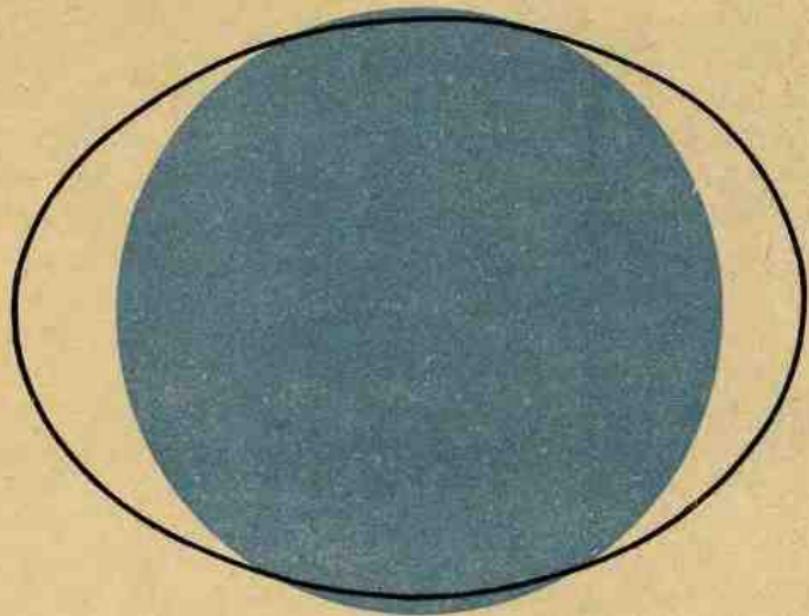
В начале гл. 2 мы указывали, что есть два пути обнаружить абсолютное движение: измерять движение по отношению к пучку света и использовать явление инерции, возникающее при ускорении предмета. Опыт Майкельсона — Морли показал, что первый путь непригоден. И специальная теория относительности Эйнштейна объяснила причину этого. В этой главе мы возвращаемся ко второму методу: использованию явлений инерции как ключа к абсолютному движению.

Когда ускоряется космический корабль, космонавт внутри корабля гигантской силой прижимается к спинке своего кресла. Это обычное явление инерции, вызванное ускорением ракеты. Доказывает ли это явление, что ракета движется? Для доказатель-

ства относительности всех движений, включая и ускоренное движение, необходимо, чтобы и ракету можно было принять за неподвижную систему отсчета. В этом случае Земля и все космическое пространство должны будут казаться движущимися назад, прочь от ракеты. Но, посмотрев на создавшееся положение с этой точки зрения, можно ли объяснить силы, действующие на космонавта? Сила, которая прижимает его к креслу, показывает, без всякого сомнения, что движется ракета, а не космос.

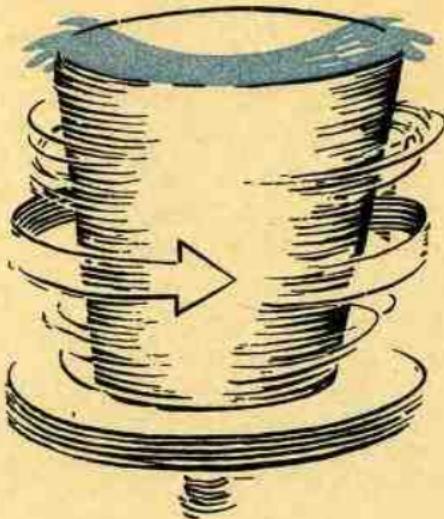
Другой подходящий пример представляет вращающаяся Земля. Центробежная сила, инерционное явление, сопровождающее вращение, вызывает растяжение земного экватора, так что Земля сплющивается. Если всякое движение относительно, то нельзя ли принять Землю за неподвижную систему отсчета и считать космос вращающимся вокруг нее? Конечно,





это можно вообразить, но что же тогда растягивает земной экватор? Это растяжение показывает, что вращается сама Земля, а не Вселенная. Кстати, астрономы не договорились еще, растягивают центробежные силы и сейчас экватор Земли или растяжение возникло в прошедшие геологические эпохи, когда вещества Земли было более пластичным, а теперь стало характерной чертой твердой Земли, чертой, которая сохранится, даже если прекратится вращение Земли. Все согласны, однако, что центробежная сила ответственна за это растяжение.

Цепь размышлений, приведших Ньютона к мысли о том, что движение не относительно, точно такая же. Он ссылался как на доказательство на тот факт, что во вращающемся вокруг вертикальной оси ведре центробежная сила искривляет поверхность воды и даже может привести к выплескиванию воды через край. Невозможно представить себе, что вращающаяся Вселенная может так влиять на воду, следовательно, утверждает Ньютон, необходимо признать, что вращение ведра абсолютно.



В течение десяти лет, последовавших за опубликованием специальной теории относительности, Эйнштейн размышлял над этой задачей. Большинство физиков не рассматривало ее как задачу вообще. Почему бы, говорили они, равномерному движению не быть относительным (как это утверждает специальная теория относительности), а ускоренному — абсолютным? Такое положение дел Эйнштейна не удовлетворяло. Он чувствовал, что если равномерное, прямолинейное движение относительно, то таким же должно быть и ускоренное движение. Наконец, в 1916 г., через 11 лет после создания специальной теории относительности, он опубликовал свою общую теорию относительности. Эта теория названа общей, так как она является обобщением, расширением специальной теории. Она включает в себя специальную теорию как частный случай.

Общая теория является значительно более крупным научным достижением, чем специальная теория. Если бы не Эйнштейн впервые сформулировал специальную теорию, то нет сомнения, что эта теория вскоре была бы создана другими физиками. Пуанкаре был одним из тех, кто почти вплотную подошел к ней. В своей замечательной речи, произнесенной в

1904 г., Пуанкаре предсказал возникновение «совершенно новой механики», в которой никакая скорость не может достигать скорости света, подобно тому, как никакая температура не может опуститься ниже абсолютного нуля. Будет установлен, говорил он, «принцип относительности, согласно которому законы физических явлений должны быть одинаковы, независимо от того, покоится наблюдатель или находится в равномерном и прямолинейном движении; у нас не будет способа различать, находимся мы в состоянии покоя или в таком движении». Пуанкаре не видел того решающего шага, который необходимо было сделать для выполнения этой программы, но интуитивно он понял сущность специальной теории. В то время Эйнштейн еще не сознавал, насколько мысли Пуанкаре, Лоренца и других были близки его собственным. Несколько годами позже он чрезвычайно высоко оценил выдающийся вклад этих людей.

С общей теорией относительности положение совершенно отличное. Она была, по выражению Теллера, «прекрасной неожиданностью»; работой такой изумительной оригинальности, такой необычности, что она вызвала в научном мире нечто похожее на то, что произошло в танцевальных залах США, когда в 1962 г. в них вторгся новый танец, крик моды, твист. Эйнштейн изменил* древние ритмы танцев времени и пространства. В удивительно короткое время каждый физик или танцевал новый твист, не скрывая охватившего его ужаса перед ним, или жаловался на старость, мешающую научиться новому танцу. Если бы не родился Эйнштейн, то нет сомнения, что другие ученые дали бы физике такой же твист, но могло бы пройти столетие или больше, прежде чем это бы произошло. В истории науки немного основополагающих теорий, в такой степени являющихся делом рук одного человека.

«Ньютон, прости меня», — писал Эйнштейн в конце жизни. «В твоё время ты нашел тот единственный

* В оригинале непереводимая игра слов. По-английски *twist* (читается твист) переводится и как «изменение», и как твист (название танца). — Прим. перев.

путь, который был пределом возможного для человека величайшего ума и творческой силы». Это трогательная дань уважения гениальнейшего ученого нашего времени своему гениальному предшественнику.

Центральным стержнем общей теории Эйнштейна является то, что получило название принципа эквивалентности.

Принцип эквивалентности не что иное, как ошеломляющее утверждение (Ньютон счел бы Эйнштейна безумцем), что тяжесть и инерция одно и то же. Это не просто похожие явления. Тяжесть и инерция — два различных слова для одного и того же явления.

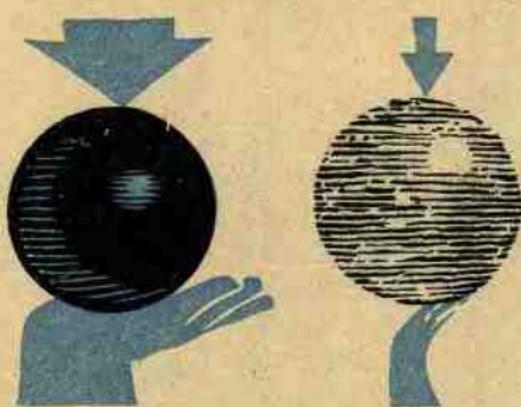
Эйнштейн был не первый ученый, которого поразило странное сходство между гравитационным и инерционными явлениями. Представим себе, что пушечное ядро и маленький деревянный шарик падают с одной и той же высоты. Допустим, что вес ядра в сто раз больше, чем вес деревянного шарика. Это означает, что на ядро действует сила тяжести, в сто раз большая, чем сила, действующая на деревянный шарик. Легко понять причину, по которой враги Галилея не могли поверить, что эти шарики достигнут Земли одновременно. Мы теперь, конечно, знаем, что если пренебречь сопротивлением воздуха, то шары будут падать бок о бок. Чтобы объяснить это явление, Ньютон должен был предположить нечто очень удивительное. В той же степени, с какой тяжесть тянет вниз ядро, инерция ядра, сопротивляемость силе, его сдерживает. Действительно, на ядро действует сила тяжести в сто раз большая, чем на деревянный шарик, но инерция сдерживает ядро ровно в сто раз сильнее!

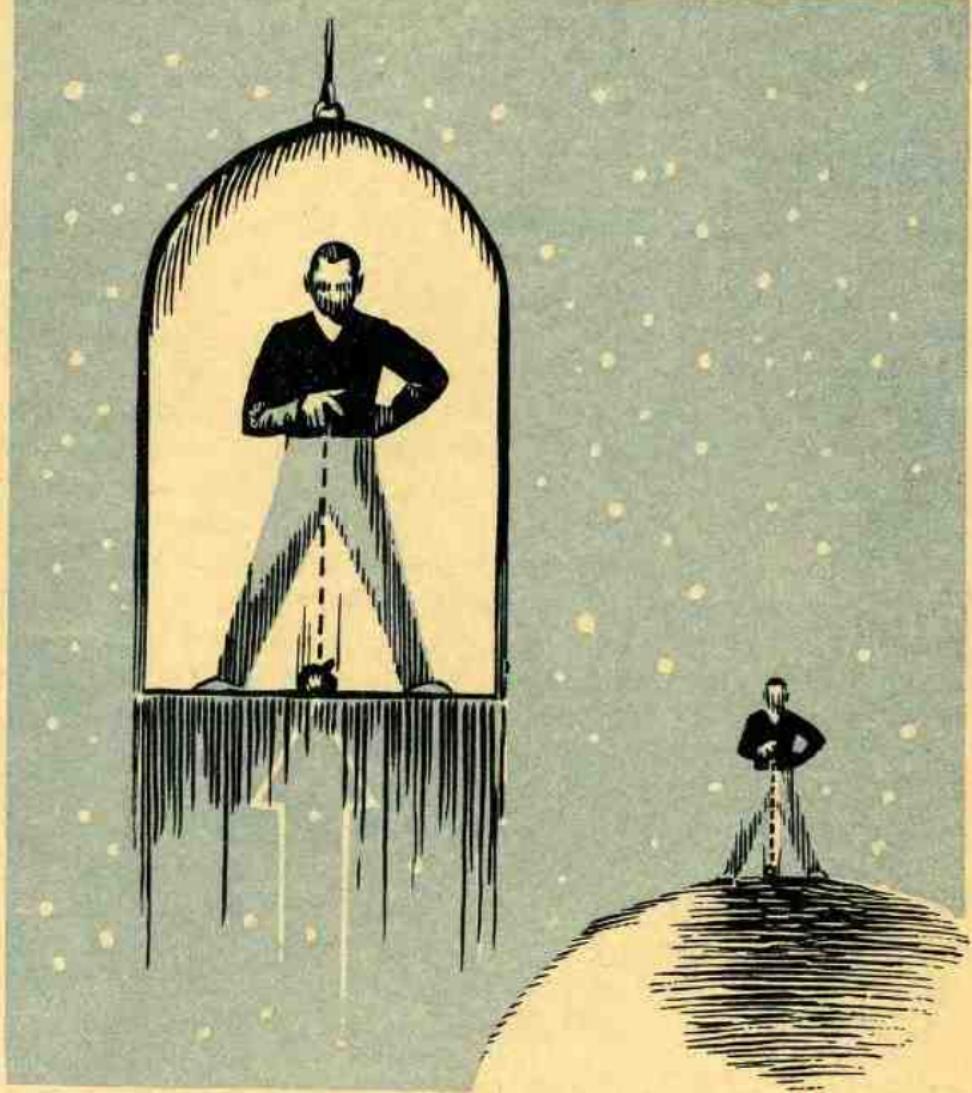
Физики часто выражают это другими словами. Сила тяжести, действующая на предмет, всегда пропорциональна инерционной массе этого предмета. Если предмет А вдвое тяжелее предмета Б, его инерция также вдвое больше. Вдвое большая сила необходима для ускорения предмета А до той же конечной скорости, что и у предмета Б. Если бы это было не

так, то предметы разного веса падали бы с разными ускорениями.

Очень легко вообразить себе мир, в котором нет пропорциональности между этими силами (инерции и тяготения). И действительно, во времена от Аристотеля до Галилея ученые представляли себе мир именно таким! Мы очень хорошо чувствовали бы себя в таком мире. Изменились бы условия в падающем лифте, но ведь мы не часто в нем оказываемся. Как бы там ни было, мы имеем счастье жить в мире, где эти две силы пропорциональны. Впервые это показал Галилей. Удивительно точные опыты, подтвердившие открытие Галилея, были выполнены около 1900 г. венгерским физиком бароном Роландом фон Этвешем. Наиболее точная всесторонняя проверка была сделана несколько лет назад группой ученых Принстонского университета. С той точностью, которой они могли достигнуть, гравитационная масса (вес) всегда оказывалась пропорциональной инертной массе.

Ньюton, конечно, знал об этой удивительной связи между тяжестью и инерцией, связи, которая заставляет все предметы падать с одинаковым ускорением, но он никак не мог это объяснить. Для него эта связь казалась необычайным совпадением. За счет такого совпадения можно использовать инерцию таким образом, что гравитационное поле будет возникать и исчезать. В первой главе было рассказа-

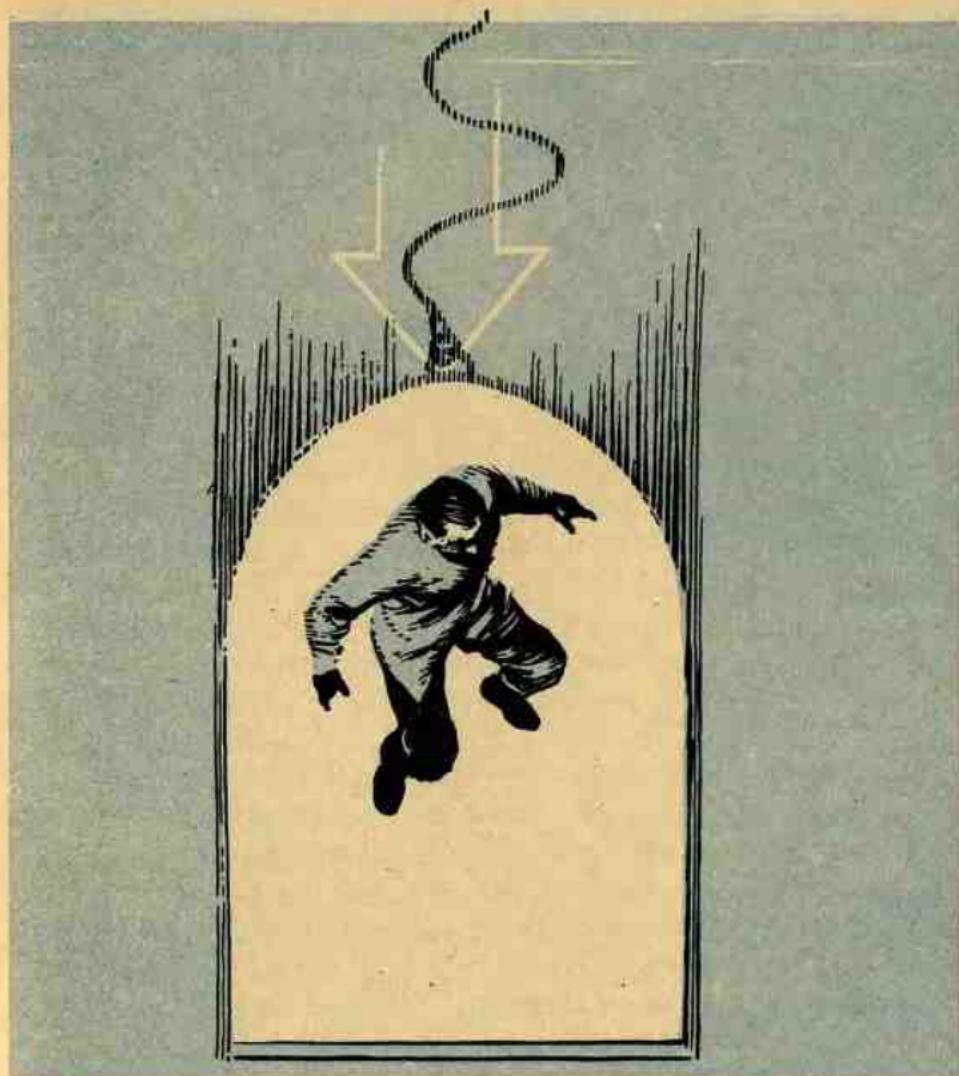




но об искусственном поле тяжести, которое может быть создано в космическом корабле торOIDальной формы (в виде бублика) простым вращением корабля как колеса. Центробежная сила будет прижимать предметы к внешнему краю. Вращая корабль с определенной постоянной скоростью, можно получить внутри корабля поле сил инерции с таким же действием, как и поле тяжести Земли. Прогуливающийся космонавт будет чувствовать себя как бы на кривом

полу. Брошенные предметы будут падать на этот пол. Дым будет подниматься к потолку. Все явления будут такими же, как и в обычном поле тяжести. Для иллюстрации этого положения Эйнштейн предложил следующий мысленный эксперимент.

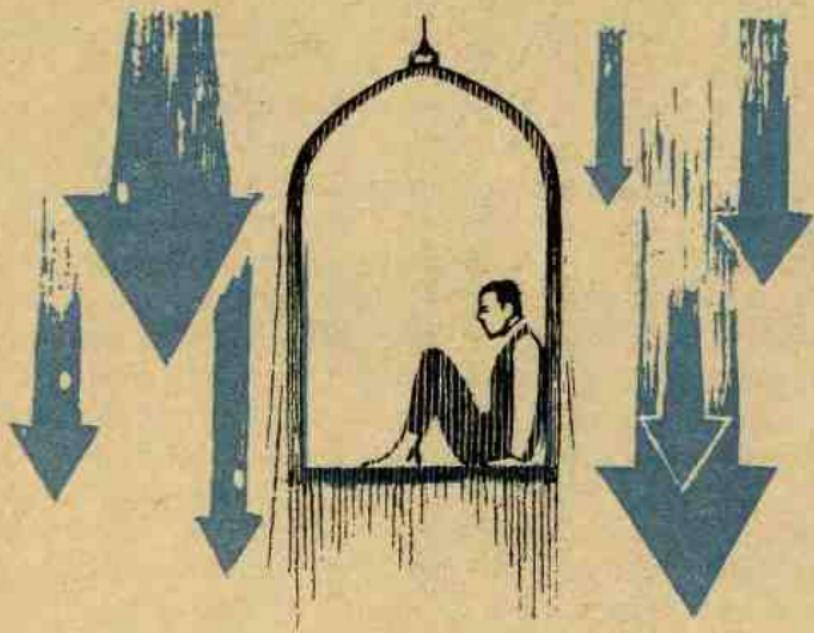
Вообразите в космосе лифт, двигающийся вверх с постоянно нарастающей скоростью. Если ускорение постоянно и в точности равно ускорению падающего на землю предмета, то человек внутри лифта будет



чувствовать себя так же, как и в гравитационном поле, в точности равном земному. Этим способом можно не только промоделировать тяжесть, но и нейтрализовать ее. В падающем лифте, например, ускорение вниз полностью ликвидирует влияние тяжести внутри кабины. Состояние с $g=0$ (отсутствие тяготения) существует внутри космического корабля все то время, пока он находится в состоянии свободного падения, т. е. когда он движется только под действием сил тяжести. Невесомость, которую ощущали советские и американские космонавты в полетах вокруг Земли, объясняется тем, что их корабли находились в состоянии свободного падения, обращаясь вокруг Земли. Все время, пока ракетные двигатели космического корабля выключены, внутри корабля будет состояние с $g=0$.

Замечательное соответствие между тяжестью и инерцией оставалось необъясненным до тех пор, пока Эйнштейн не создал общую теорию относительности. Как и в специальной теории относительности, он предложил наипростейшую, наиболее смелую гипотезу. Вспомните, в специальной теории относительности Эйнштейн предположил, что причина, по которой мы не замечаем эфирного ветра, состоит в том, что нет никакого эфирного ветра. В общей теории относительности он сказал: тяжесть и инерция кажутся одним и тем же потому, что они являются одним и тем же.

Неправильно говорить, что внутри свободно падающего лифта притяжение Земли нейтрализуется. Тяготение не нейтрализуется, оно ликвидируется. Тяготение действительно исчезает. Аналогично этому неправильно говорить, что тяготение во вращающемся космическом корабле или в поднимающемся с ускорением лифте моделируется. И в этом случае тяготение не моделируется, оно создается. Гравитационное поле, созданное этим способом, имеет иную математическую форму, чем гравитационные поля, окружающие большие небесные тела, например Землю, но тем не менее это обычное гравитационное поле. Как и в специальной теории, математическое описа-



ние природы усложняется в общей теории, но окончательный результат оправдывает это усложнение. Вместо двух различных сил оставлена только одна. Более того, теория приводит к новым предсказаниям, которые могут быть проверены на опыте.

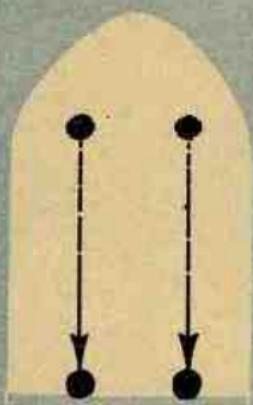
Принцип эквивалентности Эйнштейна — эквивалентности тяготения и инерции — дает возможность рассматривать все движения, в том числе и ускоренные, как относительные. Когда воображаемый лифт Эйнштейна с нарастающей скоростью движется в космосе, внутри него можно наблюдать явления инерции. Но теоретически лифт можно рассматривать как неподвижную, фиксированную систему отсчета. Тогда вся Вселенная со всеми ее галактиками окажется движущейся вниз мимо лифта с нарастающей скоростью. Это ускоренное движение Вселенной со-

здаст гравитационное поле, которое заставляет все предметы в лифте прижиматься к полу. Можно сказать, что эти явления не инерционные, а гравитационные.

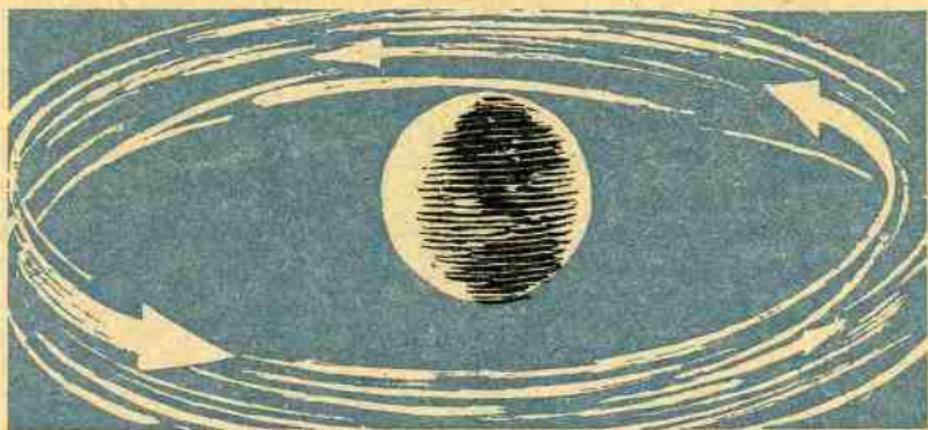
Но что же происходит в действительности? Двигается лифт, и его движение создает инерционные явления, или движется Вселенная, создавая гравитационное поле? Это неправильный вопрос. Нет никакого «действительного», абсолютного движения. Существует лишь относительное движение лифта и Вселенной. Это относительное движение создает силовое поле, описываемое уравнениями поля общей теории. Силовое поле может называться гравитационным или инерционным в зависимости от выбора системы отсчета. Если системой отсчета служит лифт, то поле называется гравитационным. Если же системой отсчета является космос, то поле называется инерционным. Инерция и тяготение — всего лишь два различных слова, примененных к одному и тому же явлению. Естественно, много проще и более удобно рассматривать Вселенную покоящейся. В этом случае никто не попытается назвать поле внутри лифта гравитационным. Общая теория относительности говорит, однако, что это поле может быть названо гравитационным, если выбрана подходящая система отсчета.

Ни один эксперимент, выполненный внутри этого лифта, не сможет доказать «ложность» такого представления.

Когда говорят, что наблюдатель внутри лифта не может сказать, является ли поле, прижимающее его к полу, инерционным или гравитационным, то это не означает, что он не может найти разницу между этим полем и гравитационным полем, окружающим большие количества вещества, скажем планету. Гравитационное поле вокруг Земли, например, обладает сферической симметрией и такое поле нельзя точно воспроизвести ускорением лифта в пространстве. Если два яблока разнести на метр, а затем сбросить с большой высоты на Землю, то, падая, они будут сближаться, так как каждое яблоко падает по пря-



мой линии, направленной к центру Земли. В движущемся лифте, однако, все предметы падают по параллельным линиям. Это различие между двумя полями может быть найдено опытами внутри лифта,



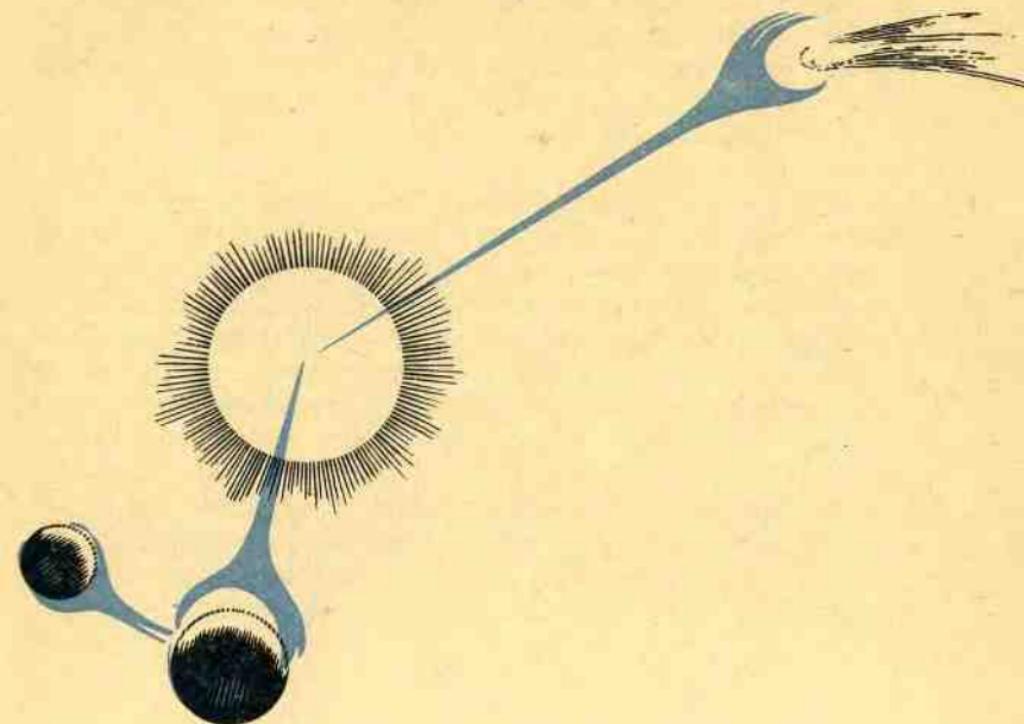
но этими опытами нельзя найти различия между инерцией и тяготением. В опытах можно различить только поля различной математической структуры.

