

22.313

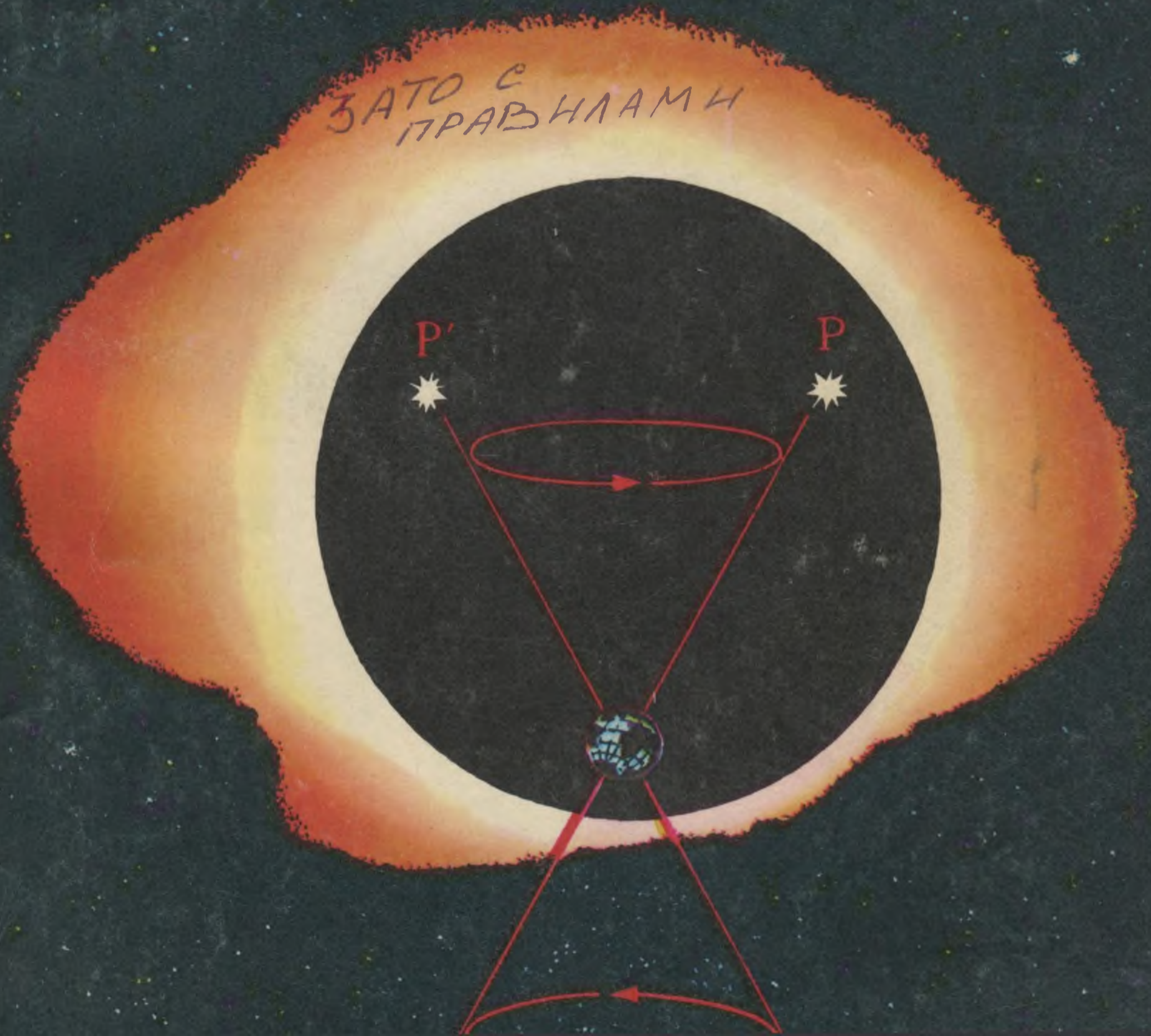
H 29

1031853

Дж. НАРЛИКАР

# ПРАВИТАЦИЯ БЕЗ ФОРМУЛ

ЗАТО С  
ПРАВНАМИ





**Дж. НАРИКАР**

**ГРАВИТАЦИЯ  
БЕЗ ФОРМУЛ**



# THE LIGHTER SIDE OF GRAVITY

**JAYANT V. NARLIKAR**

Tata Institute of Fundamental Research  
Bombay, India

W. H. Freeman and Company  
San Francisco

**ДЖ. НАРЛИКАР**

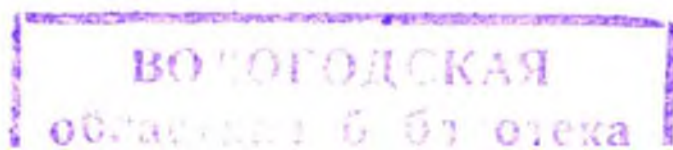
# **ГРАВИТАЦИЯ БЕЗ ФОРМУЛ**

Перевод с английского  
канд. физ.-мат. наук  
С. И. Блинникова

с предисловием  
д-ра физ.-мат. наук  
И. Ю. Кобзарева

1031853

Москва • Мир • 1985





ББК 22.3 + 22.6  
Н29  
УДК 531.5

**Нарликар Дж.**

Н29 Гравитация без формул: Пер. с англ. С.И. Блинникова/ С предисловием И.Ю. Кобзарева.—М.: Мир, 1985, 148 с., ил.

Почему Луна не падает на Землю? В чем причина морских приливов? Что заставляет планеты обращаться вокруг Солнца? Каковы источники энергии звезд? Чем объяснить смещение перигелия Меркурия? Что такое гравитационное красное смещение? Каково происхождение белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр? Существуют ли белые дыры? Почему расширяется Вселенная? В книге индийского астрофизика в увлекательной форме рассказывается о теории тяготения Ньютона и общей теории относительности Эйнштейна, которые позволили ответить на эти многочисленные вопросы.

Расчитана на широкие круги читателей. Доступна школьникам старших классов.

Н  $\frac{1704020000-159}{041(01)-85}$  62-85, ч. 1

ББК 22.3 + 22.6  
531.5

*Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии  
и геофизике*

© 1982 by W. H. Freeman and Company

© Перевод на русский язык, «Мир», 1985

# Предисловие

В настоящее время общая теория относительности, или теория тяготения Эйнштейна, стала важным элементом современной культуры. Предполагается, что на каком-то уровне с этой теорией должен быть знаком каждый образованный человек. Разумеется, знание этого предмета в его подлинном смысле доступно только специалисту-теоретику с достаточной физико-математической подготовкой, но речь идет о знании более общего характера.

Предлагаемая вниманию советского читателя книга индийского ученого в некотором смысле уникальна: автор сделал попытку изложить основы теории тяготения для людей, абсолютно с ней незнакомых. Не предполагается даже знание механики Ньютона в объеме средней школы, а используемый математический аппарат ограничен простейшей алгеброй. В целом автор с поставленной задачей справился: весь долгий путь от простейших представлений о природе механического движения до проблем современной космологии в книге пройден. Начав с элементарных идей о движении, автор описывает в последних главах книги свойства черных дыр, гипотетических белых дыр и Вселенной в целом. В этом

смысле книга занимает особое место как в мировой, так и в советской научно-популярной литературе.

Примечательная особенность книги состоит в том, что, несмотря на элементарность изложения, она всесторонне освещает современную проблематику. Автор излагает такие идеи, как извлечение энергии из черных дыр, возможные методы их обнаружения, знакомит читателя с объектами, являющимися кандидатами в черные дыры, и т.д.

Специалисту может показаться, что некоторые вещи изложены чересчур примитивно, но при внимательном чтении становится ясно, что автор не допускает чрезмерного упрощения, а скорее умело обходит трудности, связанные с популяризацией этой области науки. Читатель без специальной подготовки, на которого рассчитана книга, этого и не заметит, и только знаток предмета способен оценить такт и продуманность, с которыми это сделано.

В целом книга, несомненно, доступна читателю со средним образованием и, безусловно, будет содействовать знакомству с современной физикой.

17 апреля 1984 г.

*И. Ю. Кобзарев*



SITZUNGSBERICHTE 1915.  
XLIV. XLVI

KÖNIGLICH PREUSSISCHEN  
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

Gesamtsitzung vom 4. November.  
Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 11. November.

Zur allgemeinen Relativitätstheorie.

(Mit Nachtrag.)

VON A. EINSTEIN.

PHILOSOPHIÆ  
NATURALIS  
PRINCIPIA  
MATHEMATICA

Autore J. S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Mathematicos  
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.

S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.

Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud  
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Титульные листы «Начал» И. Ньютона 1686 г. и статьи А. Эйнштейна по общей теории относительности 1915 г. В этих работах заложены основы двух величайших достижений в теории гравитации. (Титульный лист «Начал» – с любезного разрешения библиотеки «Банкрофт», Калифорнийский университет, Беркли.)

# От автора

Нередко можно слышать, что современная теоретическая физика началась с ньютоновского закона тяготения. И это весьма справедливо, особенно в том, что касается целей и методов современной физики: описывать и объяснять различные сложные явления природы при помощи нескольких основных законов.

Гравитация — одна из основных сил природы. Она вызывает множество астрономических явлений — от океанских приливов до расширения Вселенной. Ньютон описал гравитацию при помощи простого закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Эйнштейн увидел в ней нечто более глубокое, связывающее ее с пространством-временем. Современный физик-теоретик пытается включить ее в теорию великого объединения, связывающую все основные типы взаимодействий. Но и сегодня гравитация остается загадочной.

В этой книге я хотел рассказать, как разнообразна по своим проявлениям и как важна эта таинственная вездесущая сила. Естественно, я сконцентрировал внимание на астрономических явлениях — ведь именно астрономия была и остается той областью науки, в которой проверяется теория гравитации. Это движения планет, комет и спутников, внутреннее строение и эволюция звезд, приливные эффекты на Земле и в двойных звездах, сверхплотные объекты, такие, как ней-

тронные звезды, черные и белые дыры, происхождение и эволюция наблюдаемой Вселенной.

Изложение ведется на общедоступном уровне. Несмотря на название книги, не следует думать, что она носит развлекательный характер. Моя цель состояла в том, чтобы подчеркнуть плодотворную взаимосвязь между астрономией и теорией гравитации, взаимосвязь, которая существовала на протяжении трех столетий и сохранится в обозримом будущем.

Чтобы книга получилась небольшой по объему и содержала более или менее общепринятые вещи, пришлось опустить многие интересные и перспективные идеи, лежащие за рамками ньютоновской и эйнштейновской теорий. В отличие от консервативного большинства астрономов я считаю, что последнее слово в теории гравитации еще не сказано и что некоторые астрономические явления уже требуют притока свежих идей. Однако основное внимание в этой книге уделялось успехам теорий Ньютона и Эйнштейна, а также тем смелым и весьма абстрактным выводам, которые из этих теорий следуют.

Я писал эту книгу с большим удовольствием, и работа была еще приятнее благодаря тому, что мне помогали многие люди. Очень полезными были замечания Дж. Фолкнера. Моя жена Мангала сделала наброски некоторых рисунков. Она



и мои родители прочитали черновой вариант рукописи и внесли полезные предложения, как сделать книгу более доступной читателю-неспециалисту. Мне приятно поблагодарить сотрудников художественного и фотографического отделов Института фундаментальных исследований им. Тата за быстрое исполнение некоторых рисунков. Рисунки, заимствованные из других источников, с благодар-

ностью отмечены в соответствующих местах. И наконец, я весьма признателен г-ну Д. Б. Саванте за быструю перепечатку рукописи.

*Джайянт В. Нарликар*

Институт фундаментальных исследований им. Тата  
Бомбей, Индия

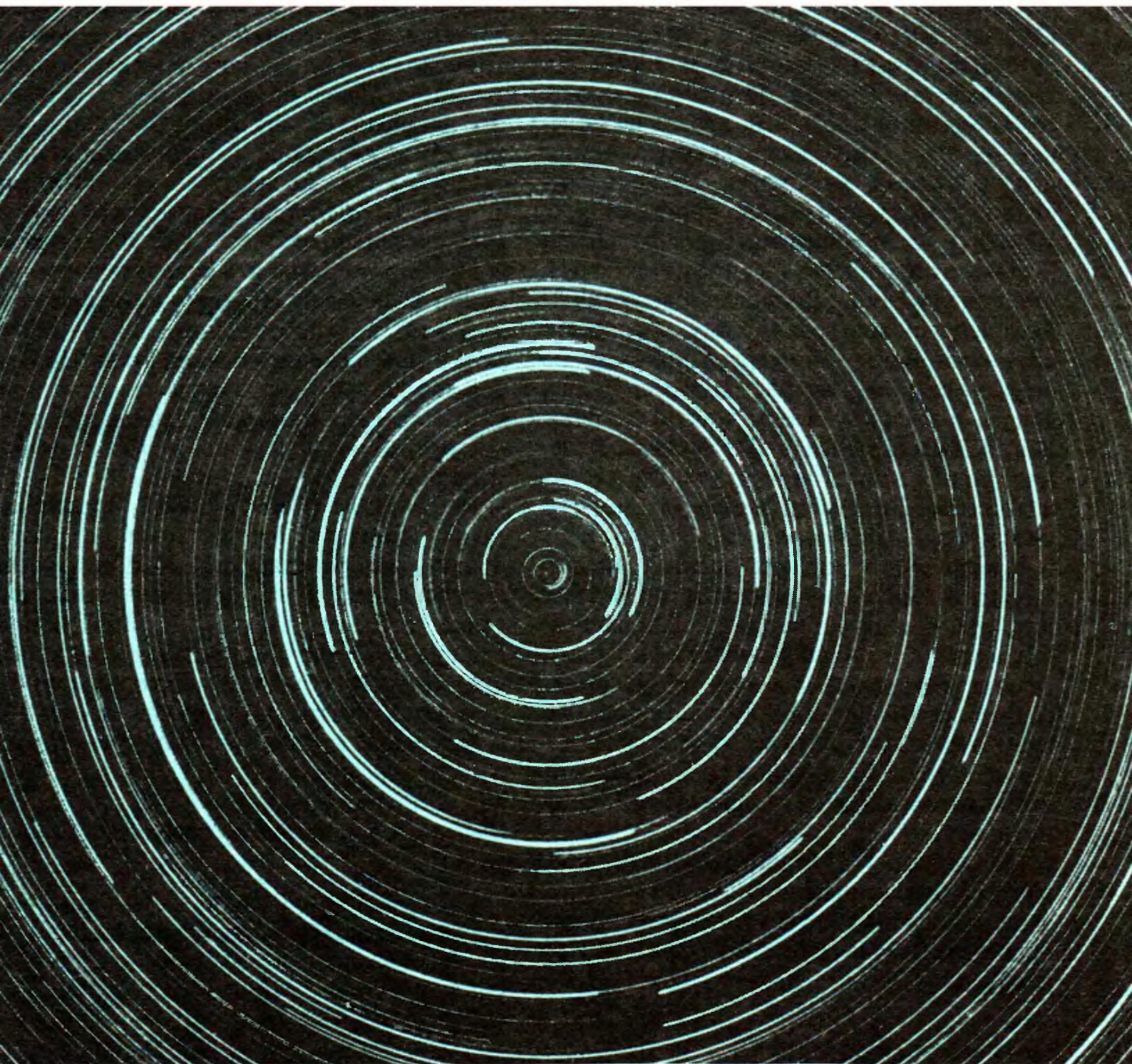


# 1

## Почему движутся тела

---

На фотографии ночного неба,  
полученной с большой экспозицией,  
видна Полярная звезда и кажущееся движение звезд.  
(С любезного разрешения Ликской обсерватории.)





## БЕСПОКОЙНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Среди древнеиндийских мифов есть такой рассказ о Полярной звезде. У короля Уттанапада были две жены. Любимая, Суручи, была надменной и гордой, а не-любимая, Сунити, — кроткой и скромной. Однажды сын Сунити Дхрува увидел, как его сводный брат Уттама играет на коленях у отца. Ему тоже захотелось поиграть с ними, но Суручи, которая случайно проходила мимо, прогнала его. Чувствуя себя обиженным, пятилетний Дхрува отправился на поиски такого места, откуда ему не пришлось бы уходить. Мудрецы посоветовали ему умиловать бога Вишну, и Дхрува наложил на себя суровую епитимью. Наконец, Вишну явился и предложил ему любую награду. Когда Дхрува поведал ему о своем желании, Вишну поместил его туда, где теперь находится Полярная звезда, — в положение, навеки неизменное.

В отличие от других звезд и планет Полярная звезда не восходит и не заходит; она всегда видна в одной и той же части неба. Эта неподвижность Полярной звезды помогала древним и помогает современным морякам в навигации. Однако нынешний Дхрува не мог бы довольствоваться Полярной звездой как местом вечного покоя. Попробуем выяснить почему.

Положение Полярной звезды на небе кажется неизменным потому, что она почти точно лежит в точке пересечения оси вращения Земли с небесной сферой. При вращении Земли вокруг оси другие

звезды восходят над горизонтом на востоке и заходят на западе. В той мере, в какой направление оси вращения Земли остается неизменным, Полярная звезда не восходит и не заходит, а кажется неподвижно стоящей на одном месте. Однако ось вращения Земли очень медленно, но все же меняет свое направление в пространстве. Она не жестко закреплена, как на рис. 1.1, а, а описывает узкий конус, изображенный на рис. 1.1, б. Время полного оборота земной оси составляет примерно 26 000 лет. Поэтому не удивительно, что на протяжении человеческой жизни или даже нескольких веков Полярная звезда выглядит почти неподвижной, между тем как на самом деле ее положение относительно земной оси постепенно меняется.

Но дело даже не в этом! Положение самой Полярной звезды вовсе не фиксировано в пространстве. Как и другие звезды нашей Галактики, она движется. Мало того, вся Галактика в целом (а она, как видно на рис. 1.2, представляет собой дисковидный объект с небольшим утолщением в центре и содержит около 100 млрд. звезд) вращается вокруг своей оси с периодом примерно 200 млн. лет\*. Значит, Дхрува не мог бы утверждать, что нашел себе спокойное, неподвижное местечко!

---

\* Кроме того, наша Галактика участвует в крупномасштабном движении, называемом расширением Вселенной. Подробнее об этом см. в гл. 10.

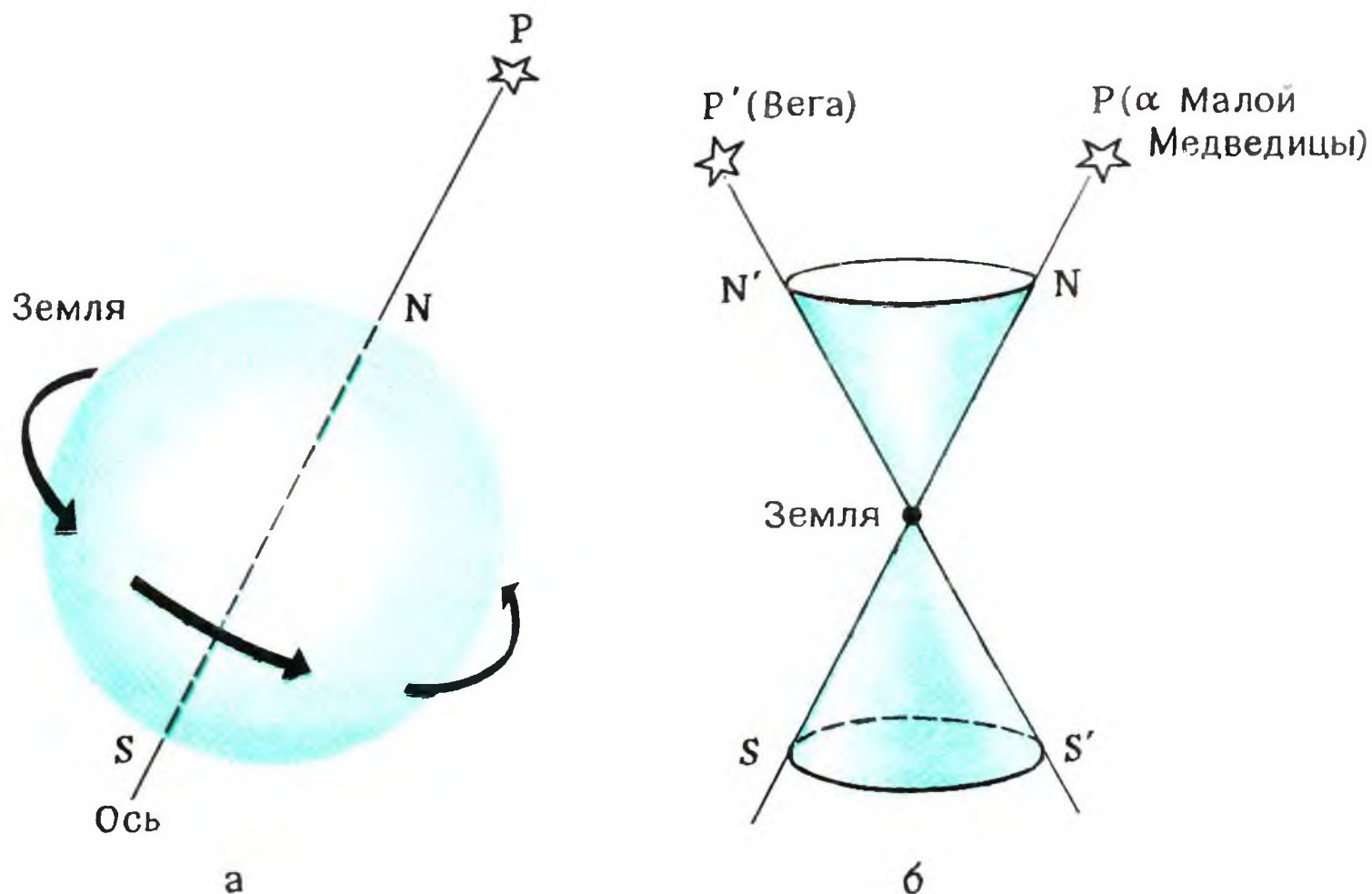


Рис. 1.1. *а*—Земля вращается вокруг своей оси  $NS$ . В настоящее время Полярная звезда  $P$  лежит почти точно в месте пересечения этой оси с небесной сферой; *б*—ось не фиксирована в пространстве, а *прецессирует*, т. е. описывает в пространстве коническую поверхность. Поэтому Полярная звезда меняет свое положение относительно оси. Показаны две противоположные образующие конуса  $NS$  и  $N'S'$ . В настоящее время ось проходит через звезду альфа Малой Медведицы (или Полярную звезду); через 13 000 лет она будет проходить через звезду Вега (альфу Лиры).



Рис. 1.2. Схематическое изображение нашей Галактики. Стрелками показано направление ее вращения. Крестиком в кружке отмечено примерное положение Полярной звезды.



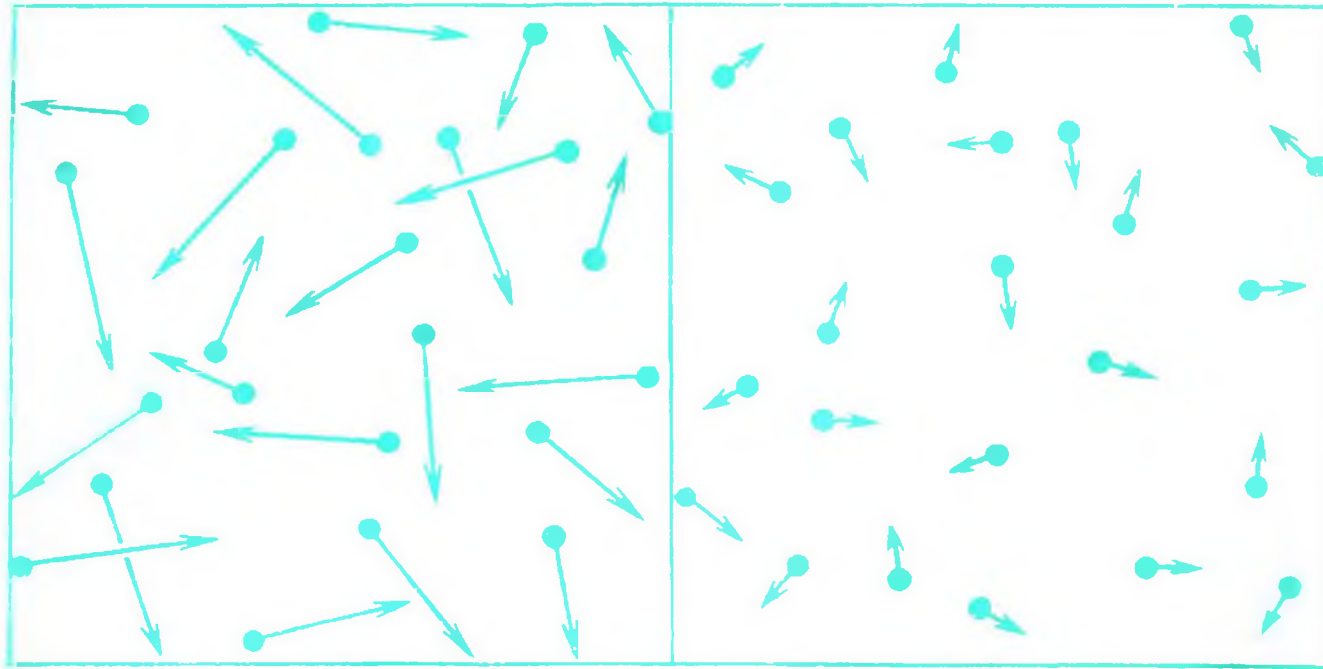


Рис. 1.3. Молекулы воздуха в хаотическом движении. Длина стрелки обозначает скорость соответствующей молекулы. Справа изображено распределение молекул с меньшими скоростями, что соответствует более низкой температуре воздуха, чем для распределения слева.

И в самом деле, при более тщательном рассмотрении обнаруживается, что характерной чертой Вселенной является не покой, а движение. Причем астроном наблюдает примеры крупномасштабных движений, а исследователь микромира находит многообразные движения мелкого масштаба. Когда смотришь на реку издали, может показаться, что вода в ней неподвижна. Однако приблизившись к ней, замечаешь непрерывное течение воды. В безветренный день может показаться, что воздух неподвижен. Однако молекулярная физика утверждает, что спокойный казался бы воздух состоит из молекул, находящихся в *хаотическом движении*, и этим беспорядочным движением определяется *температура* воздуха (рис. 1.3). Чем быстрее случайные движения молекул, тем выше температура воз-

духа. Переходя к атомам, мы обнаруживаем все новые движения в той или иной форме у всех видов материи. Это и колебания решетки в кристаллах, и отрицательно заряженные электроны, свободно движущиеся в металлах (электронный газ), и связанные электроны, перескакивающие с одной орбиты на другую внутри атома. Даже внутри атомных ядер нет покоя! На ускорителях частиц высоких энергий, таких, как в «Фермилэб» близ Чикаго или в ЦЕРНе возле Женевы, физики-атомники постепенно раскрывают секреты таинственного мира элементарных частиц (рис. 1.4). Искать покоя и неподвижности в такой беспокойной Вселенной – напрасная трата сил. Напротив, следует задать вопрос: «Почему все тела движутся?».

## ОТ АРИСТОТЕЛЯ ДО ГАЛИЛЕЯ

Этот вопрос был задан около 23 столетий назад Аристотелем, греческим философом, учеником Платона и воспитателем Александра Македонского. В средние века философия Аристотеля господство-

вала в западном мышлении, а его учение поддерживалось авторитетом римско-католической церкви. Теперь, в век науки, метод и идеи Аристотеля кажутся нам чуждыми и трудными для восприятия.

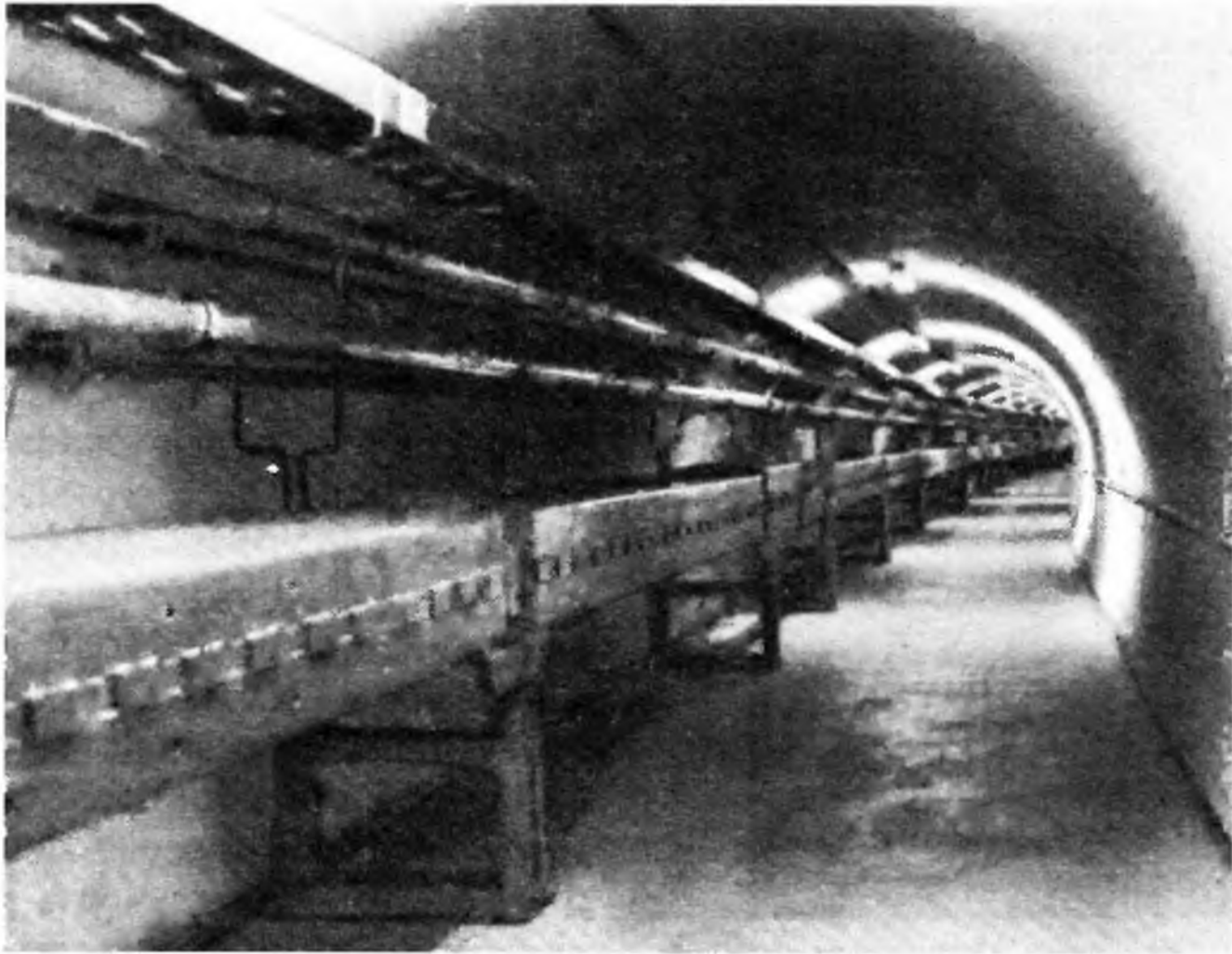


Рис. 1.4. Секция ускорителя частиц высоких энергий «Ферми-лэб». (С любезного разрешения Р. Р. Уилсона. Национальная лаборатория ускорителей.)

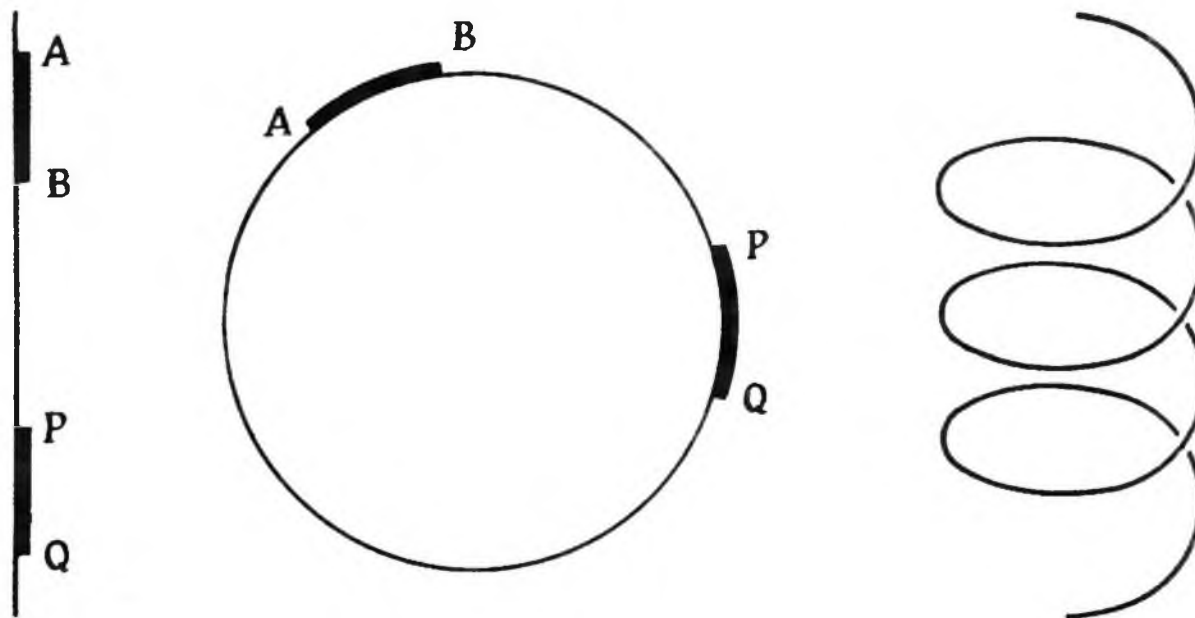


Рис. 1.5. Прямая линия и окружность – простые кривые в том смысле, что любую их часть  $AB$  можно наложить на любую другую их часть  $PQ$ . Галилей указал, что тем же свойством обладает и изображенная справа винтовая линия.





Рис. 1.6. Портрет Галилея (1564–1642). (С любезного разрешения Йеркской обсерватории.)

Однако для Греции 350 г. до н.э. они представляли весьма стройную систему.

Аристотель говорил об изменениях в системе вообще, и движение означало для него локальное изменение. Повседневные наблюдения давали много примеров: движение звезд по небу, поднимающийся дым, движение облаков, падение дождевых капель, морские приливы, полет стрел и т.д. Аристотель систематизировал эти наблюдения, рассматривая все природные движения как комбинации движений по прямой и по окружности. Чем же таким особенным отличаются прямые и окружности? Как показано на рис. 1.5, эти линии являются *простыми*. Любая часть простой линии может быть наложена на любую другую ее часть. При помощи отрезков окружностей и прямой можно описать любую сложную кривую. Согласно доводам Аристотеля, именно это и происходит в природе. На вопрос, почему же все-таки тела движутся, Аристотель отвечал, что каждое тело естественно стремится занять неко-

торое предпочтительное положение и наблюдаемые в природе движения тел именно потому и происходят.

Это естественное движение Аристотель противопоставлял другому, насильственному движению, которое возникает, например, под воздействием живых существ. В одном из приведенных выше примеров стрелу выпускает человек, и поэтому ее полет не естественное, а насильственное движение. Любое такое движение всегда должно вызываться некой реальной причиной.

Только в XVII в. идеям Аристотеля был брошен серьезный вызов. Это сделал Галилео Галилей (рис. 1.6), придворный математик и философ великого герцога Флоренции. Гениальность Галилея проявилась не столько в математике и философии, сколько в использовании экспериментов для доказательства своих доводов. Книга Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой» – яркий пример противоборства научного мышления со средневековыми взглядами, основанными на философии Аристотеля. Галилей не только отстаивал систему Коперника, но и подвергал критике самые основы аристотелевой натуральной философии.

Все аргументы Галилея против системы Аристотеля и их доказательства здесь не удастся перечислить даже вкратце. Рассмотрим два примера, относящиеся к описанному Аристотелем насильственному движению: полет стрелы и толкание тележки.

Почему движется стрела после выстрела из лука? Согласно Аристотелю, чтобы она двигалась, на нее должна все время действовать сила. Первопричина ее движения, конечно, натянувший тетиву лука человек. А дальше? Последователи Аристотеля утверждали, что стрела летит потому, что воздух позади непрерывно толкает ее вперед подобно тому, как ветер



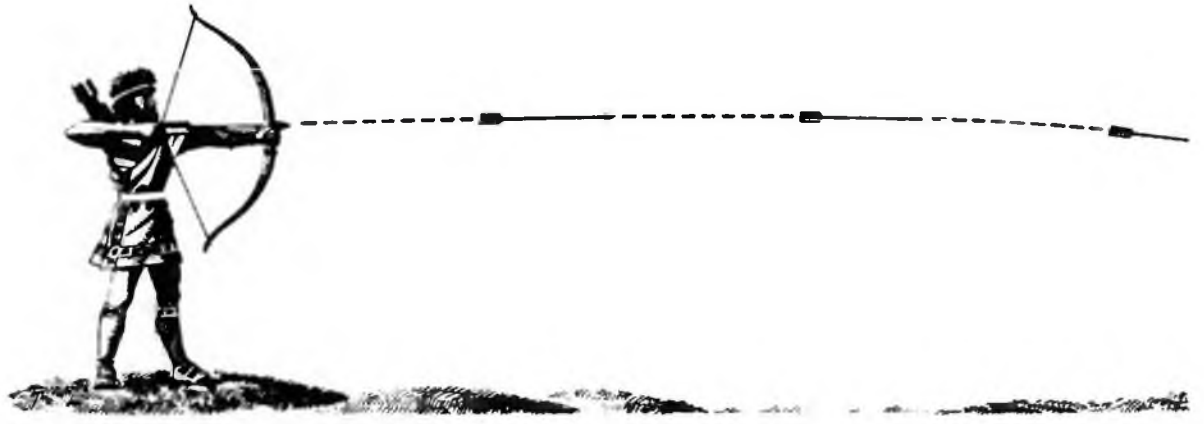


Рис. 1.7. Стрела, пущенная в направлении своей длины, летит гораздо дальше, чем стрела, пущенная боком. Галилей ссылался на этот эксперимент, чтобы опровергнуть принцип Аристотеля, согласно которому тела движутся под действием толкающего их воздуха. В этом эксперименте воздух мог бы давить на большую площадь сечения стрелы при боковом полете, чем при продольном.

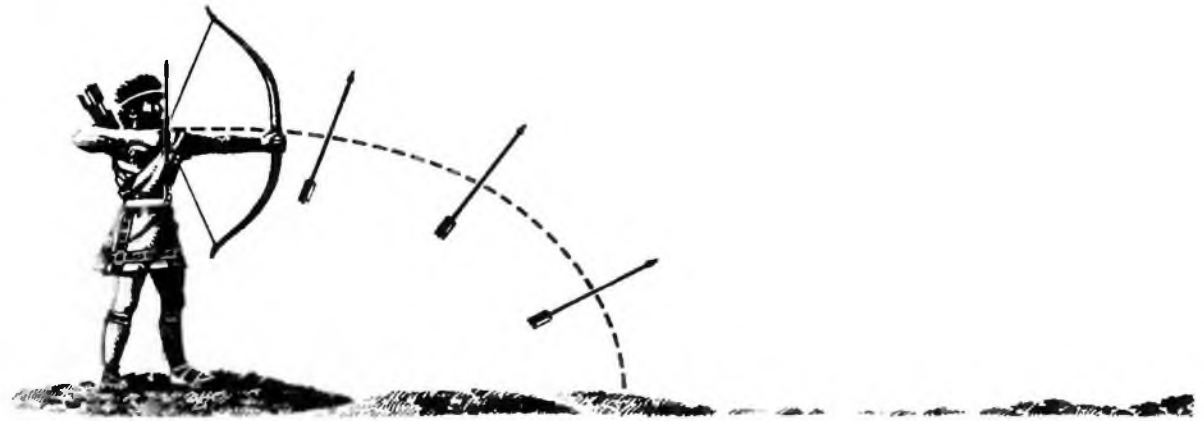
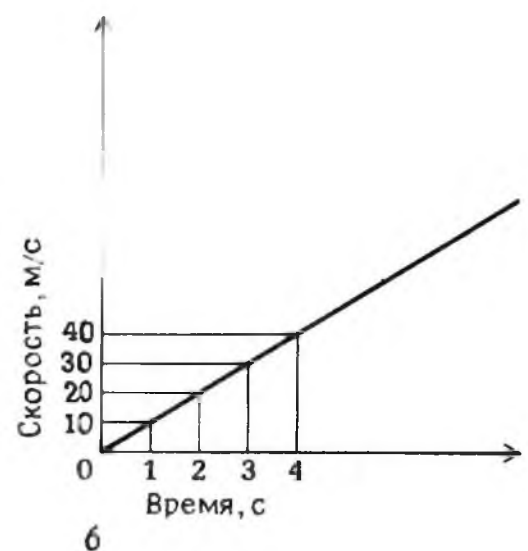
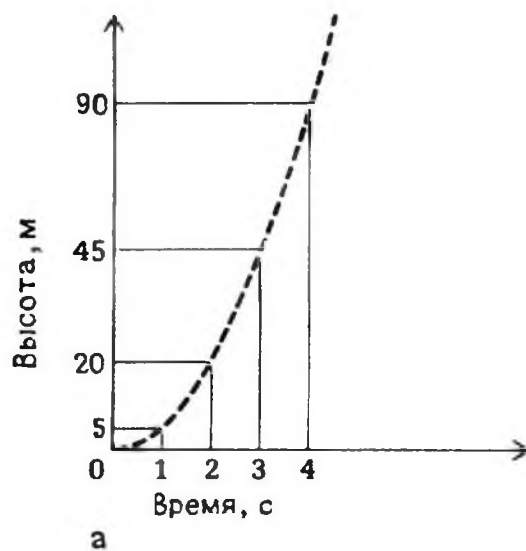


Рис. 1.8. Галилей доказал на опытах, что предметы, брошенные с высоты, пролетают возрастающие расстояния за равные промежутки времени. Как показывает штриховая линия (а), равным промежуткам времени соответствуют при падении тела возрастающие отрезки расстояния. Как показывает жирная прямая (б), скорость падения также непрерывно растет со временем.



несет облака по небу. На это рассуждение Галилей прежде всего отвечал, что стрела, выпущенная боком (рис. 1.7), пролетает небольшое расстояние. Если бы Аристотель был прав, то разве воздух, воздействуя на большее сечение стрелы, летящей боком, не придавал бы ей большую скорость, чем при обычном выстреле?

Аристотель утверждал, что постоянная сила порождает постоянную скорость. Чтобы проверить правильность этого утверждения, Галилей сконструировал водяные часы для точного измерения временных интервалов, а затем провел эксперимент по сбрасыванию тяжелого

предмета с большой высоты. Если вес тела и есть та сила, которая вызывает падение, то, согласно Аристотелю, оно должно пролетать одинаковые расстояния за равные промежутки времени. Галилей показал (рис. 1.8), что за равные промежутки времени падающее тело пролетает все большие расстояния. Его скорость не остается постоянной, а возрастает пропорционально времени.

Брошенное тело, первоначально находившееся в покое, постепенно набирает скорость. Так же обстоит дело и в других примерах из повседневной жизни. Тележка стоит на месте, но, если ее толкнуть, она начнет двигаться. Таким образом, на-



блюдается не постоянная скорость, а изменение скорости. Изменение скорости за единицу времени называется *ускорением*. Если скорость автомобиля 80 км/ч, а водитель сильнее нажмет на газ, то скорость автомобиля возрастет – он ускорится. Галилей осознал, что истинный результат воздействия силы на тело – это ускорение.

Вернемся к примеру с тележкой. Чтобы привести ее в движение, нужна сила, перестанем толкать тележку – и она остановится. Так, может быть, Аристотель был прав, утверждая, что для движения нужна сила? Разумеется, немного подумав, лег-

ко найти ошибку в его рассуждениях. Когда мы начинаем с некоторой силой толкать тележку, она не сразу приобретает постоянную скорость. Ее скорость растет постепенно, т.е. тележка ускоряется. Будь Аристотель прав, то с прекращением действия силы тележка остановилась бы немедленно. Однако, прежде чем остановиться, она еще немного прокатится. А останавливается она потому, что все это время на нее действовала сила, препятствующая движению, – сила трения. Итак, даже после того, как толкающая сила исчезла, изменение скорости происходит под действием некоторой силы.

## ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

Путем таких рассуждений и опытов Галилей правильно уловил связь силы с движением. Он понял, что сила приводит к изменениям в движении и что в отсутствие действующей на тело силы его скорость не меняется. Галилей дал лишь качественную оценку связи между силой и изменением скорости. Количественное описание этой связи было найдено только спустя несколько десятилетий после его смерти. Точную формулировку законов движения дал Исаак Ньютон, который родился в 1642 г. – в год смерти Галилея. В своей книге «Математические начала натуральной философии», опубликованной в 1687 г., Ньютон (рис. 1.9) подробно рассмотрел три закона движения.

Первый из них был уже известен Галилею. Он гласит, что тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не действует какая-либо внешняя сила. На рис. 1.10 показано, какого рода опыты и рассуждения привели Галилея к этому закону. Обратите внимание на различие между этим законом и аристотелевой концепцией движения.

Аристотель считал, что для движения тела с постоянной скоростью на него должна действовать постоянная сила, а в выводах Галилея утверждается, что постоянная скорость тела свидетельствует

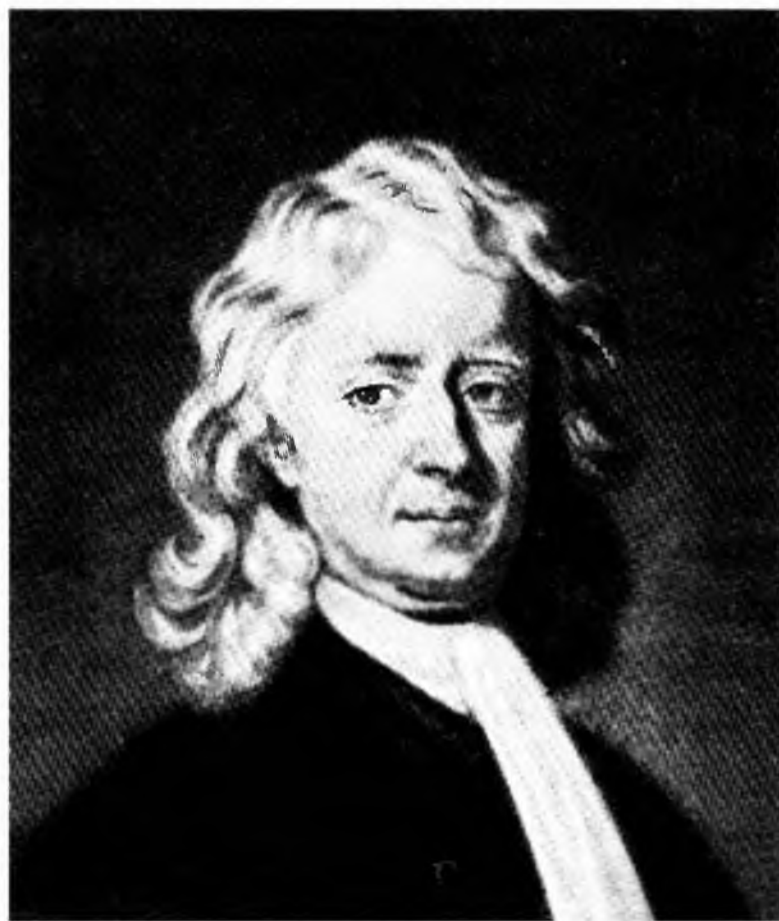


Рис. 1.9. Портрет Исаака Ньютона (1642–1727), с гравюры (мешо-тинто), изготовленной в 1740 г. Дж. Макардлом по портрету Э. Симена (Национальная портретная галерея).

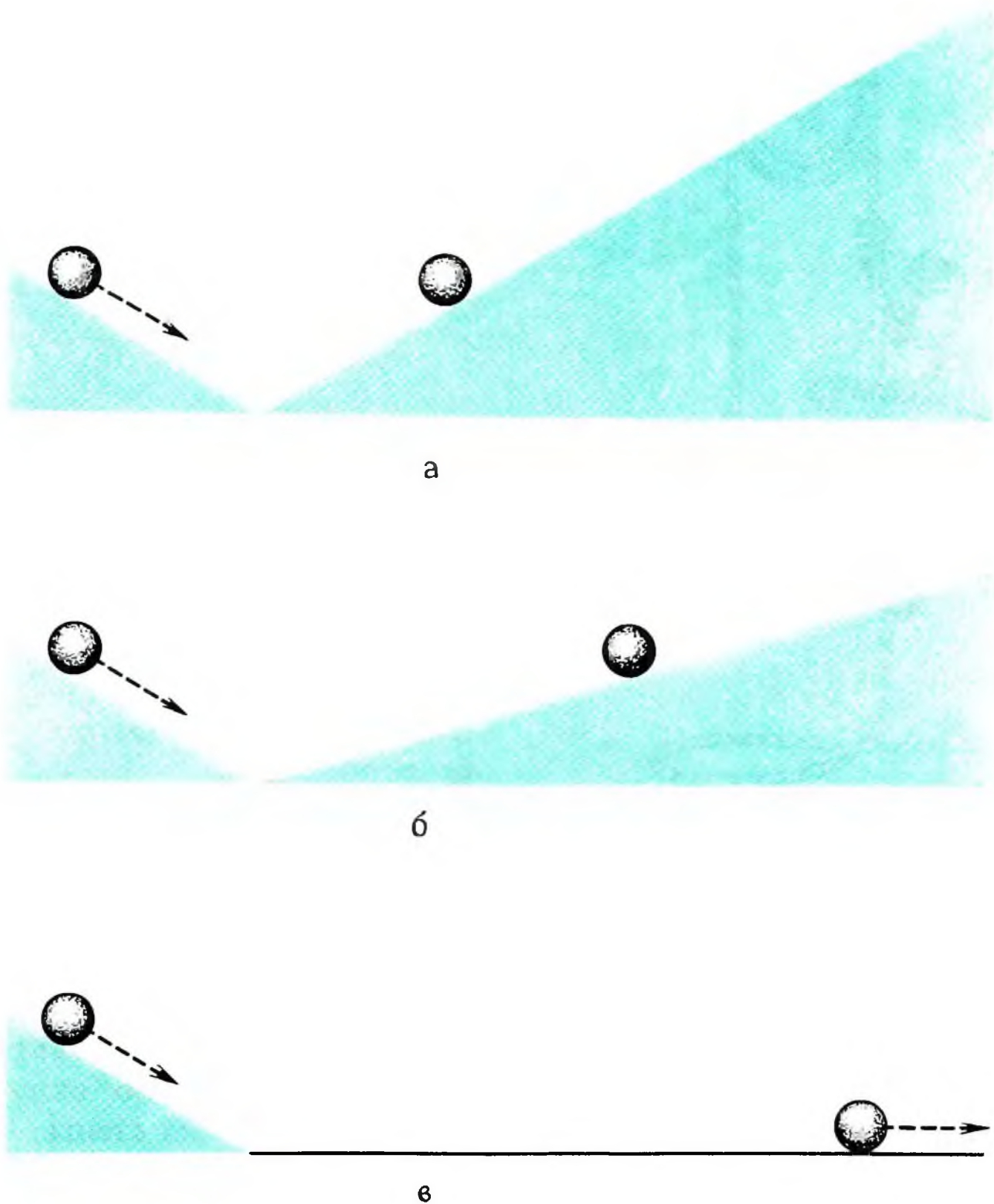


Рис. 1.10. Галилей пришел к первому закону движения при помощи экспериментов, подобных изображенному здесь. *а* – шарик скатывается с некоторой высоты по наклонной плоскости и вкатывается на другую плоскость, достигая той же высоты. *б* – при уменьшении наклона второй плоскости шарик катится по ней дальше. *в* – если плоскость горизонтальная, то при отсутствии трения или другой силы шарик будет катиться до бесконечности.

об отсутствии действующей на него силы.

Второй закон Ньютона утверждает, что ускорение тела пропорционально вызывающей его силе. И здесь мы встречаемся еще с одним понятием, качественно знакомым Галилею, – с понятием *инерции*. Инерция – это свойство любого материального тела сопротивляться измене-

ниям состояния его движения. Количественно мы можем сказать, что, чем больше инерция тела, тем больше сила, необходимая для придания ему одного и того же ускорения. Автомобиль придется толкать с большей силой, чем велосипед, потому что у автомобиля инерция значительно выше, чем у велосипеда. Ту



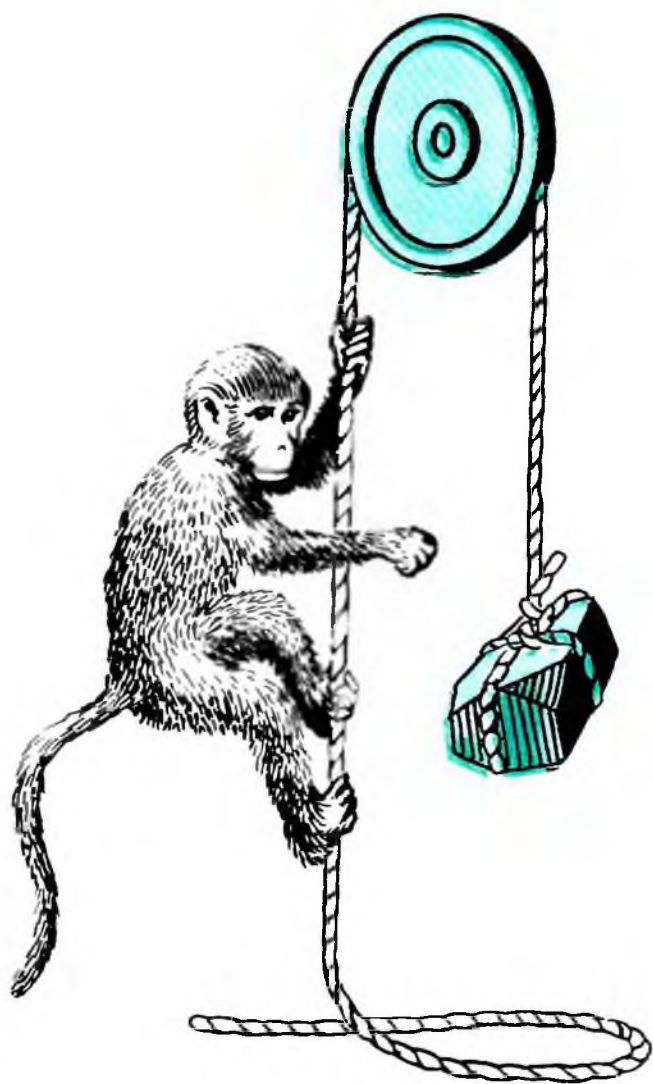


Рис. 1.11. Обезьяна пытается взобраться по веревке. Усилие, с которым она тянет веревку, чтобы подняться, по закону равенства действия и противодействия, передается камню. Поэтому камень, так же как обезьяна, движется вверх.

же мысль можно сформулировать иначе: данная сила порождает тем большее ускорение тела, чем меньше его инерция. При одинаковом расходе горючего малолитражный автомобиль разгоняется быстрее, чем тяжелый лимузин.

Ньютон ввел количественную меру инерции — *массу*. Масса — это мера количества вещества, содержащегося в теле. Чем больше вещества, тем больше масса и тем больше инерция тела. По второму закону Ньютона, мы можем сравнить массы двух тел  $A$  и  $B$ , просто измеряя ускорение, которое вызывает у них одна и та же внешняя сила. Если та же сила вызывает у  $A$  вдвое большее ускорение, чем у  $B$ , значит, масса  $B$  вдвое больше массы  $A$ .

Третий закон Ньютона гласит, что действие и противодействие равны по величине и противоположны по направлению. Если мы давим на стену, то чувствуем, что стена давит на нас. Сила, приложенная к стене (действие), вызывает равную и противоположную силу (противодействие) со стороны стены.

На рис. 1.11 изображена обезьяна, взбирающаяся по веревке, перекинутой через блок. К одному концу веревки прикреплен груз, вес которого равен весу обезьяны. Груз находится на том же расстоянии от блока, что и обезьяна. Где будет груз, когда обезьяна вскарабкается наверх? Используя третий закон Ньютона, докажите, что груз достигнет блока одновременно с обезьяной!

## НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ

Прежде чем закончить эту главу, определим некоторые понятия *динамики* — раздела механики, в котором на основе трех законов Ньютона рассматривается дви-

жение тел под действием различных сил.