Подобное положение возникает и на вращающейся Земле. Древний спор о том, вращается Земля или небеса вокруг нее (так думал Аристотель), оказывается не более чем спором о выборе самой простой системы отсчета. Конечно, наиболее удобно выбрать систему отсчета, связанную со Вселенной. Мы говорим, что относительно Вселенной Земля вращается и инерция сплющивает Землю, растягивая ее экватор.



Ничто, кроме неудобства, не мешает нам выбрать Землю в качестве фиксированной системы отсчета. В последнем случае мы скажем, что космос вращается вокруг Земли, создавая гравитационное поле, действующее на ее экватор. И снова это поле будет иметь математически иную структуру, чем гравитационное поле вокруг планеты, и тем не менее оно справедливо может быть названо гравитационным. Если мы выберем Землю за неподвижную систему отсчета, нам даже не придется изменять нашу повседневную речь. Мы говорим, что Солнце всходит по утрам и заходит вечером, что Большая Медведица вращается вокруг Полярной Звезды. Какая же точка зрения «правильна»? Вращаются небеса или вращается Земля? Этот вопрос лишен смысла. С тем же основанием официантка могла бы спросить клиента, желает он мороженое на пироге или пирог под мороженым.

Вообразите себе космос вооруженным некими «захватами» для каждого предмета в нем. (В гл. 7 рас-



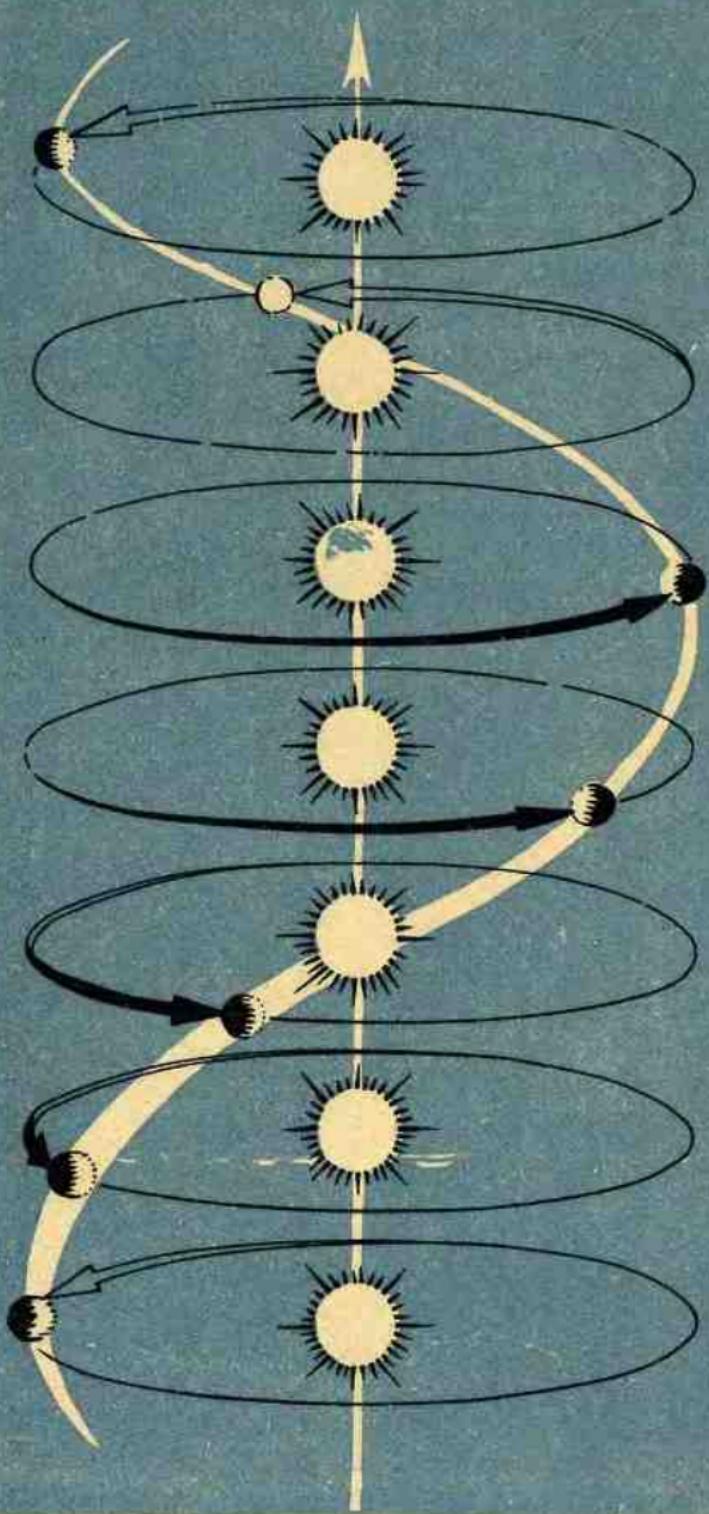
сматривается вопрос о происхождении этих захватов.) Необычайность этих захватов состоит в том, что, пока предмет движется во Вселенной прямолинейно и равномерно, Вселенная не препятствует его движению. Но стоит только попытаться заставить предмет двигаться неравномерно (ускоренно), захват сожмется. Если за неподвижную систему отсчета принята Вселенная, то захват называется инерцией предмета, его сопротивляемостью изменению движения. Если за неподвижную систему отсчета принят предмет, захват называется тяготением, попыткой Вселенной сдержать неравномерное движение предмета относительно нее.

Часто общую теорию относительности резюмируют следующим образом. Ньютона разъяснил, что если наблюдатель находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения, то нет ни одного механического опыта, с помощью которого он мог бы отличить свое состояние от покоя. Специальная теория относительности распространила это заключение и на оптические опыты. Общая теория является следующим по порядку сообщением — обобщением специальной теории на неравномерное движение. Ни один эксперимент, говорит общая теория, какого бы вида он ни был, не поможет наблюдателю, в каком бы движении тот ни находился, равномерном или неравномерном, отличить свое состояние от состояния покоя.

Сущность общей теории относительности иногда формулируется и так: все законы природы инвариантны (одинаковы) для любого наблюдателя. Это означает, что независимо от того, как движется наблюдатель, он может описать все законы природы (как они ему представляются) одинаковыми математическими уравнениями. Он может быть ученым, работающим в земной лаборатории, или на Луне, или в огромном космическом корабле, медленно ускоряющемся на пути к далекой звезде. Общая теория относительности дает ему ряд уравнений, с помощью которых можно выразить все законы природы, проявляющиеся в любом выполнимом эксперименте. Эти

уравнения будут точными независимо от того, находится наблюдатель в покое или в равномерном либо ускоренном движении по отношению к любому другому предмету.

В следующей главе мы подробнее рассмотрим теорию тяготения Эйнштейна и ее связь с новым важным понятием, известным под названием пространства — времени.

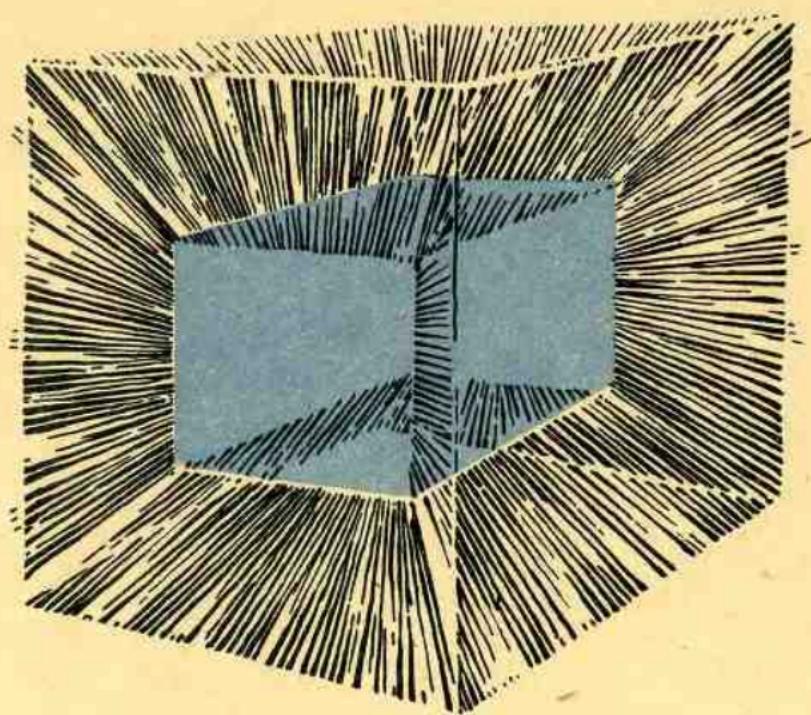
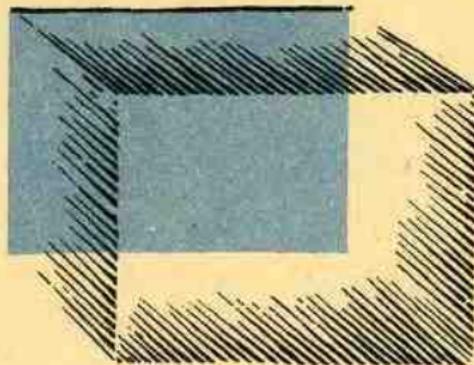


6

Тяготение и пространство — время

Прежде чем можно будет что-либо сказать о теории тяготения Эйнштейна, необходимо сделать несколько очень кратких замечаний относительно четырехмерной неевклидовой геометрии. Герман Минковский, польский математик, дал теории относительности изящную интерпретацию в терминах четырехмерного пространства — времени. Многие идеи этой главы в такой же мере принадлежат Минковскому, как и Эйнштейну.

Рассмотрим геометрическую точку. Она не имеет размера. При движении вдоль прямой она порождает линию, имеющую одно измерение. Будем двигать прямую под прямым углом к ней самой, и она создаст плоскость, имеющую два измерения. Если двигать плоскость под прямым углом к ней самой, то

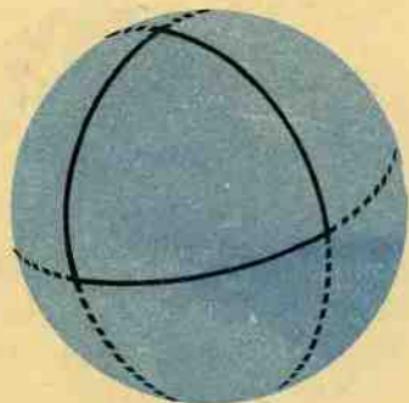


она образует трехмерное пространство. И это тот предел, до которого мы можем дойти в своем воображении. Но математик представляет себе (не в том смысле, что он создает в своем воображении какую-то картину, а в том смысле, что он разрабатывает математический аппарат) движение трехмерного пространства в направлении, перпендикулярном всем его трем измерениям. Это порождает четырехмерное



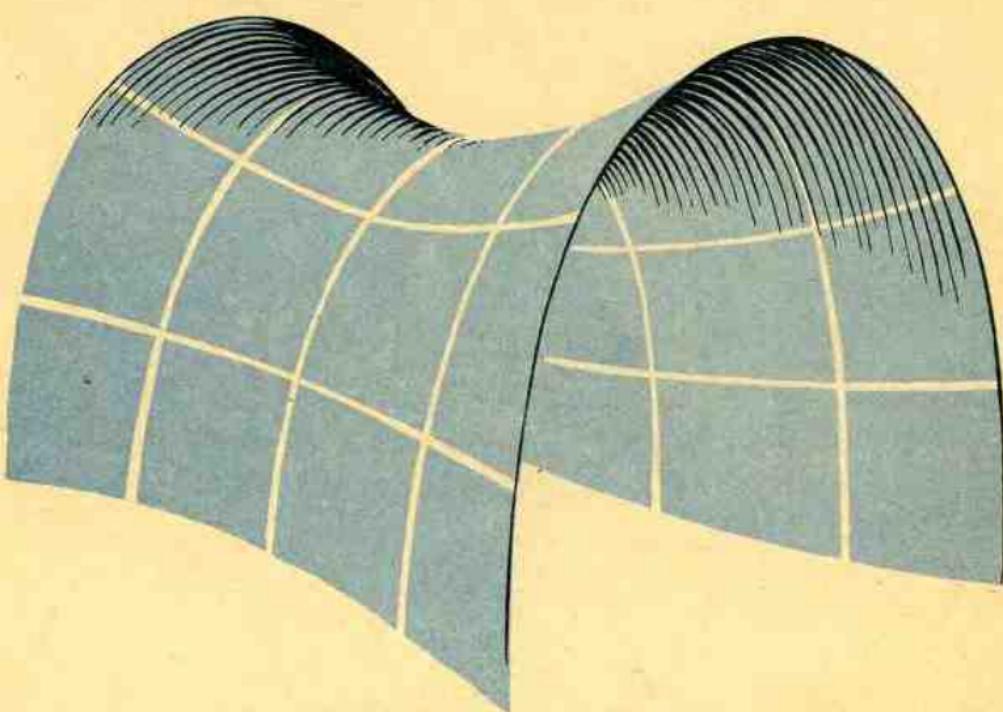
евклидово пространство. Нет никакой необходимости останавливаться на четырех. Мы можем переходить к пространствам пяти, шести, семи или более измерений. Все эти пространства евклиды. Они представляют собой развитие евклидовой геометрии точно так же, как евклидова стереометрия является развитием евклидовой планиметрии.

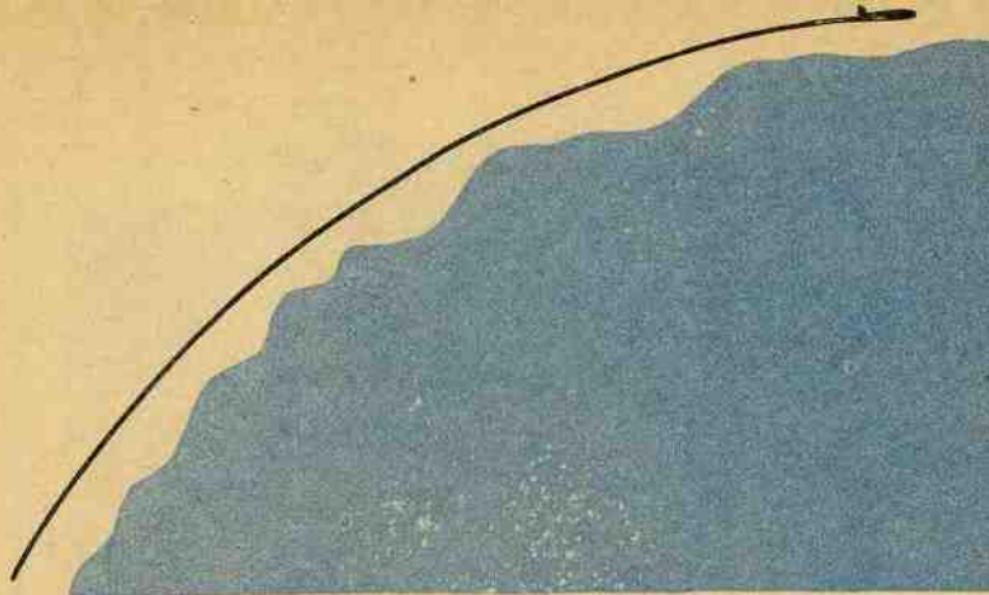
Евклидова геометрия основана на нескольких аксиомах, одной из которых является знаменитая аксиома о параллельных прямых. Она гласит, что на плоскости через данную точку, расположенную вне данной прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную этой прямой. Говорят, что евклидова поверхность, на которой выполняется этот постулат, плоская. Она имеет нулевую кривизну и бесконечную площадь. Неевклидова геометрия — это такая геометрия, в которой аксиома о параллельных прямых заменена другой аксиомой. При этом возможны два существенно различных случая.



В первом случае, называемом эллиптической геометрией, говорится, что на поверхности через данную точку, расположенную вне заданной линии, не может быть проведено ни одной параллельной ей линии. Поверхность сферы представляет собой грубую, неточную модель неевклидовой поверхности такого типа. «Наиболее прямой» линией на сфере является большой круг (круг с диаметром, равным диаметру сферы). Все большие круги пересекаются друг с другом, и поэтому невозможно, чтобы два больших круга были параллельны. Говорят, что неевклидова поверхность этого типа имеет положительную кривизну. Такая кривизна приводит к тому, что поверхность замыкается сама на себя. Она имеет конечную, а не бесконечную площадь.

Неевклидова геометрия другого типа, называемая гиперболической, — это геометрия, в которой евклидов постулат о параллельных прямых заменен постулатом, гласящим, что на поверхности через точку, расположенную вне данной линии, проходит бесконечное множество параллельных ей линий. Грубой моделью части поверхности такого типа является седловидная поверхность. Говорят, что такая поверхность имеет отрицательную кривизну. Она не замыкается сама на себя. Подобно евклидовой плоскости, она тянется до бесконечности во всех направлениях. И эллиптическая, и гиперболическая геометрии пред-



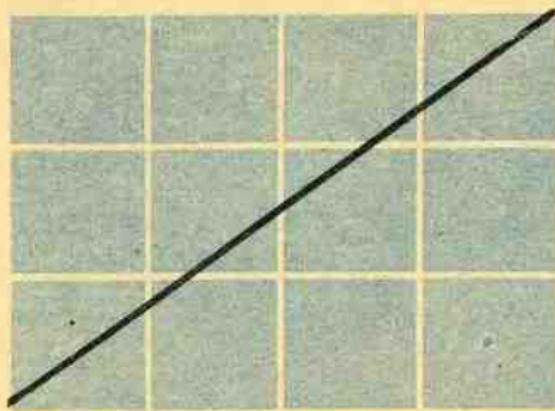


ставляют собой геометрии поверхностей постоянной кривизны. Это означает, что кривизна везде одна и та же, объекты не претерпевают искажений при переходе из одной точки в другую. Неевклидова геометрия более общего типа, обычно называемая римановой геометрией, это такая геометрия, в которой кривизна может меняться от точки к точке любым заданным образом.

Точно так же, как имеются евклидовы геометрии пространств 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... измерений, существуют неевклидовы геометрии 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... измерений.

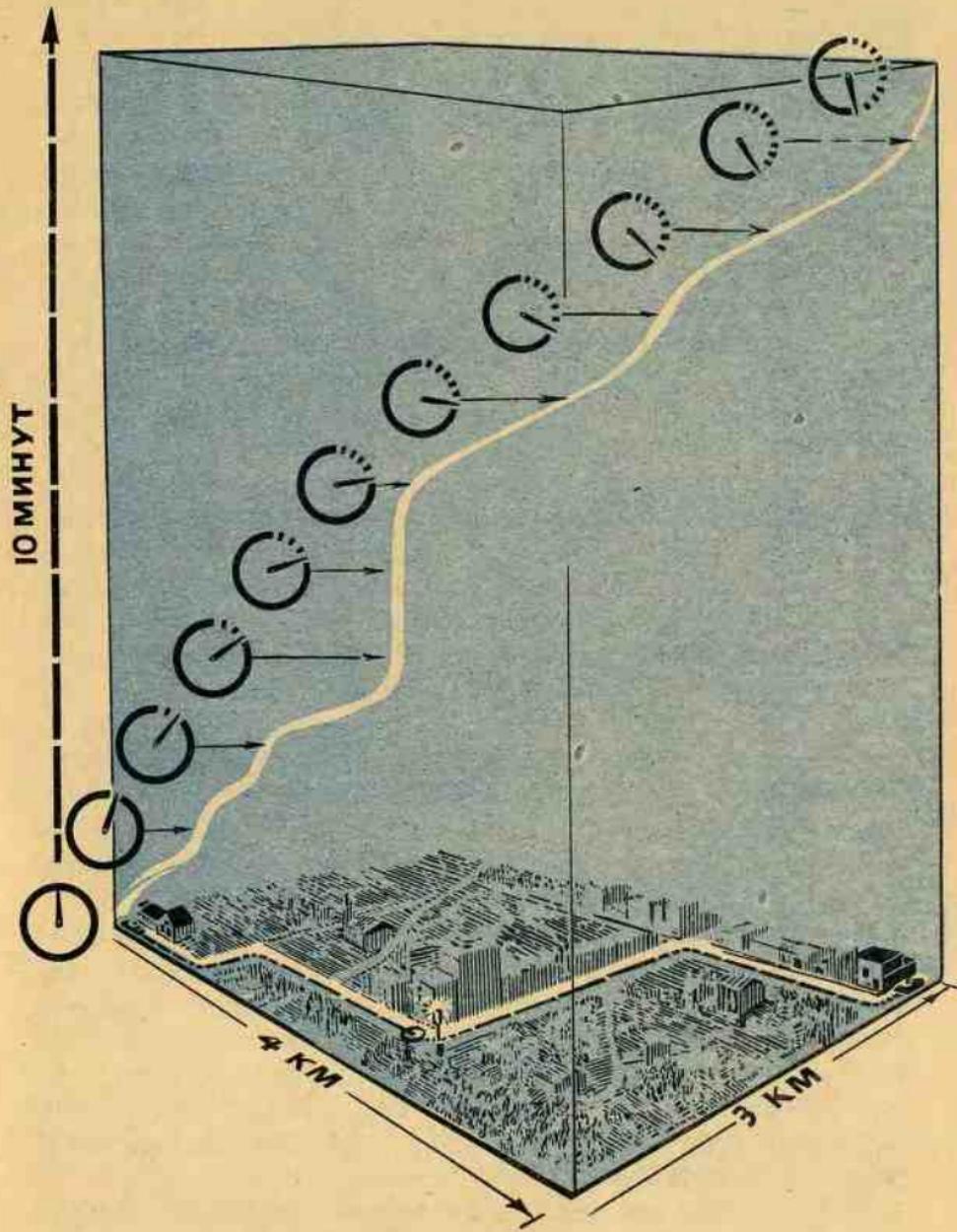
При разработке общей теории относительности Эйнштейн счел необходимым использовать четырехмерную риманову геометрию. Однако вместо четвертого пространственного измерения Эйнштейн выбрал в качестве четвертого измерения время. В понятии четвертого измерения нет ничего таинственного или мистического. Просто это означает, что каждое событие, которое имеет место во Вселенной, представляет собой событие, происходящее в четырехмерном мире пространства — времени.

Это можно уяснить себе, рассмотрев следующее событие. Вы садитесь в автомобиль в 2 часа дня и едете из своего дома в ресторан, расположенный в 3 км к югу и в 4 км к востоку от вашего дома. На двухмерной плоскости кратчайшее расстояние от ва-



шего дома до ресторана есть гипотенуза прямоугольного треугольника со сторонами 3 и 4 км. Эта гипотенуза имеет длину 5 км. Но вам требуется также затратить какое-то время, скажем 10 мин, на поездку. Этот промежуток времени может быть изображен на трехмерном графике. Одна координата на этом графике есть расстояние к югу в километрах, другая — расстояние к востоку в километрах, а координата по вертикали — время в минутах. На трехмерном графике пространства — времени «интервал» (пространственно-временной промежуток) между двумя событиями (вашим отъездом из дома и прибытием к ресторану) изображен в виде прямой.

Эта прямая линия не есть график реальной поездки. Просто она является мерой пространственно-временного расстояния между двумя событиями. График поездки может быть сложной кривой, поскольку ваша машина ускоряется в начале движения, расположение улиц может сделать невозможной поездку к ресторану по прямой, где-то в пути вы остановитесь при красном свете, и, наконец, вы должны испытать отрицательное ускорение, когда останавливаете машину. Сложный волнистый график реальной поездки в теории относительности называется «мировой линией» поездки. В рассмотренном случае это мировая линия в трехмерном пространстве — времени, или (как его иногда называют) в трехмерном пространстве Минковского.



Так как эта поездка на автомобиле происходила на плоскости, имеющей два измерения, оказалось возможным добавить еще одно измерение — временное и изобразить ее в виде трехмерного графика. Когда события происходят в трехмерном пространстве, невозможно нарисовать график в четырехмерном пространстве — времени, но математики умеют обращаться с такими графиками, не рисуя их. Попытайтесь представить себе четырехмерного ученого, который умеет чертить четырехмерные графики с такой же легкостью, как обычный ученый чертит двух- и трехмерные графики. Три координаты его графика соответствуют трем измерениям нашего пространства. Четвертая координата — это наше время. Если космический корабль улетает с Земли и приземляется на Марсе, наш воображаемый ученый изобразит мировую линию этого путешествия в виде кривой на своем четырехмерном графике. (Линия будет кривой, так как корабль не может проделать такое путешествие без ускорений.) Пространственно-временной «интервал» между отлетом и приземлением будет изображаться на этом графике прямой линией.

В теории относительности всякий предмет представляет собой четырехмерную структуру, движущуюся вдоль мировой линии в четырехмерном мире пространства — времени. Если какой-либо предмет рассматривается покоящимся по отношению к трем пространственным координатам, он все равно движется во времени. Его мировая линия будет прямой, параллельной временной оси графика. Если предмет совершает равномерное движение в пространстве, его мировая линия по-прежнему будет прямой, но теперь уже непараллельной оси времени. Если предмет движется неравномерно, его мировая линия становится кривой.

Теперь мы можем рассмотреть Лоренц — Фитцджеральдово сокращение специальной теории с новой точки зрения: с точки зрения Минковского, иначе говоря, с точки зрения нашего четырехмерного ученого. Как мы видели, когда два космических ко-



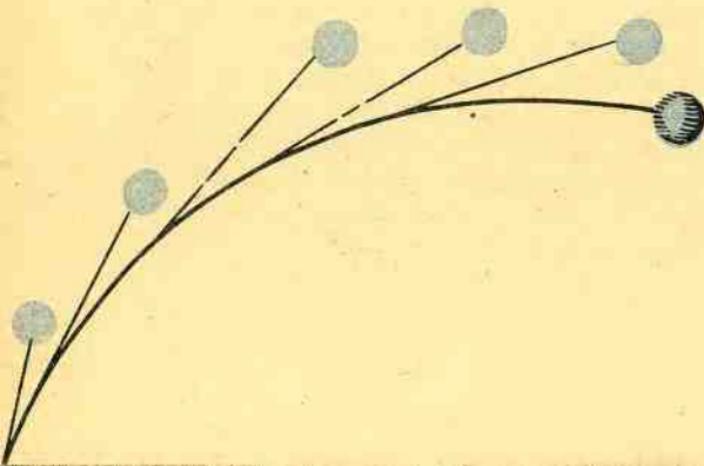
рабля проходят один мимо другого, находясь в состоянии относительного движения, наблюдатели на каждом из кораблей обнаруживают некоторые изменения формы другого корабля, а также изменения скорости хода часов на другом корабле. Это происходит по той причине, что пространство и время не являются абсолютными величинами, не зависящими друг от друга. Они похожи, так сказать, на теневые проекции четырехмерных пространственно-временных предметов. Если поставить книгу против источника света и проектировать ее тень на двухмерную стенку, то, поворачивая книгу, можно изменять форму ее тени. В одном положении тень книги представляет собой широкий прямоугольник, в другом — узкий. Книга не меняет своей формы, меняются только ее двухмерные тени. Подобным образом наблюдатель видит четырехмерную структуру, скажем, космический корабль, в различных трехмерных проекциях в зависимости от того, как он движется по отношению к кораблю. В некоторых случаях проекция занимает больше пространства и меньше времени, в других случаях наоборот. Изменения, которые он наблюдает в пространственных и временных измерениях другого корабля, могут быть объяснены своего рода «поворотом» корабля в пространстве — времени, приводящим к изменению его теней.

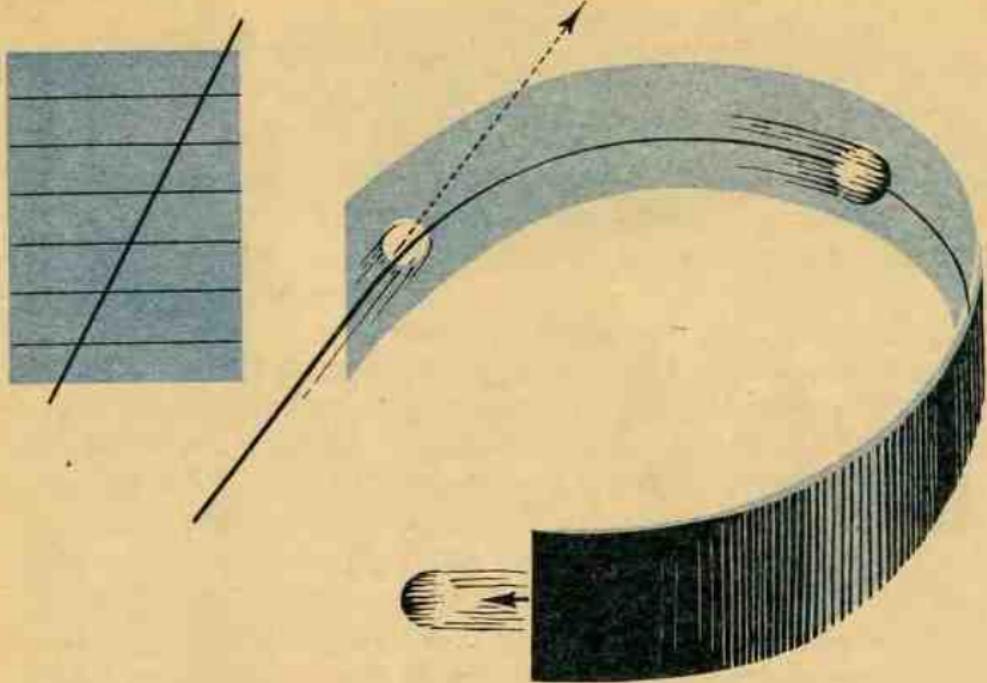
вых проекций на пространство и время. Именно это имел в виду Минковский, когда (в 1908 г.) начал знаменитую лекцию на 80-м съезде германского общества натуралистов и физиков. Эта лекция опубликована в книге «Принцип относительности» Альберта Эйнштейна и др. Никакая из популярных книг по теории относительности не будет полной без следующей цитаты из лекции Минковского:

«Взгляды на пространство и время, которые я хочу изложить перед вами, развивались на основе экспериментальной физики, и в этом их сила. Они радикальны. Отныне пространство само по себе и время само по себе обратились в простые тени, и только какое-то единство их обоих сохранит независимую реальность».

Отсюда следует понять, что пространственно-временная структура, четырехмерная структура космического корабля, остается такой же твердой и неизменной, как в классической физике. В этом состоит существенное различие между отброшенной теорией сокращения Лоренца и теорией сокращения Эйнштейна. Для Лоренца сокращение представляло собой реальное сокращение трехмерного предмета. Для Эйнштейна «реальный» предмет — это четырехмерный предмет, который никак не меняется. Его трехмерная проекция на пространство и его одномерная проекция на время могут изменяться, но четырехмерный корабль в пространстве — времени остается неизменным.

Это другой пример того, как теория относительности вводит новые абсолюты. Четырехмерная форма твердого тела абсолютна и неизменна. Подобно

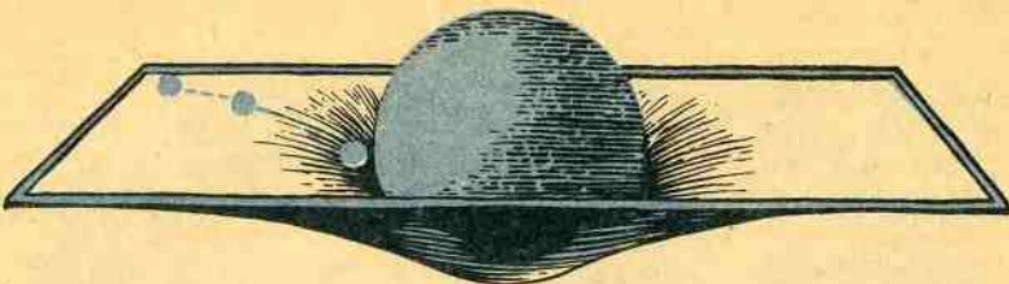




этому, четырехмерный интервал между двумя событиями в пространстве — времени есть абсолютный интервал. Наблюдатели, движущиеся с большими скоростями в разных состояниях относительного движения, могут расходиться во мнении о том, насколько удаленными друг от друга в пространстве представляются им два события и как они разделены во времени, но все наблюдатели независимо от их движения, будут едины в том, насколько разделены эти два события в пространстве — времени.

В классической физике тело, если на него не действует сила, движется в пространстве вдоль прямой с постоянной скоростью. Например, планета двигалась бы по прямой, если бы ее не удерживала сила притяжения к Солнцу. Таким образом, Солнце заставляет планету двигаться по эллиптической орбите.

В теории относительности тело, пока на него не действуют силы, также движется по прямой с постоянной скоростью, но эта прямая должна рассматриваться как линия в пространстве — времени, а не



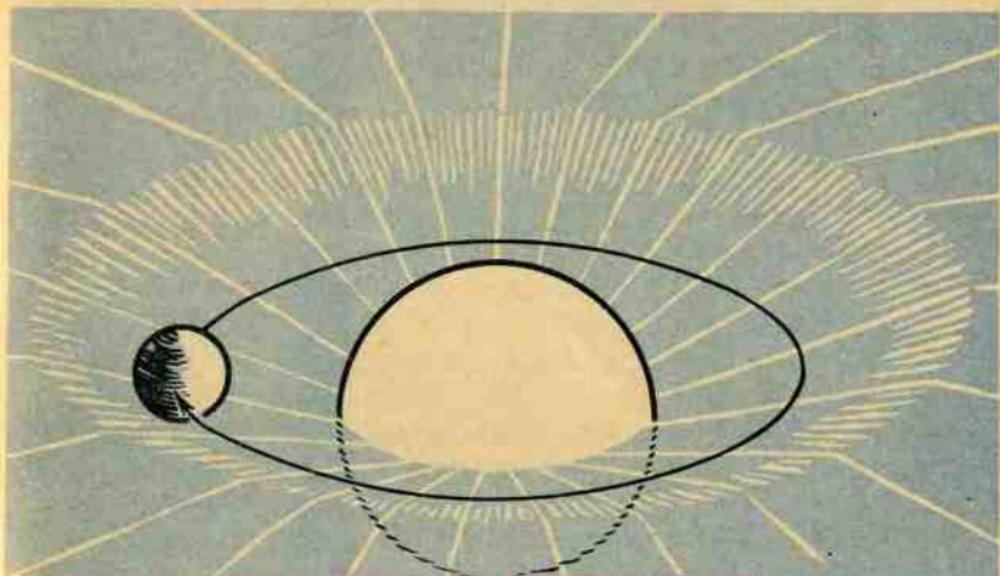
в пространстве. Все это справедливо даже при наличии тяготения. Дело в том, что тяготение, согласно Эйнштейну, вовсе не является силой! Солнце не «притягивает» планеты. Земля не «притягивает» вниз падающее яблоко. Просто большое материальное тело, такое, как Солнце, приводит к искривлению пространства — времени в окружающей его области. Чем ближе к Солнцу, тем больше кривизна. Иными словами, структура пространства — времени в окрестности больших материальных тел становится неевклидовой. В этом неевклидовом пространстве тела продолжают выбирать возможные наиболее прямые пути, но то, что является прямым в пространстве — времени, изображается кривой линией, когда проектируется на пространство. Наш воображаемый учёный, если бы он изображал орбиту Земли на своем четырехмерном графике, представил бы ее в виде прямой линии. Мы, будучи трехмерными существами (точнее, существами, которые разделяют пространство — время на трехмерное пространство и одномерное время), видим ее путь в пространстве в виде эллипса.

Авторы, пишущие о теории относительности, часто объясняют это следующим образом. Представим себе плоский кусок резины, натянутый на прямоугольную рамку. Апельсин, положенный на этот кусок, создает впадину. Мраморный шарик, помещенный вблизи апельсина, будет скатываться к нему. Апельсин не «притягивает» шарик. Он создает поле (впадину) такой структуры, что шарик, выбирая путь наименьшего сопротивления, скатывается к нему. Грубо (очень грубо) подобным же образом простран-

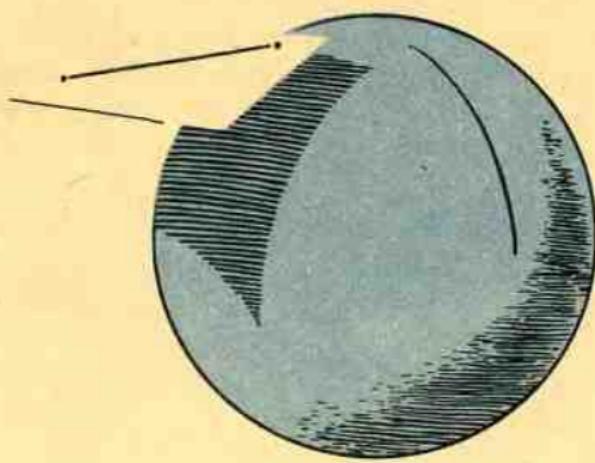
ство — время искривляется в присутствии больших масс, таких, как Солнце. Это искривление и есть поле тяготения. Планета, движущаяся вокруг Солнца, движется по эллипсу не потому, что Солнце притягивает ее, а благодаря особым свойствам поля; в этом поле эллипс представляет собой наиболее прямой путь, по которому планета может двигаться в пространстве — времени.

Такой путь называется геодезической линией. Это слово настолько важно в теории относительности, что его следует объяснить более подробно. На евклидовой плоскости, такой, как ровный лист бумаги, наиболее прямая линия между двумя точками есть прямая линия. Она является также кратчайшим расстоянием. На поверхности шара геодезическая линия между двумя точками есть дуга большого круга. Если натянуть веревку между этими точками, она отметит геодезическую линию. Последняя также представляет собой наиболее прямое и кратчайшее расстояние между двумя точками.

В четырехмерной евклидовой геометрии, где все измерения являются пространственными измерениями, геодезическая линия также есть кратчайшая и

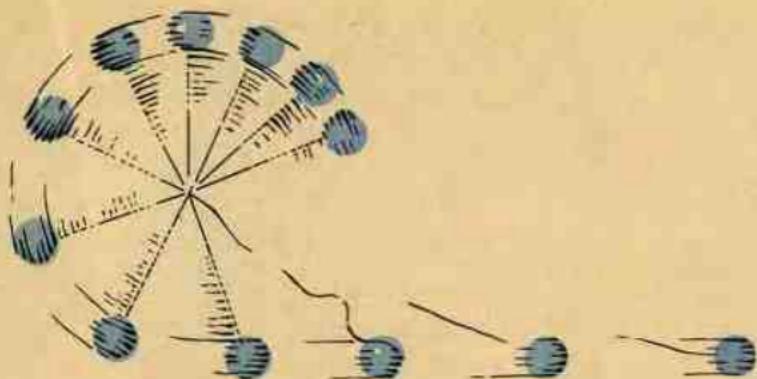


наиболее прямая линия, соединяющая две точки. Но в неевклидовой геометрии пространства — времени Эйнштейна это все не так просто. Имеется три пространственных измерения и одно временное измерение, объединенные согласно уравнениям теории относительности. Эти уравнения таковы, что геодезическая линия, хотя она по-прежнему остается наиболее прямым путем в пространстве — времени, есть длиннейшее, а не кратчайшее расстояние. Это понятие невозможно объяснить, не прибегая к сложному математическому аппарату, но последний дает следующий курьезный результат. Тело, движущееся под действием только тяготения, всегда выбирает такой путь, на прохождение которого требуется наибольшее время, если последнее измеряется по его собственным часам. Берtrand Рассел назвал это «законом космической лени». Яблоко падает по прямой



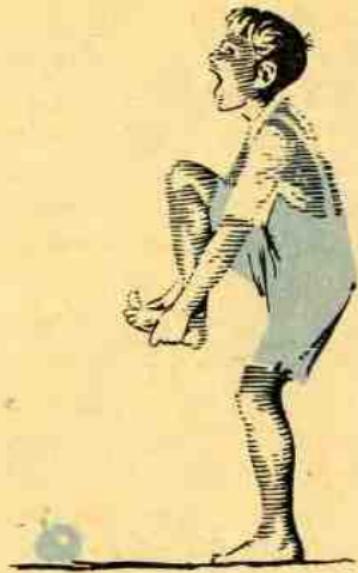
вниз, ракета движется по параболе, Земля движется по эллипсу потому, что они «слишком ленивы», чтобы выбрать другие пути.

Именно этот закон космической лени заставляет тела двигаться в пространстве — времени так, что иногда это движение объясняют инерцией, а в дру-



гих случаях тяготением. Если вы привяжете веревку к яблоку и закрутите ее по кругу, веревка не даст яблоку двигаться по прямой линии. Мы говорим, что инерция яблока натягивает веревку. Если веревка разорвется, яблоко полетит по прямой. Нечто подобное происходит, когда яблоко падает с дерева. До того как оно упадет, ветка не дает ему двигаться по четырехмерной прямой. Яблоко на ветке покоятся (по отношению к Земле), но оно движется во времени, так как непрерывно зреет. Если бы не было поля тяготения, это продвижение вдоль временной координаты изображалось бы прямой линией на четырехмерном графике. Но земное притяжение искривляет пространство — время в окрестностях яблока. Вследствие этого мировая линия яблока становится кривой. Когда яблоко срывается с ветки, оно продолжает двигаться в пространстве — времени, но (будучи ленивым яблоком) теперь выпрямляет свой путь и выбирает геодезическую линию. Мы видим эту геодезическую линию как линию, по которой падает яблоко, и приписываем падение притяжению. Однако, если бы захотели, мы могли бы сказать, что инерция яблока, после того как оно внезапно было сброшено со своего искривленного пути, привела его на Землю.

Допустим, что после того, как яблоко упало, мимо проходил мальчишка и поддал его босой ногой.



Он вскрикнул от боли, так как ушиб пальцы. Последователь Ньютона сказал бы, что инерция яблока сопротивлялась этому удару. Последователь Эйнштейна может сказать то же самое, но он может также сказать, если ему это больше нравится, что пальцы на ноге мальчишки заставили весь космос (включая и пальцы) ускоряться в обратном направлении, а это привело к созданию поля тяготения, которое с большой силой притянуло яблоко к пальцам. Все это вопрос формулировки. Математически эта ситуация описывается одной системой пространственно-временных уравнений поля, но о ней можно говорить (благодаря принципу эквивалентности) на языке любой из двух ньютоновских формул (гравитация, инерция).

Хотя теория относительности заменяет тяготение геометрическим искривлением пространства — времени, она оставляет без ответа многие важные вопросы. Происходит это искривление мгновенно во всем пространстве или распространяется подобно волнам? Большинство физиков считает, что искривление движется подобно волне и это движение проис-

ходит со скоростью света. Высказано даже предположение, что гравитационные волны состоят из крошечных неделимых частиц, обладающих конечной энергией и называемых «гравитонами». До сих пор, однако, ни один эксперимент не обнаружил ни волн, ни гравитонов.

Роберт Дик, физик из Принстонского университета, считает, что тяготение постепенно становится слабее и, возможно, в настоящее время оно на 13 процентов меньше, чем было четыре или пять миллиардов лет назад, когда образовалась Земля. Если это так, то Земля, вероятно, расширяется и ее поверхность трескается при этом процессе. Солнце также должно было бы расширяться. Два миллиарда лет назад оно должно было быть меньше, плотнее и горячее: этот факт мог бы объяснить тропические условия, которые господствовали на большей части Земли в ранние геологические эпохи. Все эти соображения в настоящее время являются только догадками, но, может быть, скоро удастся поставить эксперимент по проверке теории Дика.

Теория относительности дает новый способ рассмотрения и описания тяготения, но оно по-прежнему остается таинственным, малопонятным явлением. Никто не знает, как оно связано и связано ли вообще с электромагнетизмом. Эйнштейн и другие пытались разработать «теорию единого поля», которая объединила бы тяготение и электромагнетизм в одной системе математических уравнений. Результаты оказались неутешительными. Может быть, какой-нибудь юный читатель этих строк, если он обладает творческим гением Эйнштейна, когда-нибудь поймет, как сформулировать такую теорию.

Была ли подтверждена экспериментальными данными общая теория относительности? Да, хотя и не так полно, как специальная теория относительности. Одно подтверждение было получено при изучении орбиты Меркурия — ближайшей к Солнцу планеты. Орбита Меркурия представляет собой эллипс, но сам эллипс медленно поворачивается. С помощью уравнений тяготения Ньютона можно объяс-

нить это, если учесть влияние других планет, но предсказываемое при этом вращение получается немного более медленным, чем наблюдаемое в действительности. Уравнения Эйнштейна предсказывают вращение эллиптической орбиты планеты даже в отсутствие других планет; в случае Меркурия предсказанная орбита значительно ближе к действительной, чем орбита, предсказанная Ньютоном. Орбиты других планет гораздо более близки к круговым, поэтому этот эффект труднее наблюдать, но в последние годы были проведены измерения вращения орбит Венеры и Земли, которые находятся в хорошем согласии с уравнениями Эйнштейна.

Второе предсказание, сделанное Эйнштейном, состояло в том, что в спектре Солнца должно наблюдаться очень небольшое смещение в сторону красного края. Согласно уравнениям общей теории сильные поля тяготения оказывают замедляющее действие на время. Это означает, что любой ритмический процесс, такой, как колебания атома или тикание часов, на Солнце будет идти с немного меньшей скоростью, чем на Земле. В свою очередь это приведет к сдвигу спектра Солнца в сторону более длинных волн, что даст покраснение спектра. Такой сдвиг наблюдался, но он не является очень сильным подтверждением, так как ему можно дать очень много других объяснений*. Белая звезда — карлик, очень близкая к Сириусу, известная как спутник Сириуса, обладает массой, достаточной для того, чтобы создать красное смещение, в тридцать раз большее, чем Солнце. Оно также наблюдалось и является более сильным подтверждением. Однако самое сильное подтверждение действия тяготения на время было

* Уже после написания книги, в 1962 г., было сообщено о самых последних и самых точных измерениях величины красного сдвига в спектре Солнца. Бламонт и Родье в Медонской обсерватории (Франция), использовав совершенно новый метод, измерили красный сдвиг одной из линий поглощения стронция. Измеренная величина сдвига оказалась настолько близкой к предсказываемой общей теорией относительности, что впервые стало возможным говорить о действительно очень хорошем подтверждении теории.



получено недавно в лаборатории. О нем будет рассказано в конце гл. 8.

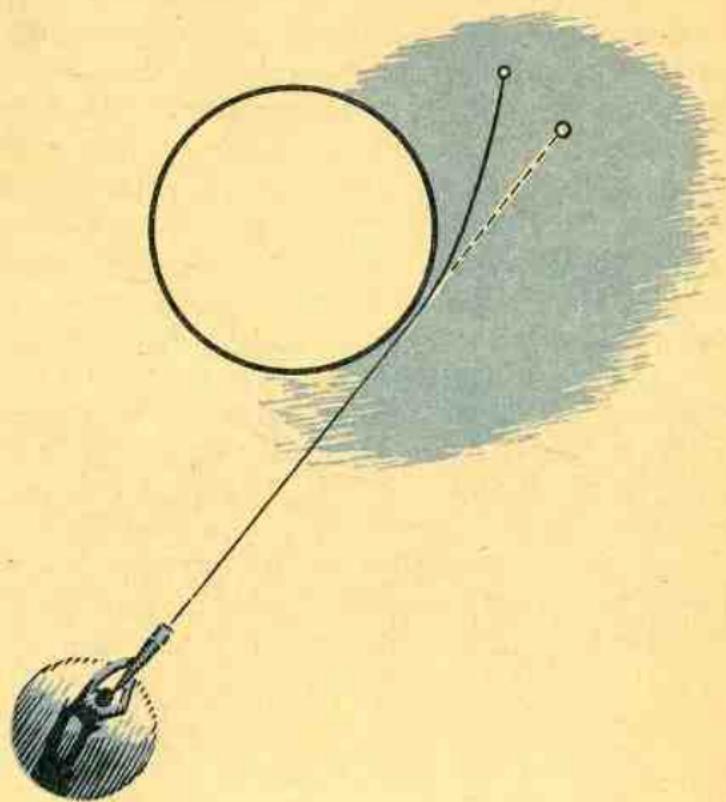
Наиболее сенсационная из всех проверок общей теории была проведена в 1919 г. во время полного затмения Солнца. Эйнштейн рассуждал следующим образом. Если лифт в межзвездном пространстве идет вверх с увеличивающейся скоростью, то луч света, идущий внутри лифта от стены к стене, будет отклоняться вниз, двигаясь по параболическому пути. Это можно объяснить инерцией, но согласно общей теории можно считать лифт неподвижной системой отсчета и рассматривать искривление луча как результат действия тяготения. Таким образом, тяготение может искривлять световые лучи. Это искривление слишком ничтожно, чтобы его можно было зарегистрировать с помощью какого-либо опыта, проводимого в лаборатории, но оно может быть измерено астрономами во время полного затмения Солнца. В результате того что солнечный свет задерживается Луной, звезды, расположенные вблизи края Солнца, становятся видимыми. Свет от этих звезд проходит через самую сильную часть поля тяготения Солнца. Любой сдвиг в видимых положениях этих звезд указывал бы на то, что тяготение Солнца изгибает путь света. Чем больше сдвиг, тем больше изгиб.

Следует помнить о следующем. Когда вы читаете об «искривлении» света в результате действия тяготения или инерции, вы должны иметь в виду,

что это только трехмерный способ описания явления. В пространстве путь света действительно искривляется. Но в четырехмерном мире Минковского пространства — времени свет, так же как и в классической физике, по-прежнему движется вдоль геодезической линии. Он выбирает возможный наиболее прямой путь. Наш воображаемый четырехмерный ученый на своей карте пространства — времени всегда изображал бы путь луча света прямой линией даже в том случае, если он проходит через сильные поля тяготения.

Эддингтон, английский астроном, возглавлял экспедицию ученых, которая в 1919 г. прибыла в Африку наблюдать полное затмение Солнца. Главной целью этой экспедиции было провести точные измерения положений звезд, расположенных вблизи солнечного диска. Физика Ньютона также предсказывала искривление света в поле тяготения, но уравнения Эйнштейна давали примерно вдвое большее отклонение. Таким образом, были возможны по крайней мере три различных результата опыта:

1. Изменений в положениях звезд могло не произойти.



2. Отклонение могло быть близко к тому, что предсказала физика Ньютона.

3. Отклонение могло быть близко к тому, что предсказал Эйнштейн.

Первый результат ниспровергал бы как уравнения Ньютона, так и уравнения общей теории относительности. Второй говорил бы в пользу Ньютона и против Эйнштейна. Третий говорил бы против Ньютона и в пользу Эйнштейна. Согласно популярному в то время анекдоту, два астронома из этой экспедиции обсуждали все три возможности.

«А что,— сказал один из них,— если мы получим отклонение, вдвое большее предсказанного Эйнштейном?»

«Тогда,— сказал другой,— Эддингтон сойдет с ума».

К счастью, отклонение оказалось близко к предсказанию Эйнштейна. Широкая реклама, созданная вокруг экспедиции Эддингтона, впервые привлекла внимание широкой публики к общей теории относительности. Сегодня астрономы скептически относятся к этому подтверждению. Трудности при проведении точных измерений положений звезд во время затмения оказались значительно большими, чем предполагал Эддингтон. Результаты, полученные во время различных затмений, наблюдавшихся после 1919 г., были несколько отличными. На конференции Королевского общества в Лондоне в феврале 1962 г. группа ученых обсудила этот вопрос. Они пришли к заключению, что так как трудности очень велики, то наблюдающим затмения не стоит больше пытаться проводить такие измерения.

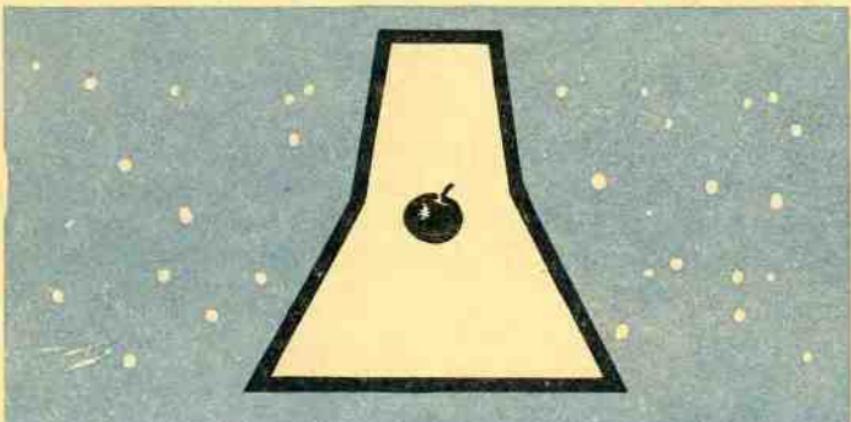
Несмотря на то что имеются опыты (все-таки их немного), подтверждающие общую теорию относительности, и огромное число опытов, еще не проводившихся и даже не обсуждавшихся, которые могли бы подтвердить ее еще лучше, возможны эксперименты, которые могли бы сильно дискредитировать эту теорию. Георгий Гамов, хорошо известный физик из Колорадского университета, описал один такой эксперимент, в котором участвуют античастицы.

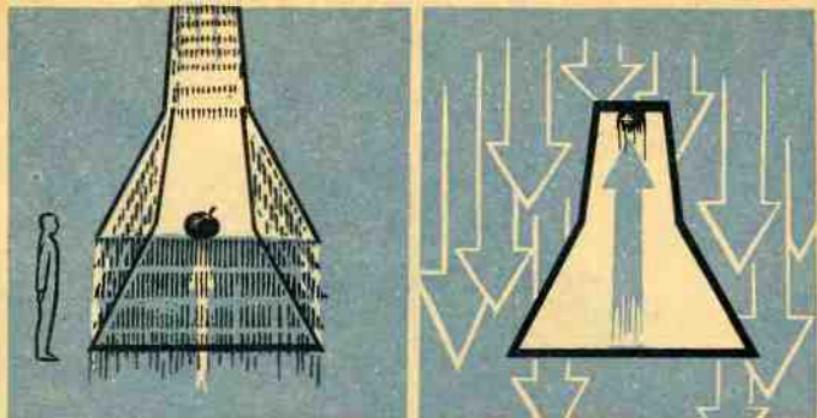
Как мы уже говорили, последние представляют собой элементарные частицы, во всем подобные частичкам обычной материи, но имеющие противоположный электрический заряд. Некоторые ученые считают, что античастицы могут иметь отрицательную массу. Если это так, любая действующая на них сила будет ускорять их в отрицательном направлении. Антияблоко, сделанное из антиматерии, улетело бы в небеса, вместо того чтобы упасть на нос Ньютону. Имеют античастицы отрицательную массу или нет, пока не установлено, но если это так, теория относительности окажется перед серьезными затруднениями.

Чтобы понять, почему должны появиться трудности, представим себе космический корабль, покоящийся по отношению к звездам. В центре одного из его отсеков плавает одно антияблоко с отрицательной массой. Корабль начинает двигаться в направлении к потолку с ускорением в одно g (g — это ускорение, с которым тела падают на Землю, равное примерно 9,8 м/сек за 1 сек. Последнее означает, что каждую секунду скорость увеличивается на 9,8 м/сек).

Что произойдет с яблоком?