Мы уже говорили о скорости и ускорении. Понятие скорости описывает два свойства движения: как быстро движется

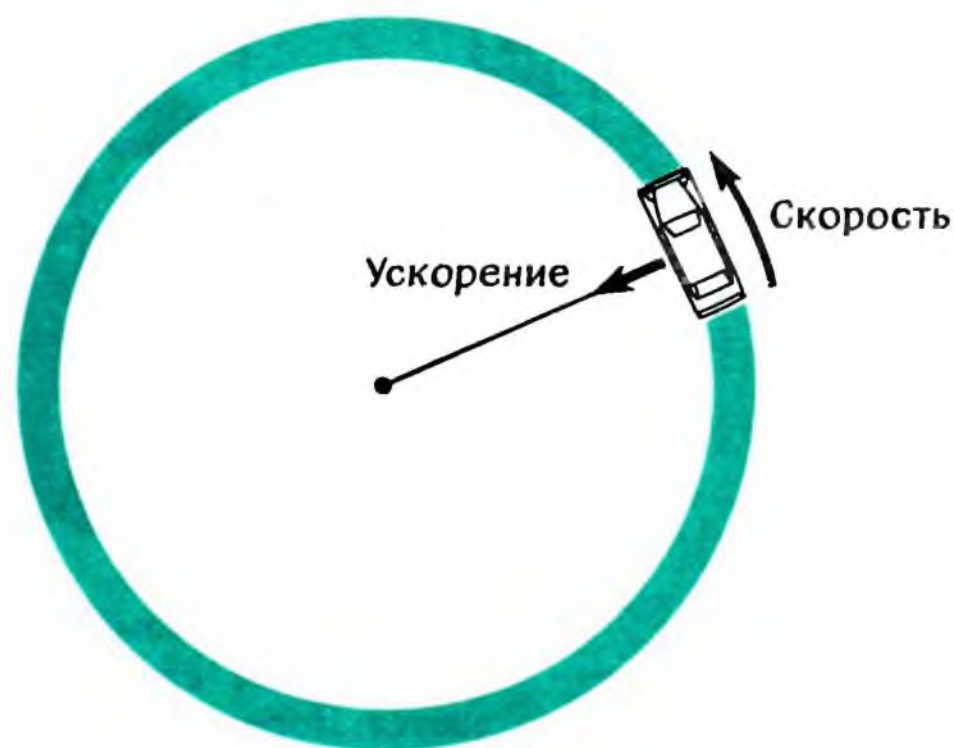


Рис. 1.12. Автомобиль, двигаясь по круговой трассе, непрерывно меняет свое направление. Его скорость может быть постоянной по величине, но меняться по направлению. В результате автомобиль движется с ускорением, направленным к центру трассы.

тело и в каком направлении оно движется. Величину, описывающую первое свойство, назовем быстротой. Так, данные о том, что автомобиль проезжает 100 км/ч, говорят нам о его быстроте. Чтобы знать все о его скорости, нужно еще выяснить, в каком направлении он движется.

Ускорение, как уже упоминалось, — это *темп изменения скорости*. Изменение скорости может происходить двояко: меняется быстрота или направление. Автомобиль, показанный на рис. 1.12, мчится по круговой гоночной трассе со скоростью 150 км/ч. Хотя величина скорости постоянна, направление движения при езде по кругу все время меняется, поэтому автомобиль движется с ускорением.

Как и скорость, ускорение характеризуется величиной и направлением. Каково в этом случае ускорение автомобиля? Обычно ответ получают при помощи математического анализа, но выразить его можно в простой форме. Ускорение направлено к центру гоночной трассы, а величина его равна квадрату величины скорости автомобиля, деленной на радиус трассы. Если радиус равен 1 км, то величина ускорения  $(250 \text{ км/ч} \times 250 \text{ км/ч}) / 1 \text{ км} = 62\,500 \text{ км/ч}^2 = 4,8 \text{ м/с}^2$ .

Другое полезное понятие — *угловая ско-*

*рость*. Когда гоночный автомобиль из нашего примера пройдет один полный круг, мы говорим, что он описал вокруг центра полную окружность в  $360^\circ$ . Сколько времени потребуется автомобилю для одного оборота? Мы уже знаем, что скорость его равна 250 км/ч, а длина трассы равна  $2\pi \text{ км}^*$ . Следовательно, время одного обхода трассы равно  $(2\pi/250) \text{ ч}$ , или около 1,5 мин. Поскольку за это время автомобиль описал угол  $360^\circ$ , величина его угловой скорости примерно равна  $360^\circ / 1,5 \text{ мин}$ , или  $240^\circ$  в минуту.

Рассмотрим теперь рис. 1.13. Такие события вполне могли бы произойти в фильме с участием комиков Лорела и Харди. Бабочка налетает на Лорела и слегка нарушает его покой, не причиняя ему никакого вреда. Однако, когда в погоне за бабочкой на Лорела налетает Харди, это приводит к печальным последствиям. Какое свойство движения лежит в основе подобных эффектов?

В этом примере вполне можно считать, что скорость Харди и бабочки одинакова, но их воздействие на Лорела совершенно различно. Ясно, что тут сыграла роль

\* Длина окружности в  $2\pi$  раз больше ее радиуса. Число  $\pi$  равно 3,141596...; его часто аппроксимируют дробью  $22/7$ .





Рис. 1.13. Эти комедийные кадры показывают, как в результате столкновения импульс Харди передается Лорелу.

большая масса Харди. Но это еще не все! Если бы Харди медленно шел, то столкновение с Лорелом не привело бы к таким последствиям. Значит, окончательный результат определяется и массой и скоростью. Величина, в которую входят они обе, называется *импульсом* или *количеством движения*. Импульс — это произведение массы на скорость, его направление совпадает с направлением скорости.

Теперь ясно, что второй закон Ньютона можно сформулировать и в таком виде: скорость изменения импульса равна приложенной силе. При столкновении с Лорелом импульс Харди явно изменился, причиной изменения послужила сила соударения. А, согласно третьему закону Ньютона, Лорел испытал равную по величине и противоположно направленную силу противодействия, отчего и свалился со стула.

Из второго закона Ньютона следует, что если результирующая сила, действующая на тело (или группу тел), равна нулю, то полный импульс не меняется. В случае столкновения Лорела и Харди результирующей силы нет — равные и противоположно направленные силы соударения компенсируют друг друга, — поэтому полный импульс не меняется. До соударения Лорел сидел, а Харди двигался.

Впоследствии бедняге Лорелу переходит почти весь импульс. Такая неизменность полного импульса называется *законом сохранения импульса*.

Тесно связано с этим понятием и понятие *момента импульса* (или *момента количества движения*). Чтобы разъяснить его, вернемся к примеру с гоночным автомобилем. Пусть масса автомобиля равна 1000 кг. Тогда его импульс составляет  $1000 \text{ кг} \times 250 \text{ км/ч} = 250\,000 \text{ кг} \cdot \text{км/ч} \approx 7 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . Его момент импульса относительно центра трассы получается умножением импульса на радиус трассы.

Вообще, всякое вращающееся тело обладает моментом импульса. На рис. 1.14 изображена Земля, вращающаяся вокруг своей оси. Как вычислить ее момент импульса? Для этого мысленно разделим Землю на мелкие кусочки. На рис. 1.14 показан типичный кусочек, который движется по окружности с центром на оси вращения. Точно так же, как в случае с гоночным автомобилем, умножим импульс этого кусочка на радиус окружности, по которой он движется. Складывая все значения, вычисленные для каждого кусочка, получаем полный момент импульса Земли. Подобно закону сохранения импульса, при отсутствии результирующих сил, влияющих на вращение системы, для нее верен *закон сохранения*



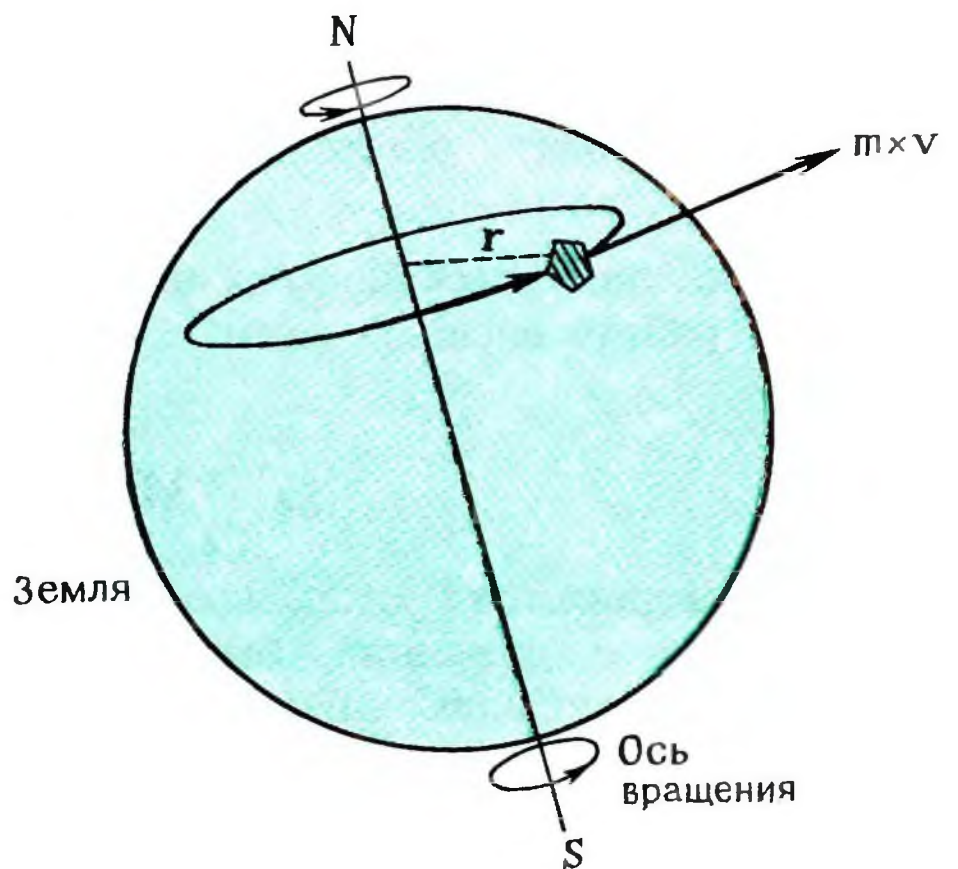


Рис. 1.14. Типичный кусочек вещества внутри вращающейся Земли движется вокруг оси вращения на расстоянии  $r$  от нее. Если  $v$  – скорость, а  $m$  – масса этого куска, то его импульс равен по величине  $mv$  и направлен по касательной. Момент импульса этого кусочка относительно оси вращения равен  $mvr$ . Полный момент импульса Земли получается при сложении моментов импульсов всех кусочков, на которые она мысленно разбита.

ния момента импульса. Сохранение момента импульса играет важную роль в динамической эволюции многих астрофизических систем.

Рассмотрим, наконец, важные понятия *работы* и *энергии*. В рассуждениях Галилея и Ньютона уже прояснилась связь между силой и движением. Вопреки Аристотелю мы знаем теперь, что силы вовсе не поддерживают постоянной скорость движения, а, напротив, изменяют ее. Нет ли какого-нибудь способа «бухгалтерского учета» действия приложенных сил на любом этапе движения?

Физики нашли способ математического определения работы, производимой этими силами. На рис. 1.15 под действием постоянной силы  $F$  тело переместилось из положения  $A$  в положение  $B$ . Пусть  $d$  – результирующее перемещение тела в направлении силы  $F$ . Тогда произведе-

ние  $Fd$  и есть работа, совершенная этой силой.

В чем же проявляется эта работа? Мы знаем, что в результате воздействия силы тело ускорилось. Пусть в точке  $A$  оно покоилось, а в точке  $B$  достигло скорости  $v$ . Простой подсчет с использованием второго закона Ньютона показывает, что работа силы  $F$ , определенная выше как произведение  $Fd$ , в точности равна  $mvv/2$ , или  $mv^2/2$ , где  $m$  – масса тела.

Величина  $mv^2/2$  называется *кинетической энергией* тела – энергией, приобретенной за счет движения. Итак, работа силы не пропала впустую, а позволила телу приобрести кинетическую энергию, равную этой работе.

Если какая-то внешняя сила, например сила трения, препятствует движению, то тело замедляется. Здесь мы имеем дело с уменьшением кинетической энергии те-

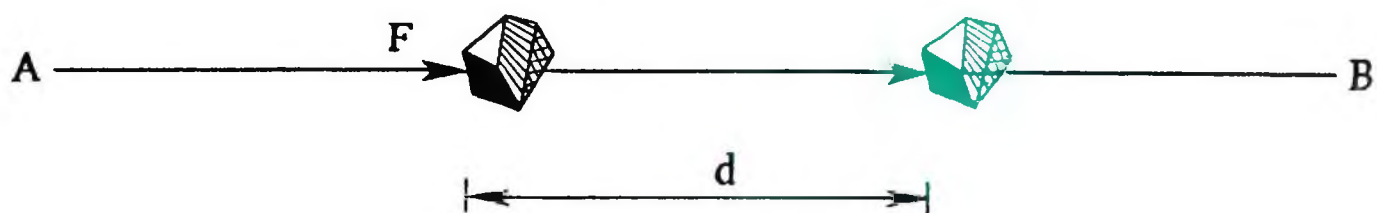


Рис. 1.15. Работа, производимая силой  $F$  при перемещении предмета на расстояние  $d$  от  $A$  до  $B$ , равна  $Fd$ . При этом нужно учитывать только перемещение в направлении силы.



ла. Энергия расходуется на работу против внешней силы. Таким образом, можно сформулировать общее правило для движущихся тел:

Изменение кинетической энергии равно работе внешней силы.

Если это изменение отрицательно (что соответствует уменьшению кинетической энергии), то и работа отрицательна, т. е. совершается против внешней силы.

В гл. 3 мы свяжем это правило с *законом сохранения энергии*.

## ПОЧЕМУ ДВИЖУТСЯ ТЕЛА

Вот и завершается краткий обзор динамики — науки о движении, быть может одной из древнейших наук. Почему же движутся тела? Сначала на этот вопрос пытался ответить Аристотель, но правильный ответ дали позднее Галилей и Ньютон. Галилей первым осознал, что результат воздействия сил — это изменение в состоянии движения, а Ньютон дал количественную формулу связи между силой и ускорением.

В природе наблюдается множество различных сил. В результате огромных усилий как в области теории, так и в экспериментах ученым удалось свести число основных типов этих сил всего к четырем. В этой книге мы рассмотрим примеры всех четырех типов основных взаимодействий, однако главное внимание мы уделим гравитации — самой загадочной из всех сил.



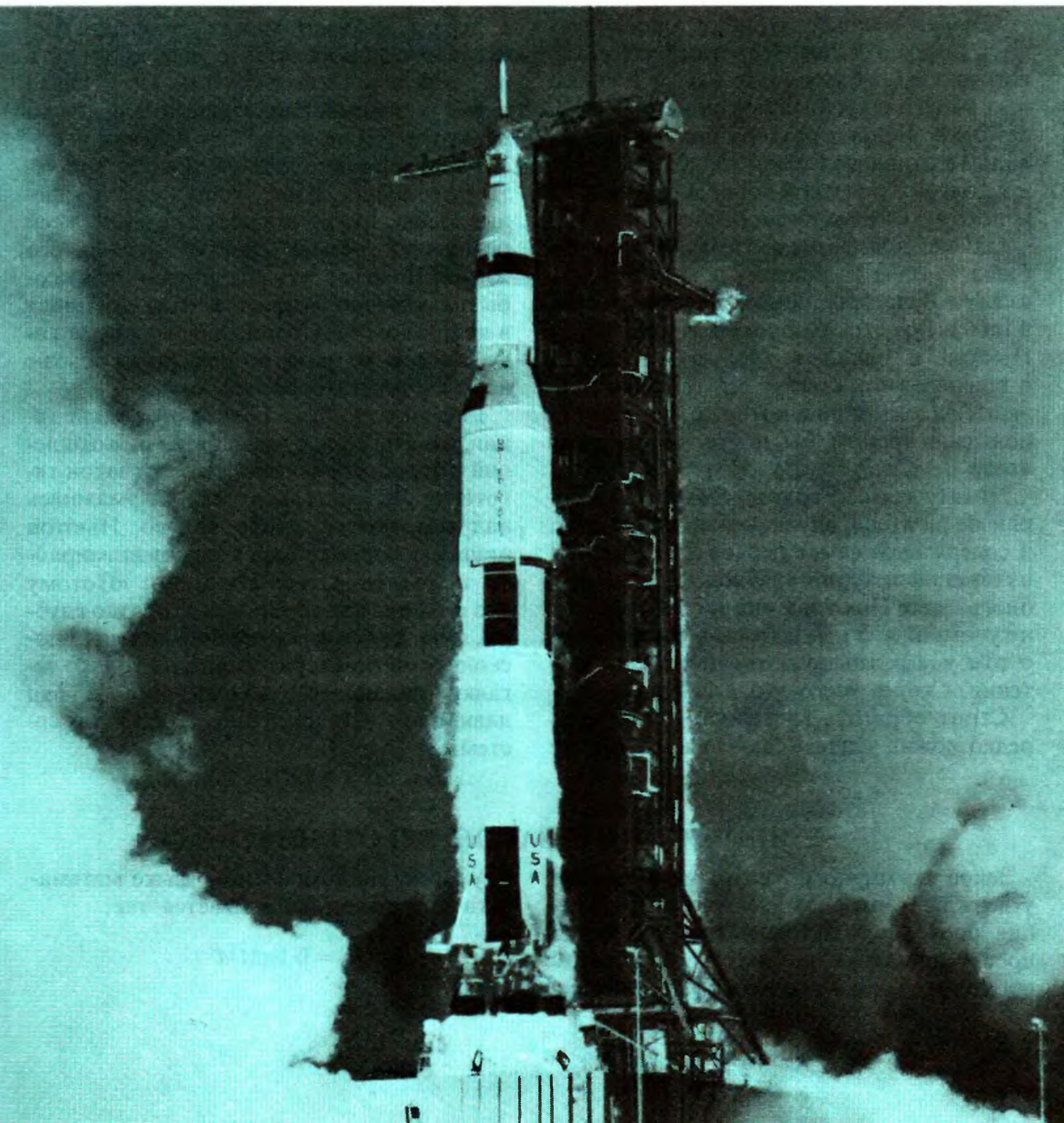
# 2

## От падающего яблока к „Аполлону-11“

---

Ракета-носитель «Сатурн-V», с помощью которой осуществлена первая экспедиция на Луну астронавтов Нейла Армстронга, Майкла Коллинза и Эдвина Олдрина на борту космического корабля «Аполлон-11».

(Фото НАСА.)





## ПОЧЕМУ УПАЛО ЯБЛОКО?

Яблоко – важный атрибут многих легенд, мифов и сказок. Запретный плод стал источником соблазна для Евы и в конечном счете навлек гнев божий на род человеческий. Яблоко раздора послужило поводом к отправке тысячи кораблей в Троию и к долгой Троянской войне. Отравленное яблоко чуть не погубило Белоснежку и т. д.

Однако для физиков самая важная легенда связана с яблоком, которое упало в саду в Вулсторпе, Линкольншир, Англия, в 1666 г. Вот это-то яблоко и увидел Исаак Ньютон и «впал в глубокое раздумье о причине того, почему все тела притягиваются вдоль линии, которая, будучи продолжена, прошла бы почти точно через центр Земли».

Цитата взята из вольтеровской «Philosophie de Newton», опубликованной в 1738 г. и содержащей самое первое из известных изложений истории с яблоком. В ранних биографиях Ньютона она не встречается; не упоминает о ней и он сам, рассказывая о том, как размышлял о всемирном тяготении. Скорее всего это легенда.

Стоит обратить внимание на то, сколь редко можно увидеть само падение яблока

с дерева. Яблоко может провисеть несколько недель на ветке и, упав, пролежать на земле еще несколько дней. Но сколько времени занимает само падение с дерева на землю? Например, при падении с высоты 3 м время полета составляет три четверти секунды. Итак, чтобы увидеть падение яблока, нужно оказаться на месте в сей решающий весьма краткий период его жизни! Шансы стать свидетелем этого события, конечно, возрастут, если оказаться в яблоневом саду в подходящее время года, но все же само по себе это событие нельзя считать особенно частым.

Еще гораздо реже появляются такие гении, как Ньютон, сумевший из размышлений о подобном явлении вывести закон тяготения. Легенда гласит, что, задумавшись над тем, почему упало яблоко, Ньютон пришел в конце концов к закону всемирного тяготения. Ответ Ньютона: «Потому что его притягивает Земля» – гораздо глубже, чем кажется на первый взгляд, поскольку он помог разрешить не только загадку падающего яблока, но и ряд давнишних загадок нашей Солнечной системы.

## В ЧЕМ СОСТОИТ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ?

Закон всемирного тяготения Ньютона утверждает, что сила взаимного притяжения любых двух материальных тел прямо пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния ме-

жду ними. На компактном языке математики этот закон записывается так:

$$F = G (mM/d^2).$$

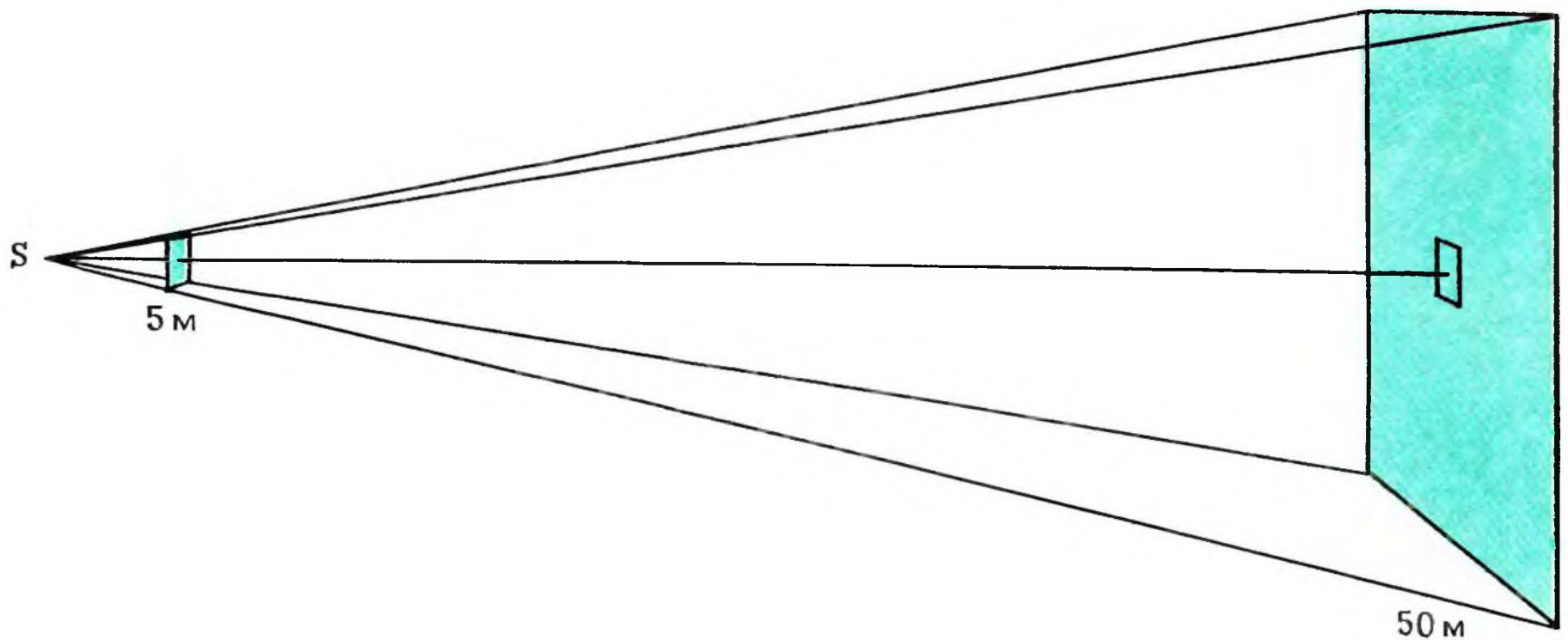


Рис. 2.1. Источник света  $S$ , наблюдаемый с расстояния в 10 раз большего, выглядит в 100 раз слабее. Количество света, падающего на маленький квадрат в 5 м от источника, равно количеству света, падающего на большой квадрат в 50 м от источника. Площадь большого квадрата в 100 раз больше площади маленького. Маленький квадрат на 10-кратном расстоянии получает лишь одну сотую часть количества света, который падает на него вблизи источника.

В этой формуле  $F$  – сила тяготения между двумя телами массой  $m$  и  $M$  соответственно, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга, а  $G$  – универсальная постоянная. Термин *масса* мы уже встречали: она определяется как количество вещества в теле, а также является мерой инерции тела. Теперь мы обнаруживаем еще одно свойство: масса – это мера гравитационного воздействия тела на другие тела, а также мера его восприимчивости к гравитационному влиянию других тел. Если увеличить  $m$  в формуле Ньютона в 10 раз, то и сила  $F$  соответственно увеличится в 10 раз. Если  $m$  уменьшается в 10 раз, то и сила  $F$  соответственно уменьшается в 10 раз. Вследствие этого свойства гравитация не играет заметной роли в поведении атомов и молекул, массы которых невообразимо малы, тогда как в астрономии, науке, имеющей дело с небесными телами очень больших масс, гравитация важна.

Вследствие уменьшения гравитации с расстоянием этот закон часто называют законом обратной пропорциональности квадрату расстояния. Таким законом

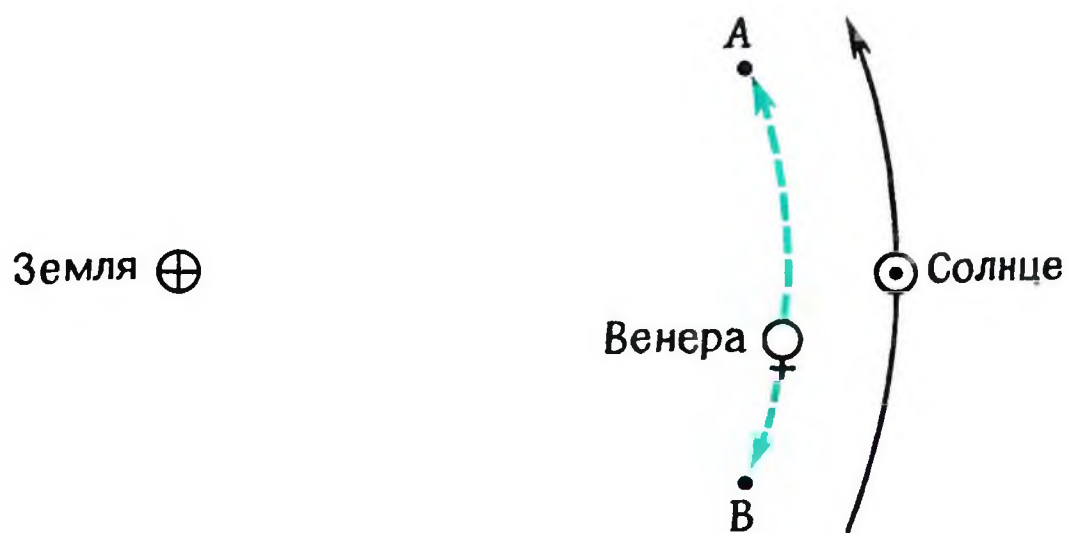
описываются многие явления природы. Например, он справедлив и для освещенности, создаваемой светящимся телом. Если смотреть на лампочку мощностью 100 Вт с расстояния 5 м, то она кажется очень яркой. Та же лампочка с расстояния 50 м выглядит тусклой. Рассмотрим фиксированную площадку, расположенную перпендикулярно направлению световых лучей (рис. 2.1). Если расстояние до источника света увеличить в 10 раз (с 5 до 50 м), то количество света, падающего в секунду на эту площадку, в 100 ( $10^2$ ) раз уменьшится. То же самое соотношение выполняется для силы гравитации  $F$ . Если увеличить расстояние  $d$  в 10 раз, то сила  $F$  станет в  $10^2$ , или в 100 раз, меньше.

Здесь уместно спросить: «Почему гравитация важна в астрономии и незначительна в атомной физике, если в первой расстояния между объектами огромны, а во второй чрезвычайно малы?». Ответ заключается в том, что, хотя по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния сила гравитации и могла бы проявиться в масштабах атомов, другие,





Рис. 2.3. Наблюдателю на Земле кажется, что Солнце обращается вокруг Земли в направлении длинной стрелки. Ему также кажется, что и Венера обращается вокруг Земли, но она иногда обгоняет Солнце (точка А), а иногда отстает от него (точка В). Последнее движение называется попятным.



Однако представление «Земля неподвижна – космос движется» так прочно укоренилось в индийской астрономии, что ученики и последователи Ариабхаты либо вообще отрицали, что он когда-либо придерживался противоположных взглядов, либо пытались истолковать упомянутое изречение иначе, чтобы оно звучало не так вызывающе для ученых того времени.

Геоцентрическая модель мира не ограничивалась только движениями звезд. Эти движения были вполне регулярны и вполне соответствовали критерию Аристотеля о кругообразности или прямолинейности естественных движений. Но был еще один класс объектов – планеты, движения которых выглядели весьма нерегулярными. (Греческое слово *планетес* означает «блуждающая».) У планет иногда наблюдается *попятное движение* (рис. 2.3), а скорость прямого движения меняется и становится то больше, то меньше. Чтобы приспособить такие движения к аристотелевой системе мира, греческим астрономам, в особенности Гиппарху и Птолемею, пришлось прибегнуть к сложным геометрическим построениям, включающим круговые пути планет, называемые *эпициклами*. Эта попытка была небезуспешной в том смысле, что с помощью теории эпициклов удавалось предсказывать, в какой части неба будет находиться планета в данный день. В те времена требования к точности наблюдений не были такими жесткими, как теперь, и благодаря успехам этой теории, естественно, она приобрела

статус догмы.