С точки зрения наблюдателя вне корабля, связанного с инерциальной системой космоса, яблоко по отношению к звездам должно остаться на том же самом месте, где оно было. На него не действует никакая сила. Корабль не прикасается к яблоку, он мог бы вообще находиться очень далеко от него. Следовательно, пол отсека будет двигаться вверх до



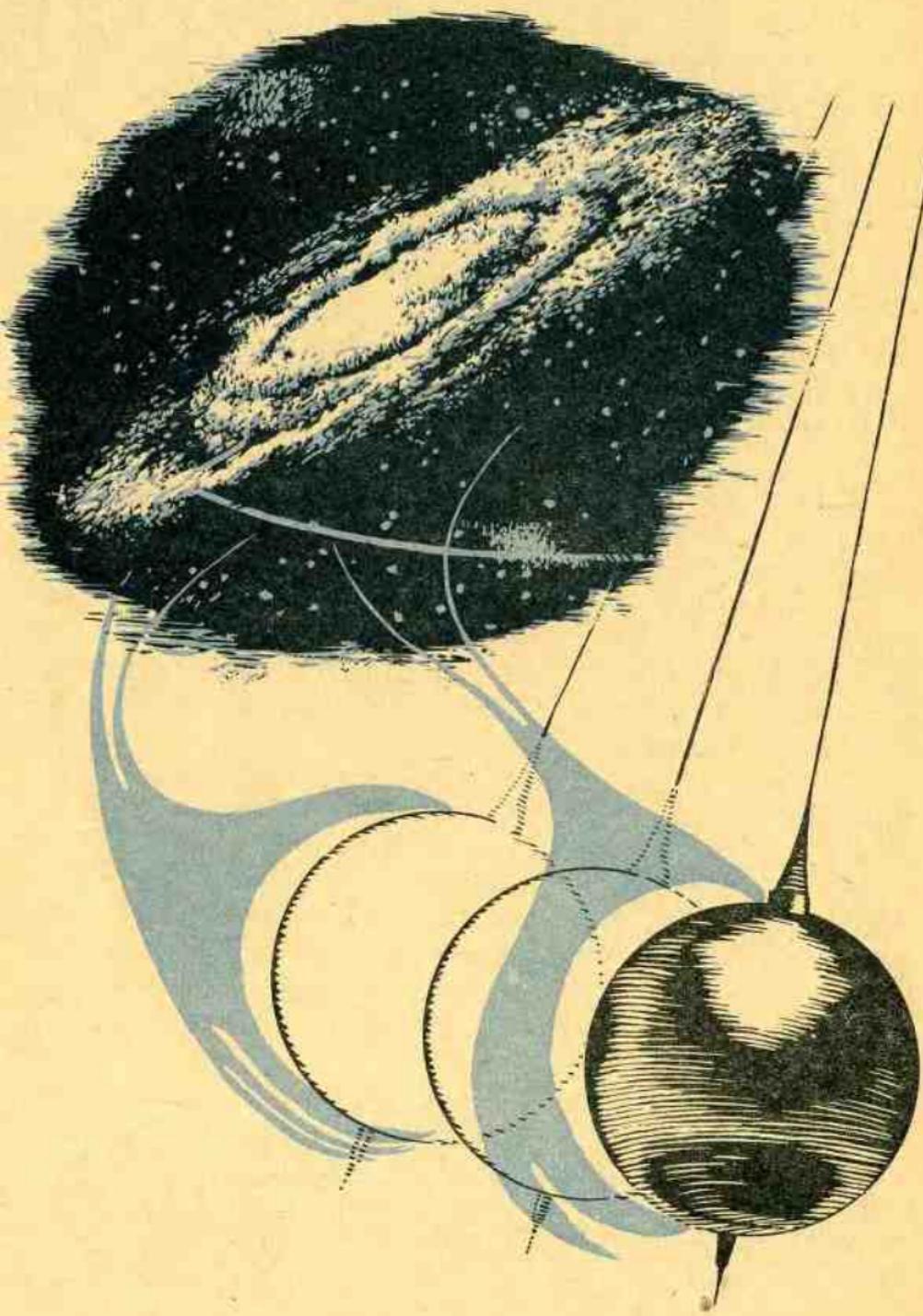


тех пор, пока не ударится в яблоко. (В этом мысленном эксперименте мы не беспокоимся о том, что случится, когда пол ударится об яблоко.)

Ситуация полностью изменится, если принять корабль в качестве неподвижной системы отсчета. Теперь наблюдатель должен предположить наличие поля тяготения, действующего внутри корабля. Это поле пошлет яблоко к потолку с ускорением (по отношению к звездам) два g . Основной принцип относительности нарушается. Две системы отсчета не взаимозаменяемы.

Иными словами, понятие отрицательной массы нелегко примирить с общей теорией относительности, тогда как ньютоновский подход к инерции свободно его допускает. Классическая физика попросту принимает первую точку зрения. Корабль находится в абсолютном движении относительно эфира. Яблоко остается в абсолютном покое. Не появляется никаких полей тяготения, которые запутали бы эту картину.

Открытие отрицательной массы и сопровождающего ее эффекта антигравитации, заключает Гамов, «заставило бы нас выбирать между законом инерции Ньютона и принципом эквивалентности Эйнштейна. Автор горячо надеется, что этого никогда не будет».



7

Принцип Маха

Принцип эквивалентности Эйнштейна гласит, что силовое поле, возникающее тогда, когда телу сообщается ускорение или вращение, в зависимости от выбора системы отсчета может рассматриваться как инерционное или как гравитационное. Но при этом возникает очень важный вопрос, который ведет к глубоким, еще не решенным задачам.

Являются эти силовые поля результатом движения по отношению к пространству — времени, существующему независимо от вещества, или само пространство — время создано веществом? Иначе говоря, создается ли пространство — время галактиками и другими телами Вселенной?

Мнения специалистов разошлись. Все старые доводы восемнадцатого и девятнадцатого веков о су-

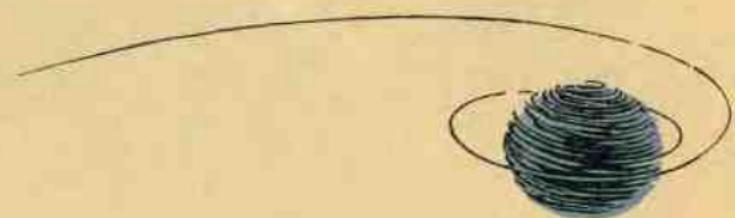
ществовании «пространства» или «эфира», независимого от вещества, высказываются и сейчас; но только теперь спорят о пространственно-временной структуре (иногда называемой «метрическим полем») космоса. Большинство ученых, писавших о теории относительности (Артур Эддингтон, Берtrand Рассел, Альфред Уайтхед и др.), считали, что свойства пространства — времени не зависят от звезд, хотя, конечно, местные искривления создаются звездами. Грубо говоря, если бы не существовало никаких других тел во Вселенной, кроме Земли, то было бы возможно, утверждают эти авторы, вращение Земли относительно пространства — времени. (Вопрос о том, какой кривизной в целом — положительной, отрицательной или нулевой — обладает это пространство, не имеет отношения к данному спору.) Одинокий космический корабль, единственное тело во Вселенной, мог бы включить свои двигатели и ускориться. Космонавты внутри корабля при ускорении почувствовали бы действие сил инерции. Однокая Земля, вращаясь в пространстве, сплющивалась бы в направлении экватора. Сплющивание возникло бы из-за того, что частицы вещества испытывали бы действие сил, двигаясь не по геодезическим в пространстве — времени. Частицы должны были бы двигаться, так сказать, против «шерсти» пространства — времени. Было бы даже возможно на этой одинокой Земле измерить силу инерции, называемую кориолисовой*, и определить направление вращения Земли.

Эйнштейн признавал возможную справедливость подобной точки зрения, но (по крайней мере в молодости) она ему была не по душе. Он предпочитал точку зрения, впервые предложенную ирландским

* Вращение Земли вызывает отклонение межконтинентальной ракеты, летящей на север или юг, направо в северном полушарии и налево в южном. Это инерционное явление называется кориолисовой силой по имени Кориолиса, французского инженера начала девятнадцатого века, впервые его полностью проанализировавшего. Циклоны и другие круговые движения в атмосфере являются прямым следствием кориолисовых сил.

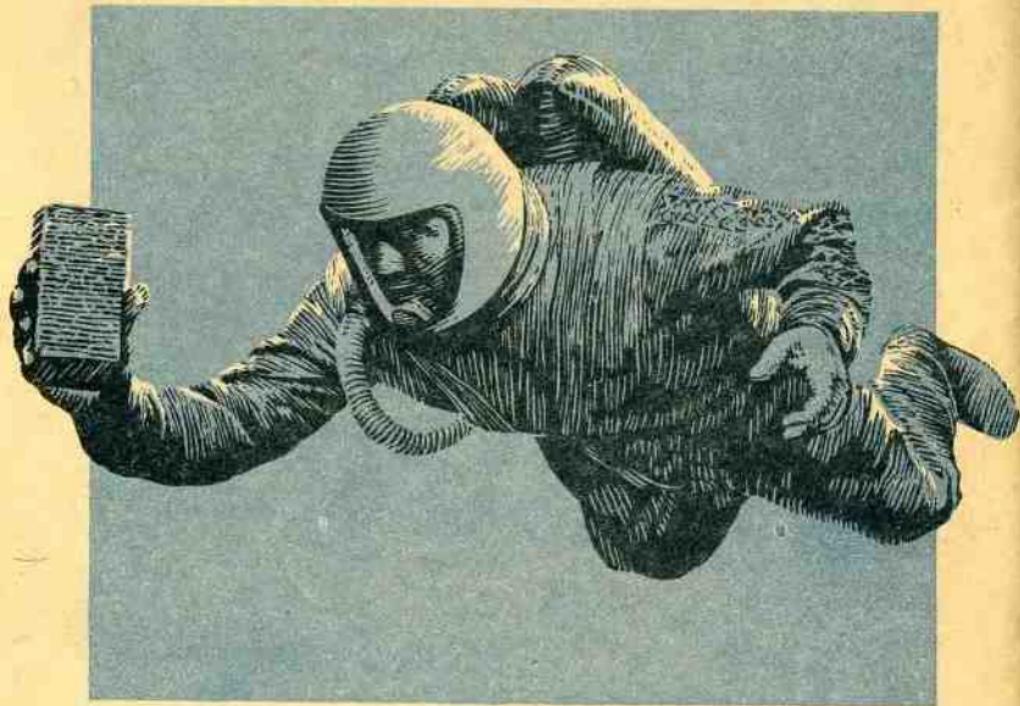
философом епископом Беркли. Беркли доказывал, что если Земля — единственное тело во Вселенной, то бессмысленно говорить о возможности ее вращения. Подобный взгляд в какой-то степени разделяли немецкий философ семнадцатого столетия Лейбниц и голландский физик Христиан Гюйгенс, но он был забыт, пока Эрнст Мах (австрийский физик девятнадцатого века) не возродил его, предложив правдоподобную научную теорию. Мах предвосхитил многое в теории относительности, и Эйнштейн писал о большом влиянии Маха на его ранние мысли. (С грустью нужно признать, что Мах в старости, когда его мысли нашли свое отражение в теории Эйнштейна, отказался признать справедливость теории относительности.)

С точки зрения Маха, космос, лишенный звезд, не будет иметь той пространственно-временной структуры, по отношению к которой могла бы вращаться Земля. Для существования гравитационных (или инерционных) полей, способных сплющить планету или поднять жидкость на стенку вращающегося ведра, необходимо существование звезд, создающих структуру пространства — времени. Не имея такой структуры, пространство — время не имело бы и геодезических. Мы не могли бы даже сказать, что пучок света, распространяющийся в полностью пустом пространстве, двигался бы по геодезической, так как при отсутствии пространственно-временной структуры пучок не смог бы предпочесть одну траекторию другой. Как выразился А. д'Абро (в своей превосходной книге «Эволюция научной мысли»), пучок не знал бы, по какому пути



пойти. Даже существование сферического тела, подобного Земле, было бы невозможным. Частицы Земли собраны воедино тяготением, а тяготение передвигает частицы по геодезическим. Не будь структуры у пространства — времени, не будь геодезических, Земля (по словам д'Абро) не знала бы, какую форму ей принять. Об этой точке зрения Эддингтон однажды сказал юмористически: «В полностью пустой Вселенной (если Мах прав) гравитационные поля Эйнштейна должны рухнуть!»

Д'Абро описывает мысленный опыт, помогающий понять позицию Маха. Представим космонавта, витающего в пространстве. Пусть он единственное тело во Вселенной. В руке у него кирпич. Мы знаем, что кирпич должен быть невесом (нет гравитационной массы). Будет ли у него инертная масса? Если космонавт попытается кинуть кирпич в пространство, возникнет ли сопротивление движению его руки? С точки зрения Маха, его не должно быть. В отсутствие звезд, создающих метрическое поле про-



странства — времени, нет ничего, по отношению к чему мог бы ускориться кирпич. Есть, конечно, космонавт, но его масса так мала, что любыми эффектами, связанными с ним, можно пренебречь.

Эйнштейн для точки зрения Маха применял термин «принцип Маха». Вначале Эйнштейн надеялся, что эта точка зрения может быть введена в теорию относительности. И действительно, он создал модель Вселенной (о ней будет рассказано в гл. 9), в которой пространственно-временное строение Вселенной существует лишь постольку, поскольку существуют создающие ее звезды и другие материальные тела. «В последовательной теории относительности,— писал Эйнштейн в 1917 г., публикуя первое математическое описание этой модели,— не может быть никакой инерции относительно «пространства», а лишь инерция масс по отношению друг к другу. Если, следовательно, я удалю какую-то массу достаточно далеко от всех других масс Вселенной, ее инерция упадет до нуля».

Позже был найден серьезный изъян в космической модели Эйнштейна, и он был вынужден отказаться от принципа Маха, но этот принцип продолжает оказывать серьезное влияние и на современных космологов. Это происходит потому, что относительность движения доведена в нем до предела. Противоположная точка зрения, предполагающая существование пространственно-временной метрики даже в отсутствие звезд, в действительности очень близка к старой теории эфира. Вместо неподвижного, невидимого студня, именуемого эфиром, предлагается неподвижная, невидимая структура пространства — времени. Если принять это предположение, то ускорения и вращения приобретают подозрительно абсолютный характер. И действительно, проповедники этой точки зрения без колебаний говорят о вращениях и ускорениях как об «абсолютных». Однако если явления инерции относительны, но не по отношению к такой структуре, а лишь по отношению к структуре, созданной звездами, то относительность выступает в своем наиболее чистом виде.

Деннис Скьяма, английский космолог, идя по пути Маха, создал остроумную теорию. Ее занимательное изложение дано в его популярной книге «Единство Вселенной». Согласно Скьяма, инерционные явления, возникающие при вращении и ускорении, являются результатом движения по отношению ко всему веществу во Вселенной. Если это так, то измерения инерции дают метод оценки полного количества вещества во Вселенной! Уравнения Скьяма показывают, что влияние ближайших звезд на инерцию поразительно мало. Все звезды в нашей Галактике, по его расчету, дают примерно лишь одну десятимиллионную часть силы инерции на Земле. Главная часть этой силы создается далекими галактиками. Скьяма оценил, что 80 процентов силы инерции являются результатом движения относительно галактик, настолько удаленных, что их еще не видно в наших телескопах!

Во времена Маха не было известно, что кроме нашей Галактики существуют и другие галактики, не было известно даже, что наша Галактика вращается. Сейчас астрономы знают, что центробежные силы, возникающие при вращении, очень сильно сплющивают нашу Галактику. С точки зрения Маха, это сплющивание могло произойти только в том случае, если вне нашей Галактики существуют огромные массы вещества. Знай Мах о явлениях инерции при вращении нашей Галактики, указывает Скья-

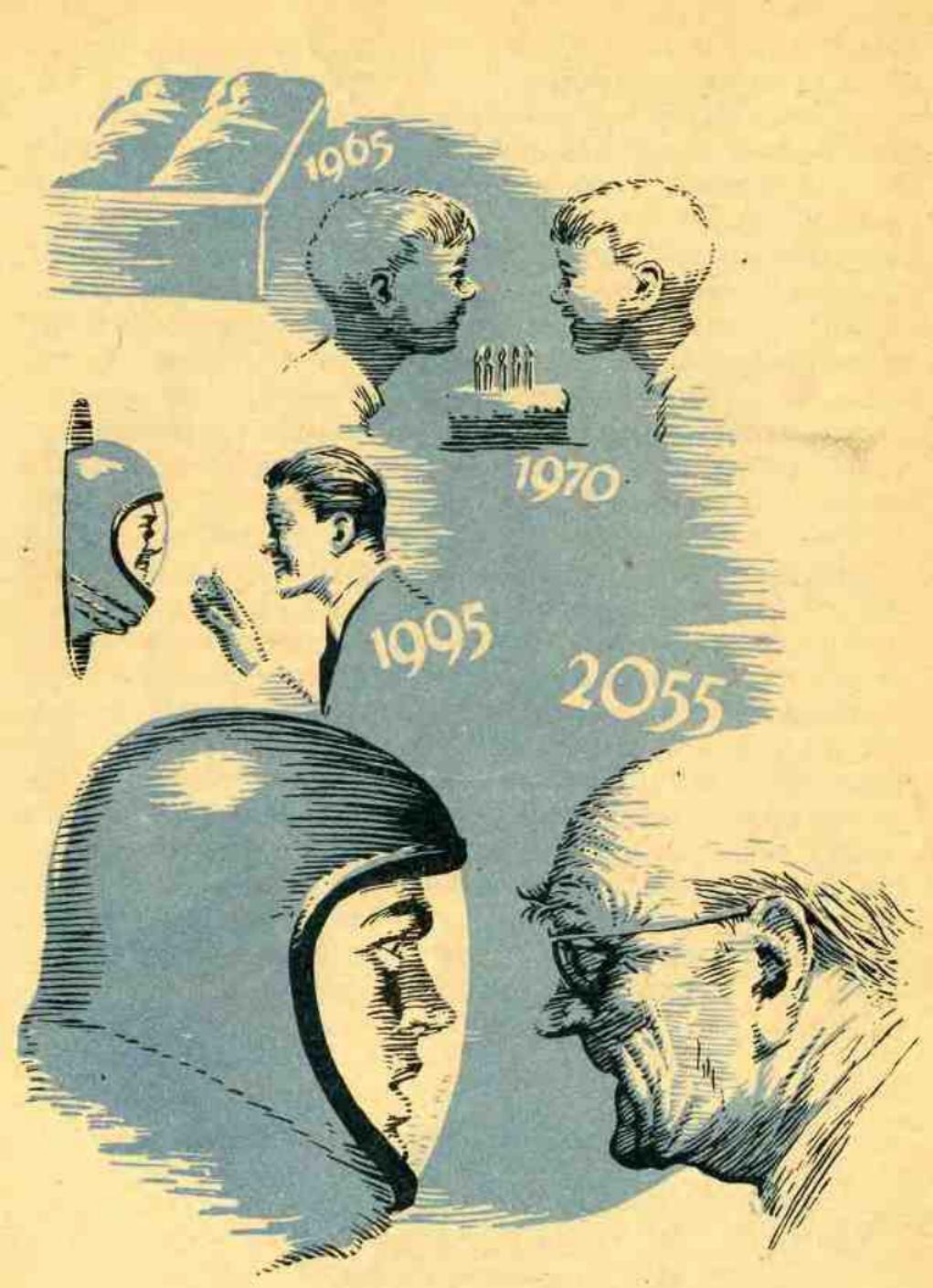


ма, он мог бы предсказать существование и других галактик за пятьдесят лет до их открытия.

Необычность точки зрения Скьяма станет более наглядной со следующей иллюстрацией. Однажды я купил головоломку, представляющую собой квадратную коробочку со стеклянной крышкой, внутри которой было четыре стальных шарика. Каждый шарик располагался в желобке, шедшем от центра квадрата к одному из его углов. Задача состояла в том, чтобы загнать одновременно все четыре шарика в углы. Единственный способ сделать это — положить головоломку на стол и привести ее во вращение. Центробежная сила — вот что помогает решить эту головоломку. Если Скьяма прав, то эту головоломку нельзя было бы разгадать подобным способом, не будь миллиардов галактик на громадных расстояниях от нашей.

Будет ли теория относительности развиваться по направлению, указанному Махом и Скьяма, или сохранится не зависящая от звезд структура пространства — времени? На это никто не может ответить. Если будет успешно развиваться теория поля, в которой элементарные частицы вещества можно будет понять как пространственно-временное поле, то звезды сами по себе станут всего лишь одним из проявлений такого поля. Вместо звезд, создающих структуру, структура будет создавать звезды. В настоящее время, однако, все это лишь предположения.





8

Парадокс близнецов

Какова была реакция всемирно известных ученых и философов на странный, новый мир относительности? Она была различной. Большинство физиков и астрономов, смущенные нарушением «здравого смысла» и математическими трудностями общей теории относительности, хранили благородное молчание. Но ученые и философы, способные понять теорию относительности, встретили ее с радостью. Мы уже упоминали, как быстро Эддингтон осознал важность достижений Эйнштейна. Морис Шлик, Берtrand Рассел, Рудольф Кернэп, Эрнст Кассирер, Альфред Уайтхед, Ганс Рейхенбах и многие другие выдающиеся философы были первыми энтузиастами, которые писали об этой теории и старались выяснить все ее следствия. Кни-

га Рассела «Азбука теории относительности» была впервые опубликована в 1925 г., но до сих пор она остается одним из лучших популярных изложений теории относительности.

Многие ученые оказались неспособными освободиться от старого, ньютоновского образа мыслей. Они во многом напоминали ученых далеких дней Галилея, которые не могли заставить себя признать, что Аристотель мог ошибаться. Сам Майкельсон, знания математики которого были ограниченными, так и не признал теории относительности, хотя его великий эксперимент проложил путь специальной теории. Позже, в 1935 г., когда я был студентом Чикагского университета, курс астрономии читал нам профессор Вильям Макмиллан, широко известный ученый. Он открыто говорил, что теория относительности — это печальное недоразумение.

«Мы, современное поколение, слишком нетерпеливы, чтобы чего-нибудь дождаться», — писал Макмиллан в 1927 г. «За сорок лет, прошедших после попытки Майкельсона обнаружить ожидавшееся движение Земли относительно эфира, мы отказались от всего, чему нас учили раньше, создали постулат, самый бессмысленный из всех, который мы только смогли придумать, и создали неньютоновскую механику, согласующуюся с этим постулатом. Достигнутый успех — превосходная дань нашей умственной активности и нашему остроумию, но нет уверенности, что нашему здравому смыслу».

Самые разнообразные возражения выдвигались против теории относительности. Одно из наиболее ранних и наиболее упорных возражений высказывалось относительно парадокса, впервые упомянутого самим Эйнштейном в 1905 г. в его статье о специальной теории относительности (слово «парадокс» употребляется для обозначения чего-то противоположного общепринятыму, но логически непротиворечивого).

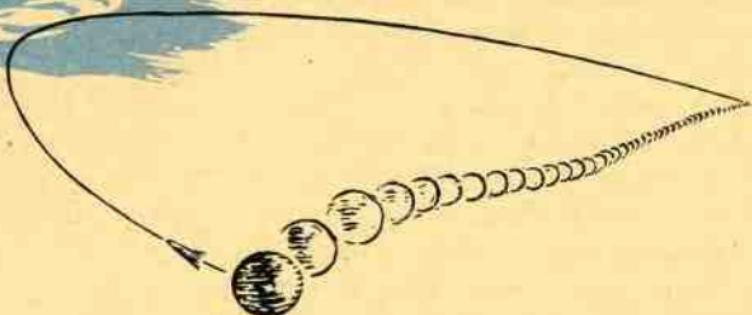
Этому парадоксу уделяется много внимания в современной научной литературе, поскольку разви-

тие космических полетов наряду с конструированием фантастически точных приборов для измерения времени может вскоре дать способ проверки этого парадокса прямым способом.

Этот парадокс обычно излагается как мысленный опыт с участием близнецов. Они сверяют свои часы. Один из близнецов на космическом корабле совершает длительное путешествие в космосе. Когда он возвращается, близнецы сравнивают показания часов. Согласно специальной теории относительности часы путешественника покажут несколько меньшее время. Другими словами, время в космическом корабле движется медленнее, чем на Земле. До тех пор, пока космический маршрут ограничен солнечной системой и совершается с относительно малой скоростью, эта разница времен будет пренебрежимо малой. Но на больших расстояниях и при скоростях, близких к скорости света, «сокращение времени» (так иногда называют это явление) будет возрастать. Нет ничего невероятного в том, что со временем будет открыт способ, с помощью которого космический корабль, медленно ускоряясь, сможет достичь скорости, лишь немногого меньшей скорости света. Это даст возможность посещать другие звезды в нашей Галактике, а возможно, даже и другие галактики. Итак, парадокс близнецов — больше чем просто головоломка для гостиной, когда-нибудь он станет повседневностью космических путешественников.

Допустим, что космонавт — один из близнецов — проходит расстояние в тысячу световых лет и возвращается: это расстояние мало по сравнению с размерами нашей Галактики. Есть ли уверенность, что космонавт не умрет задолго до конца пути? Не потребуется ли для его путешествия, как во многих научно-фантастических произведениях, целой колонии мужчин и женщин, поколениями живущих и умирающих, пока корабль совершает свое длинное межзвездное путешествие?

Ответ зависит от скорости движения корабля. Если путешествие будет происходить со скоростью,



близкой к скорости света, время внутри корабля будет течь много медленней. По земному времени путешествие будет продолжаться, конечно, более 2000 лет. С точки зрения космонавта, в корабле, если он движется достаточно быстро, путешествие может продлиться лишь несколько десятилетий!

Для тех читателей, которые любят численные примеры, приведем результат недавних расчетов Эдвина Макмиллана, физика из Калифорнийского университета в Беркли. Некий космонавт отправился с Земли к спиральной туманности Андромеды. До нее немного меньше двух миллионов световых лет. Космонавт первую половину дороги проходит с постоянным ускорением $2g$, затем с постоянным замедлением в $2g$ вплоть до достижения туманности. (Это удобный способ создания постоянного поля тяготения внутри корабля на все время длинного путешествия без помощи вращения.) Обратный путь совершается тем же способом. Согласно собственным часам космонавта продолжительность путешествия составит 29 лет. По земным часам пройдет почти 3 миллиона лет!

Вы сразу заметили, что возникают самые разнообразные привлекательные возможности. Сорокалетний ученый и его юная лаборантка влюбились друг в друга. Они чувствуют, что разница в возрасте делает их свадьбу невозможной. Поэтому он отправляется в длинное космическое путешествие, передвигаясь со скоростью, близкой к скорости све-

та. Он возвращается в возрасте 41 года. Тем временем его подруга на Земле стала тридцатитрехлетней женщиной. Вероятно, она не смогла ждать возвращения любимого 15 лет и вышла замуж за кого-то другого. Ученый не может вынести этого и отправляется в другое продолжительное путешествие, тем более что ему интересно выяснить отношение последующих поколений к одной, созданной им теории, подтверждают они ее или опровергнут. Он возвращается на Землю в возрасте 42 лет. Подруга его прошлых лет давно умерла, и, что еще хуже, от его столь дорогой ему теории ничего не осталось. Оскорбленный, он отправляется в еще более длинный путь, чтобы, возвратившись в возрасте 45 лет, увидеть мир, проживший уже несколько тысячелетий. Возможно, что, подобно путешественнику из романа Уэллса «Машина времени», он обнаружит, что человечество выродилось. И вот тут он «сидет на мель». «Машина времени» Уэллса могла передвигаться в обоих направлениях, а у нашего однокого ученого не будет способа вернуться обратно в привычный ему отрезок человеческой истории.

Если такие путешествия во времени станут возможными, то возникнут совершенно необычные моральные вопросы. Будет ли что-нибудь незаконного в том, например, что женщина вышла замуж за собственного пра-пра-пра-пра-правнука?

Заметьте, пожалуйста: этот сорт путешествий во времени обходит все логические ловушки (этот бич научной фантастики), как, например, возможность попасть в прошлое и убить собственных родителей до вашего появления на свет или юркнуть в будущее и подстрелить самого себя, послав пулю в лоб. Рассмотрим, например, положение с мисс Кэт из известного шуточного стишка:

Юная леди по имени Кэт
Двигалась много быстрее, чем свет.
Но попадала всегда не туда:
Быстро помчишься — придешь во вчера *.

* Перевод А. И. Базя.

Возвратись она вчера, она должна была бы встретиться со своим двойником. В противном случае это не было бы действительно вчера. Но вчера не могло быть двух мисс Кэт, поскольку, отправляясь в путешествие во времени, мисс Кэт ничего не помнила о своей встрече со своим двойником, стоявшейся вчера. Итак, перед вами логическое противоречие. Такого типа путешествия во времени невозможны логически, если не предполагать существования мира, идентичного нашему, но движущегося по другому пути во времени (на день раньше). Даже при этом положение дел очень усложняется.

Заметьте также, что эйнштейновская форма путешествий во времени не приписывает путешественнику какого-то подлинного бессмертия или хотя бы долголетия. С точки зрения путешественника, старость подходит к нему всегда с нормальной скоростью. И лишь «собственное время» Земли кажется этому путешественнику несущимся с головокружительной скоростью.

Анри Бергсон, известный французский философ, был наиболее выдающимся из мыслителей, скреп-



тивших шпаги с Эйнштейном из-за парадокса близнецов. Он много писал об этом парадоксе, потешаясь над тем, что казалось ему логически абсурдным. К сожалению, все им написанное доказало лишь то, что можно быть крупным философом без заметных знаний математики. В последние несколько лет протесты появились снова. Герберт Дингль, английский физик, «наиболее громко» отказывается поверить в парадокс. Уже немало лет он пишет острумные статьи об этом парадоксе и обвиняет специалистов по теории относительности то в тупости, то в изворотливости. Поверхностный анализ, который будет проведен нами, конечно, не разъяснит полностью идущую полемику, участники которой быстро углубляются в сложные уравнения, но поможет уяснить общие причины, приведшие к почти единодушному признанию специалистами того, что парадокс близнецов будет осуществляться именно так, как написал об этом Эйнштейн.