Вызов геоцентрической системе бросил Николай Коперник (1473–1543), предложивший для описания движений в Солнечной системе совершенно иную схему. В этой схеме, называемой *гелиоцентрической системой мира*, предполагается, что Солнце неподвижно в пространстве, а планеты, в том числе и Земля, обращаются вокруг него. Как и Птолемей, для описания движений планет Коперник также привлек (может быть, под влиянием Аристотеля?) сложные построения с окружностями (рис. 2.4).

Построения Коперника проще, но вовсе не приводят к большей точности по сравнению с геоцентрической системой. Главная их ценность в том, что в них впервые закреплено центральное положение Солнца в планетной системе. Трудно пришлось бы тому, кто попытался бы строить в геоцентрической системе динамическую теорию для объяснения движения планет, из-за той роли, которая отводилась Земле. Ключ к разгадке движения планет связан, как мы увидим ниже, не с Землей, а с Солнцем.

При жизни Коперника его гипотеза встретила сильное сопротивление. Лишь на смертном одре увидел Коперник опубликованную свою книгу «Об обращении небесных сфер». Ее влияние на следующие поколения сказалось не сразу, но оно было огромным.

В гл. 1 упоминалось, какую могучую поддержку теории Коперника оказал Га-



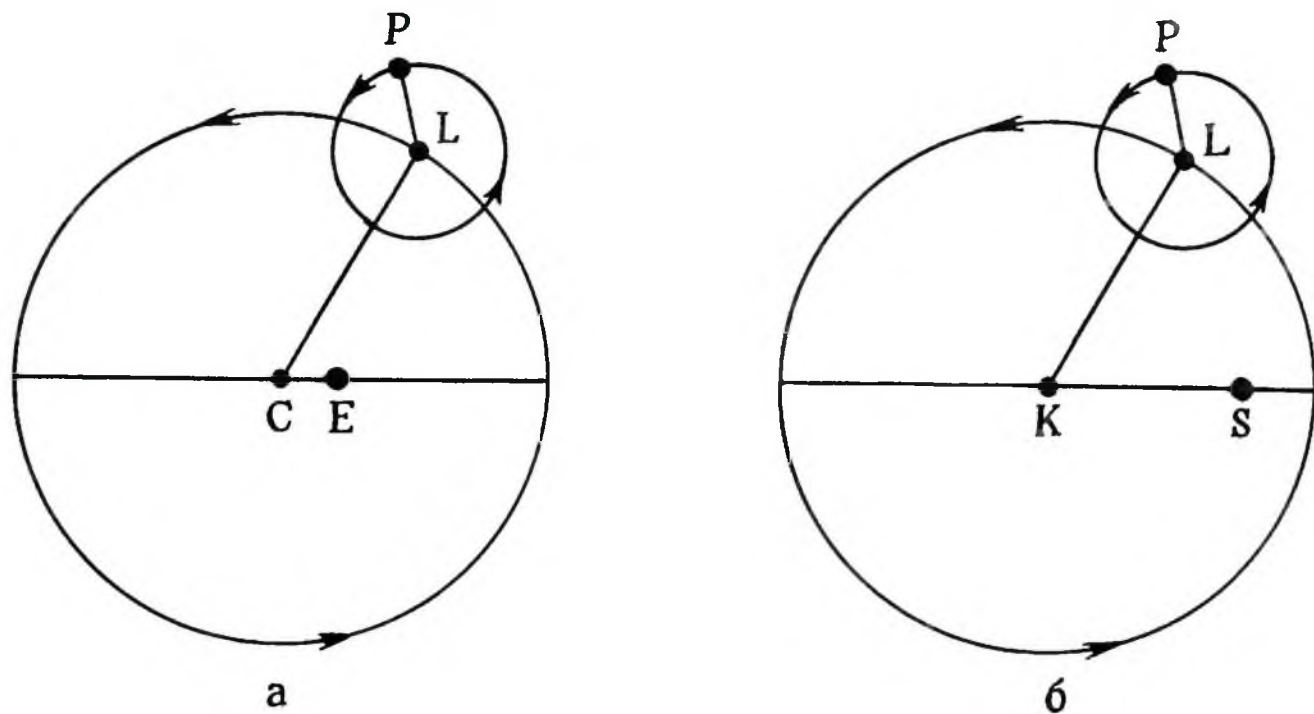


Рис. 2.4. *а* – построения Птолемея. Земля находится в точке  $E$ , а планета – в точке  $P$ , движущейся по окружности с центром  $L$ . В свою очередь центр  $L$  движется вокруг  $E$  по другой окружности, центр которой не совпадает с  $E$ . Птолемей давал сложные указания, как искать размеры окружностей и скорости, с которыми точки  $P$  и  $L$  по ним движутся. *б* – построения Коперника также основаны на окружностях, но в них зафиксирована точка  $S$ , обозначающая Солнце. Планета  $P$  движется по окружности, центр которой  $L$  движется по другой окружности, центр которой не совпадает с  $S$ .

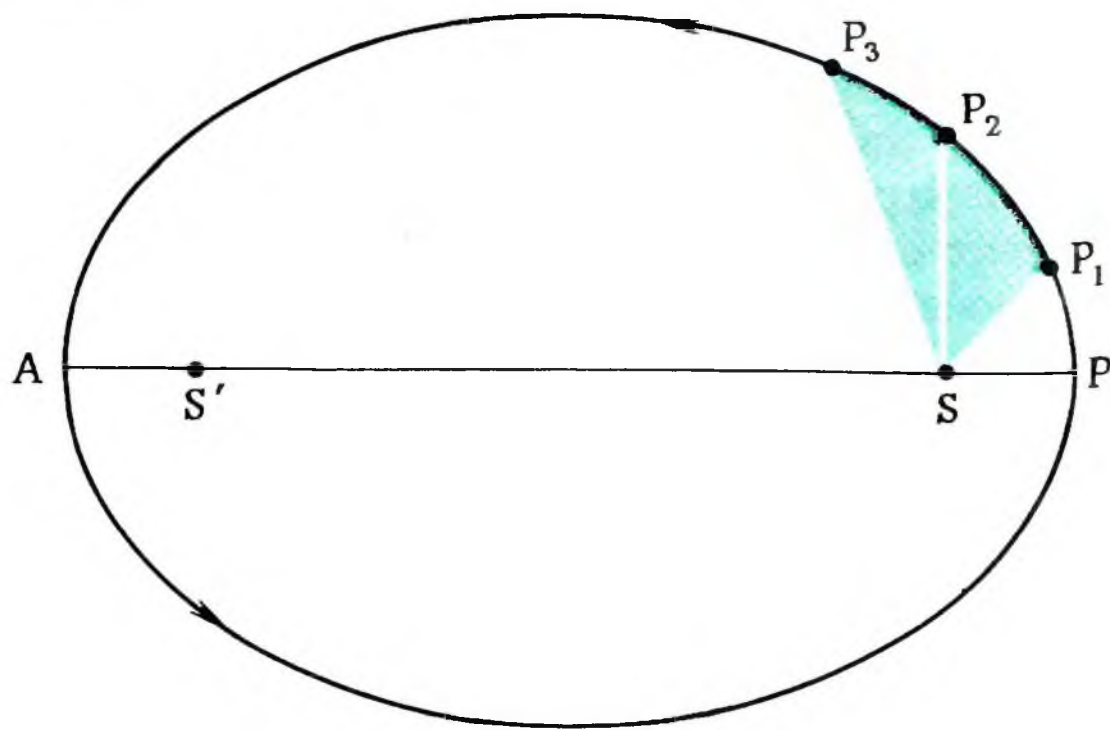


Рис. 2.5. Орбита планеты лучше всего описывается эллипсом. Солнце  $S$  находится в одном из двух фокусов; другой фокус обозначен  $S'$ . Планета движется по эллипсу таким образом, что линия, соединяющая ее с Солнцем, описывает равные площади за равные промежутки времени. Так, если планета переместилась из  $P_1$  в  $P_2$  за то же время, что и из  $P_2$  в  $P_3$ , то площади  $SP_1P_2$  и  $SP_2P_3$  должны быть равны. Отрезок  $AP$  называется *большой осью* эллипса, причем  $A$  (самая удаленная от Солнца точка) называется *афелием*, а  $P$  (ближайшая к Солнцу точка) – *перигелием*.

лилей. Однако только Иоганну Кеплеру (1571–1630) удалось, исходя из тщательных наблюдений, развить теорию Коперника. Для описания планетных орбит Коперник пытался использовать окружности, но Кеплер обнаружил, что лучше всего эти орбиты описываются *эллипсами*. Кеплер пришел к следующим трем законам движения планет (они проиллюстрированы на рис. 2.5):

1. Орбита планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор, проведенный от Солн-

ца к планете, описывает равные площади в равные промежутки времени.

3. Квадрат времени, необходимого для одного полного оборота, пропорционален кубу большой оси орбиты.

Законы Кеплера послужили эмпирической основой для динамической теории Ньютона. Законы Кеплера описали, как движутся планеты; законы движения и гравитации Ньютона позволили понять, почему движение планет подчиняется законам Кеплера.

## НЬЮТОНОВСКАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ И ДВИЖЕНИЕ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Чтобы начертить окружность радиуса  $r$  с центром в точке  $S$ , нужно закрепить один конец нити в  $S$ , а к другому привязать карандаш  $P$ . Длина нити — это радиус  $r$ . Держа нить натянутой, ведем карандашом по бумаге, и он вычерчивает окружность. А как вычертить эллипс с фокусами в точках  $S$  и  $S'$  и большой полуосью  $a$ ? Тут построение немного сложнее (рис. 2.6). Возьмем кусок нити длиной  $2a$  и закрепим ее концы в  $S$  и  $S'$ . Будем вести карандашом так, чтобы его конец  $P$  скользил вдоль нити, а участки  $PS$  и  $PS'$  были все время натянуты. При построении окружности конец карандаша все время остается на расстоянии  $PS = a$ ; в случае эллипса  $PS + PS' = 2a$ . Ясно, что при построении эллипса расстояние  $SS'$  не может превышать  $2a$ . Когда

$S$  и  $S'$  совпадают, эллипс превращается в окружность.

Ньютон применил свою динамику для описания движения планет под действием тяготения Солнца. Его уравнения движения (см. гл. 1) связывают ускорение планеты с приложенной силой, в данном случае — с силой тяготения. Можно ли, зная ускорение планеты, рассчитать ее траекто-

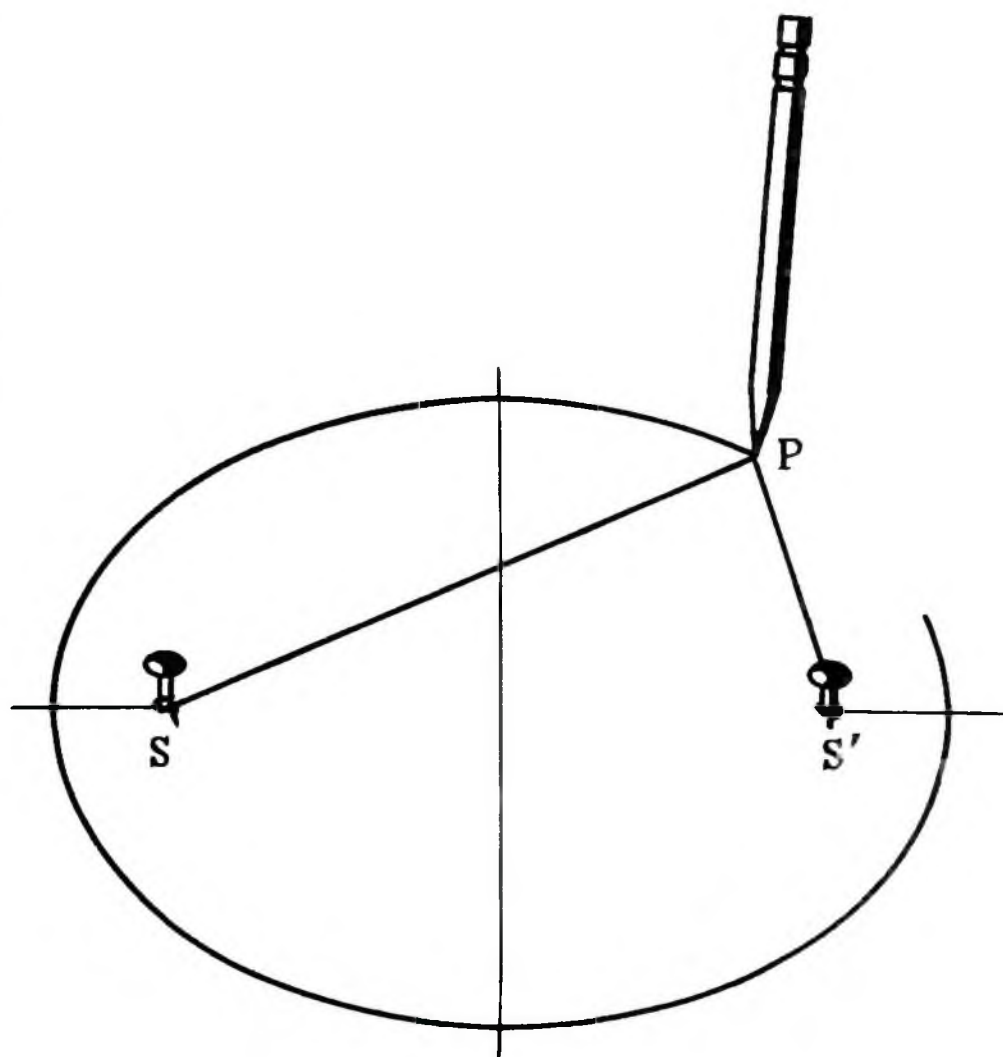


Рис. 2.6. Как начертить эллипс. Отношение расстояния  $SS'$  к длине нити  $PS + PS'$  называется *эксцентриситетом* эллипса. Если эксцентриситет равен нулю, то  $S$  и  $S'$  совпадают и эллипс превращается в окружность.



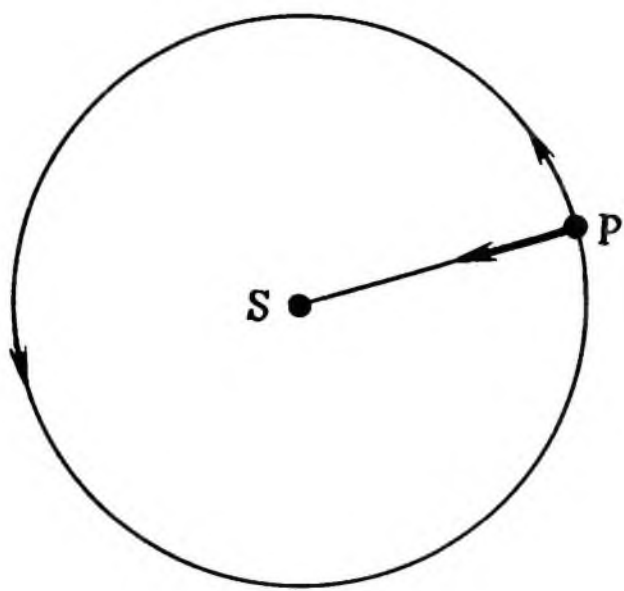


Рис. 2.7. Закон обратной пропорциональности квадрату расстояния для гравитационного притяжения выводится из кеплеровских законов движения планет. Особенно легко это делается в том упрощенном случае, когда планета  $P$  движется по круговой орбите, а Солнце  $S$  находится в центре. Сила, с которой  $S$  действует на  $P$ , и ускорение  $P$  направлены по радиусу, как показано стрелкой.

рию в пространстве? Для решения этой задачи Ньютон создал новый раздел математики, который он назвал флюксиями и который теперь называется *математическим анализом*. При помощи методов анализа ему удалось доказать, что планеты движутся по эллиптическим траекториям и подчиняются трем законам Кеплера. Но научное сообщество всегда склонно к консерватизму и с подозрением относится к новым методам. Поэтому, чтобы сделать теорию более доступной, Ньютон придал своим простым аналитическим доказательствам более привычную, хотя и более громоздкую, геометрическую форму. В книге Ньютона «Математические начала натуральной философии», опубликованной в 1687 г., содержится его знаменитая работа о движении и гравитации.

Можно понять, как из законов Кеплера вытекает закон обратной пропорциональности квадрату расстояния для гравитации, и не прибегая к тонким математическим рассуждениям. Рассмотрим упрощенную задачу движения по окружности, которая, как отмечалось выше, является частным случаем эллипса.

На рис. 2.7 изображена планета  $P$  массы  $m$ , которая движется по окружности с центром  $S$ , где находится Солнце. Прежде всего отметим, что, поскольку радиус  $SP$  описывает равные площади за равные промежутки времени (второй закон Кеплера), точка  $P$  должна двигаться по окружности с постоянной по величине скоростью.

Пусть радиус круга равен  $r$ , тогда длина окружности равна  $2\pi r$ . Если период обращения планеты равен  $T$ , то постоянная величина скорости  $v$  выражается так:

$$v = 2\pi r/T.$$

В каком направлении должна действовать сила на планету  $P$ , чтобы она двигалась по окружности? Утверждать, что сила действует в направлении движения, значит, впасть в ту же ошибку, что Аристотель и его последователи. Сила связана не со скоростью, а с ускорением. А ускорение точки  $P$  направлено к центру  $S$  и равно по величине  $v^2/r$  (см. гл. 1). Поэтому сила  $F$ , действующая на планету, направлена к центру и вычисляется по второму закону Ньютона: сила равна произведению массы на ускорение, или

$$F = mv^2/r.$$

Поскольку  $v = 2\pi r/T$ , имеем

$$F = m(2\pi r/T)^2/r = 4\pi^2 mr/T^2.$$

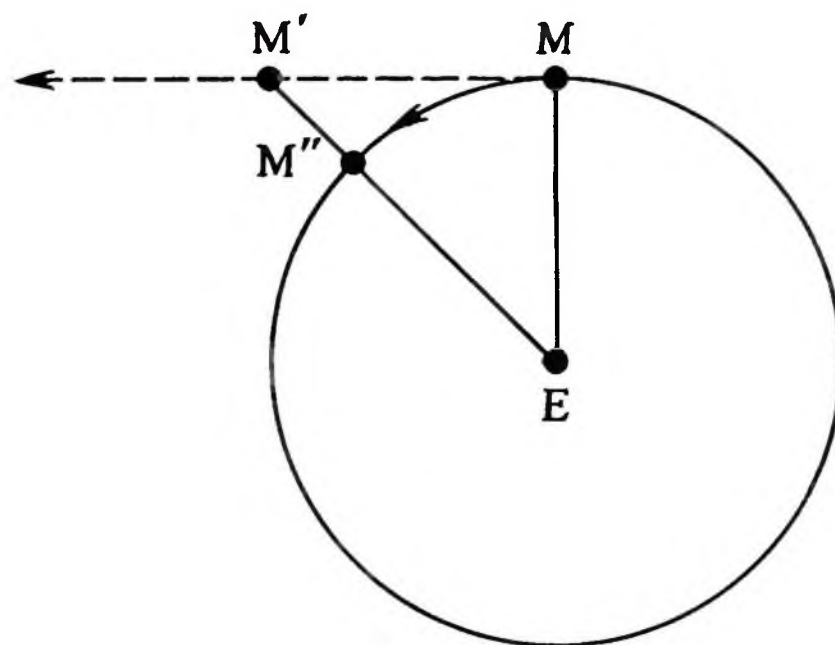
Воспользуемся теперь третьим законом Кеплера, который гласит, что  $T^2$  пропорционально  $r^3$ , т. е.

$$T^2 = kr^3,$$

где  $k$  — некоторое постоянное число. Подставляя  $T^2$  в выражение для силы  $F$ , получаем

$$F = 4\pi^2 mr/kr^3 = (4\pi^2 m/k)/r^2.$$

Рис. 2.8. В отсутствие гравитационного притяжения Земли Луна двигалась бы по прямой из  $M$  в  $M'$ . На самом деле вследствие тяготения Луна движется по дуге окружности  $MM''$ . Дуга ближе к Земле, чем прямая. Таким образом, двигаясь в поперечном направлении, Луна одновременно падает на Землю (в данном случае из  $M'$  в  $M''$ ).



Отсюда следует, что сила, действующая на планету  $P$ , уменьшается обратно пропорционально квадрату ее расстояния от  $S$ !

Закон тяготения описывает не только движение планет вокруг Солнца, но и движение Луны вокруг Земли, а также движение других спутников вокруг своих планет. Поначалу может показаться удивительным, что один и тот же закон управляет и падением яблока, и движением Луны. Внимательно изучив рис. 2.8, нетрудно понять, что Луна (как и яблоко) тоже падает на Землю, но только непрерывно. Пусть Луна  $M$  движется по окружности с центром в Земле  $E$ . Вообразим, что сила притяжения Земли вдруг по волшебству

исчезает. Как показано на рис. 2.8, Луна будет тогда двигаться вдоль штриховой прямой с постоянной скоростью – ведь никакая сила на нее не действует (первый закон Ньютона)! Сравним этот путь с фактической круговой траекторией Луны вокруг Земли. Предоставленная себе самой, Луна, естественно, стремилась бы улететь вдоль штриховой прямой, но Земля постоянно «тащит» Луну к себе. Поэтому можно рассматривать движение Луны как непрерывное падение на Землю. Правда, обладая поперечной скоростью, она никогда не достигает Земли, а смещается перпендикулярно прямой Земля–Луна.

## КТО ПЕРВЫМ ЗАДУМАЛСЯ О ГРАВИТАЦИИ?

Ньютон не был первым, кто задумался о гравитации. Еще в XV в. некоторым астрономам приходила в голову мысль о существовании притяжения между небесными телами и Землей. Утверждалось, что Земля притягивается во всех направлениях «магнетическими» силами, но, поскольку эти силы во всех направлениях одинаковы, Земля остается в покое.

У. Гильберт в 1600 г., И. Буйяр в книге «Astronomia Philolaica», опубликованной в 1645 г., и А. Борелли в 1666 г., по-видимому, были в общем недалеко от ньютоновского закона всемирного тяготения,

как и Кеплер, который даже однажды рассматривал закон обратной пропорциональности квадрату расстояния, но отверг его.

Легенда о яблоке приписывает Ньютону открытие гравитации в 1666 г., хотя первая его публикация о ней, трактат «Propositions de Motu», был прочитан в Королевском обществе в феврале 1685 г., а сами «Начала» были изданы в 1687 г. Между тем в 1674 г. Роберт Гук (рис. 2.9) опубликовал свою работу, в которой движение Земли вокруг Солнца описывалось при помощи закона притяжения, которое





Рис. 2.9. Роберт Гук (1635–1703). (Lives in Science. © 1957 by Scientific American, Inc.)

убывало с расстоянием. Рассказывают, будто Гук сообщил о своих идеях Ньютону, который независимо пришел к похожим выводам.

Почему Ньютон ждал так долго, почти два десятилетия, прежде чем опубликовал свои результаты? В нынешнюю эпоху в науке, для которой подходит лозунг «публикуй или погибай» и скоропалительная публикация полусырых результатов — довольно распространенное явление, понять сдержанность Ньютона еще труднее.

Утверждают, что Ньютон был педантом и хотел повременить до тех пор, пока не разберется с некоторыми проблемами, связанными с его теорией. Одной из этих

проблем была необходимость математически доказать, что сферическое тело притягивает другие тела так, как если бы вся его масса была сосредоточена в центре (рис. 2.10). Другая проблема была связана с наблюдениями. По-видимому, Ньютон хотел дождаться появления надежных измерений расстояний в системе Земля — Солнце — Луна, чтобы проверить правильность своей теории. Они появились в конце 1670-х годов. Только тогда Ньютон почувствовал уверенность в своем законе тяготения.

Дискуссия о том, почему выжидал Ньютон и какое место следует отвести Гуку, еще продолжается. Однако в окончательном ее итоге сомнений нет. Честь расчета планетных орбит на основе законов движения и гравитации принадлежит Ньютону. Никто из его современников не обладал такими математическими познаниями и общим кругозором, чтобы проделать подобные вычисления.

Неприязнь Ньютона к полемике и его сдержанность отражены в его письме к Эдмунду Галлею при передаче книги II «Начал» для публикации. К тому времени книга I «Начал» была уже издана, и Гук высказал претензии на приоритет в установлении закона тяготения. Галлей выступал в этом споре посредником. Имея в виду книгу III (которая должна была последовать за книгой II), Ньютон писал: «Третью я теперь намереваюсь изъять. Философия — столь наглая сутяжница, что иметь дело с этой леди — все равно что таскаться по судам.» Однако, к счастью для потомков, Галлею удалось убедить Ньютона изменить свое решение.

## УСПЕХИ ЗАКОНА ТЯГОТЕНИЯ

Оставив в стороне споры о том, кому принадлежит приоритет в открытии закона тяготения, сделаем обзор некоторых его достижений. Из закона тяготения сле-

довало мгновенное действие на расстоянии. Сила тяготения между Солнцем и Землей мгновенно передается на расстояние 150 млн. километров. Как это происходит?



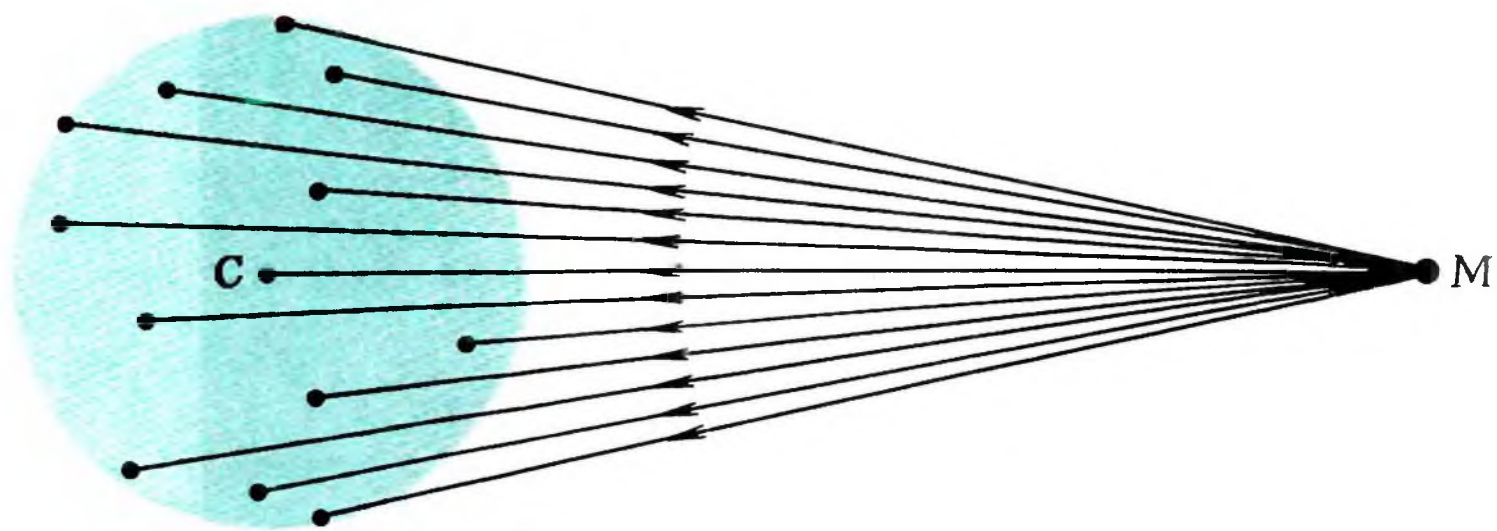


Рис. 2.10. Если разделить шар на мелкие кусочки, то каждый из них будет гравитационно притягивать к себе частицу  $M$ . На рисунке изображено несколько таких кусочков. Результирующей всех этих сил, приложенных к  $M$ , будет сила, действующая в направлении  $MC$ , где  $C$  – центр шара. Величина силы будет такой же, как если бы вся масса шара была сосредоточена в  $C$ .

Почему притяжение уменьшается по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния? Подобные вопросы волновали современников и последователей Ньютона. Говорят, что, когда эти вопросы задали Ньютону, он ответил: «Non fingo hypotheses» («Гипотез не измышляю»). Ньютон придавал большее значение адекватности описания наблюдений при помощи своего закона, чем глубоким вопросам о таинственных явлениях природы, приводящих к этому закону.

И в самом деле, именно успехи, достигнутые при помощи закона Ньютона, обеспечили ему такое твердое положение в постньютоновской физике. Благодаря достижениям закона всемирного тяготения неприятные и трудные вопросы «как?» и «почему?» отодвинулись на задний план. Рассмотрим некоторые из этих триумфальных результатов.

Первый пример – комета Галлея (рис. 2.11). Как и планеты, эта комета движется по орбите под действием солнечного тяготения. Но в отличие от орбит планет ее орбита чрезвычайно вытянута. Если мы вновь обратимся к процедуре построения эллипса, то увидим, что эллипс получается сильно вытянутым, когда расстояние ме-

жду фокусами  $S$  и  $S'$  почти равно (но все же меньше чем)  $2a$ . Примеры орбит кометы и планеты приведены на рис. 2.12.

Поскольку комета движется по такой орбите, она появляется в окрестностях Солнца через большие промежутки времени. Однако, если только на орбиту кометы (которая достигает отдаленных областей Солнечной системы) не повлияет планета, например Юпитер, ее появления вблизи Солнца будут периодически повторяться.

Эдмунд Галлей, современник и друг Ньютона, обратил внимание на такую периодичность у кометы, наблюдавшейся в 1682 г. Галлей утверждал, что та же самая комета появлялась и ранее в 1456, 1531 и 1607 гг., т. е. с постоянным периодом, несколько превышающим 75 лет. Галлей предсказал, что ее можно будет наблюдать снова в 1758 г. Предсказание сбылось, хотя Галлей и не дожился до этого события. Очередное возвращение кометы Галлея приходится на наше время – 1985–1986 гг.

Пожалуй, никто так не способствовал утверждению закона тяготения, как французский математик Пьер Симон Лаплас (1749–1827). Пяти томный труд Лапласа «Небесная механика», опубликованный с 1799 по 1825 г., сравнивали по влиянию





Рис. 2.11. Фотография кометы Галлея. (С любезного разрешения обсерваторий Маунт-Вилсон и Лас-Кампаньяс, Институт Карнеги в Вашингтоне.)

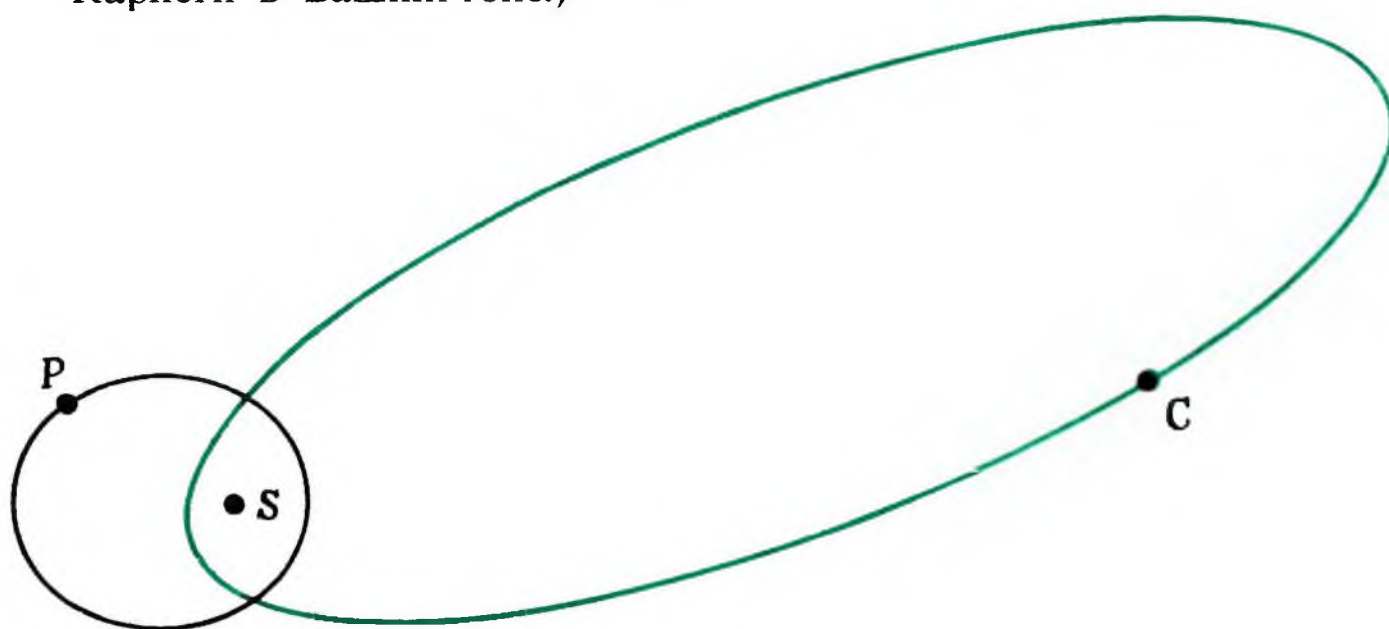


Рис. 2.12. Типичные орбиты планеты  $P$  и кометы  $C$ . Обе орбиты — эллипсы, в фокусах которых находится Солнце  $S$ . Орбита планеты почти круговая, а орбита кометы — сильно вытянутый эллипс.

От падающего яблока к «Аполлону-11»

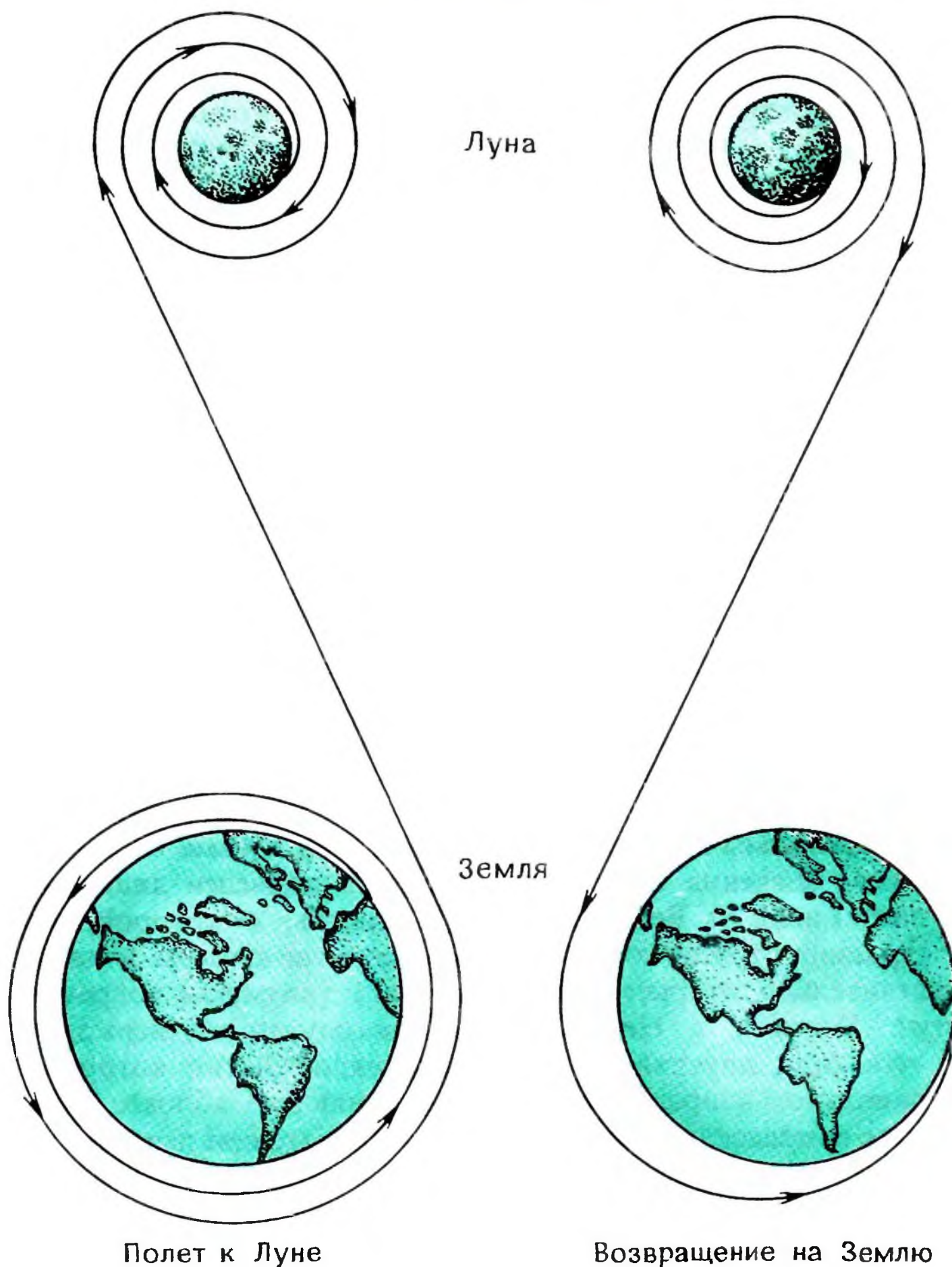


Рис. 2.13. Схема полета космического аппарата с Земли на Луну и обратно. В динамике этих сложных движений решающую роль играют законы Ньютона.

на современную астрономию с «Альмагестом» Птолемея. В этой работе при помощи новейших математических методов того времени Лаплас рассчитал движение планет и их спутников под действием взаимного тяготения. Эта задача исключительно сложна, если учитывать все взаимодействия между 18 (известными тогда) те-

лами Солнечной системы. Столкнувшись с такой задачей в наши дни, физик немедленно перепоручил бы все ЭВМ. Успехи, достигнутые Лапласом в решении этой гигантской задачи, и согласие его расчетов с наблюдениями планет и спутников убедили даже скептиков в справедливости закона тяготения Ньютона. Рассказывают,



что когда Наполеон спросил Лапласа, почему в его книге не упоминается бог, он ответил: «Эта гипотеза мне не понадобилась».

Следующую победу теория Ньютона одержала в 1845 г., когда с ее помощью была открыта новая планета. К этому открытию независимо пришли два астронома – Адамс в Англии и Леверье во Франции. Их работы были связаны с отклонениями, обнаруженными в орбите Урана, самой далекой из известных тогда планет Солнечной системы, от расчетной орбиты. Уран явно отклонялся от эллиптической орбиты, предсказанной теорией Ньютона. Адамс и Леверье независимо пришли к заключению, что отклонения вызваны наличием поблизости еще одной планеты; гравитационное притяжение этой неизвестной планеты и порождало возмущения орбиты Урана. Обоим астрономам удалось вычислить положение этой планеты. Чаллис и Эйри, ведущие астрономы-наблюдатели Англии, не придали значения предложениям Адамса, зато Галле из Берлинской обсерватории серьезно отнесся к работе Леверье и действительно открыл новую планету – Нептун. История с Нептуном подтверждает, что если научная теория развивается в правильном направлении, то даже расхождения с ее предсказаниями могут вести к новым научным открытиям.

В этих трех примерах речь шла о естественных телах Солнечной системы; че-

твертый и последний наш пример связан с искусственными спутниками и космическими аппаратами. Движение этих объектов: полет первого советского искусственного спутника Земли, экспедиция «Аполлона-11» на Луну и полеты «Викингов», «Пионеров» и других космических аппаратов к планетам Солнечной системы – подчиняется закону тяготения, который сформулировал Ньютон три столетия назад (рис. 2.13).

Так, например, в путешествии «Аполлона-11» с Земли на Луну (и обратно!) приходилось учитывать следующие движения. Во-первых, движение Земли вокруг Солнца и Луны вокруг Земли. Здесь мы имеем дело с «задачей трех тел», когда каждое тело движется под действием тяготения двух других. Во-вторых, полет космического аппарата с Земли на Луну, который определяется гравитационным воздействием на него Земли и Луны. Расчет правильной траектории весьма сложен и может быть успешно проведен лишь на ЭВМ.

Точность, с которой осуществляются космические полеты в наши дни, можно считать триумфом современной техники. Она же служит подтверждением закона тяготения, открытию которого якобы помогло падающее яблоко. Поэтому мы уже увереннее можем перейти к еще более ярким проявлениям гравитации в астрономии.



# З

## Какова сила гравитации

---

Астронавт Эдвард Г. Уайт II был первым американцем, вышедшим в открытый космос. Уайт в состоянии невесомости в космическом пространстве во время полета на спутнике «Джемини-Титан-4» в 1965 г. (Фото НАСА.)





## МАССА ЗЕМЛИ

Физики-атомники считают гравитацию самой слабой из четырех известных основных сил природы. Но астрономы знают, что в окрестностях небесных тел гравитация оказывается самой важной силой. Как в каждом конкретном случае оценить эту силу? В этой главе мы попытаемся с помощью нескольких примеров ответить на этот вопрос.

Все обитатели Земли ощущают действие гравитации. Ощущение веса возникает вследствие гравитационного воздействия Земли на нас. С помощью ньютоновского закона обратной пропорциональности квадрату расстояния можно узнать, какова сила гравитации, действующая на поверхности Земли. Пусть  $m$  — масса тела, а  $M$  — масса Земли. Согласно закону Ньютона, сила притяжения между телом и Землей равна

$$F = GmM/R^2,$$

где  $G$  — гравитационная постоянная (см. гл. 2) и  $R$  — расстояние между телом и Землей.

А чему равно  $R$ ? Как показано на рис. 3.1, Земля — почти идеальный шар радиусом около 6350 км. От какой точки Земли следует измерять расстояние до тела? Расстояние от точки поверхности, где находится тело, равно нулю, а от диаметрально противоположной 12 700 км. Любая другая точка Земли лежит на некотором промежуточном между этими крайними значениями расстоянии.

Вспомним один результат из гл. 2, ре-

зультат, для доказательства которого Ньютону, по свидетельству современников, понадобилось несколько лет. *Притяжение шара таково, как если бы вся его масса была сосредоточена в его центре.* Поэтому для тела на поверхности шарообразной Земли правильное значение  $R$  равно ее радиусу — около 6350 км.

Теперь мы получаем интересное следствие этого результата. Если известно значение гравитационной постоянной  $G$ , то можно определить массу Земли! Генри Кавендиш (1731–1810) впервые экспериментально измерил значение  $G$ . На рис. 3.2 показаны портрет Кавендиша и его прибор. Разумеется, современные методы позволяют измерить  $G$  с гораздо большей точностью, чем в ранних опытах Кавендиша. Численное значение  $G$  равно  $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{г})$ .

Как, зная эту величину, вычислить массу Земли  $M$ ? Вспомним сначала опыты Галилея на падающей башне в Пизе (рис. 3.3). Галилей показал, что все тела, отпущенные с одной и той же высоты, падают с одинаковой скоростью. Этот опыт легко понять при помощи второго закона Ньютона: сила равна массе, умноженной на ускорение. Мы уже знаем, чему равна сила тяготения, действующая на тело, находящееся на поверхности или близко к поверхности Земли. Деля эту силу на массу тела, находим ускорение. Обозначая ускорение буквой  $g$ , получаем простую формулу

$$g = GM/R^2.$$



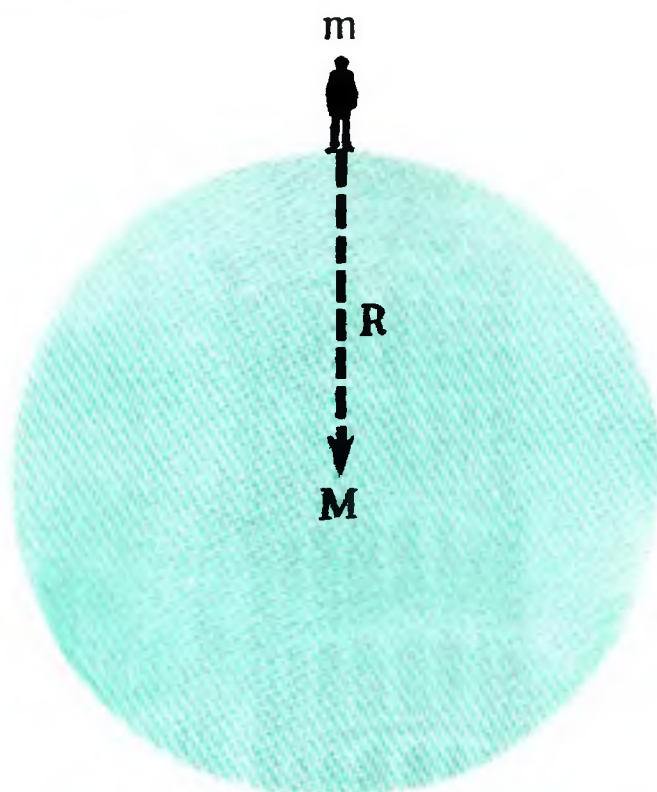


Рис. 3.1. Тело массы  $m$  на поверхности Земли притягивается так, как если бы вся масса  $M$  Земли (которая здесь считается шаром) была сосредоточена в ее центре.

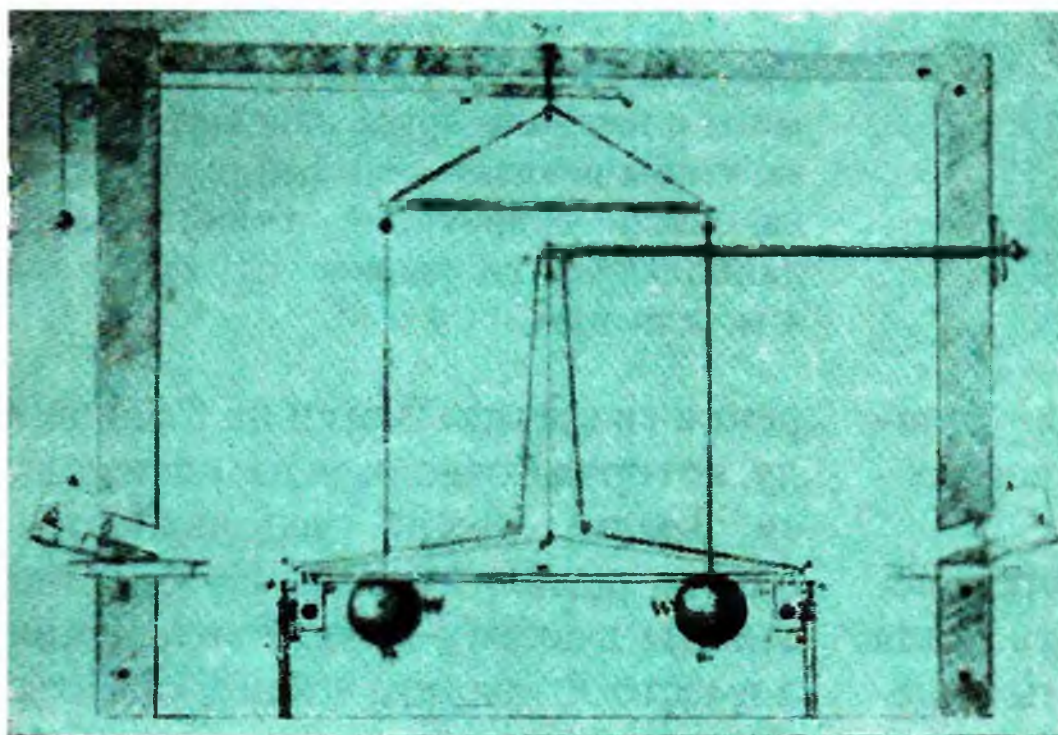


Рис. 3.2. Генри Кавендиш (1731–1810) (его портрет помещен справа) придумал эксперимент для измерения гравитационной постоянной  $G$ . В приборе Кавендиша (изображенном слева) сила гравитационного воздействия двух массивных шаров на две подвешенные дробинки измеряется путем уравновешивания ее крутильной силой, т.е. силой, с которой скрученная нить стремится раскрутиться.

Обратите внимание, что  $g$ , ускорение свободного падения тела, не зависит от его массы. Это соответствует выводу Галилея об одинаковой скорости падения всех тел\*. Величина  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .

\* Этот вывод сделан в предположении, что силой сопротивления воздуха можно пренебречь. Лист бумаги, брошенный из окна третьего этажа, падает медленнее, чем брошенная оттуда же авторучка, поскольку сопротивление воздуха листу бумаги значительно выше, чем ручке. Галилей знал об этом эффекте.

Можно записать это соотношение иначе:

$$M = gR^2/G.$$

В такой записи в правой части формулы все величины известны:  $g$  – ускорение свободного падения,  $R$  – радиус Земли и  $G$  – гравитационная постоянная. Простой подсчет показывает, что масса Земли равна примерно  $6 \cdot 10^{24}$  кг. Этой колоссальной, по нашим обыденным представлениям, величиной и объясняется, почему все





Рис. 3.3. Галилей бросал разнообразные предметы с верхнего яруса падающей башни в Пизе, чтобы показать, что все тела падают с одинаковыми скоростями. Высота башни 56 м, наибольшее отклонение от вертикали около 4 м, или чуть более  $4^\circ$ .

мы ощущаем силу тяжести. Земля — единственный столь массивный объект в непосредственной близости от нас.

Метод, использованный для определения массы Земли, можно применить и для измерения массы Солнца. В гл. 2 мы видели, что планеты, двигаясь вокруг Солнца, в то же время непрерывно падают на него. Следовательно, можно говорить об уско-

рении «падения» Земли на Солнце. Формулу, которая позволила нам вычислить массу Земли, можно использовать и для оценки массы Солнца. Нужно лишь подставить вместо  $g$  ускорение падения Земли, а вместо  $R$  — радиус земной орбиты. Масса Солнца, оказывается, равна приблизительно  $2 \cdot 10^{30}$  кг. Таким образом, Солнце примерно в 330 000 раз массивнее Земли!

## МАССА И ВЕС

Обычная для разговорной речи неточность приводит иногда к путанице в понятиях массы и веса. Масса — это мера количества вещества, содержащегося в теле. Кроме того, масса служит мерой инерции тела (гл. 1), т. е. свойства, благодаря которому тело сопротивляется любым изменениям состояния покоя или движения. В гл. 2 мы установили еще одно качество массы — она является мерой силы, с которой тело притягивает другие тела и притягивается ими. Эти свойства массы прису-

щи любому телу, где бы во Вселенной оно ни находилось: масса — внутреннее свойство тела\*.

С другой стороны, вес тела — это сумма силы, с которой оно гравитационно притя-

\* Эрнст Мах подверг сомнению справедливость ньютоновского представления о том, что масса — это внутреннее свойство тела. В своей книге «Механика», изданной в 1893 г., Мах приводит убедительные доводы против такого представления.

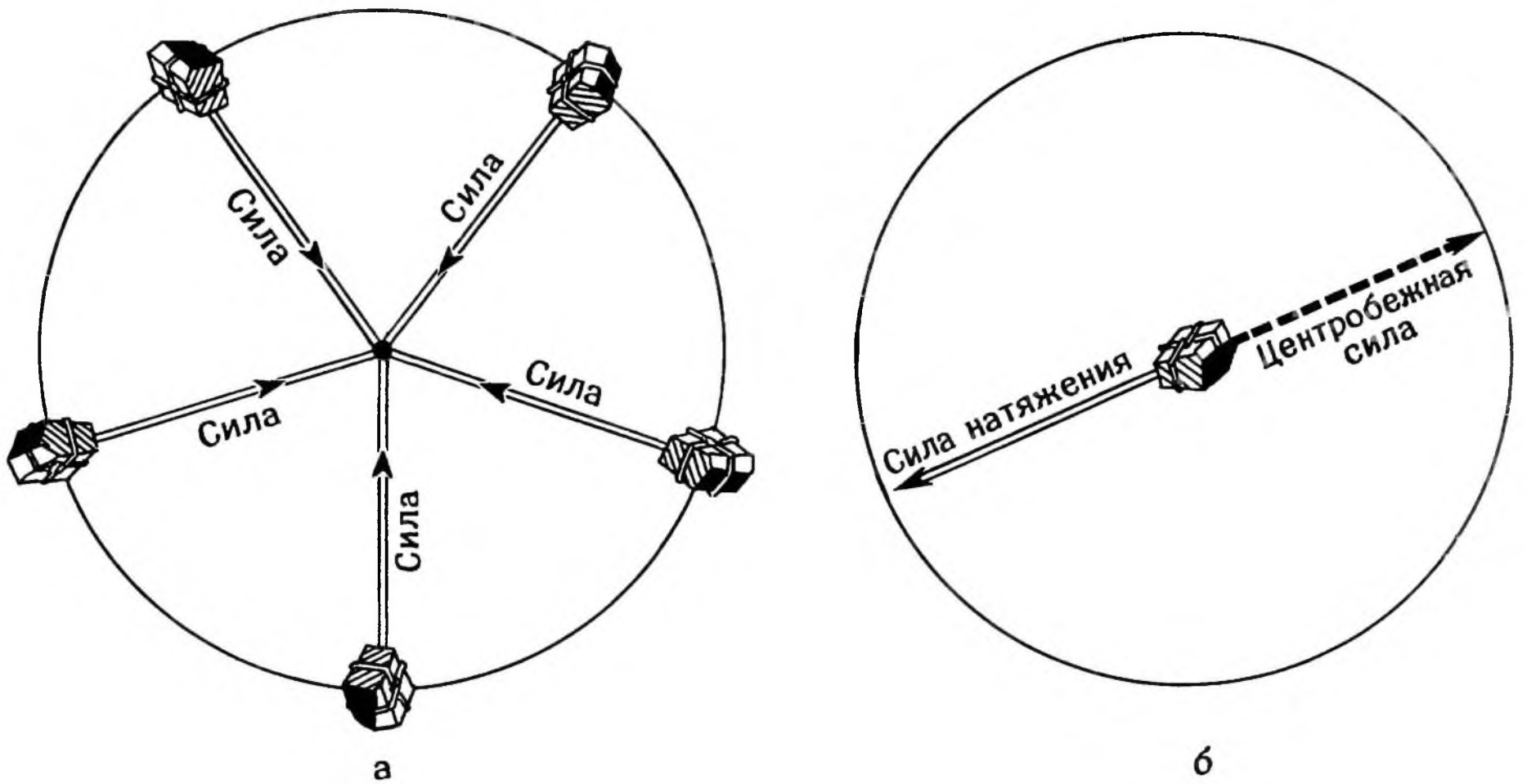


Рис. 3.4. *а* – камень привязан к концу веревки и вращается по кругу. Веревка натянута, и сила ее натяжения приложена к камню и направлена к центру круга. *б* – в системе отсчета камня сила натяжения веревки уравновешивается равной, но противоположно направленной силой. Это и есть *центробежная сила*. Космонавт на борту спутника, обращающегося вокруг Земли, находится в состоянии невесомости; это происходит потому, что центробежная, или направленная наружу, сила уравновешивает направленную внутрь силу земного тяготения. (F. Hoyle, J.V. Narlikar. The Physics–Astronomy Frontier. © 1980 W.H. Freeman and Co.)

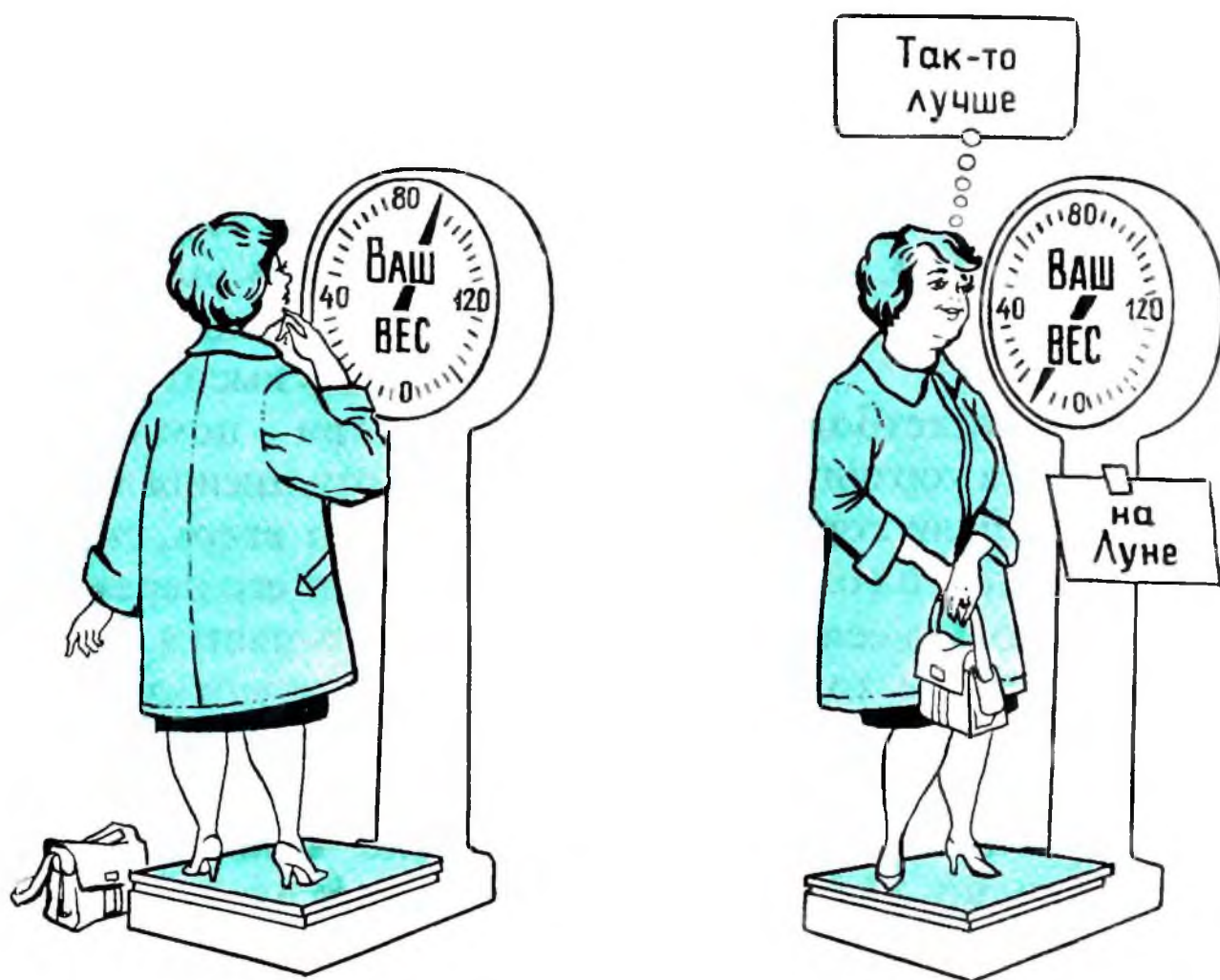


Рис. 3.5. Масса тела неизменна, но его вес меняется от места к месту в зависимости от силы тяготения. Вес человека на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле!