Возражение Дингля, наиболее сильное из когда-либо выдвинутых против парадокса близнецов, заключается в следующем. Согласно общей теории относительности не существует никакого абсолютного движения, нет «избранной» системы отсчета. Всегда можно выбрать движущийся предмет за неподвижную систему отсчета, не нарушая при этом никаких законов природы. Когда за систему отсчета принята Земля, то космонавт совершает длительное путешествие, возвращается и обнаруживает, что стал моложе брата-домоседа. А что произойдет, если систему отсчета связать с космическим кораблем? Теперь мы должны считать, что Земля проделала длительное путешествие и возвратилась назад. В этом случае домоседом будет тот из близнецов, который находился в космическом корабле. Когда Земля возвратится, не станет ли брат, находившийся на ней, моложе? Если так произойдет, то в создавшемся положении парадоксальный вызов здравому смыслу уступит место очевидному логическому противоречию. Ясно, что каждый из близнецов не может быть моложе другого.

Дингль хотел бы сделать из этого вывод: или необходимо предположить, что по окончании путешествия возраст близнецов будет в точности одинаков, или принцип относительности должен быть отброшен.

Не выполняя никаких вычислений, нетрудно понять, что кроме этих двух альтернатив существуют и другие. Верно, что всякое движение относительно, но в данном случае имеется одно, очень важное различие между относительным движением космонавта и относительным движением домоседа. Домосед неподвижен относительно Вселенной.

Как эта разница сказывается на парадоксе?

Допустим, что космонавт отправляется проводить планету X где-то в Галактике. Его путешествие проходит при постоянной скорости. Часы домоседа связаны с инерциальной системой отсчета Земли, и их показания совпадают с показаниями всех остальных часов на Земле потому, что все они неподвижны по отношению друг к другу. Часы космонавта связаны с другой инерциальной системой отсчета, с кораблем. Если бы корабль постоянно придерживался одного направления, то не возникло бы никакого парадокса вследствие того, что не было бы никакого способа сравнить показания обоих часов. Но у планеты X корабль останавливается и поворачивает обратно. При этом инерциальная система отсчета изменяется: вместо системы отсчета, движущейся от Земли, появляется система, движущаяся к Земле. При таком изменении возникают громадные силы инерции, поскольку при повороте корабль испытывает ускорение. И если ускорение при повороте будет очень большим, то космонавт (а не его брат-близнец на Земле) погибнет. Эти силы инерции возникают, конечно, из-за того, что космонавт ускоряется по отношению к Вселенной. Они не возникают на Земле, потому что Земля не испытывает такого ускорения.

С одной точки зрения, можно было бы сказать, что силы инерции, созданные ускорением, «вызывают» замедление часов космонавта; с другой точки

зрения, возникновение ускорения просто обнаруживает изменение системы отсчета. Вследствие такого изменения мировая линия космического корабля, его путь на графике в четырехмерном пространстве — времени Минковского изменяется так, что полное «собственное время» путешествия с возвратом оказывается меньше, чем полное собственное время вдоль мировой линии близнеца-домоседа. При изменении системы отсчета существует ускорение, но в расчет входят только уравнения специальной теории.

Возражение Дингля все еще сохраняется, так как точно те же вычисления можно было бы проделать и при предположении, что неподвижная система отсчета связана с кораблем, а не с Землей. Теперь в путь отправляется Земля, затем она возвращается обратно, меняя инерциальную систему отсчета. Почему бы не проделать те же вычисления и на основе тех же уравнений не показать, что время на Земле отстало? И эти вычисления были бы справедливы, не будь одного необычайной важности факта: при движении Земли вся Вселенная двигалась бы вместе с нею. При повороте Земли поворачивалась бы и Вселенная. Это ускорение Вселенной создало бы мощное гравитационное поле. А как уже было показано, тяготение замедляет часы. Часы на Солнце, например, тикают реже, чем такие же часы на Земле, а на Земле реже, чем на Луне. После выполнения всех расчетов оказывается, что гравитационное поле, созданное ускорением космоса, замедлило бы часы в космическом корабле по сравнению с земными в точности на столько же, на сколько они замедлялись в предыдущем случае. Гравитационное поле, конечно, не повлияло на земные часы. Земля неподвижна относительно космоса, следовательно, на ней и не возникало дополнительного гравитационного поля.

Поучительно рассмотреть случай, при котором возникает точно такая же разница во времени, хотя никаких ускорений нет. Космический корабль А пролетает мимо Земли с постоянной скоростью, на-

правляясь к планете X. В момент прохождения корабля мимо Земли часы на нем устанавливаются на ноль. Корабль А продолжает свое движение к планете X и проходит мимо космического корабля Б, движущегося с постоянной скоростью в противоположном направлении. В момент наибольшего сближения корабль А по радио сообщает кораблю Б время (измеренное по своим часам), прошедшее с момента пролета им мимо Земли. На корабле Б запоминают эти сведения и продолжают с постоянной скоростью двигаться к Земле. Проходя мимо Земли, они сообщают на Землю сведения о времени, затраченном А на путешествие с Земли до планеты X, а также время, затраченное Б (и измеренное по его часам) на путешествие от планеты X до Земли. Сумма этих двух промежутков времени будет меньше, чем время (измеренное по земным часам), протекшее с момента прохождения А мимо Земли до момента прохождения Б.

Эта разница во времени может быть вычислена по уравнениям специальной теории. Никаких ускорений здесь не было. Конечно, в данном случае нет и парадокса близнецов, поскольку нет космонавта, улетевшего и возвратившегося назад. Можно было бы предположить, что путешествующий близнец отправился на корабле А, затем пересел на корабль Б и вернулся обратно; но этого нельзя сделать без перехода от одной инерциальной системы отсчета к другой. Чтобы сделать такую пересадку, он должен был бы подвергнуться действию потрясающие мощных сил инерции. Эти силы вызывались бы тем, что изменилась его система отсчета. При желании мы могли бы сказать, что силы инерции замедлили часы близнеца. Однако если рассматривать весь эпизод с точки зрения путешествующего близнеца, связав его с неподвижной системой отсчета, то в рассуждения войдет сдвигающийся космос, создавший гравитационное поле. (Главный источник путаницы при рассмотрении парадокса близнецов заключается в том, что положение может быть описано с разных точек зрения.) Независимо от принят-

той точки зрения уравнения теории относительности всегда дают одну и ту же разницу во времени. Эту разницу можно получить, пользуясь одной лишь специальной теорией. И вообще для обсуждения парадокса близнецов мы привлекли общую теорию лишь для того, чтобы опровергнуть возражения Дингля.

Часто бывает невозможно установить, какая из возможностей «правильная». Путешествующий близнец летает туда и обратно или это проделывает домосед вместе с космосом? Есть факт: относительное движение близнецов. Имеется, однако, два различных способа рассказать об этом. С одной точки зрения, изменение инерциальной системы отсчета космонавта, создающее силы инерции, приводит к разнице в возрасте. С другой точки зрения, действие сил тяготения перевешивает эффект, связанный с изменением Землей инерциальной системы. С любой точки зрения домосед и космос неподвижны по отношению друг к другу. Итак, положение полностью различно с разных точек зрения, несмотря на то что относительность движения строго сохраняется. Парадоксальная разница в возрасте объясняется независимо от того, какой из близнецов считается покоящимся. Нет необходимости отбрасывать теорию относительности.

А теперь может быть задан интересный вопрос. Что, если в космосе нет ничего, кроме двух космических кораблей, А и Б? Пусть корабль А, используя свой ракетный двигатель, ускорится, совершил длинное путешествие и вернется назад. Будут ли предварительно синхронизированные часы на обоих кораблях вести себя по-прежнему?

Ответ будет зависеть от того, чьего взгляда на инерцию вы придерживаетесь — Эддингтона или Дениса Скьяма. С точки зрения Эддингтона — «да». Корабль А ускоряется по отношению к пространственно-временной метрике космоса; корабль Б — нет. Их поведение несимметрично и приведет к обычной разнице в возрасте. С точки зрения Скьяма — «нет». Имеет смысл говорить об ускорении

только по отношению к другим материальным телам. В данном случае единственными предметами являются два космических корабля. Положение полностью симметрично. И действительно, в данном случае нельзя говорить об инерциальной системе отсчета потому, что нет инерции (кроме крайне слабой инерции, созданной присутствием двух кораблей). Трудно предсказать, что случилось бы в космосе без инерции, если бы корабль включил свои ракетные двигатели! Как выразился с английской осторожностью Скьяма: «Жизнь была бы совсем другой в такой Вселенной!»

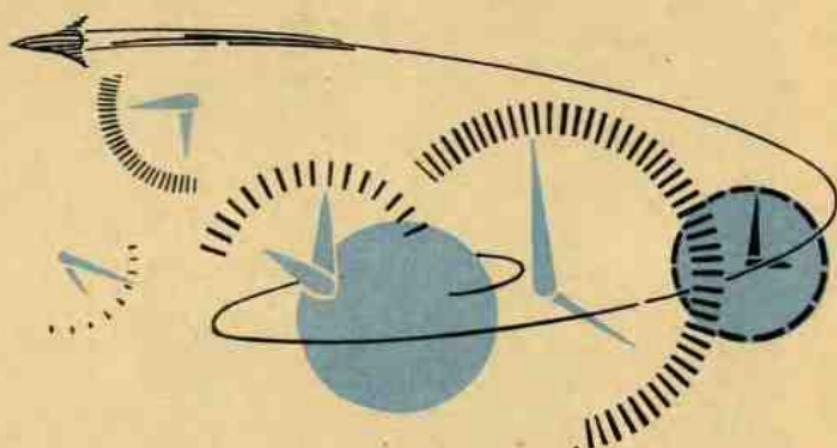
Поскольку замедление часов путешествующего близнеца можно рассматривать как гравитационное явление, любой опыт, который показывает замедление времени под действием тяжести, представляет собой косвенное подтверждение парадокса близнецов. В последние годы было получено несколько таких подтверждений с помощью нового замечательного лабораторного метода, основанного на эффекте Мёссбауэра. Молодой немецкий физик Рудольф Мёссбауэр в 1958 г. открыл способ изготовления «ядерных часов», с непостижимой точностью отмеряющих время. Представьте часы, тикающие пять раз в секунду, и другие часы, тикающие так, что после миллиона миллионов тиканий они отстанут лишь на одну сотую тиканья. Эффект Мёссбауэра способен сразу же обнаружить, что вторые часы идут медленнее первых! Опыты с применением эффекта Мёссбауэра показали, что время вблизи фундамента здания (где тяжесть больше) течет несколько медленнее, чем на его крыше. По замечанию Гамова: «Машинистка, работающая на первом этаже здания Эмпайр Стейт Билдинг*, старится медленнее, чем ее сестра-близнец, работающая под самой крышей». Конечно, эта разница в возрасте неуловимо мала, но она есть и может быть измерена.

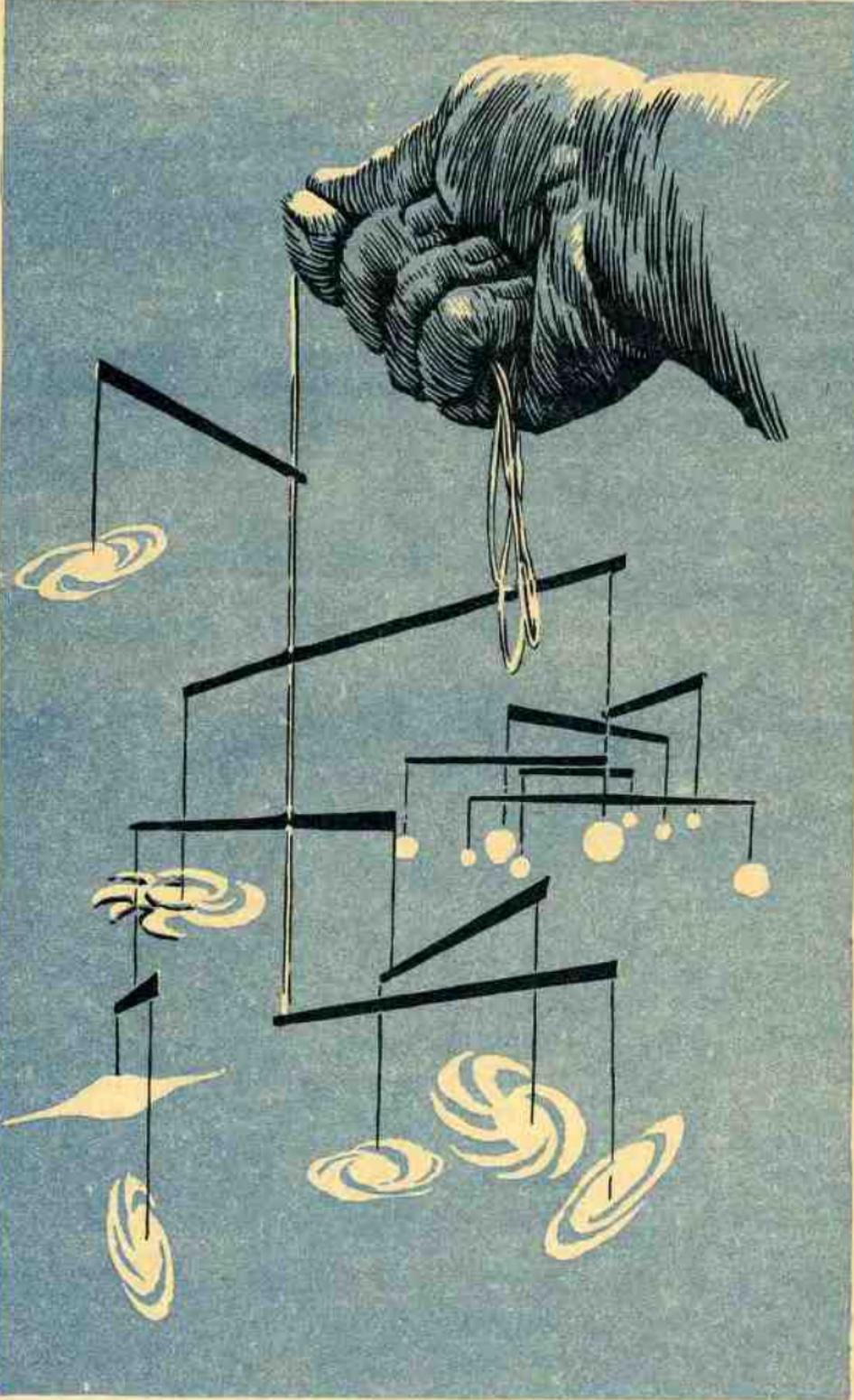
Английские физики, используя эффект Мёссбауэра, обнаружили, что ядерные часы, помещенные на

* Здание в Нью-Йорке, имеющее 102 этажа.— Прим. перев.

краю быстро вращающегося диска диаметром всего в 15 см, несколько замедляют свой ход. Вращающиеся часы можно рассматривать как близнеца, непрерывно изменяющего свою инерциальную систему отсчета (или как близнеца, на которого воздействует гравитационное поле, если считать диск покоящимся, а космос — вращающимся). Этот опыт является прямой проверкой парадокса близнецов. Наиболее прямой опыт будет выполнен тогда, когда ядерные часы поместят на искусственном спутнике, который будет вращаться с большой скоростью вокруг Земли. Затем спутник возвратят и показания часов сравнят с теми часами, которые остались на Земле. Конечно, быстро приближается то время, когда космонавт сможет сделать самую точную проверку, захватив ядерные часы с собой в далекое космическое путешествие. Никто из физиков, кроме профессора Дингля, не сомневается, что показания часов космонавта после его возвращения на Землю будут немного не совпадать с показаниями ядерных часов, оставшихся на Земле.

Тем не менее мы всегда должны быть готовы к сюрпризам. Вспомните опыт Майкельсона — Морли!







Модели Вселенной

Ни один физик не оспаривает сегодня специальную теорию относительности, и лишь немногие оспаривают основные положения общей теории относительности. Правда, общая теория относительности оставляет многие важные проблемы нерешенными. Несомненно и то, что наблюдения и эксперименты, поддерживающие эту теорию, малочисленны и не всегда убедительны. Но даже если бы не было вообще никаких подтверждений, общая теория относительности все же была бы необычайно привлекательна из-за больших упрощений, вводимых ею в физику.

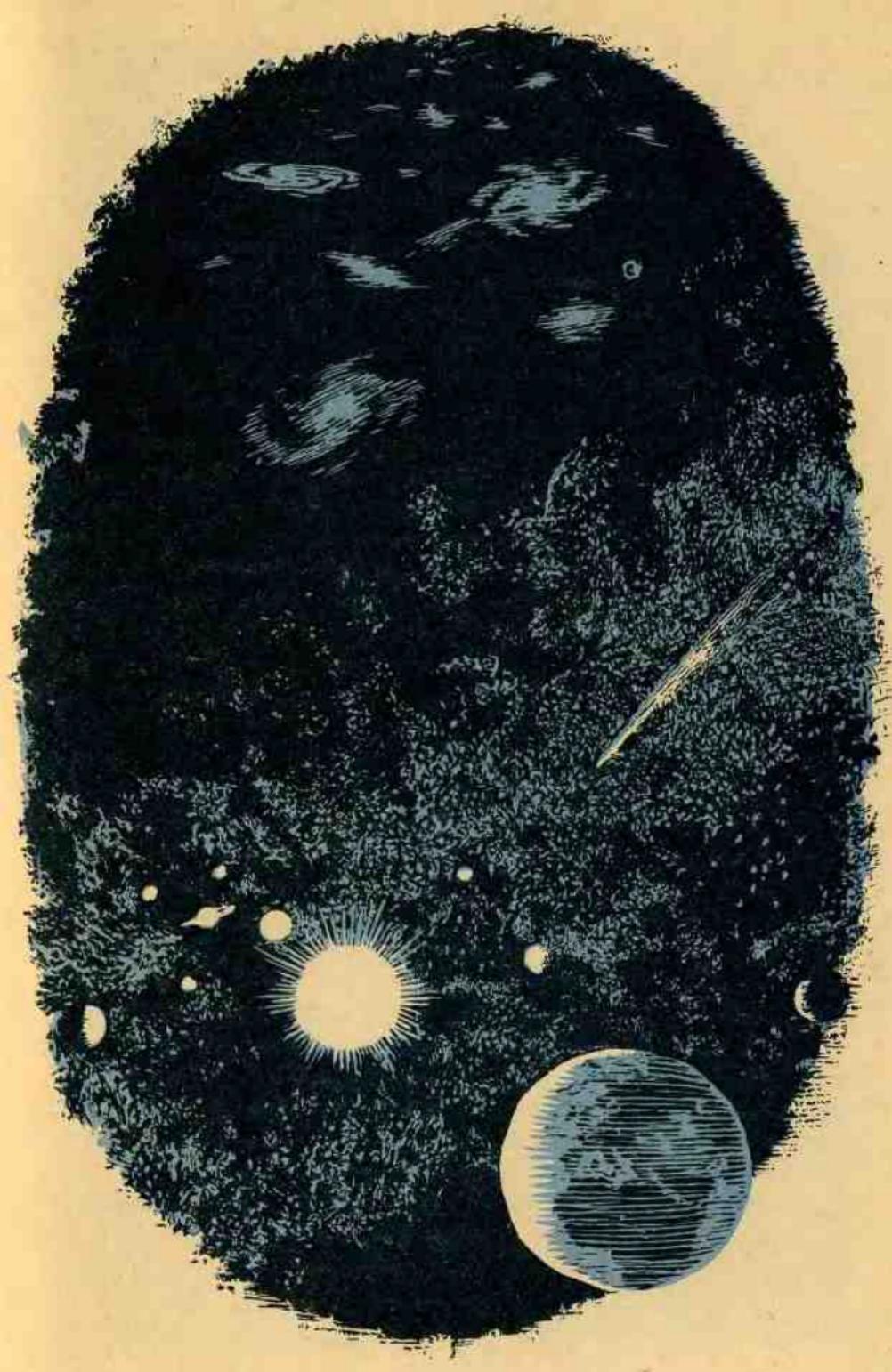
Упрощений? Может показаться странным использование этого слова по отношению к теории, где применяется настолько развитая математика, что

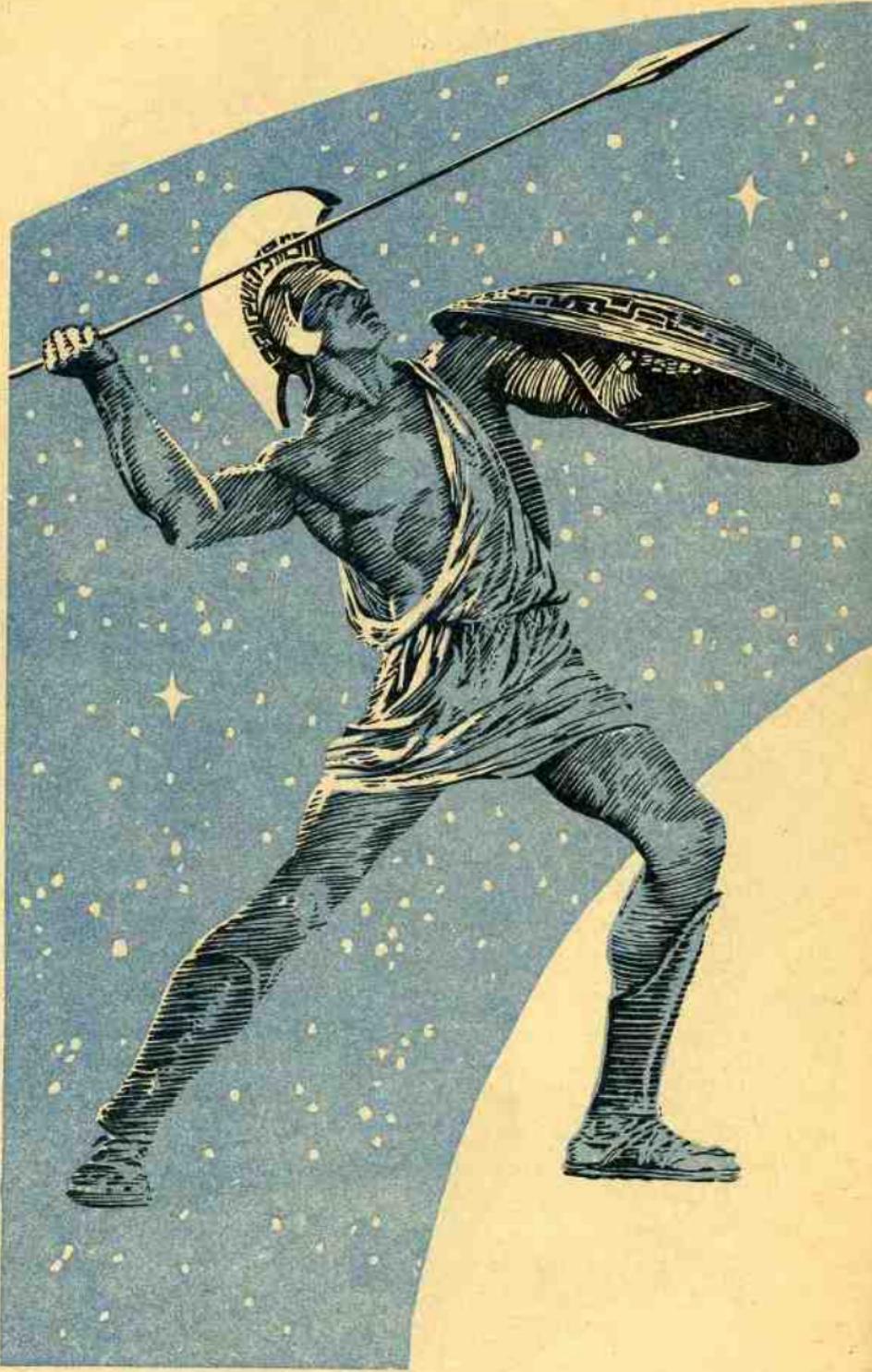
кто-то однажды сказал, будто во всем мире не более двенадцати человек могут понять ее (между прочим, это число было явно преуменьшено даже в то время, когда такое мнение было общепризнанным). Математический аппарат теории относительности действительно сложен, но эта сложность компенсируется необыкновенным упрощением общей картины. Например, сведения тяготения и инерции к одному и тому же явлению достаточно, чтобы сделать общую теорию относительности наиболее плодотворным направлением при формировании взгляда на мир.

Эйнштейн высказал эту мысль в 1921 г., когда читал лекцию об относительности в Принстонском университете: «Возможность объяснить численное равенство инерции и гравитации единством их природы дает общей теории относительности, по моему убеждению, такие преимущества перед концепциями классической механики, что в сравнении с этим все трудности, встречающиеся здесь, следует считать небольшими...»

К тому же теории относительности присуще то, что математики любят называть «изяществом». Это своего рода артистическое произведение. «Каждый любитель прекрасного, — заявил однажды Лоренц, — должен желать, чтобы она оказалась правильной».

В этой главе твердо установленные аспекты теории относительности будут оставлены в стороне, и читатель окунется в область ожесточенных споров, область, где точки зрения являются не более чем предположениями, которые должны быть приняты или отвергнуты на основе научных доказательств. Что представляет собой Вселенная в целом? Мы знаем, что Земля — это третья от Солнца планета в системе из девяти планет и что Солнце является одной из примерно ста миллиардов звезд, составляющих нашу Галактику. Мы знаем, что в той области пространства, которую можно прозондировать самыми мощными телескопами, разбросаны другие галактики, число которых также должно исчисляться миллиардами. Продолжается ли это до бесконечности?







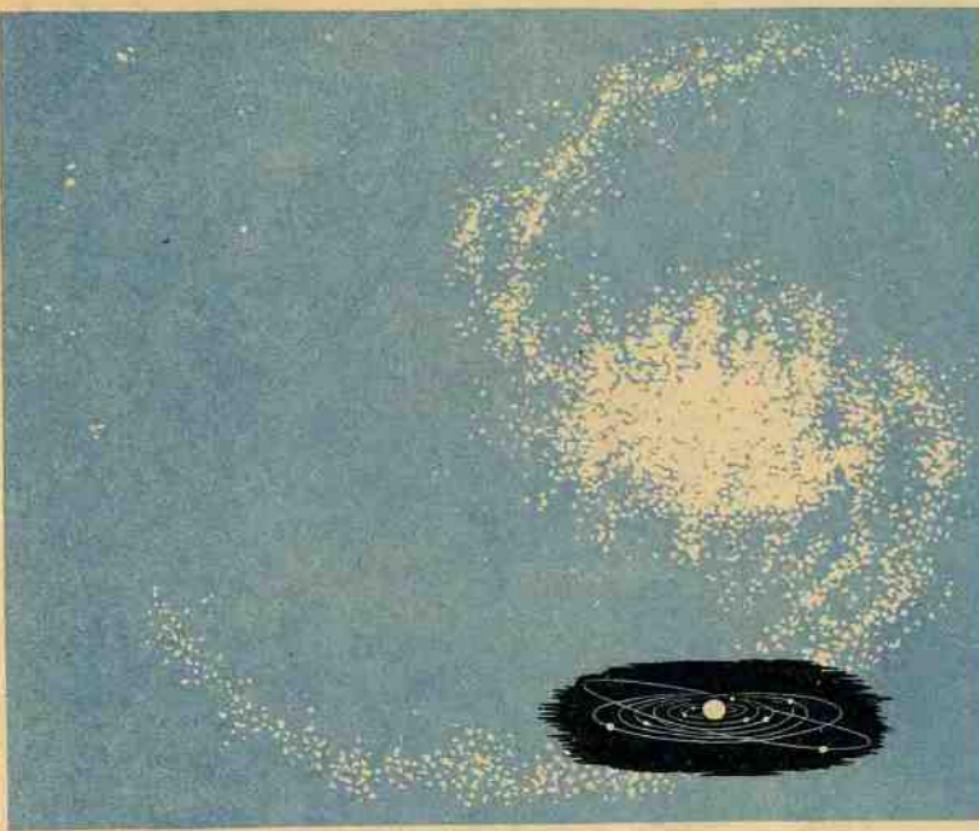
Бесконечно ли число галактик? Или же пространство все-таки имеет конечные размеры? (Может быть, нам следует говорить «наше пространство», поскольку если наше пространство ограничено, то кто может сказать, что не существует других ограниченных пространств?)

Астрономы прилагают все усилия, чтобы ответить на эти вопросы. Они конструируют так называемые модели Вселенной — воображаемые картины мира, если его рассматривать как единое целое. В начале девятнадцатого века многие астрономы предполагали, что Вселенная безгранична и содержит бесконечное число солнц. Пространство считалось евклидовым. Прямые линии уходили в бесконечность во всех направлениях. Если бы космический корабль отправился в путь в любом направлении и двигался по прямой линии, то его путешествие длилось бы бесконечно долго, причем он никогда не достиг бы

границы. Эта точка зрения восходит к древним грекам. Они любили говорить, что, если воин будет бросать свое копье все дальше и дальше, в пространство, он никогда не сможет достичь конца; если же такой конец вообразить себе, то воин смог бы стать там и метнуть копье еще дальше!

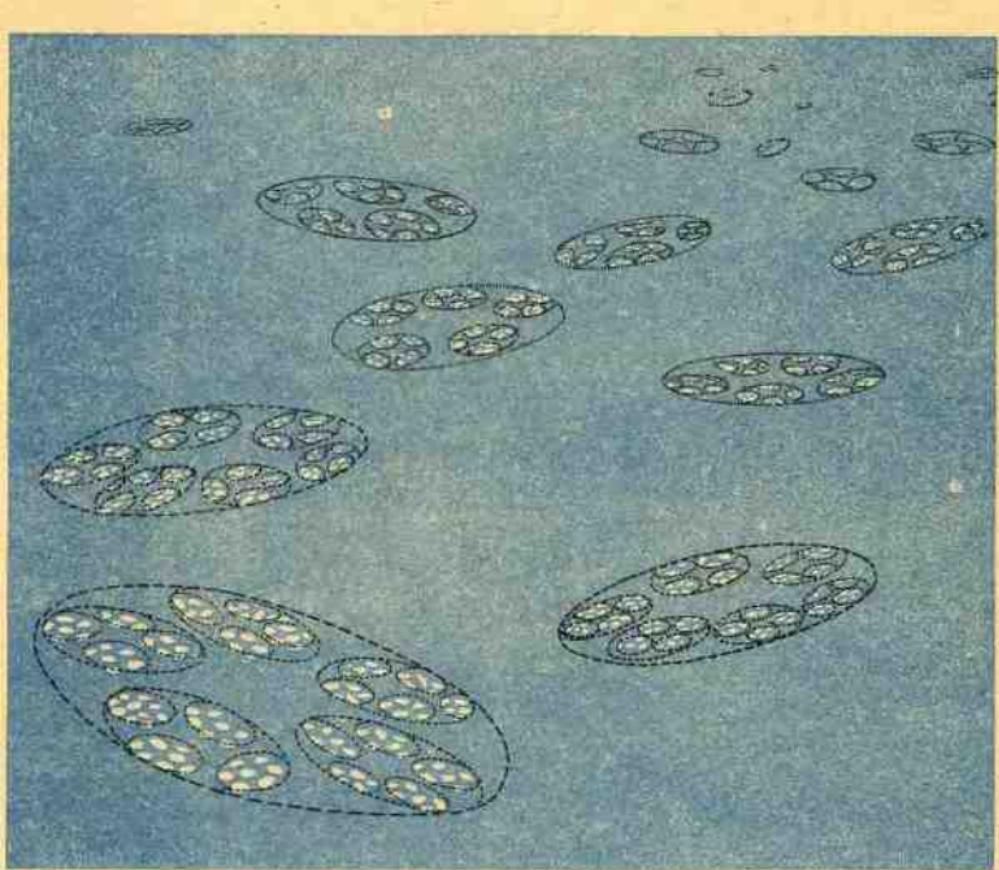
Против этой точки зрения имеется одно важное возражение. Немецкий астроном Генрих Олберс отметил в 1826 г., что если число солнц бесконечно и эти солнца распределены в пространстве случайным образом, то прямая линия, проведенная от Земли в любом направлении, должна была бы в конечном счете пройти сквозь какую-либо звезду. Это означало бы, что все ночное небо должно было представлять собой одну сплошную поверхность, испускающую слепящий звездный свет. Мы знаем, что это не так. Следует придумать какое-то объяснение темноте ночного неба, чтобы объяснить то, что теперь называют парадоксом Олберса. Большинство астрономов конца девятнадцатого и начала двадцатого века считали, что число солнц ограничено. Наша галактика, утверждали они, содержит все имеющиеся солнца. Что же вне галактики? Ничего! (И только в середине двадцатых годов этого столетия появились неопровергимые доказательства, что существуют миллионы галактик на громадных расстояниях от нашей.) Другие астрономы допускали, что свет от далеких звезд может поглощаться скоплениями межзвездной пыли.

Наиболее остроумное объяснение дал шведский математик В. К. Шарлье. Галактики, говорил он, группируются в ассоциации, ассоциации — в сверхассоциации, сверхассоциации — в сверх-сверхассоциации и так далее до бесконечности. На каждой ступени объединения расстояния между группировками растут быстрее, чем размеры групп. Если это правильно, то тогда чем дальше продолжать прямую линию от нашей галактики, тем меньше вероятность того, что она встретит другую галактику. Вместе с тем эта иерархия ассоциаций бесконечна, так что по-прежнему можно говорить, что Вселенная со-



держит бесконечное число звезд. В объяснении, данном Шарлье парадоксу Олберса, нет ничего ошибочного, за исключением того, что имеется следующее более простое объяснение.

Первая модель Вселенной, основанная на теории относительности, была предложена самим Эйнштейном в статье, опубликованной в 1917 г. Это была изящная и красивая модель, хотя позже Эйнштейн вынужден был отказаться от нее. Выше уже объяснялось, что гравитационные поля — это искривления структуры пространства — времени, производимые присутствием больших масс материи. Внутри каждой галактики, следовательно, имеется много подобных скручиваний и изгибов пространства — времени. А как же огромные области пустого пространства между галактиками? Одна точка зрения

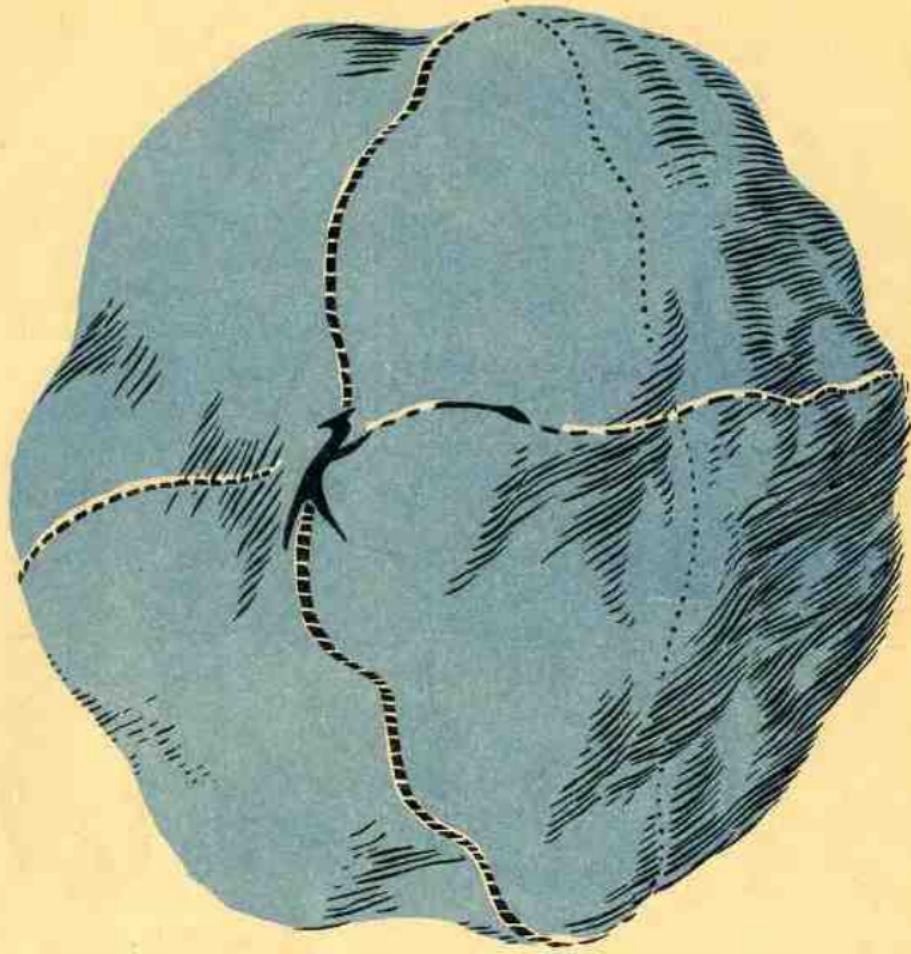


такова: чем больше расстояние от галактик, тем более плоским (более евклидовым) становится пространство. Если бы Вселенная была свободна от всякой материи, то пространство было бы совершенно плоским; некоторые, однако, считают, что в этом случае вообще было бы бессмысленным говорить, что оно имеет какую-то структуру. И в том и в другом случае Вселенная пространства — времени простирается неограниченно во всех направлениях.

Эйнштейн сделал одно заманчивое контрпредложение. Предположим, сказал он, что количество материи во Вселенной достаточно велико, чтобы обеспечить общую положительную кривизну. Пространство тогда замкнулось бы само на себя во всех направлениях. Этого нельзя понять полностью, не

углубляясь в четырехмерную неевклидову геометрию, но смысл можно схватить достаточно легко с помощью двухмерной модели. Представим себе плоскую страну Плосковию, где живут двухмерные существа. Они считают свою страну евклидовой плоскостью, которая простирается безгранично во всех направлениях. Правда, солнца Плосковии являются причиной появления на этой плоскости различных выпукостей, но это локальные выпуклости, которые не влияют на общую гладкость. Существует, однако, другая возможность, которую могут себе представить астрономы этой страны. Может быть, каждая локальная выпуклость производит небольшое искривление всей плоскости таким образом, что суммарное действие всех солнц будет приводить к деформированию этой плоскости в нечто похожее на поверхность бугристой сферы. Подобная поверхность была бы тем не менее безграничной в том смысле, что вы могли бы двигаться в любом направлении вечно и никогда не достичь границы. Воин Плосковии не смог бы найти такое место, дальше которого ему некуда было бы метнуть свое плоское копье. Однако поверхность страны была бы конечной. Путешественник, совершающий поездку по «прямой линии» достаточно долго, в конце концов прибыл бы обратно туда же, откуда начал свой путь.

Математики говорят, что подобная поверхность «замкнута». Она, конечно, не безгранична. Подобно бесконечному евклидовому пространству, центр ее везде, периферии не существует. Эту «замкнутость», топологическое свойство такой поверхности, обитатели этой страны могут легко проверить. Один критерий уже упоминался: движение вокруг сферы во всех направлениях. Другой способ проверки состоял бы в окраске этой поверхности. Если бы житель этой страны, начав с какого-то места, стал рисовать все большие и большие окружности, он в конце концов заключил бы себя внутрь пятна на противоположной стороне сферы. Однако, если эта сфера велика и жители занимают небольшую часть ее, у них не бу-

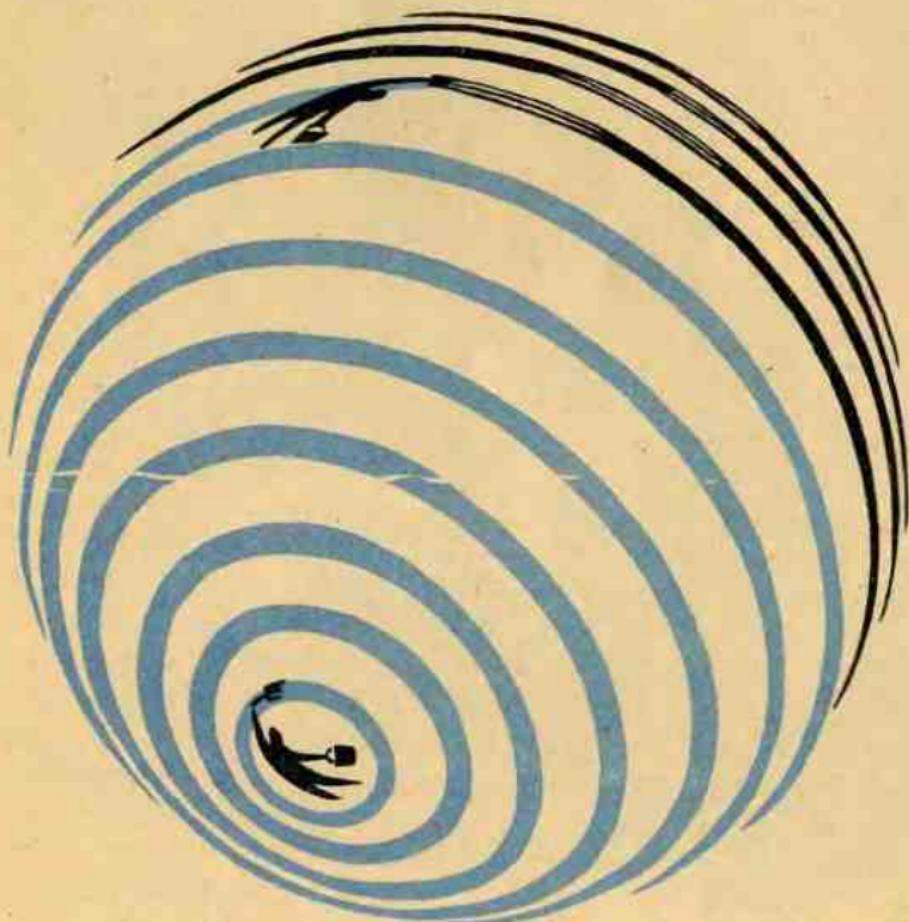


дят возможности произвести подобные топологические испытания.

Эйнштейн предположил, что наше пространство является трехмерной «поверхностью» огромной гиперсферы (четырехмерной сферы). Время в его модели остается неискривленным; это прямая координата, уходящая назад в бесконечно далекое прошлое и простирающаяся бесконечно далеко вперед в будущее. Если эту модель представлять себе как четырехмерную пространственно-временную структуру, она больше напоминает гиперцилиндр, чем гиперсферу. По этой причине такую модель обычно называют моделью «цилиндрической Вселенной». В любой момент времени мы видим пространство как

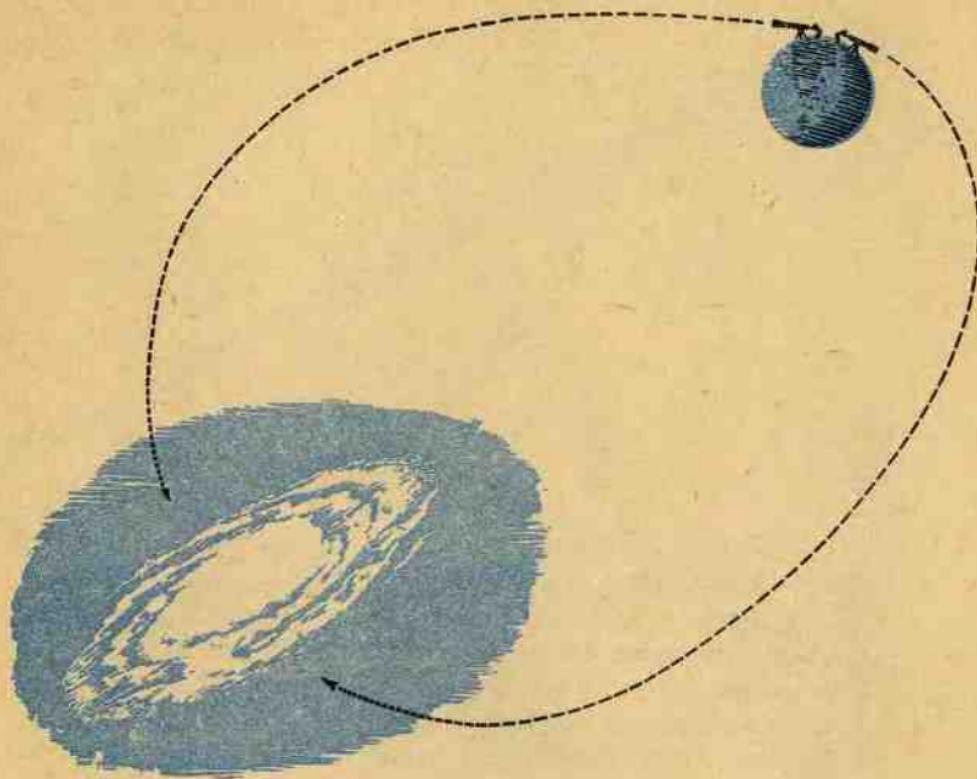
своего рода трехмерное поперечное сечение гиперцилиндра. Каждое поперечное сечение представляет собой поверхность гиперсферы.

Наша Галактика занимает только незначительную часть этой поверхности, так что пока еще нет возможности выполнить топологический эксперимент, который доказал бы ее замкнутость. Но принципиальная возможность доказать замкнутость существует. Установив достаточно мощный телескоп в каком-то направлении, можно сфокусировать его на определенной галактике, а затем, повернув телескоп в противоположную сторону, увидеть обратную сторону той же самой галактики. Если бы существовали космические корабли со скоростью, близкой к скорости света, то они могли бы описать круг



по Вселенной, двигаясь в любом направлении по наиболее прямой линии, которая только возможна. Вселенную нельзя «окрасить» в буквальном смысле этого слова, но можно сделать по существу то же самое, составляя сферические карты Вселенной все больших и больших размеров. Если картограф будет делать это достаточно долго, то он сможет обнаружить, что он оказался внутри той сферы, карту которой он составляет. Эта сфера будет становиться все меньше и меньше по мере того, как он продолжает свое занятие, подобно тому кругу, который уменьшается, когда житель Плосковии заключает себя внутрь пятна.

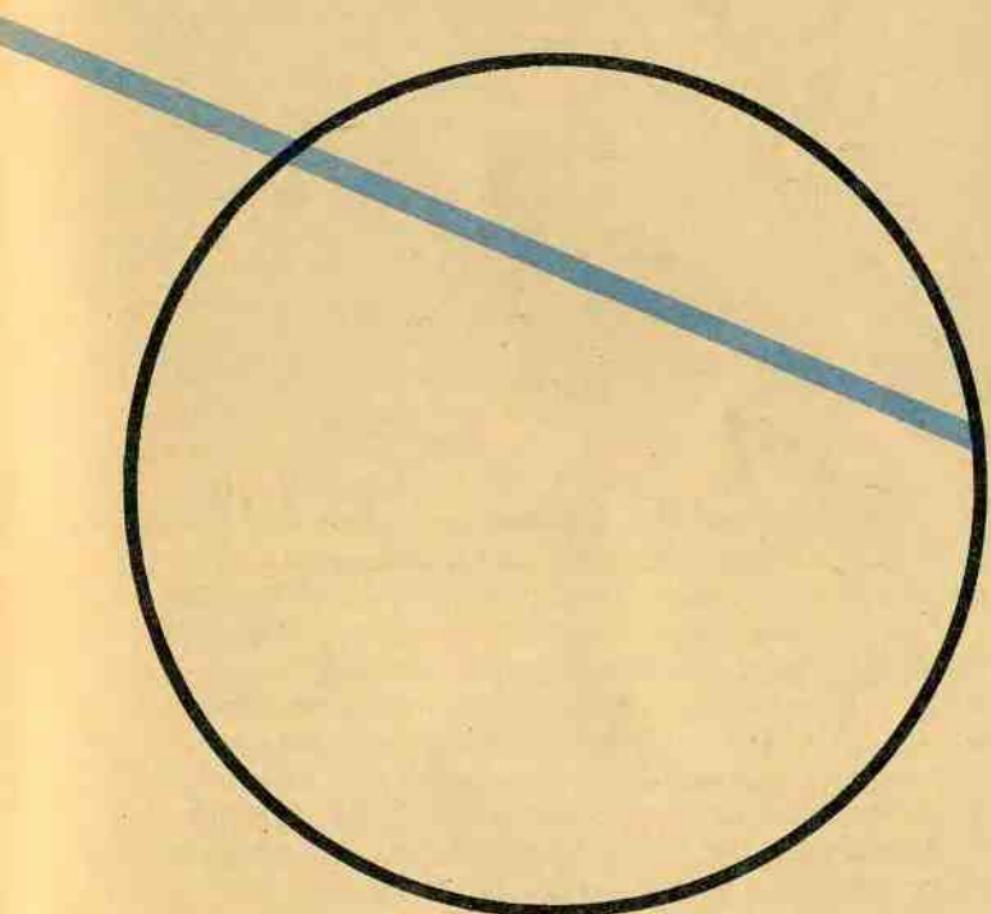




В некоторых отношениях неевклидова модель Эйнштейна проще классической модели, в которой пространство не искривлено. Она проще в том же самом смысле, в котором можно сказать, что круг проще прямой линии. Прямая линия простирается в бесконечность в обе стороны, а бесконечность в математике — очень сложная вещь! Удобство окружности в том, что она ограничена. Она не имеет концов, никому не приходится беспокоиться о том, что произойдет с этой линией в бесконечности. В аккуратной эйнштейновской Вселенной никому не приходится заботиться обо всех свободных концах в бесконечности, о том, что в космологии любят называть «границами условиями». В уютной Вселенной Эйнштейна граничных проблем не существует, потому что она не имеет границ.

Другие космологические модели, полностью согласующиеся с общей теорией относительности, обсуждались в двадцатых годах. Некоторые из них имеют свойства даже более необычные, чем цилиндрическая Вселенная Эйнштейна. Голландский астроном Виллем де Ситтер разработал модель замкнутой, ограниченной Вселенной, в которой время искривляется так же, как и пространство. Чем дальше смотришь сквозь пространство де Ситтера, тем более медленно идущими кажутся часы. Если посмотреть достаточно далеко, можно увидеть области, где время совершенно остановилось, «как на чаепитии у





сумасшедшего Шляпочкина*,— пишет Эддингтон,— где всегда шесть часов вечера».

«Не нужно думать при этом, что существует какая-то граница»,— объясняет Берtrand Рассел в «Азбуке теории относительности». «Люди, живущие в стране, которую наш наблюдатель считает страной лотофагов **, живут точно в такой же суете, как и сам наблюдатель, и им кажется, что он сам застыл в вечной неподвижности. На самом деле вы никогда бы не узнали об этой стране лотофагов, поскольку понадобилось бы бесконечно большое время, чтобы свет дошел от нее к вам. Вы смогли бы узнать о местах, расположенных недалеко от нее, но она сама оставалась бы всегда за горизонтом». Конечно, если бы вы направились к этой области на космическом корабле, держа ее с помощью телескопа под постоянным наблюдением, вы увидели бы, что по мере вашего приближения к ней ход времени там медленно ускоряется. Когда вы туда прибудете, все будет двигаться с обычной скоростью. Земля лотофагов будет теперь находиться на краю нового горизонта.

Обращали ли вы внимание на то, что, когда самолет, пролетая низко над вами, резко взмывает вверх, высота звука от его моторов сразу немножко понижается? Это называется эффектом Допплера по имени австрийского физика Христиана Иоганна Допплера, открывшего этот эффект в середине девятнадцатого века. Он легко объясним. Когда самолет приближается, то звуковые волны от его двигателей колеблют вашу барабанную перепонку более часто, чем это было бы при неподвижном самолете. Это увеличивает высоту звука. Когда самолет удаляется, ощущаемые вами ушами толчки от звуковых колебаний менее часты. Звук становится ниже.

Абсолютно то же самое происходит в том случае, когда источник света быстро движется к вам или от

* Персонаж книги Льюиса Кэрролла «Алиса в стране чудес». — Прим. перев.

** Страна изобилия и праздности, см. «Одиссею». — Прим. перев.



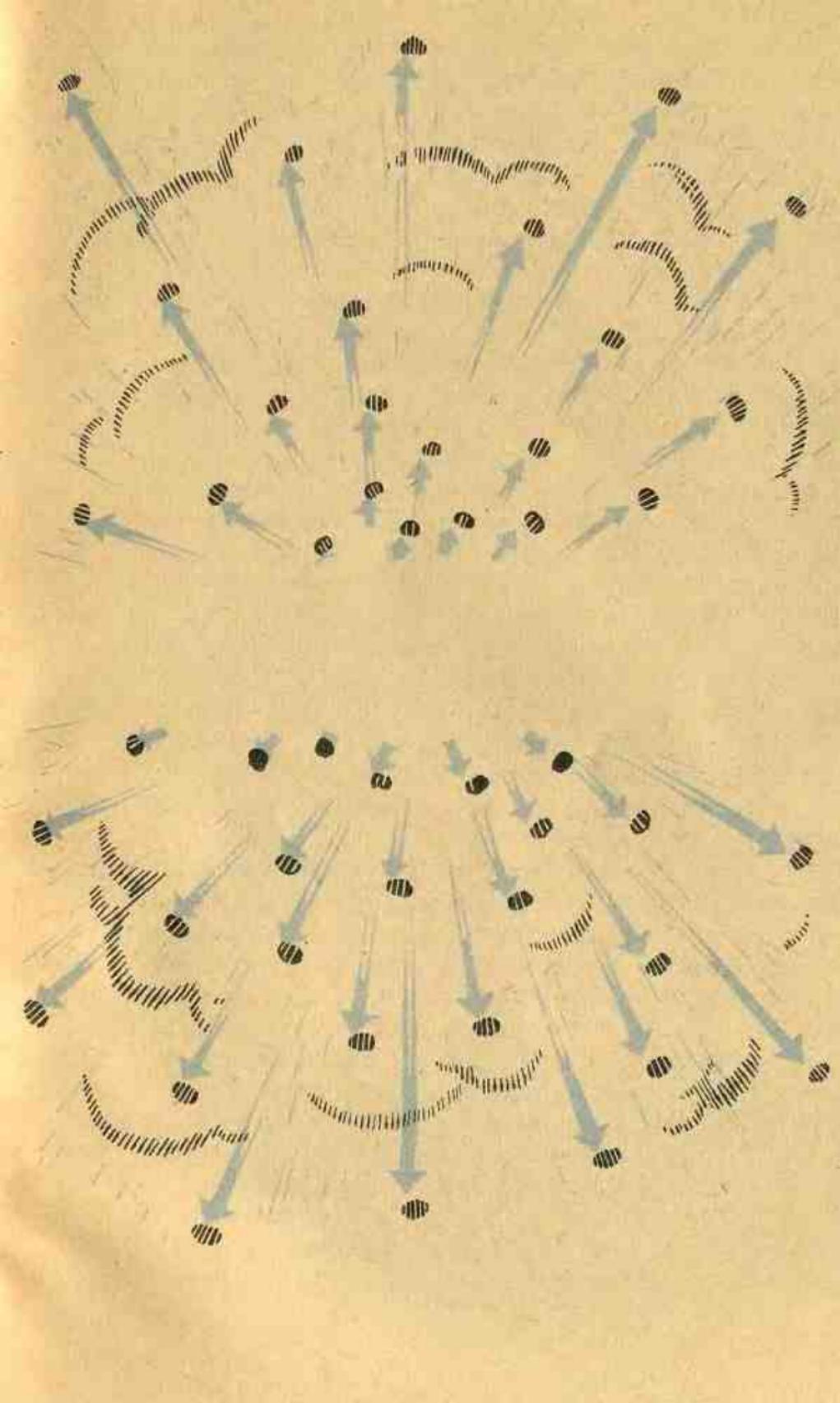
вас. При этом неизменной должна оставаться скорость света (которая всегда постоянна), но не его длина волны. Если вы и источник света движетесь навстречу друг другу, то эффект Допплера укорачивает длину световой волны света, сдвигая цвет в сторону фиолетового конца спектра. Если вы и источник света удаляетесь один от другого, то эффект Допплера дает подобное же смещение к красному концу спектра.

Георгий Гамов на одной из своих лекций рассказал историю (несомненно, анекдотическую) с эффектом Допплера, которая слишком хороша, чтобы не привести ее здесь. Это случилось, кажется, с известным американским физиком из университета Джона Гопкинса Робертом Вудом, который был за-

держан в Балтиморе за езду на красный свет. Представ перед судьей, Вуд на основе эффекта Допплера блестяще объяснил, что из-за большой скорости его движения произошел сдвиг красного света к фиолетовому концу спектра, из-за чего он воспринял его как зеленый. Судья был склонен оправдать Вуда, но на суде случайно оказался один из студентов Вуда, которого Вуд незадолго до этого провалил. Он быстро вычислил скорость, которая требуется, чтобы огонь светофора из красного стал зеленым. Судья отказался от первоначального обвинения и оштрафовал Вуда за превышение скорости.

Допплер думал, что открытый им эффект объясняет видимый цвет далеких звезд: красноватые звезды должны двигаться от Земли, голубоватые звезды — к Земле. Как оказалось, дело было не в этом (эти цвета объяснялись другими причинами); в двадцатых годах нашего века было открыто, что свет от удаленных галактик обнаруживает явное смещение в красную сторону, которое нельзя объяснить достаточно убедительно иначе, как допуская, что эти галактики движутся от Земли. Более того, это смещение возрастает в среднем пропорционально расстоянию от галактики до Земли. Если до галактики А в два раза дальше, чем до галактики Б, то красное смещение от А примерно в два раза больше красного смещения от Б. По утверждению английского астронома Фреда Хойла, красное смещение для ассоциации галактик в созвездии Гидры свидетельствует о том, что эта ассоциация удаляется от Земли с громадной скоростью, равной примерно 61 000 км/сек.