гивается Землей или другим близким телом, и силы инерции (например, центробежной). Поэтому в зависимости от положения тела его вес может меняться. Даже на Земле вес одного и того же тела в разных местах различен. Вследствие вращения и сплюснутости Земли вес человека на полюсах на 0,25% больше, чем на экваторе.

Космонавт на борту спутника, обращающегося вокруг Земли, чувствует себя невесомым. Это явление связано с тем, что в системе отсчета, в которой астронавт находится в покое, сила притяжения Земли уравнивается *центробежной силой*. Понятие центробежной силы проиллюстрировано на рис. 3.4. Эту силу мы ощущаем, например, в автомобиле, когда он резко поворачивает, а нам кажется, будто бы какая-то сила толкает нас в противоположную сторону.

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ

Человек на Луне весит меньше, и потому на ее поверхности он смог бы подпрыгнуть выше и бросить мяч дальше, чем на Земле. Физики выражают этот факт такими словами: *гравитация создает на Земле более высокий потенциальный барьер, чем на Луне*. Попытаемся разобраться в этом утверждении.

На рис. 3.6 изображен баскетболист, пытающийся забросить мяч в корзину, подвешенную прямо над ним. Если корзина находится лишь в метре над его головой, то это сделать нетрудно. Однако если поднимать корзину все выше и выше, то ему придется подбрасывать мяч все с большей и большей скоростью. На рис. 3.6, б показано, что происходит, если мяч подброшен со скоростью 10 м/с: видно, как по мере подъема мяча его скорость непрерывно падает. В исходной точке она равна 10 м/с, к тому времени, когда мяч достигнет высоты 3 м, скорость уменьшится до 6,3 м/с, на высоте 4 м/с – до 4,4 м/с, на высоте

Вес тела на Луне почти в шесть раз меньше его земного веса (рис. 3.5), поскольку на Луне ускорение силы тяжести  $g$  составляет 1/6 его значения на Земле. В табл. 3.1 приведен вес человека на различных планетах.

Таблица 3.1

Планета	Вес в долях земного веса
Меркурий	0,37
Венера	0,89
Земля	1,00
Марс	0,38
Юпитер	2,65
Сатурн	1,14

4,8 м – до 2 м/с, на высоте 5 м – до нуля.

Пять метров – максимальная высота, которой может достичь мяч в этом примере. Попадет мяч в корзину или нет, он начнет падать с нарастающей скоростью. На соответствующих высотах значения его скорости будут такими же, как при подъеме. Связь между высотой и скоростью можно понять при помощи рассмотренного в гл. 1 соотношения энергия – работа. Когда мяч летит вверх, сила тяготения направлена против его перемещения. Вследствие этого уменьшается кинетическая энергия мяча. К тому моменту, когда мяч достигнет высоты 5 м, запас кинетической энергии будет исчерпан. Подъем прекратится, и мяч на мгновение замрет в воздухе.

Возникает вопрос: не исчезла ли энергия мяча? Безусловно, кинетическая энергия мяча постепенно расходовалась по мере его подъема. Из этой энергии вычиталась работа силы гравитационного притяжения Земли. Получил ли мяч на максимальной

## Какова сила гравитации

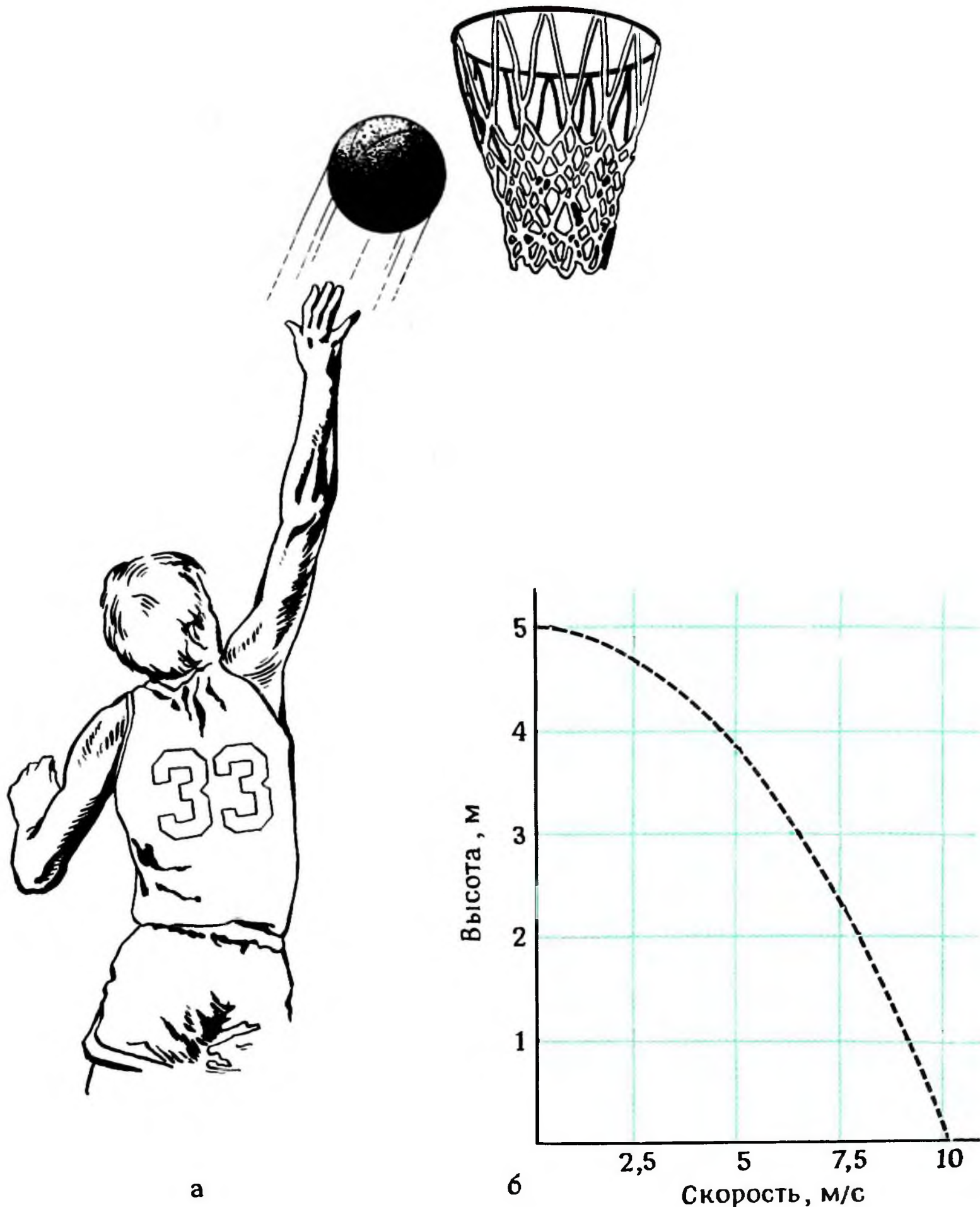


Рис. 3.6. *а* – Земля притягивает мяч вниз, поэтому, чтобы забросить его в корзину, баскетболисту приходится подкидывать его со скоростью, превышающей определенный минимум. Это минимальное значение скорости тем больше, чем выше корзина над землей. *б* – скорость мяча при подъеме уменьшается. Штриховой линией показано, как уменьшается скорость с высотой.

высоте 5 м что-нибудь взамен? Конечно, получил. По мере подъема мяч приобретает потенциальную энергию – ровно столько, сколько терял кинетической. Потенциальная энергия увеличивается про-

порционально высоте мяча и достигает максимума на высоте 5 м. Эта энергия называется потенциальной потому, что вследствие подъема мяча тяготение получает возможность совершать работу. При



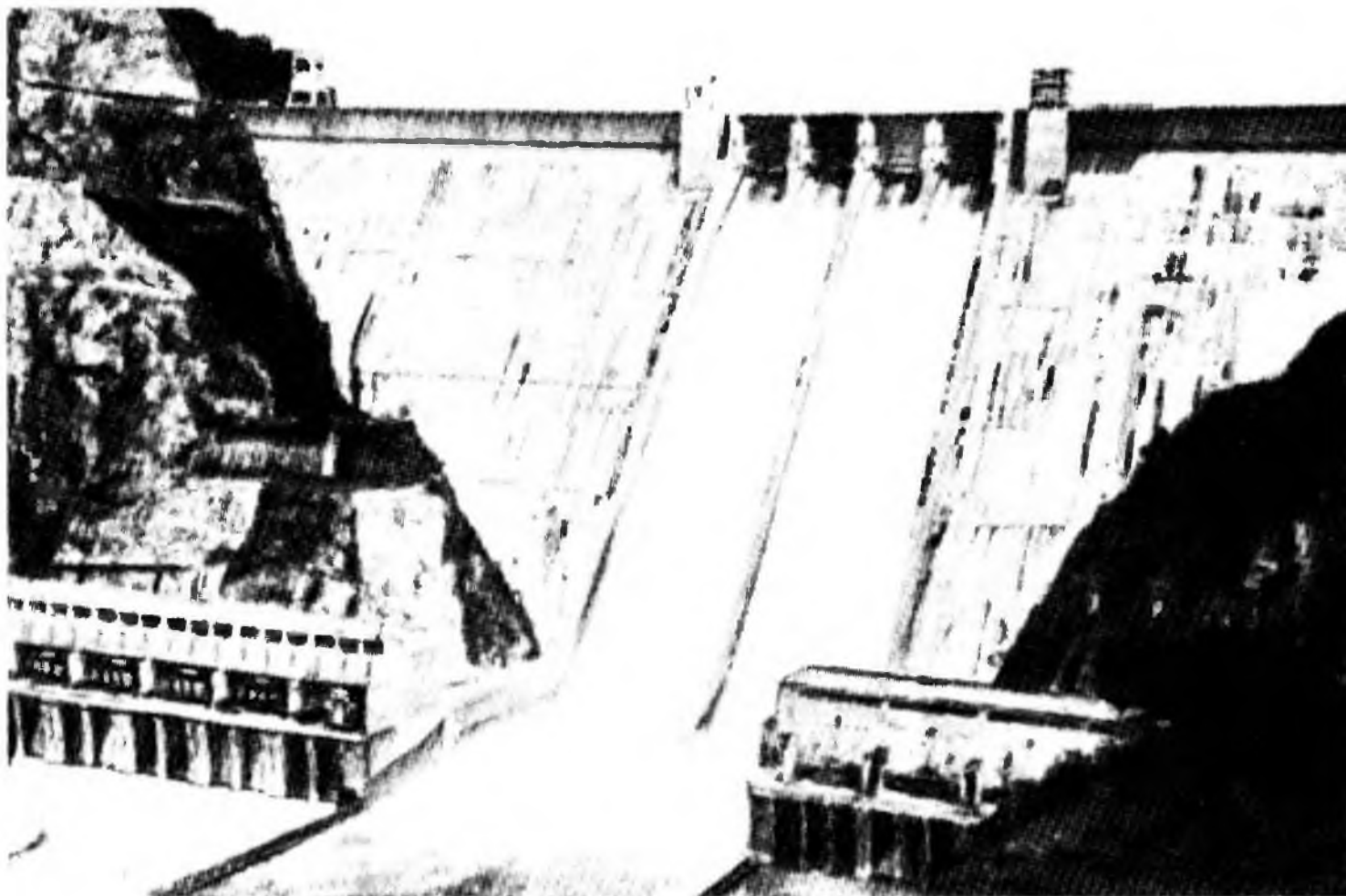


Рис. 3.7. На гидроэлектростанции Бхакра-Нангал в Северной Индии кинетическая энергия воды, приобретенная в результате ее падения, превращается в электроэнергию. Высота плотины 210 м; это одна из самых высоких в мире плотин для прямого использования гравитации. (Фотография – с любезного разрешения Совета директоров Бхара Биз; воспроизводится с разрешения министерства энергетики, департамент энергетических мощностей, правительство Индии.)

падении мяча его кинетическая энергия растет за счет работы, производимой гравитацией, а потенциальная энергия уменьшается на ту же самую величину. На гидроэлектростанции (рис. 3.7) потенциальная энергия переходит в другой вид энергии – электрическую.

Таким образом, мы приходим к закону сохранения энергии для брошенного вверх мяча:

$$\text{Кинетическая энергия} + \\ + \text{Потенциальная энергия} = \text{const.}$$

На всем протяжении полета мяча – и вверх, и вниз – сумма энергий обоих видов (кинетической и потенциальной) остается постоянной.

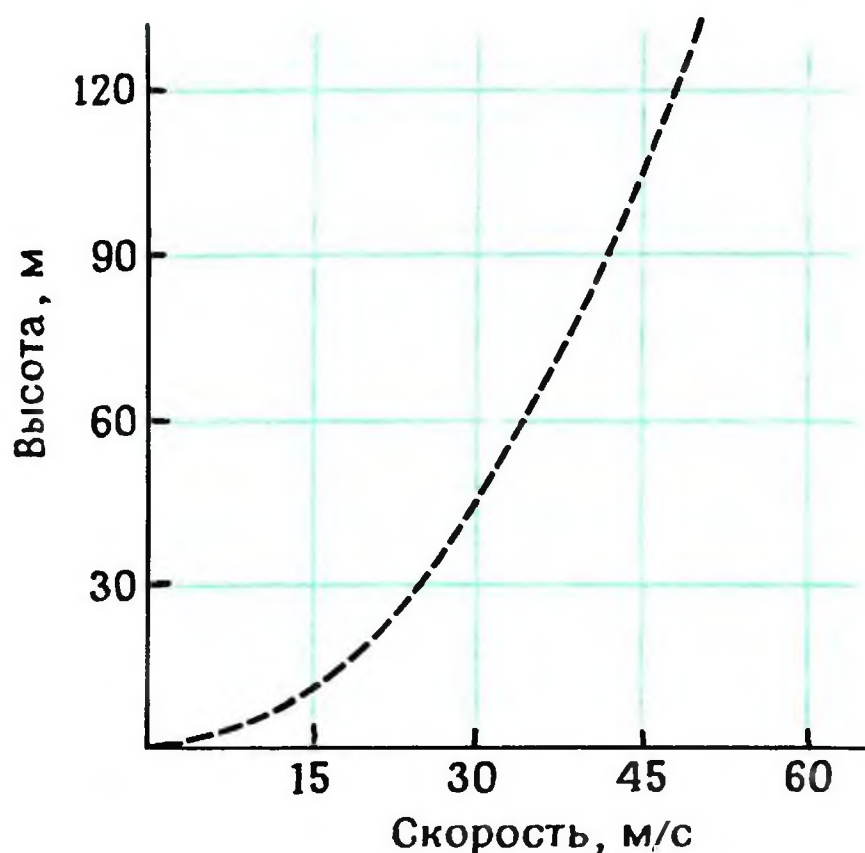
Убедившись, что полная энергия мяча сохраняется, вернемся к баскетболисту.

Скорость, с которой он способен бросить мяч, ограничена возможностями его мускулатуры. Поэтому и высота, на которую он может забросить мяч, имеет известный предел. Как мы видели, при начальной скорости 10 м/с эта максимальная высота равна 5 м. Конечно, баскетболист, у которого сильнее «накачаны» бицепсы, способен на большее.

На рис. 3.8 показано, как меняется максимальная высота в зависимости от начальной скорости броска. Хотя с ростом скорости броска достигаемая высота увеличивается, мяч всегда падает обратно, если даже попадает в корзину. Как бы силен ни был баскетболист, ему никогда не удастся забросить мяч на такую высоту, чтобы он совсем покинул Землю.

Так мы приходим к понятию *гравитационного потенциального барьера*. Чтобы

Рис. 3.8. Изменение максимальной высоты подъема в зависимости от скорости мяча. Продолжая штриховую линию далеко за пределы рисунка, мы получили бы, что скорость, необходимая для достижения высоты 6350 км, равна примерно 11,2 км/с. Это скорость убегания тела (вторая космическая скорость), запущенного с поверхности Земли.



запустить космический аппарат на Луну или в более далекие области Вселенной, нужно, чтобы он вырвался из земных оков. Можно вообразить, что космический аппарат находится на дне «гравитационной потенциальной ямы». Тогда покинуть Зе-

млю — это все равно что выбраться из ямы: нужно затратить работу, достаточную для того, чтобы преодолеть барьер, создаваемый земной гравитацией. Какова же высота гравитационного потенциального барьера Земли?

### СКОРОСТЬ УБЕГАНИЯ

В нашем примере с баскетболистом мы считали, что направленное вниз ускорение, порождаемое гравитацией, составляет  $10 \text{ м/с}^2$ . Таково значение  $g$  на поверхности Земли; эта величина впервые упоминалась при описании опытов Галилея на Пизанской башне. Пусть максимальная высота, на которую баскетболист может забросить мяч, 30 м над землей. Хотя сила притяжения Земли и убывает с подъемом мяча, но очень медленно, так что на этой высоте значение  $g$  почти такое же, как на Земле. Поэтому наш вывод о зависимости между максимальной высотой, которой достигает мяч, и его начальной скоростью справедлив; эта зависимость правильно отражена на рис. 3.8.

Однако, пытаясь применить этот результат к космическим путешествиям, мы должны помнить, что по мере удаления от Земли сила ее притяжения падает все бы-

стрее. Так, значение  $g$  на высоте 6350 км (равной радиусу Земли) в четыре раза меньше, чем на поверхности Земли. Таким образом, на этой высоте  $g = 2,5 \text{ м/с}^2$ . Поэтому работа, затрачиваемая при подъеме на 30 м на высоте 6350 км, в четыре раза меньше работы, которая производится при подъеме на такую же высоту у поверхности Земли. Следовательно, глубина гравитационной потенциальной ямы Земли меньше, чем могло показаться вначале. Работа по подъему единичной массы из этой ямы не бесконечна, она равна  $GM/R$ , где  $M$  и  $R$  — по-прежнему масса и радиус Земли, а  $G$  — гравитационная постоянная. Если вспомнить, что на поверхности Земли  $g = GM/R^2$ , то работу по подъему единичной массы можно выразить как  $gR$ . Другими словами, работа, производимая космическим аппаратом, чтобы выбраться из гравитационной потенциальной ямы Зе-



млю, равна работе, которая потребовалась бы для его подъема на высоту 6350 км, если бы значение  $g$  было таким же, как на поверхности.

Если снова вернуться к нашему примеру и к рис. 3.8, то вопрос теперь звучит так: с какой скоростью баскетболист должен бросить мяч, чтобы мяч достиг высоты

6350 км? Ответ – около 11,2 км/с, или 40 300 км/ч. Это минимальная скорость, которая позволяет космическому аппарату разорвать цепи земной гравитации. Ее называют *скоростью убегания* с поверхности Земли (или *второй космической скоростью*).

## СКОЛЬ ПРОЧНЫ УЗЫ ГРАВИТАЦИИ?

Скорость убегания позволяет оценить силу гравитации на поверхности Земли; ее же можно использовать для сравнения силы гравитации различных астрономических объектов. В общем случае для шара массы  $M$  и радиуса  $R$  скорость убегания находят по той же формуле, что и для Земли:

$$V = \sqrt{2GM/R}.$$

Скорость убегания на поверхности Луны равна всего лишь 2,4 км/с. Это означает, что космическому кораблю гораздо легче покинуть лунную поверхность, чем земную. В табл. 3.2 приведены скорости убегания с некоторых астрономических объектов.

Таблица 3.2

Астрономический объект	Скорость убегания, км/с
Луна	2,37
Земля	11,2
Юпитер	60
Солнце	618
Сириус В (белый карлик)	6000
Нейтронные звезды	≈ 200 000

Чем сильнее гравитационное притяжение тела, тем больше скорость убегания.

В табл. 3.2 самая большая скорость убегания с нейтронной звезды: две трети скорости света. Нейтронная звезда – это очень компактный объект, ее плотность в миллион миллиардов раз больше, чем плотность воды. Радиус нейтронной звезды солнечной массы может составлять всего 15 км!

Но возможно ли еще большее значение скорости убегания, чем с нейтронной звезды? Физики-теоретики утверждают, что в принципе наибольшая возможная скорость физического тела не может превышать скорость света. Для объекта, радиус которого определяется формулой

$$R = 2GM/c^2 \quad (c \text{ – скорость света}),$$

скорость убегания равна скорости света. Иными словами, даже свет не может покинуть поверхность такого тела. Для своих наблюдений астрономы используют различные виды электромагнитного излучения: видимый свет, радиоволны, рентгеновские лучи. Но они не могут наблюдать объект, если скорость убегания с него больше скорости света. Такой объект можно заметить только по создаваемой им силе гравитации.

Вот мы и встретились в первый раз с понятием черной дыры.

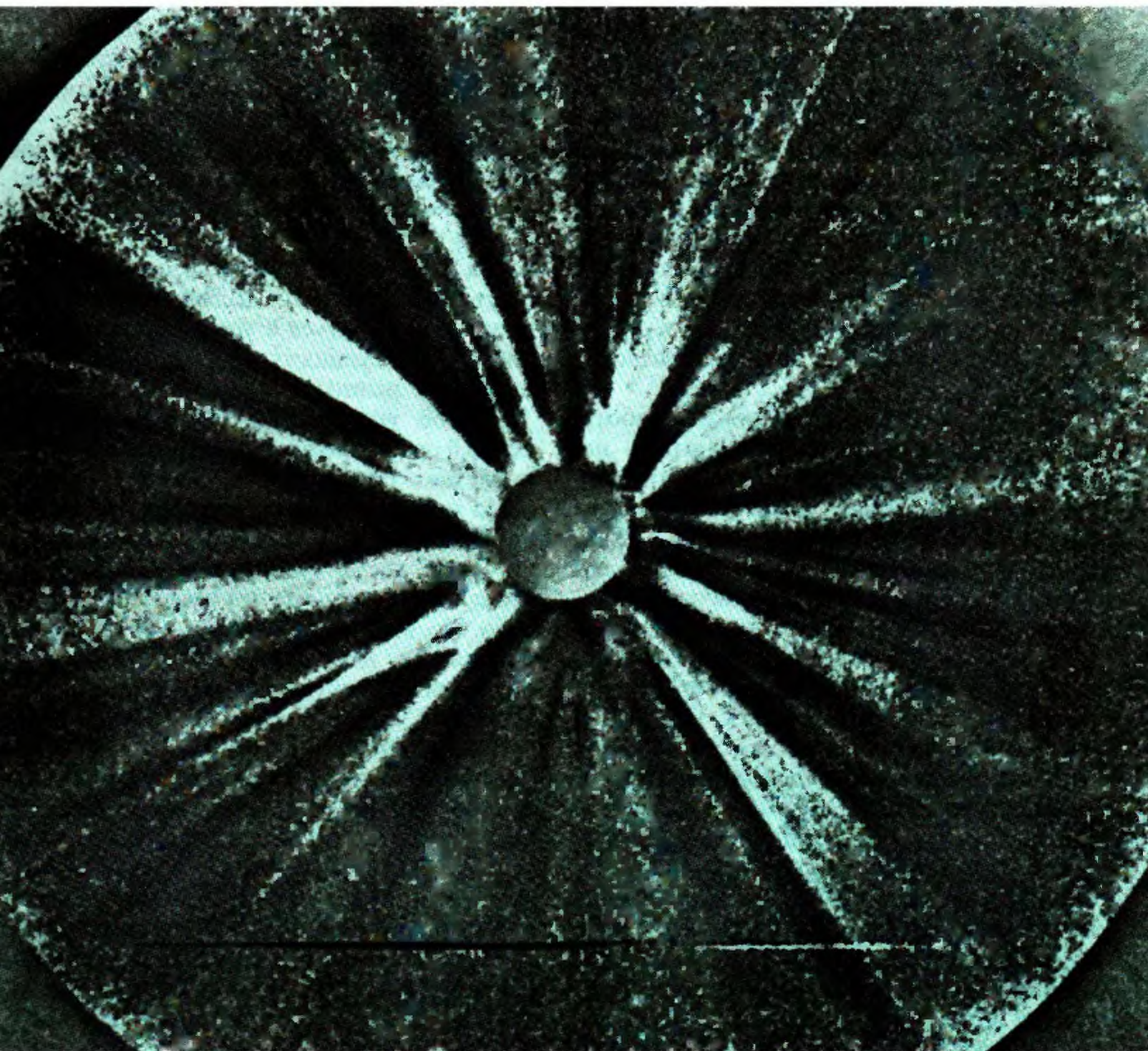


# 4

## Термоядерные реакторы в космосе

---

На обработанной ЭВМ фотографии солнечного затмения  
видны мощные потоки газа,  
которые распространяются во внешнюю корону.  
(Национальная лаборатория в Лос-Аламосе.)





## ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Часто утверждают, что человечество сможет удовлетворить растущие потребности в энергии, если сумеет создать термоядерные реакторы. В термоядерном реакторе энергия генерируется за счет слияния легких атомных ядер в более тяжелые. Топливом для такого реактора на Земле может служить тяжелый водород, называемый дейтерием. В ходе термоядерной реакции два ядра дейтерия сливаются, образуя более тяжелое ядро гелия, и при этом часть ядерной энергии высвобождается.

Отсюда следует инструкция для работы термоядерного реактора. 1. Нагреть небольшое количество топлива – дейтерия – до точки загорания, т.е. до температуры около 100 млн. градусов Цельсия. 2. Держать ядерное топливо в разогретом состоянии до тех пор, пока не начнется термоядерный синтез. После этого выделяемая энергия превысит энергию, затрачиваемую на нагревание, и реактор сможет работать самостоятельно. 3. Последняя часть операции состоит в преобразовании избытка энергии в полезную, например в электрическую.

Казалось бы, все так просто, но осуществить управляемый термоядерный синтез совсем не так легко. Многолетние исследования, ведущиеся в разных странах, еще не привели к практическим результатам. К сожалению, термоядерная реакция пока нашла применение в водородной бомбе. Колоссальная разрушительная сила термоядерного заряда свидетельствует о на-

личии в ядрах атомов огромного запаса энергии, которая выделяется при термоядерном синтезе. Что же мешает построить термоядерные реакторы?

Трудность состоит в осуществлении управляемой термоядерной реакции. Нужно, чтобы энергия выделялась постепенно, а не в форме кратковременного взрыва, как в бомбе. Для этого вещество, участвующее в реакции, должно достаточно долго удерживаться в устойчивом состоянии. В этом сущность проблемы, которую пытаются решить исследователи.

Первое указание на то, что термоядерный синтез может происходить контролируемо и породить полезную энергию, было получено не в лабораторном опыте на Земле, а при изучении внутреннего строения звезд. Человек увидел сияние звезд, когда впервые взглянул на ночное небо. Но, чтобы они светили, должно генерироваться излучение, а излучение – это вид энергии. Откуда звезды черпают свою энергию?

Пытаясь найти ключ к источнику звездной энергии, астрономы пришли к мысли о термоядерном синтезе. Они показали, что управляемая термоядерная реакция может генерировать в звездах энергию, достаточную для их свечения в течение миллионов и миллиардов лет. Как же осуществляется в звездах реакция управляемого синтеза? Ниже мы увидим, что звездам легко удается то, что так трудно человеку, так как у них есть одно преимущество. Обладая огромной массой, они могут воз-

ложить управление реакцией на тяготение.

Понять эту роль гравитации нам поможет воображаемый эпизод из жизни Ала

ад-Дина, героя сказок «Тысячи и одной ночи».

## ДЖИНН И СОЛНЦЕ

Сказка про Ала ад-Дина и волшебную лампу из «Тысячи и одной ночи» кончается тем, что Ала ад-Дин «зажил себе счастливо» со своей царевной и волшебной лампой. Но вот продолжение этой сказки для любителей астрономии.

Однажды жарким летним днем на пути через Аравийскую пустыню с Ала ад-Дином случился солнечный удар, от которого он много дней не мог оправиться. Выздоровев, он призвал джинна из волшебной лампы и повелел: «Разорви Солнце на клочки и размети их по всему белу свету, так чтобы и духу его не было» (рис. 4.1).

Допустим, что силы у джинна хоть отбавляй и он может осуществить эту грандиозную задачу. Но какую же работу нужно произвести, чтобы выполнить повеление Ала ад-Дина? Астрономы утверждают, что Солнце — почти идеальный шар радиусом около 700 000 км и массой\* приблизительно 2000 млрд. млрд. млрд. килограммов.