Делались различные попытки объяснить красное смещение не эффектом Допплера, а каким-либо иным способом. По теории «усталости света» чем дольше свет находится в пути, тем меньше частота его колебаний. (Это прекрасный пример гипотезы *ad hoc*, т. е. гипотезы, связанной только с этим частным явлением, поскольку других свидетельств в ее пользу нет.) Другое объяснение состоит в том, что прохождение света сквозь космическую пыль приводит



к появлению смещения. В модели де Ситтера это смещение четко следует из искривления времени. Но простейшее объяснение, которое наилучшим образом согласуется с другими известными фактами, состоит в том, что красное смещение действительно свидетельствует о реальном движении галактик. Исходя из этого предположения, вскоре была развита новая серия моделей «расширяющейся Вселенной».

Однако это расширение не означает, что расширяются сами галактики или что (как это теперь считают) увеличиваются расстояния между галактиками в ассоциациях галактик. По-видимому, это расширение влечет за собой увеличение расстояний между ассоциациями. Представьте себе гигантский ком теста, в который вкраплено несколько сот изюмин. Каждая изюминка представляет собой ассоциацию галактик. Если это тесто сажают в печь, оно расширяется равномерно по всем направлениям, но размеры изюминки остаются прежними. Увеличивается расстояние между изюминками. Ни одна из изюминок не может быть названа центром расширения. С точки зрения любой отдельной изюминки все остальные изюминки кажутся удаляющимися от нее. Чем больше расстояние до изюминки, тем больше кажущаяся скорость ее удаления.

Модель Вселенной Эйнштейна статична. Это объясняется тем, что он развел эту модель до того, как астрономы обнаружили расширение Вселенной. Чтобы предотвратить стягивание своей Вселенной гравитационными силами и ее гибель, Эйнштейн вынужден был в своей модели предположить, что существует еще одна сила (он ввел ее в модель с помощью так называемой «космологической постоянной»), роль которой заключается в отталкивании и удержании звезд на некотором расстоянии друг от друга. Выполненные позже вычисления показали, что модель Эйнштейна неустойчива, подобно монете, стоящей на ребре. Малейший толчок заставит ее упасть либо на лицевую, либо на обратную сторону, причем первое соответствует расширяющейся, второе — сжимающейся Вселенной. Открытие красного смещения

показало, что Вселенная во всяком случае не сжимается; космологи обратились к моделям расширяющейся Вселенной.

Конструировались всевозможные модели расширяющейся Вселенной. Советский ученый Александр Фридман и бельгийский аббат Жорж Леметр разработали две наиболее известные модели. В некоторых из этих моделей пространство предполагается замкнутым (положительная кривизна), в других — незамкнутым (отрицательная кривизна), в третьих вопрос о замкнутости пространства остается открытым. Одна из моделей была предложена Эддингтоном, который описал ее в увлекательной книге «Расширяющаяся Вселенная». Его модель по существу очень похожа на модель Эйнштейна, она замкнута, подобно огромному четырехмерному шару, и равномерно расширяется по всем своим трем пространственным измерениям. В настоящее время, однако, у астрономов нет уверенности в том, что пространство замкнуто на себя. По-видимому, плотность материи в пространстве недостаточна, чтобы привести к положительной кривизне. Астрономы отдают предпочтение незамкнутой или бесконечной Вселенной с общей отрицательной кривизной, напоминающей поверхность седла.

Читатель не должен думать, что если поверхность сферы имеет положительную кривизну, то изнутри эта поверхность будет иметь отрицательную



кривизну. Кривизна сферической поверхности положительна независимо от того, с какой стороны на нее смотреть — снаружи или изнутри. Отрицательная кривизна поверхности седла вызвана тем, что в любой своей точке эта поверхность искривлена по-разному. Она вогнута, если вы проводите по ней рукой от задней части к передней, и выпукла, если вы ведете руку от одного края к другому. Одна кривизна выражается положительным числом, другая — отрицательным. Чтобы получить кривизну этой поверхности в данной точке, эти два числа надо перемножить. Если во всех точках это число отрицательно, как должно быть, когда поверхность в любой точке искривляется по-разному, то говорят, что эта поверхность имеет отрицательную кривизну. Поверхность, окружающая дырку в торе (бублике), — другой известный пример поверхности отрицательной кривизны. Конечно, подобные поверхности являются лишь грубыми моделями трехмерного пространства отрицательной кривизны.

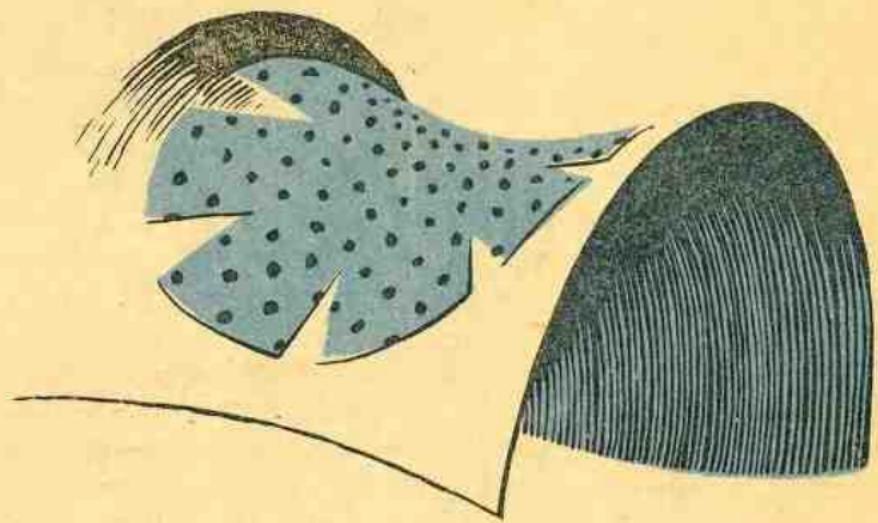
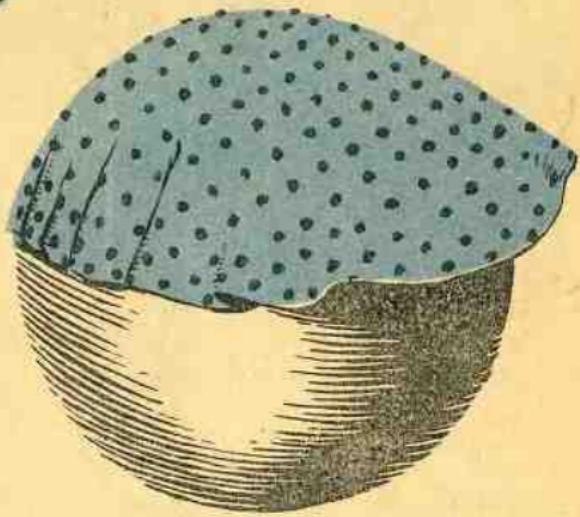
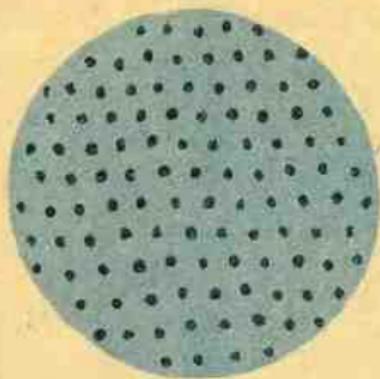
Возможно, с появлением более мощных телескопов удастся решить вопрос о том, какова кривизна Вселенной — положительна, отрицательна или равна нулю. Телескоп позволяет видеть галактики лишь в определенном сферическом объеме. Если галактики распределены случайным образом и если пространство евклидово (нулевой кривизны), число галактик внутри подобной сферы должно быть всегда пропорционально кубу радиуса этой сферы. Другими словами, если построить телескоп, которым можно заглянуть в два раза дальше, чем любым телескопом до этого, то число видимых галактик должно увеличиться с n до $8n$. Если этот скачок окажется меньше, то это будет означать, что кривизна Вселенной положительна, если больше — отрицательна.

Можно подумать, что должно быть наоборот, но рассмотрим случай двухмерных поверхностей с положительной и отрицательной кривизной. Предположим, что из плоского листа резины вырезан круг. На него наклеены изюмины на расстояниях в полсантиметра одна от другой. Для того чтобы придать



этой резине форму сферической поверхности, ее необходимо сжать, и многие изюмины сблизятся. Иными словами, если на сферической поверхности изюмины должны оставаться на расстоянии в полсантиметра одна от другой, то потребуется меньше изюмин. Если же резину наложить на поверхность седла, то изюмины раздвинутся на большие расстояния, т. е. чтобы на поверхности седла сохранить расстояния между изюминами в полсантиметра, потребуется больше изюмин. Мораль, вытекающая из всего этого, в шутливой форме может быть выражена так: когда вы покупаете бутылку пива, обязательно скажите продавцу, что вы хотите бутылку, содержащую пространство, искривленное отрицательно, а не положительно!

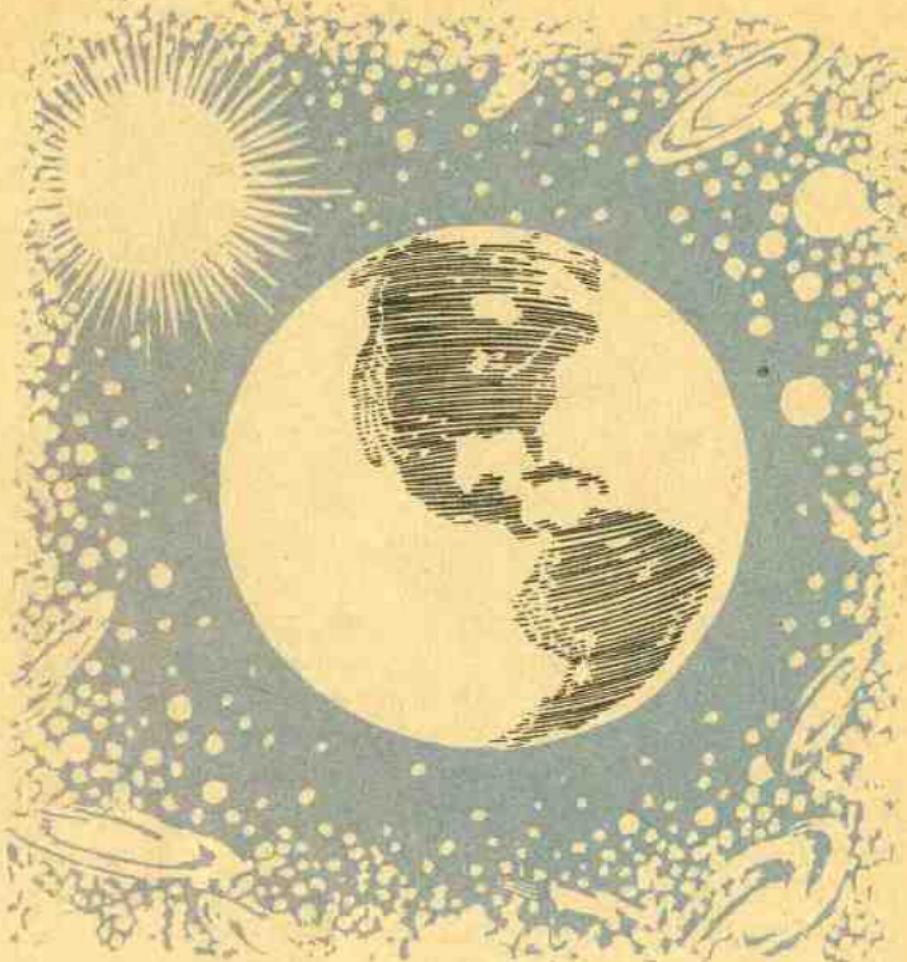
В моделях расширяющейся Вселенной не требуется космологическая постоянная Эйнштейна, приводящая к гипотетическому расталкиванию звезд. (Позже Эйнштейн считал концепцию космологической постоянной самой большой ошибкой, сделан-



ной им когда-либо.) С появлением этих моделей сразу же прояснился вопрос с парадоксом Олберса о яркости ночного неба. Статическая модель Эйнштейна мало помогла в этом отношении. Правда, она содержит только конечное количество солнц, но из-за замкнутости пространства в модели свет от этих солнц вынужден вечно обходить Вселенную, изгибая свою траекторию в соответствии с местными искривлениями пространства — времени. В результате ночное небо освещено так же ярко, как и в случае бесконечного количества солнц, если не предположить, что Вселенная настолько молода, что свет смог совершить лишь ограниченное число кольцевых витков.

Понятие расширяющейся Вселенной очень просто устраниет этот парадокс. Если далекие галактики удаляются от Земли со скоростями, пропорциональными расстояниям до них, то полное количество света, достигающего Землю, должно уменьшаться. Если какая-либо галактика находится достаточно далеко, ее скорость может превысить световую, тогда свет от нее вообще никогда не достигнет нас. Сейчас многие астрономы всерьез считают, что если бы Вселенная не была расширяющейся, то не было бы буквально никакой разницы между ночью и днем.

Тот факт, что скорость далеких галактик относительно Земли может превышать скорость света, является, казалось бы, нарушением того положения, что ни одно материальное тело не может двигаться быстрее света. Но, как мы видели в гл. 4, это положение имеет силу только в условиях, которые соответствуют требованиям специальной теории относительности. В общей теории относительности его следует перефразировать так: никакие сигналы не могут быть переданы быстрее света. Но все еще остается спорным такой важный вопрос: могут ли на самом деле далекие галактики преодолеть световой барьер и, став невидимыми, навсегда исчезнуть из поля зрения человека, даже если он будет располагать наиболее мощными телескопами, которые можно себе представить. Некоторые специалисты считают, что

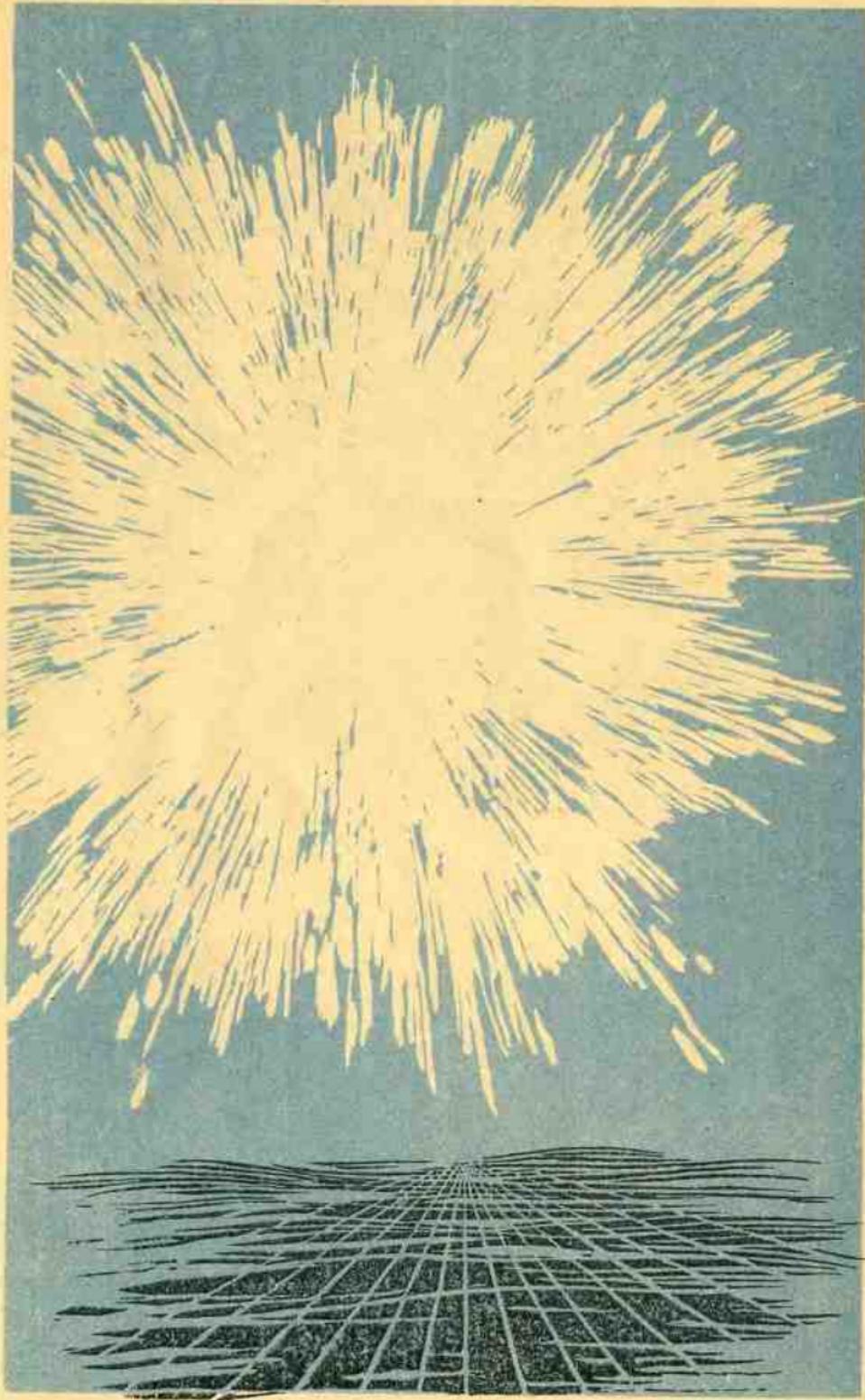


скорость света действительно является пределом и что самые далёкие галактики просто будут делаться более тусклыми, не становясь никогда полностью невидимыми (при том условии, конечно, что человек будет располагать достаточно чувствительными приборами для их наблюдения).

Старые галактики, как кто-то однажды заметил, никогда не умирают. Они просто постепенно исчезают. Важно понять, однако, что ни одна галактика не исчезает в том смысле, что исчезает ее материя из Вселенной. Она просто достигает такой скорости, что становится невозможным или почти невозможным

обнаружить ее в земные телескопы. Исчезающая галактика продолжает быть видимой со всех галактик, находящихся ближе к ней. Для каждой галактики существует такой «оптический горизонт», сферическая граница, за которую ее телескопы не могут проникнуть. Эти сферические горизонты для любых двух галактик не совпадают. Астрономы подсчитали, что точка, после которой галактики начнут исчезать из нашего «поля зрения», находится примерно в два раза дальше, чем область досягаемости любого современного оптического телескопа. Если это предположение правильно, то сейчас видима примерно одна восьмая часть всех галактик, которые когда-то можно будет наблюдать.

Если Вселенная расширяется (неважно, является ли пространство плоским, незамкнутым или замкнутым), то возникает такой каверзный вопрос. На что была похожа Вселенная раньше? Существуют два различных способа ответить на этот вопрос, две современные модели Вселенной. Обе модели рассмотрены в следующей главе.



Взрыв или устойчивое состояние?

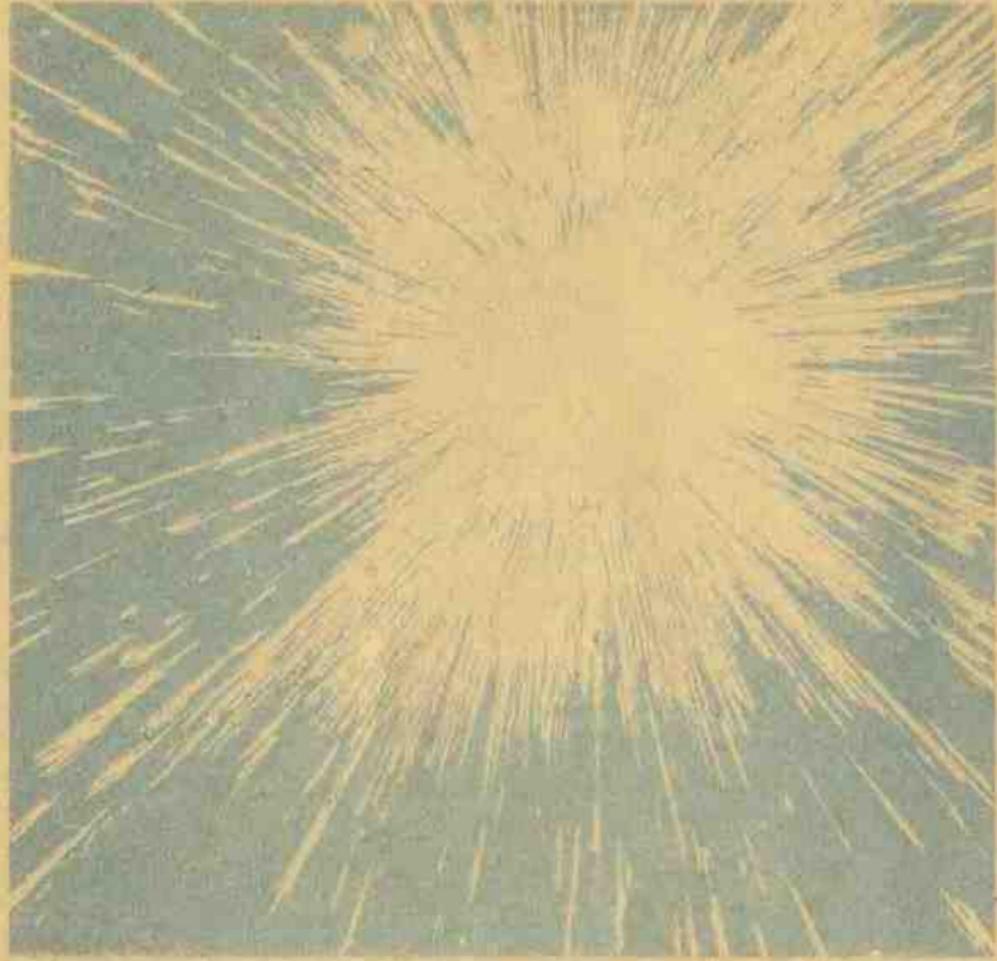
Представьте себе картину постепенного расширения космоса, а затем пустите эту картину в обратном направлении, как это делают в кино. Ясно, что в «скрытом мраком прошлом и бездне времен», как однажды сказал Шекспир, должен был быть такой момент, когда огромное количество материи было сконцентрировано в очень малом объеме. Возможно, что весь процесс расширения начался много миллиардов лет назад с огромного первичного взрыва. Это концепция Взрыва, впервые выдвинутая Леметром, а теперь нашедшая своего наиболее рьяного защитника в лице Георгия Гамова.

Гамов в книге «Создание Вселенной» убедительно защищает свою теорию. Леметр считал, что Взрыв произошел около пяти миллиардов лет назад, но

оценки возраста Вселенной все время росли в сторону увеличения. Сейчас считают, что возраст от 20 до 25 миллиардов лет является наиболее правдоподобным. Таким образом, согласно Гамову, было время, когда вся материя во Вселенной была сконцентрирована в одном невероятно плотном однородном шаре концентрированной материи Илем (Илем — древнегреческое название первичной материи). Откуда он возник? Гамов считает, что он образовался в результате предыдущего сжимания Вселенной. Об этом периоде сжатия, очевидно, мы ничего не можем узнать. Как и модель Леметра, модель Гамова начинается со Взрыва. Иногда момент Взрыва называют «моментом создания», но не в том смысле, что из ничего было создано нечто, объяснял Гамов, а в смысле создания формы из чего-то ранее бесформенного.

Перед самым Взрывом температура и давление Илема были невероятно высоки. Затем произошел чудовищный, невообразимый Взрыв. В книге Гамова детально рассматривается все, что могло произойти после этого. В конце концов из расширяющихся пыли и газа образовались звезды. Расширение Вселенной в настоящее время является продолжением движения, сообщенного материи начальным взрывом. Гамов полагает, что это движение никогда не прекратится.

В настоящее время с гамовской теорией Взрыва соперничает главным образом теория устойчивой Вселенной, предложенная в 1948 г. тремя учеными из Кембриджского университета: Германом Бонди, Томасом Голдом и Фредом Хойлом. Наиболее убедительной защитой этой теории является популярная книга Хойла «Природа Вселенной». Как и в теории Гамова, в теории устойчивого состояния принимается расширение Вселенной и пространство предполагается открытым и бесконечным, а не закрытым, как в модели Эдингтона. В отличие от теории Гамова эта теория не начинает со Взрыва, в ней вообще нет начального момента. Не случайно заглавие книги Хойла отличается от заглавия книги Гамова только заменой одного слова. Космос Хойла не имеет мо-



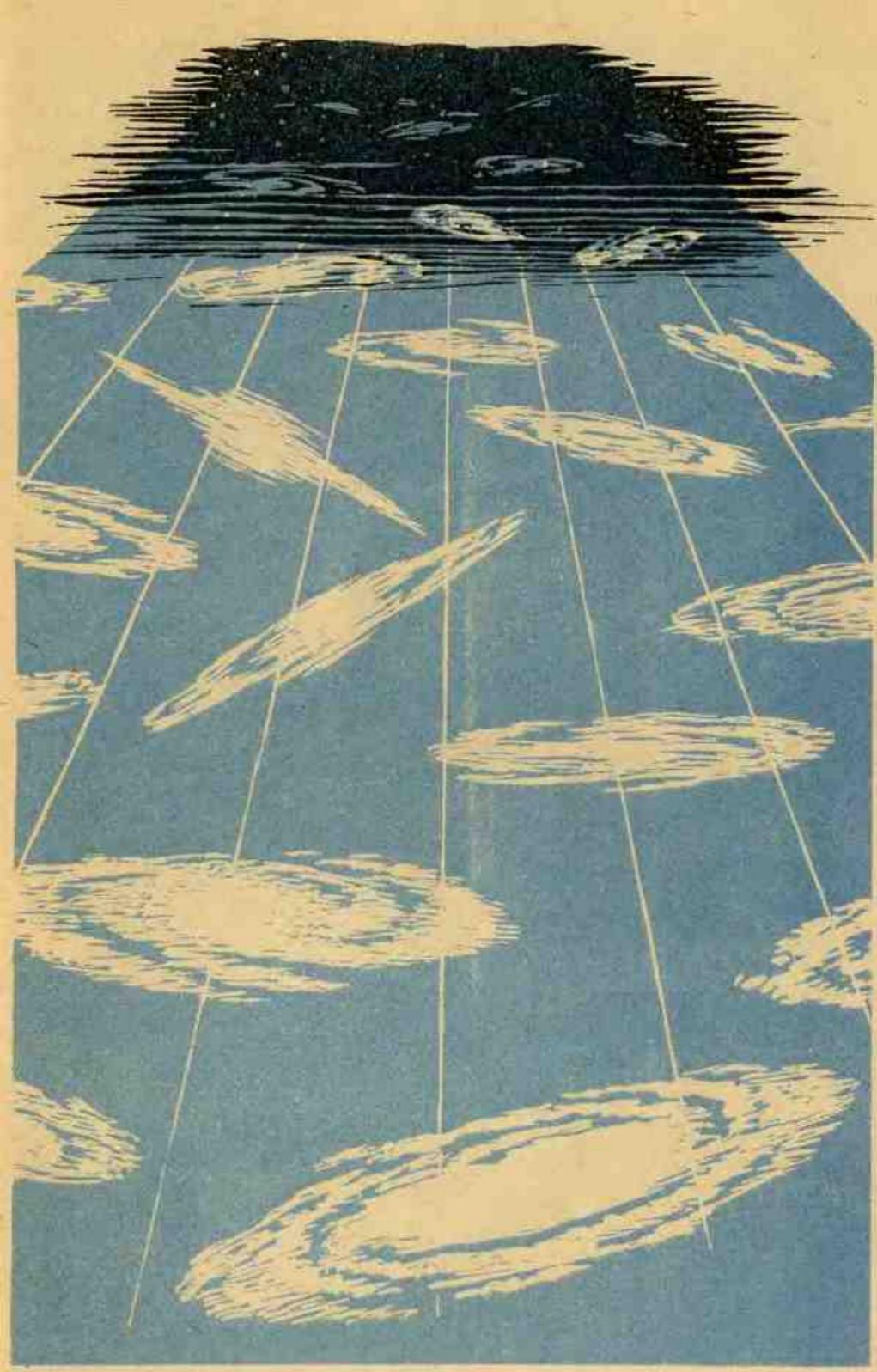
мента «создания», скорее в нем имеется, как мы увидим, бесконечное число малых созиданий. Хойл формулирует это следующим образом: «Каждое облако галактик, каждая звезда, каждый атом имели начало, но не Вселенная целиком. Вселенная есть нечто большее, чем ее части, хотя этот вывод может показаться неожиданным».