Конечно, джинн быстро почувствовал, что, разрывая Солнце на куски и растаскивая их в разные стороны, он совершает физическую работу. Дело в том, что, по закону всемирного тяготения, каждый кусок притягивается оставшейся частью Солнца. Чтобы унести кусок далеко от остатка, джинну пришлось бы совершать работу против силы гравитации. Какова полная работа, которую должен проделать джинн, чтобы полностью разрушить Солнце и разметать его куски как можно дальше друг от друга? Ответить

точно можно, лишь зная истинное распределение вещества в Солнце. Известно, что искомая величина определяется формулой  $GM^2/R^2$ , где  $M$  — масса Солнца,  $R$  — его радиус, а  $G$  — гравитационная постоянная (см. гл. 2). С учетом уже известных нам значений  $M$  и  $R$  работа оказывается равной примерно  $4 \cdot 10^{48}$  эрг. Вскоре мы лучше представим себе грандиозность этой величины, а пока обозначим ее буквой  $W$ .

Не успел джинн покончить с этим делом, как Ала ад-Дин засомневался. Он сообразил, как нужно Солнце всем жителям Земли, и ему самому в том числе. И вот, не успел еще джинн завершить свою работу, как Ала ад-Дин дал ему новый приказ: «Собери-ка все кусочки Солнца вместе». Бедный джинн отправился исполнять повеление своего господина.

Однако на сей раз, чтобы соединить все составные части Солнца, джинну уже не надо было совершать работу против сил гравитации. Более того, пока джинн, побросав куски в пространстве, отправился к Ала ад-Дину за вторым повелением, они начали собираться вместе, как показано на рис. 4.2. Гравитация, препятствовавшая выполнению первого задания, теперь превратилась в союзника. И, чтобы вновь собрать Солнце воедино, джинну трудиться не потребовалось вовсе. Вместо него работу  $W$ , затраченную им ранее на преодоление силы гравитации, теперь производила сама сила гравитации.

Напомним описанные в гл. 1 понятия работы и энергии. Работа, производимая силой, приложенной к движущемуся телу в направлении движения, идет на увеличение его кинетической энергии. В сказке

\* В гл. 3 рассказывалось, как при помощи закона всемирного тяготения можно измерить массу Солнца.



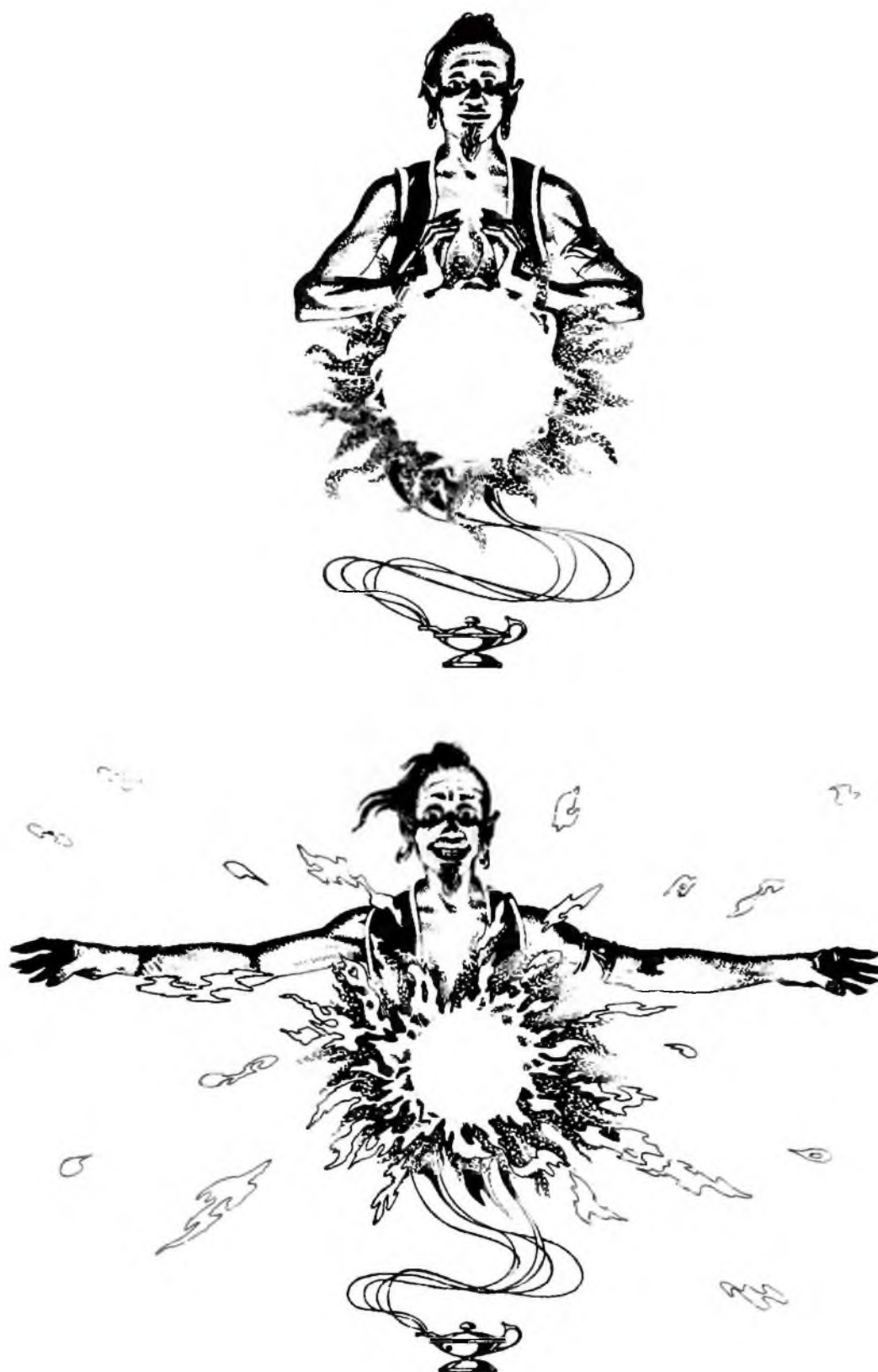


Рис. 4.1. Джинн из волшебной лампы разрывает Солнце по повелению Ала ад-Дина.

про Ала ад-Дина мы заметили, что гравитация (как приложенная сила) совершает работу, чтобы собрать Солнце из первоначально разреженного состояния.

Объединяя оба соображения, мы приходим к гипотезе Кельвина–Гельмгольца о сжатии, которая объясняет, почему Солнце светит.

## ГИПОТЕЗА КЕЛЬВИНА–ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Два выдающихся физика прошлого века – лорд Кельвин (1824–1907) и Германн фон Гельмгольц (1821–1894) – предположили, что первичным источником звездной энергии служит гравитация. Эта гипотеза называется гипотезой о сжатии,

поскольку в ней утверждается, что энергия излучения порождается непрерывным сжатием Солнца под действием его собственной гравитации.

Рассмотрим два состояния Солнца, изображенные на рис. 4.2. Стадия I пред-

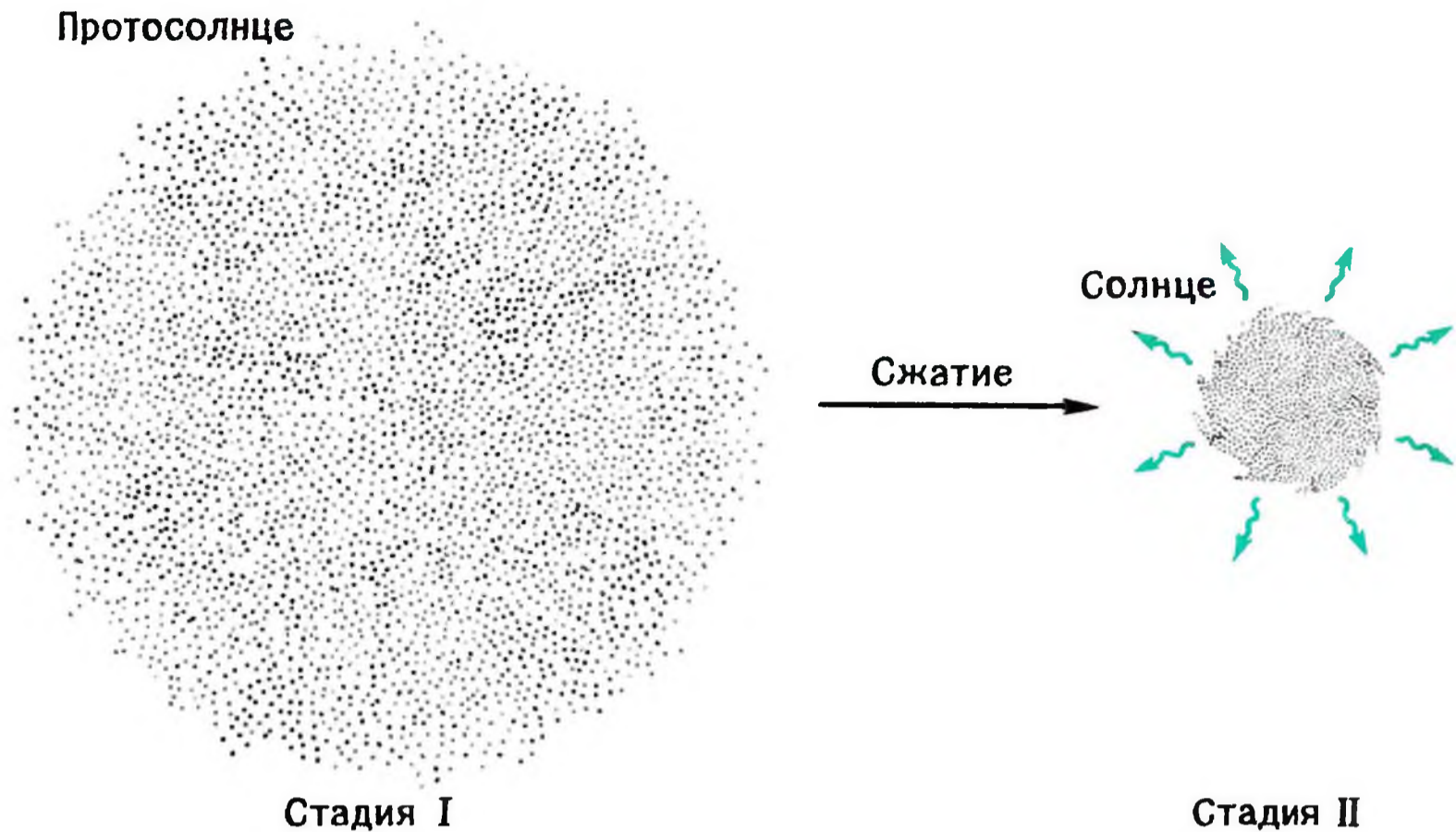


Рис. 4.2. Две стадии сжатия газового облака, из которого образуется Солнце. Стадия I – ранняя стадия, на которой облако весьма разрежено и начинает сжиматься. На стадии II облако сильно сжалось под действием самогравитации. Когда облако сжимается достаточно сильно для возникновения ядерных реакций, оно начинает излучать энергию.

ставляет собой ранний этап в истории Солнца. На стадии I Солнце было гораздо больше, чем сегодня, на стадии II. Если Солнце образовалось в результате конденсации облака межзвездного газа, то стадия I – это состояние, при котором составные части будущего Солнца были значительно удалены друг от друга. Именно в это состояние привел Солнце джинн, выполняя первое повеление Аладина! От стадии I к стадии II Солнце сжимается под действием собственной силы гравитации; другими словами, сила гравитации производит работу по приведению Солнца в современное состояние из исходного разреженного.

По известному нам закону превращения работы в энергию, эта работа сил гравитации должна перейти в кинетическую энергию. Однако на Солнце нет крупномасштабных движений. Куда же девалась кинетическая энергия?

Если как следует разобраться в этом вопросе, то мы поймем, что кинетическая

энергия не исчезла! Солнце находится в газообразном состоянии, а частицы газа движутся. Как показано на рис. 4.3, движение частиц газа не упорядоченно, а хаотично. Атомы и молекулы движутся во всевозможных направлениях с различными скоростями. Хотя эти движения в среднем компенсируют друг друга и не приводят к появлению упорядоченного крупномасштабного движения, газ все же обладает внутренней кинетической энергией. Эта энергия увеличивается (частицы газа движутся все быстрее) при медленном сжатии Солнца.

В чем же проявляется эта кинетическая энергия, если она не приводит к заметным крупномасштабным движениям? О наличии кинетической энергии свидетельствует *давление* газа. С ростом кинетической энергии растет и давление газа.

Даже на поверхности Земли, снимая показания барометра, мы говорим о давлении воздуха. Если барометр показывает 750 мм, то это означает, что атмос-



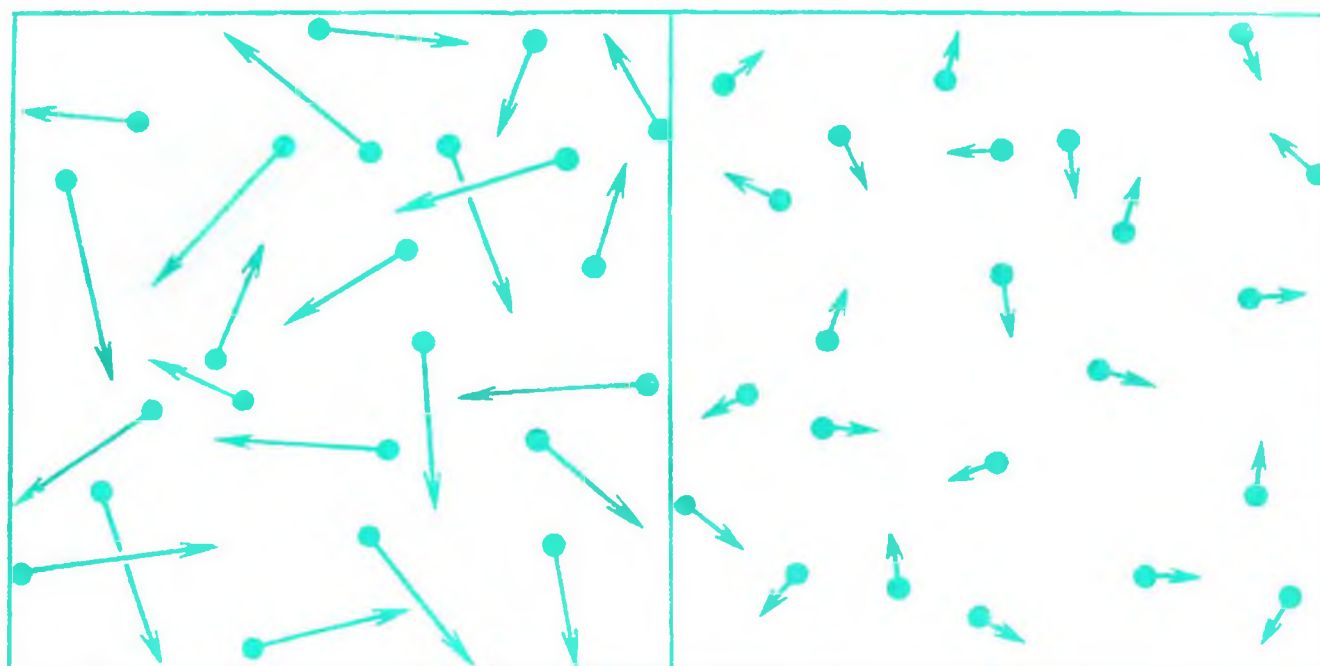


Рис. 4.3. Хаотическое движение частиц газа создает давление. Этому давлению подвержена оболочка, в которой содержится газ: частицы газа ударяются о стенки и отскакивают. По третьему закону Ньютона эти соударения приводят к возникновению силы, действующей на стенки. Величина давления определяется этой силой и зависит от плотности и температуры газа.

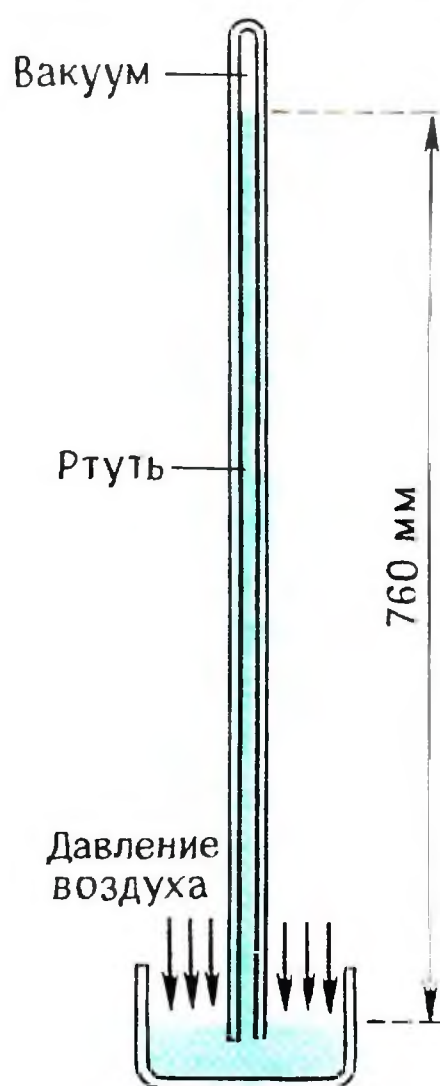


Рис. 4.4. В обычном барометре давление воздуха (показано стрелками) поддерживает вес столба ртути. Высотой этого столба измеряется давление. В верхней части трубки – вакуум. С ростом и падением атмосферного давления столбик ртути поднимается и опускается.

ферное давление достаточно для того, чтобы поддерживать вертикальный столбик ртути высотой 750 мм (рис. 4.4). Когда мы поднимаемся на самолете, атмосферное давление за бортом падает. На высоте 3000 м оно уже так мало, что самолет приходится герметизировать.

Изменение давления газа сопровождается соответствующим изменением температуры. В сжимающемся газовом облаке, которое постепенно превратилось в Солнце, с увеличением давления росла и температура. А при высокой температуре газ излучает.

Таким образом, гипотеза Кельвина—Гельмгольца предполагает такую последовательность превращений энергии:

Гравитационная энергия → Кинетическая энергия → Энергия излучения

Солнце светит благодаря силе гравитации.

Рассмотрим теперь величину  $W$ , работу, затраченную джигном.  $W$ —это и энергия, израсходованная Солнцем за время сжатия от стадии I к стадии II. Какова продолжительность сжатия? Чтобы вы-

числить этот промежуток времени, нужно знать скорость, с которой Солнце расходовало энергию за счет излучения. По количеству излучения, падающего на Землю, астрономы рассчитали, что темп расхода энергии примерно  $1,2 \cdot 10^{41}$  эрг/год. Если по сравнению с прошлым этот темп существенно не изменился, то благодаря гравитационной энергии Солнце светит уже около 30 млн. лет.

По человеческим меркам, 30 млн. лет—срок огромный, поэтому на первый взгляд гипотеза Кельвина—Гельмгольца удовлетворительно объясняет, почему светит Солнце. Однако, когда геологи оценили возраст Земли, который оказался значительно больше, возникли сомнения в ее правильности. По существующим оценкам, возраст Земли составляет почти 4,5 млрд. лет! Если верны современные представления о происхождении Солнечной системы, то Солнце и Земля образовались примерно одновременно. Если же Солнце гораздо старше 30 млн. лет, то для объяснения его энергетических запасов нужно искать какой-то другой источник помимо гравитации.

## СОЛНЦЕ КАК ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Тайна источника солнечной энергии оставалась неразгаданной до 30-х годов нашего столетия. К этому времени астрономы стали лучше представлять себе внутреннее строение Солнца и других звезд. Английскому астроному сэру Артуру Эддингтону удалось выразить эти представления в виде *четырех уравнений внутреннего строения звезд*.

Вот какая информация содержится в этих уравнениях. Первое уравнение называется *уравнением гидростатического равновесия* (рис. 4.5). Оно описывает, каким образом Солнце (или звезда) удерживается в равновесии под действием про-

тивоположно направленных сил гравитации и сил внутреннего давления. Внутреннее давление в звезде частично обусловлено горячим газом в ее недрах, а частично—излучением. Сила гравитации стремится сжать Солнце, а силы внутреннего давления—расширить его. Второе уравнение описывает соотношение между массой Солнца и его плотностью. Третье уравнение, которое называется *уравнением состояния*, связывает давление с температурой и плотностью. Из этих уравнений получается модель, в которой Солнце представляет собой газовый шар с высокой температурой в центре, посте-





Рис. 4.5. Противоположно направленные силы веса наружных слоев (штриховые стрелки, направленные внутрь) и давления, действующего на любую сферическую поверхность, расположенную внутри звезды и concentричную с ее поверхностью (сплошные стрелки, направленные наружу). Чтобы звезда находилась в гидростатическом равновесии, эти силы должны в точности уравновешиваться.

пенно понижающейся к поверхности. Четвертое уравнение описывает, как излучение горячих внутренних областей, просачиваясь наружу, постепенно поглощается. Вследствие этого поглощения излучение, генерированное в центре Солнца, достигает поверхности не со скоростью света, а в триллионы раз медленнее.

С помощью этих уравнений Эддингтону удалось показать, что реалистичная модель Солнца обладает поверхностной температурой около  $5500^{\circ}\text{C}$  (ранее такая оценка получилась у астрономов из анализа излучения Солнца) и температурой в центре более 10 млн. градусов Цельсия.

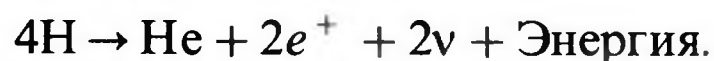
В то время информация о таинственном источнике энергии Солнца отсутствовала. И тут Эддингтон высказал пророческое предположение. Он заявил, что температура в центре Солнца настолько высока, что может высвободиться ядерная энергия, достаточная, чтобы обеспечить свечение Солнца.

Физики-атомники с этим не соглашались. Им казалось, что температура в недрах звезд недостаточна, чтобы вызвать высвобождение ядерной энергии. На подобные возражения Эддингтон язвительно отвечал\*: «Не будем спорить

с тем, кто считает, что звезды недостаточно горячи для этого процесса; пусть пойдет и поищет себе местечко погорячее». В аду не сыщешь фурии, которая могла бы сравниться с разгневанным физиком-теоретиком!

В 1920-х годах ядерная физика была еще молода, и ни у Эддингтона, ни у его противников не хватало убедительных аргументов для продолжения спора. В конце концов оказалось, что Эддингтон прав — температуры в центральных областях звезд и в самом деле достаточно высоки для поддержания ядерных реакций синтеза легких атомов.

Располагая современными знаниями об атомном ядре, можно понять, почему вначале возникли разногласия и как потом удалось от них избавиться. На рис. 4.6, а показаны четыре отдельных ядра атома водорода, представляющих собой не что иное, как положительно заряженные элементарные частицы, называемые *протонами*. На рис. 4.6, б изображено ядро атома гелия (He). Оно состоит из двух протонов и двух *нейтронов*. Нейтроны — это незаряженные, или нейтральные, частицы. В термоядерной реакции четыре протона соединяются и образуют ядро атома гелия:



\* A. S. Eddington. Internal Constitution of Stars, Cambridge, Univ. Press, 1926, p. 301.

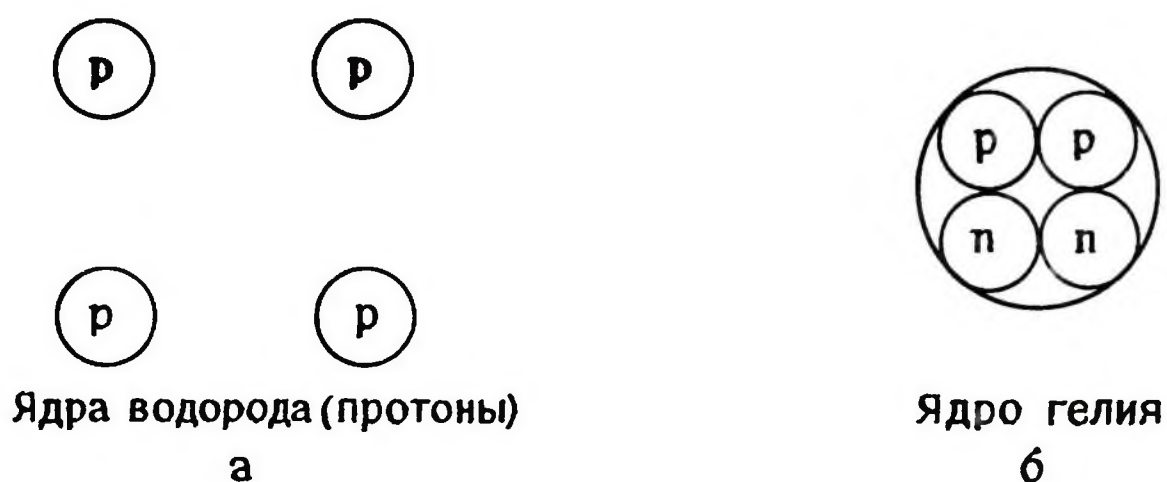


Рис. 4.6. *а* – четыре ядра атома водорода, т.е. четыре положительно заряженных протона (р). *б* – ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух электрически нейтральных частиц, нейтронов (п). В недрах звезд вещество вида (*а*) превращается в вещество вида (*б*). В этом процессе высвобождается некоторое количество энергии.

Из такой символической записи реакции следует, что ее продуктами являются ядро гелия, два позитрона ( $e^+$ ), два нейтрино ( $\nu$ ) и энергия. *Позитроны*, античастицы электронов, имеют ту же массу, что и электроны, но положительный заряд. Если потребовать, чтобы в термоядерной реакции полный электрический заряд оставался неизменным, то две единицы положительного заряда, не вошедшие в ядро атома гелия, должны перейти к каким-то другим продуктам реакции. Такая роль отводится позитронам.

Выделение энергии в описанной реакции синтеза происходит по следующей причине. Общая масса четырех участвующих в реакции ядер водорода несколько превышает суммарную массу продуктов реакции (ядро гелия и других четырех легких частиц). Но согласно специальной теории относительности Эйнштейна, при любом природном процессе потеря в массе должна компенсироваться соответствующим выигрышем в энергии. Эта энергия и потерянная масса связаны знаменитой формулой Эйнштейна  $E = Mc^2$ .

В реакции синтеза ядер гелия теряемая

масса эквивалентна энергии 26,72 МэВ\*. Другими словами, часть массы, переходящая в энергию, составляет 0,7% массы всего водорода, превращающегося в гелий. Это и есть тот резервуар, из которого люди собираются черпать энергию, если им удастся построить термоядерный реактор.

Реакция в таком реакторе несколько отличается от синтеза в недрах Солнца. В термоядерном реакторе на Земле исходным топливом служит *тяжелый водород* – дейтерий. Его ядро состоит из нейтрона и протона. Для получения ядра атома гелия и лучистой энергии нужно соединить два таких ядра.

Физики-атомники 1920-х годов возражали против гипотезы Эддингтона потому, что соединить четыре ядра водорода очень трудно. Поскольку протоны положительно заряжены, они отталкивают друг друга в соответствии с законом

\* МэВ, или 1 млн. электронвольт, – единица энергии в атомной физике. Один киловатт-час, единица, которая широко используется для измерения электроэнергии, равен примерно  $2 \cdot 10^{19}$  МэВ.



электростатики, который гласит, что *одинаковые заряды отталкиваются*. Как же соединить эти одинаковые заряды? В 1920-х годах эта проблема казалась неразрешимой, но в следующем десятилетии с открытием сильного ядерного взаимодействия трудности удалось преодолеть. Обратите внимание, что в ядре гелия на рис. 4.6, б имеются два протона. Как они удерживаются вместе, если одинаковые заряды отталкиваются? Ответ заключается в том, что внутри ядра действует какая-то сила, гораздо более мощная, чем сила электростатического отталкивания; она-то и связывает вместе четыре частицы (два нейтрона и два протона). Это сильное ядерное взаимодействие распространяется как на нейтроны,

так и на протоны, но заметно лишь на очень малом расстоянии. Если протоны сталкиваются с достаточно большими скоростями, они могут сблизиться настолько, что сильное ядерное взаимодействие будет возможно. В газе из водорода с высокой температурой ядра движутся с большими случайными скоростями и, несмотря на электростатическое отталкивание, иногда подлетают друг к другу так близко, что сильное ядерное взаимодействие соединяет их. Температуры в центрах звезд, составляющие от 10 млн. до 40 млн. градусов Цельсия, достаточно высоки, чтобы ядра достигли скоростей, при которых возможно их слияние, как и утверждал Эддингтон.

## ГРАВИТАЦИЯ КАК РЕГУЛЯТОР ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В основе современной теории внутреннего строения звезд лежат четыре уравнения Эддингтона плюс еще одно уравнение, которое описывает скорость выделения энергии в термоядерных реакциях в центральных областях звезды. В 1938 г. Ганс Бете решил пятое уравнение и построил полную модель Солнца.