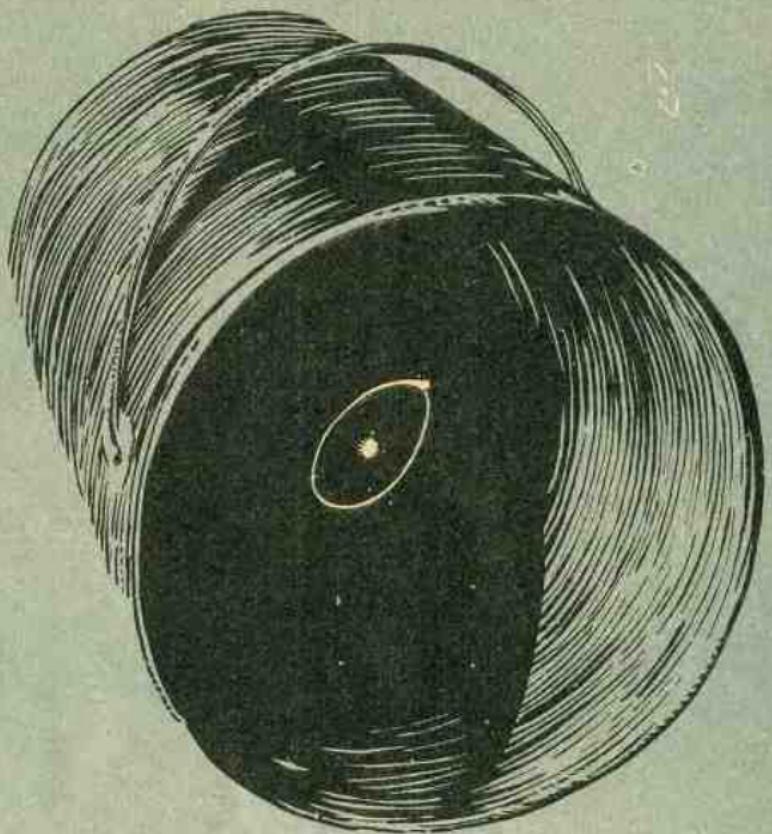
Устойчивая Вселенная всегда находится в состоянии установившегося движения. Если бы мы вернулись на сотни тысяч миллиардов лет назад, мы нашли бы те же самые типы развивающихся галактик в любой части космоса, содержащих те же самые типы стареющих звезд, некоторые из них с теми же

самыми типами планет, обращающихся вокруг этих звезд, и на некоторых из этих планет, возможно, подобные формы жизни. Может быть, существует бесконечное число планет, на которых в этот самый момент (независимо от того, что это может означать) мыслящие существа посылают своих первых космонавтов в космос. Космос однороден (в самом общем смысле слова) в бесконечном пространстве и бесконечном времени. Его расширение не есть последствие взрыва. Оно обусловлено какой-то силой отталкивания, природа которой все еще горячо обсуждается. Эта сила подобна оставленной космологической константе Эйнштейна. Она расталкивает галактики до тех пор, пока они, в конце концов, не исчезают из «поля зрения», уходя за световой барьер. Это исчезновение происходит, разумеется, с точки зрения наблюдателя в нашей Галактике. Когда наблюдатель с Земли видит, что галактика X и ее соседи растаяли, наблюдатели с галактики X видят, что с нашей Галактикой происходит то же самое.

Возникает очень важный вопрос. Если Вселенная всегда расширялась и будет продолжать расширяться, то почему она не становится менее плотной? Очевидно, нет другого способа объяснить устойчивое состояние, кроме как предположив, что непрерывно создается новая материя, возможно, в виде водорода — простейшего из элементов. Согласно Хойлу, если бы в одном ведре пространства (почти невозможно писать о взглядах Хойла, не доставив себе удовольствия употребить это образное выражение) создавался один атом водорода примерно каждые 10 миллионов лет, то это поддерживало бы космос в устойчивом состоянии. Разумеется, скорость, с которой образуется материя, должна быть как раз такой, чтобы скомпенсировать процесс уменьшения плотности.

Откуда берутся атомы водорода? Никто не осмеливается ответить на этот вопрос. Это тот пункт, с которого начинается теория Хойла. Если придерживаться веры в создание из ничего, это тот пункт в теории устойчивого состояния, где произошло, а вернее, непрерывно происходит сотворение.





Обе соперничающие теории, теория Взрыва и теория устойчивого состояния, могут быть согласованы со всеми фактами, известными о космосе (точнее, с тем, что в настоящий момент считается известным), а также со всеми принципами относительности. В настоящее время обе теории одинаково приемлемы. Каждый год какие-то новые наблюдения подтверждают теорию Взрыва и вызывают сомнения относительно теории устойчивого состояния, но они компенсируются другими новыми наблюдениями, которые подтверждают теорию устойчивого состояния и вызывают сомнения относительно теории Взрыва. Если вы будете читать статью или книгу защитника любой из этих теорий, вы увидите, что автор пишет так, как будто все данные говорят в его пользу и очень мало в пользу его упрямых оппонентов. Вы не должны ему верить. Когда специалисты расходятся во мнениях, разумно не становиться ни на чью сторону, если вы не отдаете сильного эмоционального предпочтения одной теории по сравнению с другой. Гамов откровенно писал о своем эмоциональном предпочтении теории Взрыва. Точно так же Хойл был откровенен в своем эмоциональном предпочтении теории устойчивого состояния. (Насколько мне известно, до сих пор психоаналитики еще не объяснили обе теории на основе неврозов тех людей, которые их защищают, но можете быть уверенными в том, что они в конце концов придут к этому.) Если не привлекать эмоции, разумно подождать выносить суждение до тех пор, пока астрономы не будут в состоянии привести достаточно данных, чтобы чаша весов склонилась в ту или другую сторону.

Имеется много других космических моделей. Некоторые из них были выдвинуты серьезно, некоторые — в виде шутки. Есть модели, в которых пространство закручивается само на себя, как листок Мебиуса (односторонняя поверхность, которая получается, если перевернуть один из концов полоски бумаги и затем склеить оба конца). Если вы обойдете такую Вселенную один раз, вы окажетесь там же, откуда начали свое путешествие, только все будет пе-

ревернутым, как в зеркале. Разумеется, вы можете обойти ее еще раз и поставить все на место. Имеются модели осциллирующей Вселенной, в которых Взрывы чередуются с периодами расширения и сжатия. Этот цикл повторяется непрерывно, как в доктринах вечного возрождения некоторых философов и восточных религий. (Любопытно отметить, что Эдгар По в своей странной космологической работе под названием «Эврика», которую он высоко ценил, защищал модель осциллирующей Вселенной, находящейся в настоящее время в стадии сжатия.) Наиболее эксцентричной из всех моделей, по-видимому, является модель «кинематической относительности», предложенная астрономом из Оксфордского университета Эдуардом Милном. В ней вводится два существенно различных вида времени. В терминах одного времени возраст и размер Вселенной бесконечны, и она совсем не расширяется. В терминах другого времени она имеет конечный размер и расширяется только с момента создания. Какой вид времени выбрать в качестве основного — это вопрос удобства.

Английский математик Эдмунд Уиттекер однажды предложил (в виде шутки) теорию уменьшающейся Вселенной, в которой конечный космос не только сокращается, но и материя непрерывно уходит туда, откуда она приходит в теории Хойла. Мир в конце концов полностью исчезает, но не со Взрывом, а с последним Вздохом. «Эта теория имеет то преимущество, — пишет Уиттекер, — что она дает очень простую картину конца Вселенной». Конечно, такая теория должна была бы объяснить, почему мы наблюдаем не фиолетовое, а красное смещение в спектре галактик, но это сделать нетрудно. Для этого нужно заимствовать у де Ситтера один из его приемов и предположить, что время ускоряет свой ход (один из физиков в шутку отметил, что это могло бы объяснить, почему по мере того, как мы становимся старше, кажется, что годы летят, как месяцы. Они действительно летят, как месяцы). Свет, который приходит на Землю от далекой галактики, был бы тогда светом той галактики, которая была миллионы лет

назад, когда электромагнитные колебания происходили медленнее. Это могло привести к достаточно большему красному смещению, которое превысило бы допплеровский сдвиг в сторону фиолетового края спектра. Разумеется, чем дальше галактика, тем старше и краснее она кажется.

Тот факт, что можно сформулировать модель уменьшающейся Вселенной, показывает, насколько гибки уравнения теории относительности. Они могут быть согласованы с множеством различных моделей космоса, каждая из которых очень хорошо объясняет все, что можно наблюдать в настоящее время. Интересно отметить, что английский философ Фрэнсис Бэкон в 1620 г. в своем труде «Novum Organum»



писал: «О небесах можно создать много отличающихся друг от друга гипотез, которые, однако, достаточно хорошо согласуются с явлениями». Современная космология не изменилась в этом отношении, хотя число наблюдаемых явлений стало гораздо большим; следовательно, имеются основания предполагать, что современные модели ближе к истине, чем старые. Конечно, космические модели, которые будут через сто лет, основанные на астрономических данных, неизвестных в настоящее время, могут совершенно не походить на любую из наших моделей, рассматриваемых сейчас всерьез.

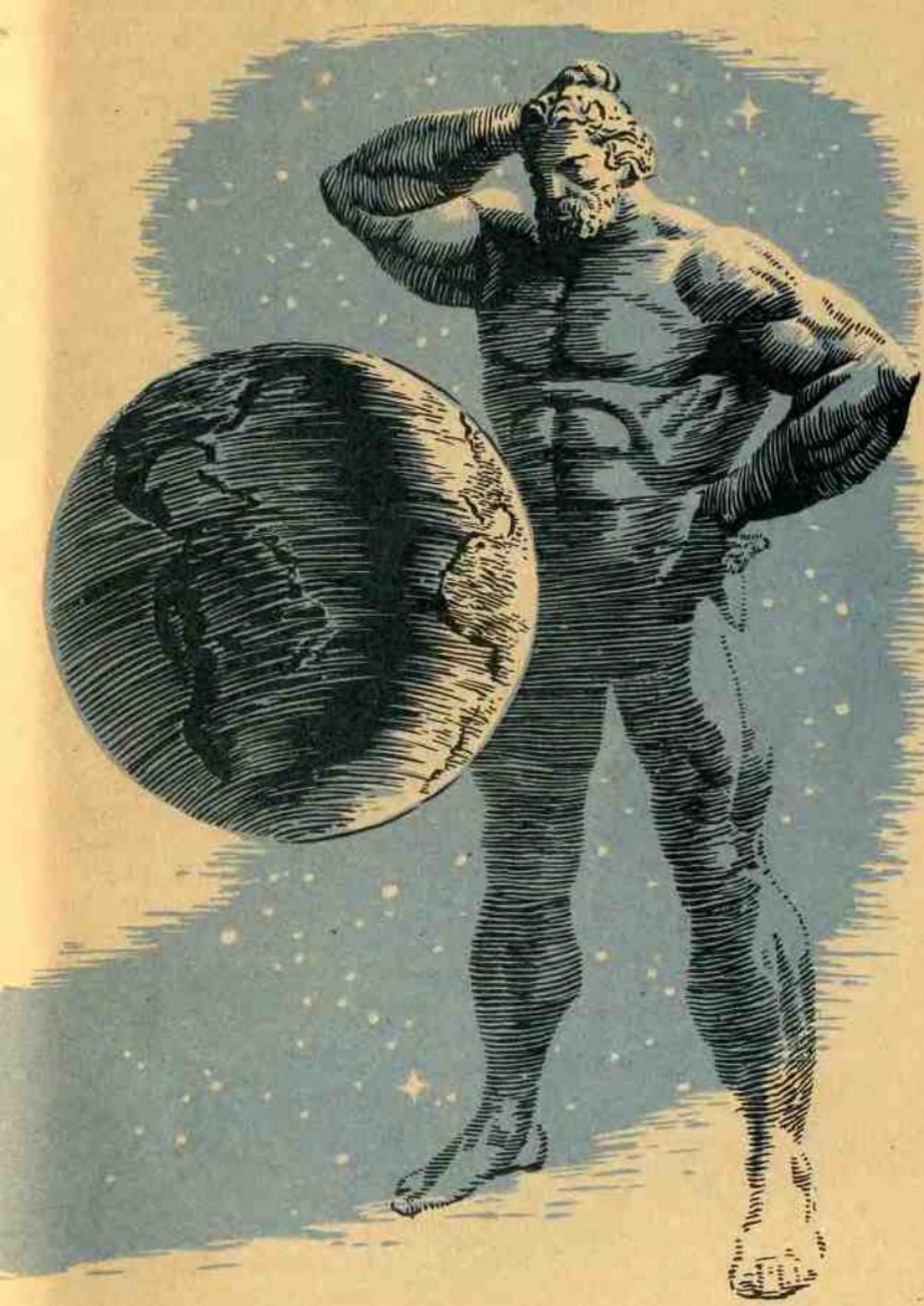
Есть забавная маленькая сказка ирландского писателя лорда Дансэни (в его книге «Человек, который ел Феникса»), в которой Атлас рассказывает Дансэни, что произошло в тот день, когда благодаря науке смертные перестали верить в древнегреческую модель Вселенной. Атлас говорит, что его задача была довольно глупой и неприятной. Ему было холодно, так как он держал на шее южный полюс Земли, а его руки были всегда мокрыми от двух океанов. Но он продолжал выполнять свое дело до тех пор, пока люди верили в него.

Затем, говорит печально Атлас, мир начал становиться «слишком ученым». Атлас решил, что в нем больше не нуждаются. Он оставил мир и ушел.

«Но, — говорит Атлас, — не без раздумий, не без больших раздумий. Однако я был глубоко удивлен; ужасно удивлен тем, что произошло, когда я это сделал».

«А что же произошло?»





«Ровным счетом ничего. Просто совсем ничего».

В этой книге я попытался рассказать историю о том, что произошло в результате более близкого к нам события, когда ньютоновский бог абсолютного движения, после того как Эйнштейн ткнул его пару раз, оставил Землю и ушел. С Землей ничего особенного не произошло, по крайней мере пока. Она продолжала вращаться вокруг своей оси, растягиваясь по экватору, обращаясь вокруг Солнца. Но в физике все-таки кое-что произошло. Ее возможности объяснять, ее возможности предсказывать и более всего ее возможности изменять лицо Земли в хорошую или плохую сторону стали больше, чем они были когда-либо раньше.

Послесловие

В предисловии уже отмечалось, что освещение некоторых вопросов в книге Гарднера нуждается в уточнении. Следует обратить внимание на следующие моменты.

При построении общей теории относительности Эйнштейн исходил из принципа эквивалентности (гравитационного поля и инерции). С помощью этого принципа он и получил основные уравнения теории. Однако необходимо помнить, что принцип эквивалентности не является общим принципом и имеет лишь ограниченную область применимости; как отмечает сам Гарднер, инерции эквивалентно лишь однородное (т. е. постоянное по величине и направлению) гравитационное поле.

Но поле можно считать однородным лишь в случае очень небольших участков пространства. Например, силовые линии гравитационного поля Земли расходятся радиально от ее центра. Только внутри объемов пространства, линейные размеры которых во много раз меньше размеров Земли, гравитационное поле Земли можно считать однородным. Поэтому говорят, что принцип эквивалентности локален, т. е. что с помощью перехода в ускоренную систему координат можно исключить гравитационное поле в отдельных участках пространства, но отнюдь не везде.

Общим принципом, применимым без всяких ограничений, является *принцип равенства инертной и гравитационной масс*. Пользуясь этим принципом, можно построить всю теорию гравитации. Если же исходить из принципа эквивалентности, то для построения теории необходимо сделать дополнительное предположение, что явление гравитации целиком

сводится к геометрическим свойствам пространства — времени.

Гарднер проводит мысль, что суть общей теории относительности — это полная равноправность всех систем отсчета, как равномерно, так и ускоренно движущихся. На самом деле суть в том, что *пространство — время искривлено*. Именно это обстоятельство и заставляет писать уравнения общей теории в такой форме, чтобы ими можно было пользоваться в любой системе координат.

В специальной теории относительности все инерциальные системы были равноправны не потому, что в них уравнения теории имели один и тот же вид. Причина была в том, что все физические явления в инерциальных системах имели один и тот же характер. Лучшее доказательство этому то, что никакими опытами, ни механическими, ни электромагнитными, нельзя обнаружить, покоится система или находится в состоянии равномерного движения.

Другое дело, когда речь идет об общей теории. Конкретный вид физических процессов здесь, конечно, различен в разных системах координат, и некоторые системы являются выделенными. Возьмем, например, специальную теорию относительности. Она, как известно, является частным случаем общей теории, так что в принципе мы можем пользоваться не только инерциальными системами координат, но и произвольным образом ускоренными. Формально это сделать можно, но это не означает, что с точки зрения физики все системы будут равноправны: во всех инерциальных системах свет всегда распространяется по прямой с одной и той же скоростью. В ускоряющихся системах координат путь света будет искривлен. Таким образом, существует объективный критерий, который в этом случае заставляет считать инерциальные системы выделенными.

А. И. БАЗЬ

Словарь терминов

Настоящий словарь терминов составлен с целью дать простые, ясные определения, которые не выходили бы за рамки элементарных книг, а не точные строгие определения. О точном определении «кривизны», например, не может быть и речи: это потребовало бы нескольких страниц. Читателю, который хотел бы найти более строгие определения, следует обратиться к соответствующей энциклопедии или учебнику.

Абсолютное движение — движение относительно неподвижного эфира или какой-нибудь столь же универсальной, выделенной системы отсчета.

Антиматерия — материя, состоящая из античастиц.

Античастица — элементарная частица, такая же, как и обычная частица, за исключением того, что она имеет противоположный заряд и (или) магнитный момент. В случае заряженных частиц противоположно и то и другое. В случае нейтральных частиц, которые не имеют заряда, различие основано на противоположности магнитного момента.

Галактика — объединение миллиардов звезд, часто в форме чечевицы, движущееся в пространстве как единое целое.

Галилеева система — см. инерциальная система.

Геодезическая линия — «наиболее прямая» линия, проведенная между двумя точками на данной поверхности или в данном пространстве или пространстве — времени; линия, соединяющая две точки, которая имеет экстремальную длину (самую большую или самую маленькую).

Гиперболическая геометрия — неевклидова геометрия, в которой на плоскости через данную точку, расположенную вне данной линии, может быть проведено бесконечное число параллельных ей линий.

Гиперсфера — четырехмерная сфера.

Гравитационная масса — масса тела, рассматриваемая как источник поля тяготения или как испытывающая действие такого поля. На Земле она измеряется как вес тела.

Длина волны — расстояние, измеряемое вдоль направления движения волны от данной точки волны до следующей, имеющей в данный момент ту же фазу.

Допплер-эффект — изменения в измеряемой длине звуковой или электромагнитной волны, обусловленные относительным движением наблюдателя к источнику волн или от него.

Евклидова геометрия — геометрия, основанная на постулатах Евклида.

Евклидово пространство — пространство с нулевой кривизной.
Илем — первичная субстанция, которая, как предполагают, взорвалась миллиарды лет назад, образовав теперешнюю расширяющуюся Вселенную.

Инертная масса — масса тела, рассматриваемая с точки зрения его сопротивления ускорению. Измеряется силой, требующейся для придания телу данного ускорения.

Инерциальная система — система координат, движущаяся в пространстве равномерно относительно других инерциальных систем. То же самое, что Галилеевская система.

Инерция — тенденция материального тела, если на него не действует внешняя сила, оставаться в покое относительно инерциальной системы или двигаться с постоянной скоростью вдоль прямой.

Координата — одно из набора чисел, используемых для определения положения точки. Для линии требуется одна координата, для плоскости — две, для пространства — три, для пространства — времени — четыре.

Космос — вся пространственно-временная Вселенная.

Красное смещение — сдвиг длин волн света к красному краю спектра. Такой сдвиг может быть обусловлен: 1. Движением источника от наблюдателя. 2. Влиянием сильного поля тяготения. 3. Тем, что свет был испущен в более ранние периоды, если предполагать, что время ускоряет свой ход.

Кривизна — отклонение линии, плоскости или пространства от «прямого» или «плоского».

Лоренц — Фитцджеральдово сокращение — релятивистское сокращение тела в направлении его движения.

Масса — грубо говоря, количество материи, содержащейся в теле.

Масса покоя — масса тела, покоящегося относительно наблюдателя.

Мировая линия — траектория движущегося тела, изображенная в четырехмерной пространственно-временной координатной системе.

Мысленный опыт — опыт, который можно только мысленно представить, но не выполнить в действительности.

Неевклидова геометрия — геометрия, в которой один или несколько постулатов Евклида заменены другими постулатами.

Нулевое g — нулевое тяготение, состояние невесомости в пространстве вдали от материальных тел или внутри космического корабля, находящегося в состоянии свободного падения.

Общая теория относительности — вторая (общая) теория относительности Эйнштейна, обобщающая его специальную теорию так, что в нее включаются ускоренное движение, тяготение и инерция.

Оптический горизонт — предельная сфера (в расширяющейся Вселенной), которая может быть достигнута с помощью

идеальных телескопов; за этим пределом галактики двигались бы от наблюдателя со скоростью, равной или большей скорости света.

Опыт Кеннеди — Торндайка — повторение опыта Майкельсона — Морли с использованием прибора, имеющего плечи разной длины.

Опыт Майкельсона — Морли — знаменитый опыт, доказавший отсутствие эфирного ветра при движении Земли в пространстве.

Осциллирующая Вселенная — вселенная, которая попеременно то расширяется, то сжимается.

Отрицательная масса — гипотетическое свойство тела, которое, если оно существует, приводило бы к тому, что это тело двигалось в направлении, противоположном направлению действующей на него силы.

Отрицательное ускорение — уменьшение скорости.

Парадокс близнецов — парадокс часов, примененный к гипотетической паре близнецов. Один из близнецов отправляется в путешествие в пространство с большой скоростью; относительно инерциальной системы Земли процесс его старения замедляется, и при возвращении на Землю он оказывается моложе своего брата, остававшегося на Земле.

Парадокс Олберса — удивительный расчет, показывающий, что если галактики равномерно распределены в пространстве, а Вселенная бесконечна во времени и пространстве и не расширяется, то все небо должно всегда сиять ярче Солнца.

Парадокс часов — поразительное утверждение теории относительности, что двое синхронизированных часов могут быть удалены друг от друга, а затем сведены вместе таким образом, что они уже не будут показывать одинаковое время, хотя и те и другие часы идут точно.

Постулат — положение, принятое без доказательства, которое составляет основу логической системы. Иногда называется аксиомой.

Принцип Маха — теория, считающая, что инерция обусловлена ускоренным движением тела по отношению ко всем материальным телам Вселенной.

Принцип эквивалентности — утверждение, составляющее основу общей теории относительности, что тяготение и инерция являются двумя различными способами рассмотрения по существу одних и тех же явлений.

Пространство — время — четырехмерная система координат в теории относительности.

Пространственно-временной интервал — расстояние между двумя событиями, измеряемое в пространстве — времени.

Пространственно-временная структура — геометрическая структура пространства — времени.

Свет — видимая часть электромагнитного спектра.

Свободное падение — движение тела под действием только сил тяготения.

Сигнал — любая цепь причинносвязанных событий, происходящих на разных телах.

Система отсчета — система координат, которая предполагается неподвижной и относительно которой производятся измерения времени, движения, длины, массы и т. д.

Сохранение массы — энергии — утверждение, что полное количество массы — энергии во Вселенной не может ни уменьшаться, ни увеличиваться.

Специальная теория относительности — первая теория относительности Эйнштейна, в которой шла речь только о наблюдателях в инерциальных системах отсчета.

Теория единого поля — теория, еще не получившая удовлетворительного развития, в которой тяготение и электромагнетизм объединены в единой системе уравнений.

Теория устойчивого состояния — теория, в которой считается, что мир во времени не имеет ни начала, ни конца, но поддерживается в «устойчивом состоянии» благодаря тому, что непрерывно создается новая материя, которая заменяет материю, уходящую в бесконечность в результате расширения Вселенной.

Топология — грубо говоря, изучение свойств фигуры, которые не изменяются при ее непрерывной деформации.

Ускорение — изменение скорости или направления (или и того и другого) движущегося тела.

Центробежная сила — сила инерции, которая принуждает тело или части тела двигаться от центра вращения.

Цилиндрическая Вселенная — первая модель Вселенной Альберта Эйнштейна. В ней пространство имеет положительную кривизну, временная координата прямая.

Четвертое измерение — любая четвертая координата в системе координат. В теории относительности в качестве четвертой координаты удобно рассматривать время.

Электромагнитная волна — излучение, испускаемое при колебаниях электрического заряда. Оно проходит через пустое пространство с постоянной относительно равномерно движущегося наблюдателя скоростью независимо от скорости своего источника или скорости наблюдателя.

Электромагнитный спектр — полный интервал электромагнитных излучений, от волн очень большой длины до волн очень малой длины.

Эллиптическая геометрия — неевклидова геометрия, в которой на плоскости через данную точку, расположенную вне данной прямой, не может быть проведено ни одной линии, параллельной этой прямой.

Эфир — вещество, которое, как считали физики девятнадцатого века, заполняет все пространство и служит средой для распространения электромагнитных волн.

Эфирный ветер — движение эфира мимо движущегося в нем тела.

Хронология

- 1879 г.— Рождение Альберта Эйнштейна (14 марта) в Ульме (Германия).
- 1881 г.— Альберт Майкельсон осуществляет первую попытку зарегистрировать эфирный ветер.
- 1887 г.— В опыте Майкельсона — Морли не обнаружен эфирный ветер.
- 1893 г.— Г. А. Лоренц публикует первую теорию сокращения, объясняющую результат опыта Майкельсона — Морли.
- 1905 г.— Эйнштейн публикует специальную теорию относительности.
- 1908 г.— Роланд фон Этвёш выполняет поразительно точные опыты, доказывающие, что инертная масса пропорциональна гравитационной массе. Герман Минковский читает свою знаменитую лекцию о пространстве и времени как «теневых изображениях» пространства — времени.
- 1911 г.— Эйнштейн предлагает, чтобы во время полного затмения Солнца был поставлен опыт по проверке отклонения светового луча от звезды силой тяготения.
- 1916 г.— Эйнштейн завершает работу над общей теорией относительности.
- 1917 г.— Эйнштейн предлагает модель «цилиндрической Вселенной». Начало современной космологии.
- 1919 г.— Артур Эддингтон возглавляет экспедицию в Африку для наблюдения солнечного затмения; измерения подтверждают предсказания Эйнштейна о действии тяготения на световой луч от звезды.
- 1932 г.— Кеннеди и Торндайк повторяют опыт Майкельсона — Морли таким образом, что опровергают первоначальную теорию сокращения Лоренца.
- 1942 г.— Энrico Ферми с сотрудниками впервые получают самоподдерживающуюся цепную ядерную реакцию. Масса переходит в энергию в согласии с формулой Эйнштейна. Начинается атомный век.
- 1955 г.— Смерть Эйнштейна (18 апреля) в Принстоне, шт. Нью-Джерси (США).
- 1958 г.— Рудольф Мёссбауэр открывает «эффект Мёссбауэра», на основании которого вскоре был поставлен опыт, подтвердивший предсказание Эйнштейна о том, что время замедляется под действием тяготения.

Оглавление

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие автора	7
Глава 1. Абсолютно или относительно?	11
Глава 2. Эксперимент Майкельсона — Морли	21
Глава 3. Специальная теория относительности. Часть I	41
Глава 4. Специальная теория относительности. Часть II	61
Глава 5. Общая теория относительности	79
Глава 6. Тяготение и пространство — время	97
Глава 7. Принцип Маха	121
Глава 8. Парадокс близнецов	129
Глава 9. Модели Вселенной	143
Глава 10. Взрыв или устойчивое состояние?	171
Послесловие	183
Словарь терминов	185
Хронология	189

М. ГАРДНЕР
Теория относительности
для миллионов
Бланк заказов, № 6, 1967 г.
Редактор Т. П. Калюжная
Обложка художника В. Г. Прохорова
Художественный редактор
А. С. Александров
Технический редактор Е. И. Мазель
Корректор Т. В. Минаева



Подписано в печать 5/VI—1967 г.
Бумага 84×108/32, офсетная № 1.
Усл. печ. л. 10,02. Уч.-изд. л. 8,77
Заказ изд. 1955 Тираж 145 000 экз.
Цена 46 коп.
Атомиздат, Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7

Тульская типография
Главполиграфпрома Комитета
по печати
при Совете Министров СССР
г. Тула, пр. им. В. И. Ленина, 109.
Заказ 238

М. ГАРДНЕР

ТЕОРИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
ДЛЯ
МИЛЛИОНОВ

Цена 46 коп.