Трудно переоценить решающую роль гравитации в этих уравнениях. Чтобы уравновесить гравитационное притяжение и предотвратить катастрофический гравитационный коллапс Солнца, необходимы колоссальные силы давления. Эти силы давления обусловлены высокими температурами и плотностями. Сжимающееся облако межзвездного газа становится звездой в тот момент, когда температура в его центре достигает значения, достаточного для начала ядерных реакций.

При попытках достичь высоких температур, подходящих для начала ядерных реакций в земном реакторе, гравитация никак не используется. В недрах Солнца она сдерживает газ, в котором происхо-

дит бурное выделение ядерной энергии. На Земле для удержания горячего газа приходится искать другие средства, например магнитное поле. Эти опыты еще далеки от успешного завершения.

Чтобы больше узнать о влиянии гравитации на звезды, проведем мысленный эксперимент. Предположим, мы связали горячую звезду с холодной проводником тепла. Мы знаем, что тепло переходит от горячего тела к холодному, поэтому и в нашем мысленном эксперименте поток тепла потечет от горячей звезды к холодной.

Тем не менее нас ждет сюрприз! В обычных условиях, если тепло переходит от горячего тела к холодному, температура горячего тела понижается, а холодного растет. По мере утечки тепла из горячей звезды ее внутреннее давление будет падать и равновесие нарушится, так что звезда сожмется под действием сил гравитации (рис. 4.5). А при сжатии звезды газ разогревается и температура

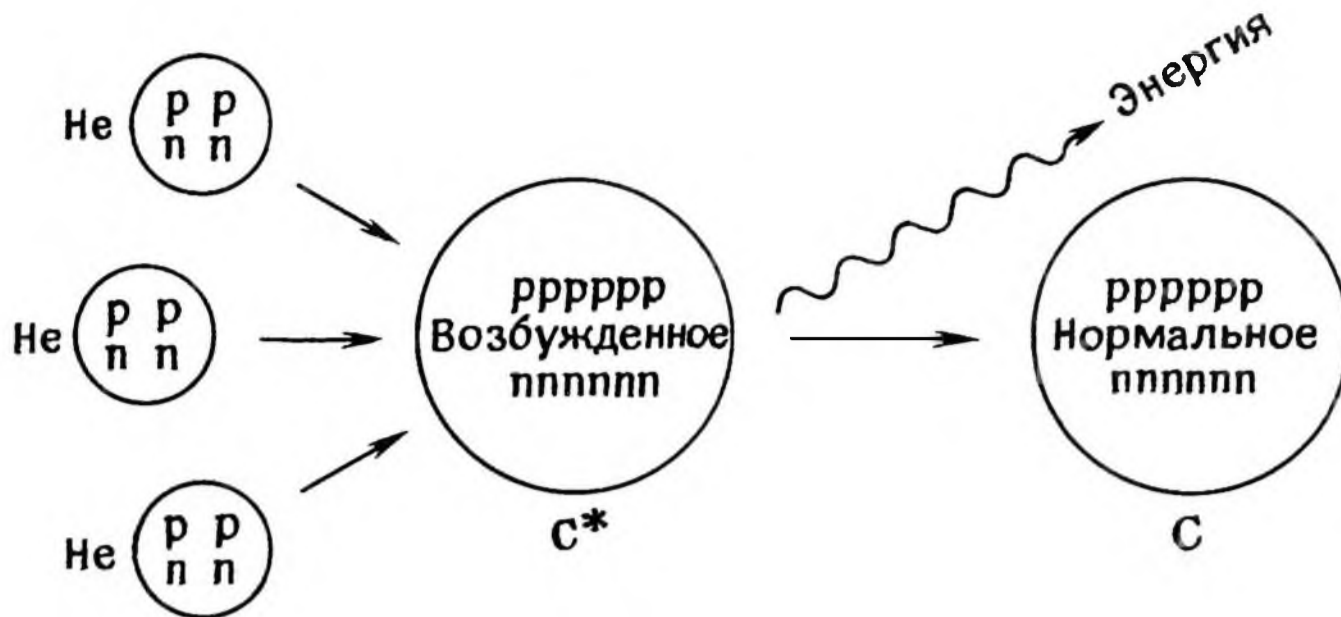


Рис. 4.7. Три ядра гелия, каждое из которых содержит два протона и два нейтрона, сливаются, образуя ядро углерода. Фред Хойл указал, что это ядро находится в *возбужденном состоянии* и переходит в нормальное ядро углерода с выделением энергии. Такая ядерная реакция происходит на поздних стадиях звездной эволюции, когда водородное топливо уже превратилось в гелий. Гелий горит при более высокой температуре, чем водород.

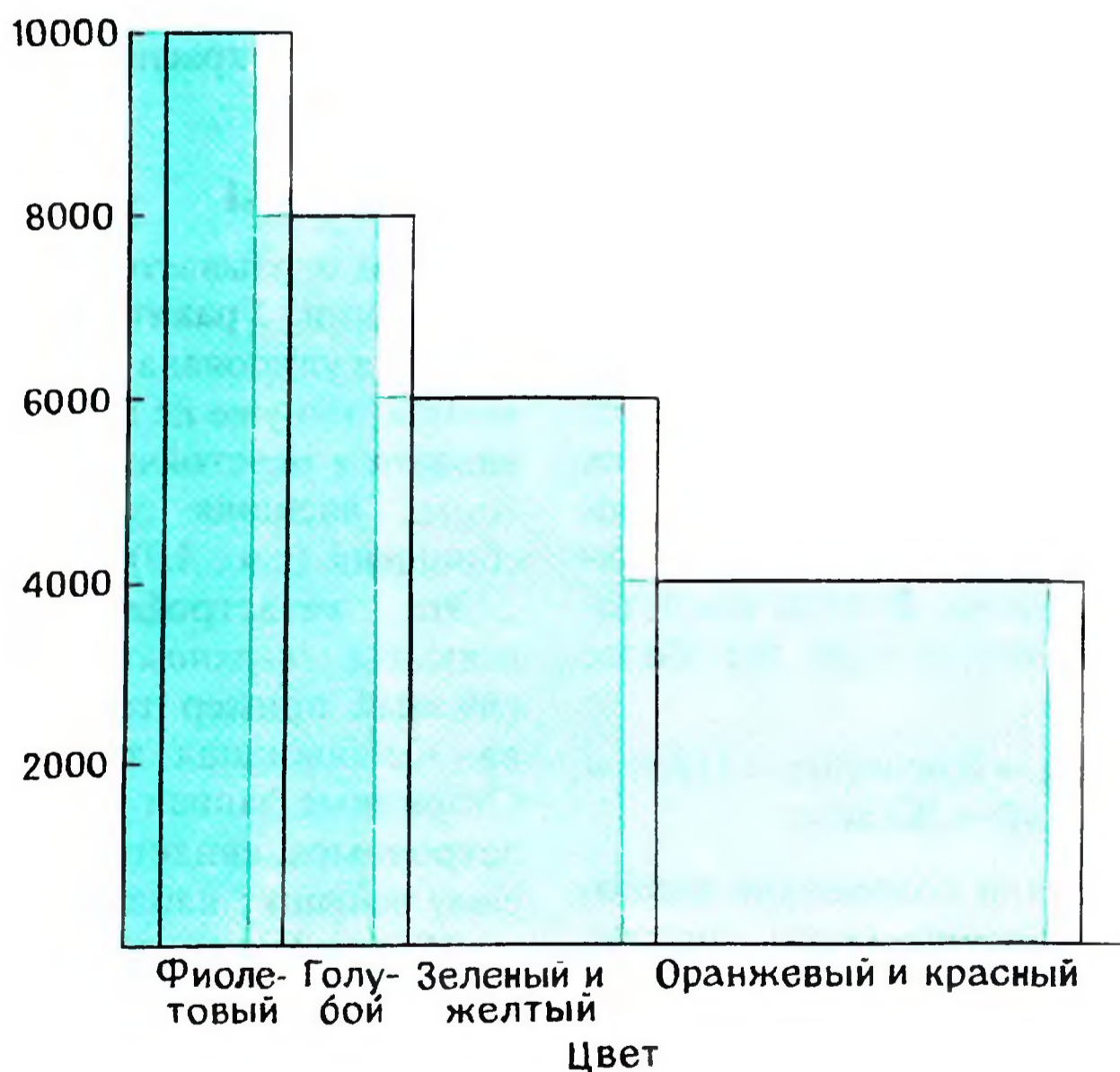


Рис. 4.8. На этом рисунке показаны поверхностные температуры звезд в их примерном соответствии с различными цветами в видимой части спектра. С повышением температуры цвет меняется от красного к фиолетовому. Так, звезда с температурой 8000 К кажется голубой, а звезда с температурой 4000 К – в основном оранжево-красной.



повышается! Что происходит с другой, холодной звездой? Она получает тепло, давление в ней растет, и ее равновесие также нарушается. Звезда расширяется, так как силы внутреннего давления преобладают над силами гравитации. Но с расширением звезды газ охлаждается, поэтому холодная звезда становится еще холоднее!

Как ни странно такое поведение, нечто подобное действительно происходит в ходе звездной эволюции. Мы уже видели, что в центральном ядре звезды, подобной Солнцу, температура достаточно высока для поддержания реакции синтеза гелия из водорода. Что произойдет, когда водород в ядре иссякнет? Из-за дефицита топлива термоядерный реактор на время «выключится». Это приведет к снижению выработки тепла и к падению давления

в ядре, поэтому ядро сжимается и разогревается. Когда его температура повысится примерно до 100 млн. градусов Цельсия, реактор снова оживет. Однако теперь топливом будет служить уже не водород, а гелий. Как показано на рис. 4.7, при такой температуре три ядра гелия могут слиться и образовать ядро углерода. Тем временем для сохранения общего равновесия внешняя оболочка звезды расширится и звезда станет *гигантом*. Расширение оболочки ведет к охлаждению, так что поверхностная температура звезды упадет. Если температура на поверхности Солнца около 5500°C, то поверхностная температура звезды-гиганта может понижаться до 3500°C. Поэтому наше Солнце имеет желтоватый цвет, а цвет звезд-гигантов приближается к красному (рис. 4.8).

## ЗВЕЗДНЫЕ КАТАСТРОФЫ

В ходе звездной эволюции процессы сжатия и расширения чередуются вновь и вновь. Пока есть топливо, звезда его сжигает. Когда его запасы иссякают, ядро сжимается и разогревается до тех пор, пока не достигнет температуры, достаточной для начала термоядерной реакции с новым топливом. В этой последовательности появляются ядра все более тяжелых элементов:

Гелий → Углерод → Кислород → Неон →  
→ Кремний → Железо.

На каждом этапе для сохранения равновесия внешняя оболочка звезды расширяется все сильнее. Звезда-гигант становится все больше. Однако ядерная физика учит, что процесс синтеза не может продолжаться без конца, а прекращается на ядрах группы железа. Дальнейшее присоединение частиц к ядру железа уже не может привести к выделению энергии. К этому моменту температура ядра достигает около 10 млрд. градусов Цельсия,

и звезда оказывается в катастрофическом положении. Гравитации, которая до сих пор регулировала равновесие горячей звезды, это уже не под силу. В звезде развиваются неустойчивости, вследствие которых внешняя оболочка может быть сброшена (рис. 4.9).

Эта катастрофа наблюдается как вспышка *сверхновой звезды*. Самый наглядный пример такого звездного взрыва – Крабовидная туманность (рис. 4.10). Старинные записи китайских и японских астрономов свидетельствуют о том, что саму вспышку наблюдали на Земле 4 июля 1054 г. Теперь, через девять с лишним веков после взрыва, мы видим расширяющуюся внешнюю оболочку на фотографии.

Продуктами такого взрыва являются атомные ядра (синтезированные в звезде), электроны, нейтрино и излучения. Ядра атомов образуют потоки *космических лучей*, которые распространяются в нашей Галактике на огромные расстояния. Для



Рис. 4.9. Взрыв сверхновой происходит тогда, когда из-за внутренних неустойчивостей сбрасывается протяженная внешняя оболочка массивной звезды.

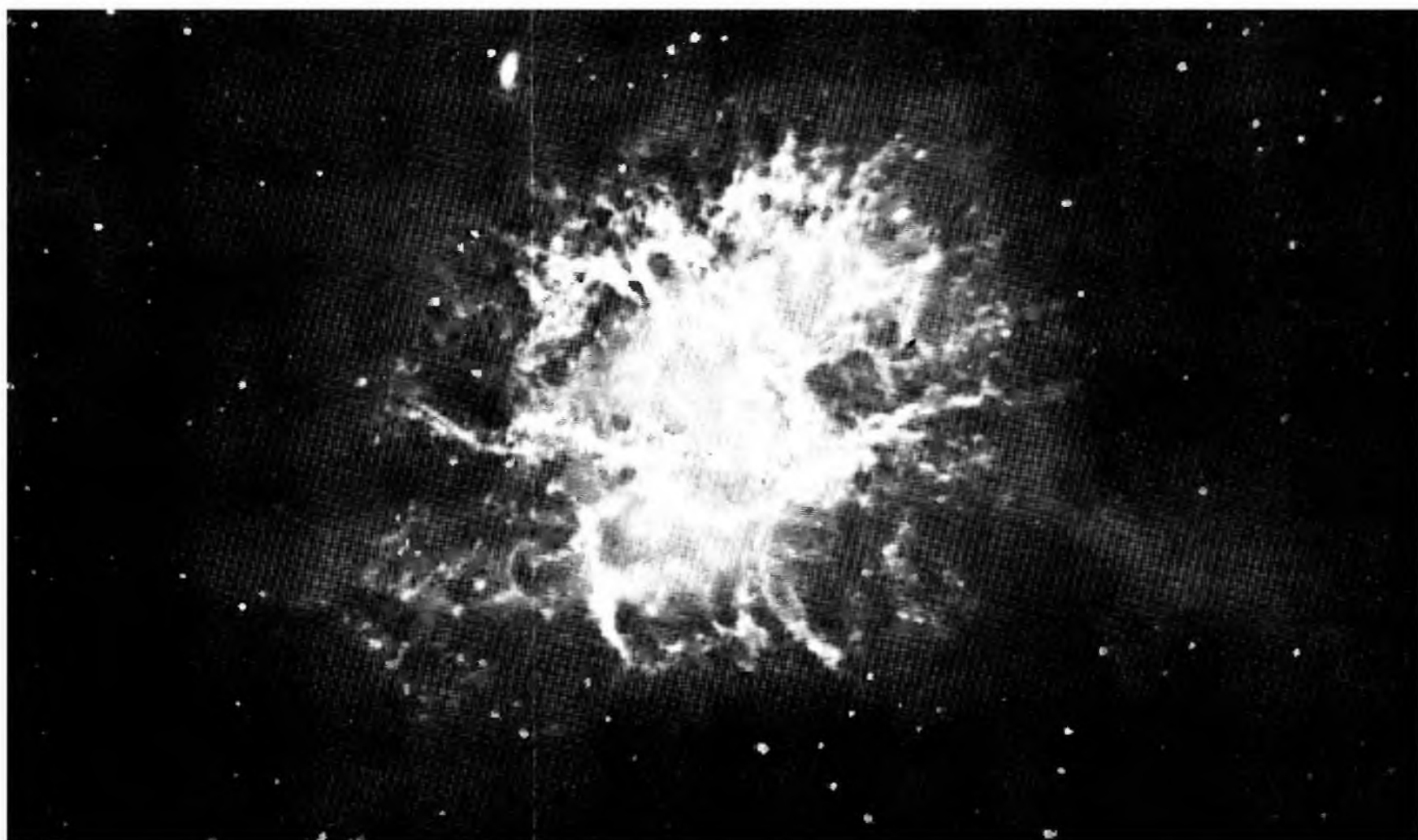


Рис. 4.10. Фотография Крабовидной туманности. Яркий объект – это, как полагают, остаток взрыва сверхновой. (С любезного разрешения обсерваторий Маунт-Вилсон и Лас-Кампаньяс, Институт Карнеги в Вашингтоне.)



нас, жителей Земли, было бы настоящей катастрофой, если бы взрыв сверхновой произошел на расстоянии, скажем, 100 световых лет. Порожденные этим взрывом космические лучи высоких энергий натворили бы страшных бед в земной атмосфере. Они могли бы, например, разрушить весь защитный слой озона и тем самым открыть все живое на Земле ультрафиолетовому излучению Солнца. К счастью, взрыв сверхновой — довольно редкое явление. Частота таких взрывов по всей Галактике — примерно одно событие в 100–300 лет. Поэтому вероятность взрыва сверхновой в наших окрестностях не дальше 100 световых лет в течение тысячи лет равна всего лишь одной миллионной.

При всей разрушительности взрыва

сверхновой имеются данные, что это событие может в свою очередь стимулировать образование звезды из близлежащего газового облака. Химический состав Солнечной системы свидетельствует о том, что своим рождением она могла быть обязана взрыву сверхновой. Сталкиваясь с облаком межзвездного газа, ударные волны от таких взрывов могут способствовать началу сжатия. Не исключено, что Солнце и планеты сконденсировались из сжимающегося газового облака. Таким образом, звездные катастрофы могут играть и созидательную, а не только разрушительную роль.

А как насчет остатков взрыва? Что остается после того, как оболочка сброшена? К этому вопросу мы вернемся в гл. 7.



# 5

## Жизнь в искривленном мире

---

Два квазара 0957 + 561 А, В (расположенные друг над другом в центре фотографии) — это не отдельные объекты, а один объект, свет от которого раздваивается под действием гравитационного поля галактики, находящейся между квазаром и Солнечной системой.

Эта промежуточная галактика, расположенная чуть выше нижнего изображения квазара, в действительности дает три изображения квазара: одно отклонено к северу от истинного положения, а два накладываются друг на друга — к югу.  
(С любезного разрешения Д. Робертса.)





## БЕЗУПРЕЧЕН ЛИ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Из гл. 2 мы вынесли впечатление, что закон всемирного тяготения Ньютона успешно описывает самые разнообразные явления природы, в которых гравитация играет важную роль. С помощью этого закона можно объяснять не только движения таких небесных тел, как планеты, кометы и спутники, но и разбираться в сложной проблеме внутреннего строения и эволюции Солнца и других звезд. Современные ученые пользуются этим законом для расчета запусков ракет, траекторий космических аппаратов и времени стыковок на космических орбитах. Закон всемирного тяготения Ньютона – пример хорошего научного закона, простого в своей основе и универсального в применении. Чего еще можно желать?

Но наука по самой своей природе всегда стремится к совершенству. Научные законы и теории признаются лишь до тех пор, пока могут выполнять свою главную задачу – объяснять явления природы. От любого научного закона, каковы бы ни были его прошлые заслуги, неизбежно

приходится отказываться, если вдруг окажется, что он не справедлив хотя бы в одном конкретном случае. Разумеется, в ученом такое событие пробуждает смешанные чувства: разочарование и смущение оттого, что нужно отбрасывать или менять старые хорошо известные истины, и одновременно волнение и надежду на то, что природа вот-вот откроет еще одну свою тайну.

Закон гравитации Ньютона не был исключением из этого правила. К началу нашего столетия на внушительном фасаде здания, воздвигнутого физиками, в фундаменте которого были заложены ньютоновские законы движения и тяготения, одна за другой стали появляться трещины. Они были вызваны расхождениями как теоретического, так и наблюдательного характера. Потребовалось бы слишком много времени и места, чтобы описать все возникшие вопросы, и мы ограничимся тем, что приведем по одному примеру таких противоречий, причем начнем с эмпирического случая.

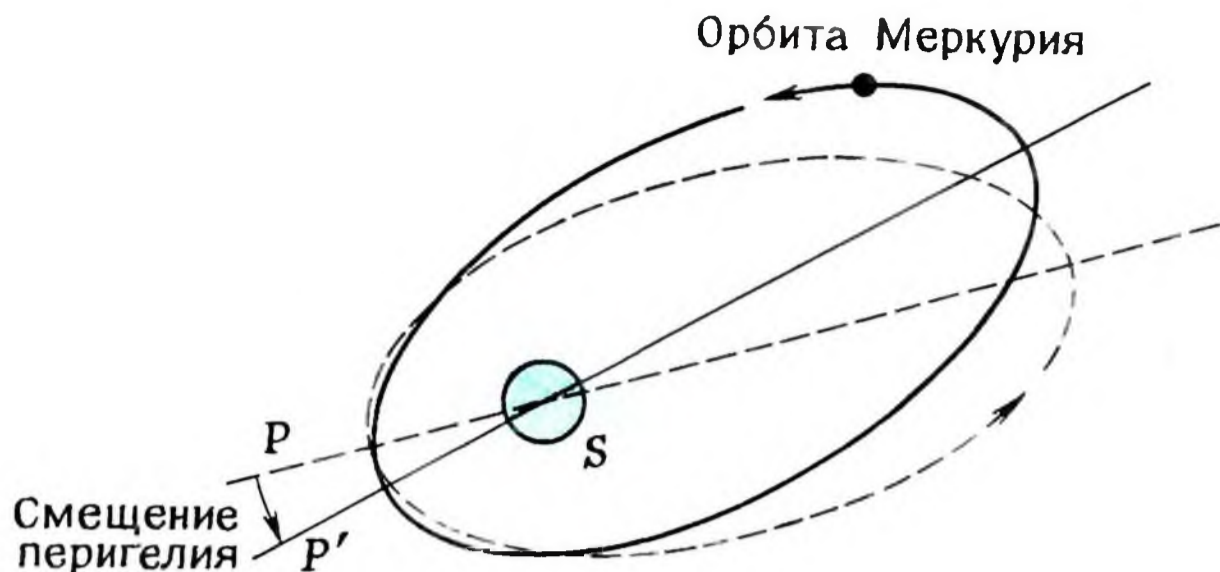
## СТРАННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕРКУРИЯ

Считается, что планеты движутся по эллиптическим орбитам. К такому выводу пришел Кеплер после тщательного изучения данных наблюдений, а впоследствии это было доказано Ньютоном при помощи законов движения и тяготения.

Однако в длинных рядах наблюдений,

охватывающих несколько десятилетий после 1764 г., стали обнаруживаться небольшие отклонения в орбите планеты Меркурий. Из всех планет Солнечной системы Меркурий – самая близкая к Солнцу, а его орбита самая вытянутая. Один оборот вокруг Солнца он совершает при-

Рис. 5.1. Смещение перигелия Меркурия. (J. C. Brandt, S. P. Moran. *New Horizons in Astronomy*. © 1972. W. H. Freeman and Co.)



мерно за 88 суток. Таким образом, если в какой-то день Меркурий находится в ближайшей к Солнцу точке  $P$ , мы вправе ожидать, что через 88 суток он вернется в ту же точку. Такое ожидаемое поведение показано на рис. 2.5.

Однако Меркурий ведет себя далеко не так. Завершив оборот, он не возвращается в ту же точку. Как показано на рис. 5.1, самой близкой к Солнцу точкой будет не  $P$ , а  $P'$ .

Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется *перигелием*. На рис. 5.1 видно, что перигелий Меркурия сместился вперед; при обращении Меркурия вокруг Солнца его перигелий непрерывно перемещается в направлении, показанном стрелкой на рис. 5.1.

Скорость этого смещения очень мала. Прямая, соединяющая Солнце и перигелий, поворачивается в пространстве так медленно, что за 100 лет проходит угол всего в  $575''$ . Чтобы лучше представить себе эту величину, вспомним, что  $1' = \frac{1}{60}^\circ$ , а  $1'' = \frac{1}{60}'$ . Таким образом, за 100 лет перигелий смещается всего лишь на  $9,58'$ , или  $\approx 0,16^\circ$ .

При всей своей незначительности это отклонение беспокоило ученых. Напомним, что в гл. 2 мы рассматривали случай отклонений орбиты планеты Уран от расчетной. Это несоответствие было устранено, когда обнаружили, что орбиту Урана возмущает другая (дотоле неизвестная) планета. Не вызвано ли аномальное поведение Меркурия возмущающим влиянием других планет?

Подсчеты показали, что ответ на этот вопрос: «Так-то оно так, да не совсем». Из  $575''$  большая часть, примерно  $532''$ , действительно объясняется возмущениями со стороны других планет Солнечной системы. Излишек же в скорости смещения перигелия — около  $43''$  в столетие — так и оставался необъяснимым в рамках ньютоновской теории. Отметим, что необъясненный эффект составляет менее 8% от полного и очень мал в абсолютном выражении. Тем не менее из-за присущего науке стремления к совершенству расхождение заставляло усомниться в справедливости ньютоновского закона тяготения.

## ОТ НЬЮТОНА К ЭЙНШТЕЙНУ

Альберта Эйнштейна (1879–1955) побудили критически посмотреть на ньютоновский закон тяготения не наблюдаемые отклонения, а теоретические трудности.

Наибольшую тревогу вызывало связанное с ним представление о *мгновенном действии на расстоянии*. Согласно закону Ньютона, Солнце и Земля притягивают



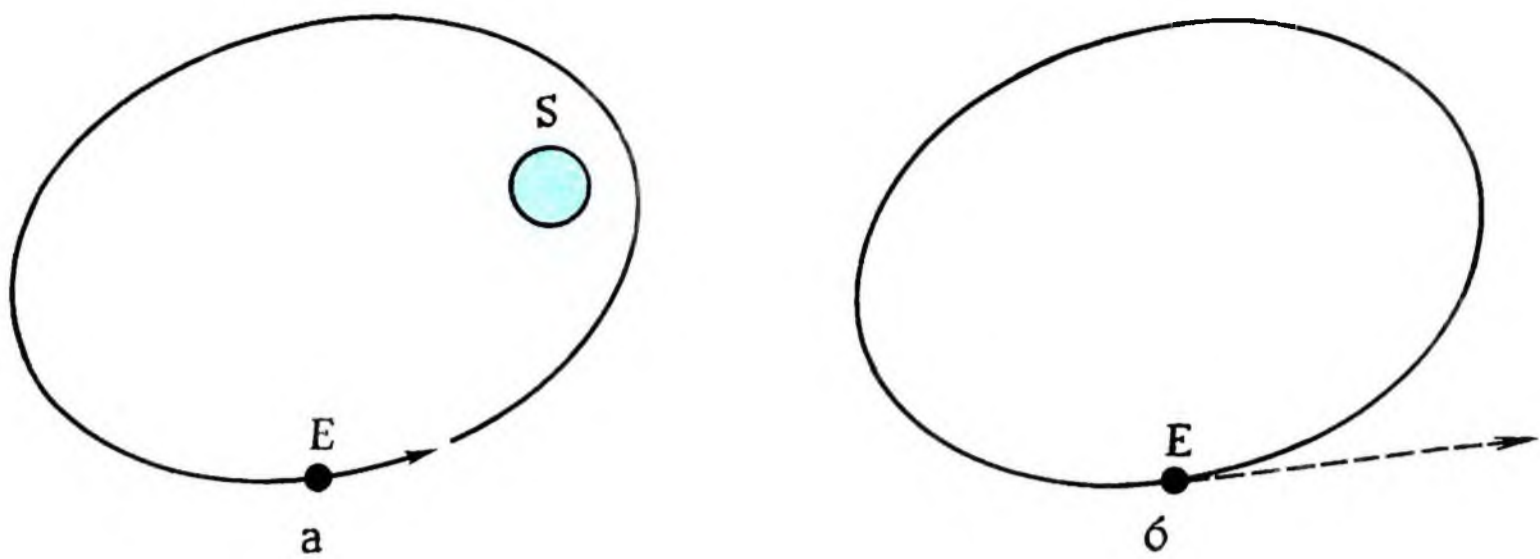


Рис. 5.2. Если бы Солнце вдруг исчезло, то Земля, освобожденная от солнечной гравитации, устремилась бы по касательной к своей эллиптической орбите. (F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics–Astronomy Frontier. © 1980. W. H. Freeman and Co.)

друг друга с силой, которая передается на огромное разделяющее их расстояние — около 150 000 000 км. К тому же предполагается, что эта сила действует мгновенно.

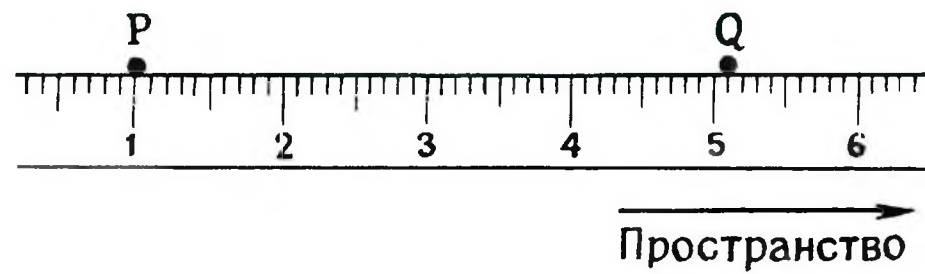
Мгновенное действие гравитации можно проиллюстрировать мысленным экспериментом. Для этого мы вновь призовем на помощь Ала ад-Дина и его джинна. Помните рассказ из предыдущей главы, в котором Ала ад-Дин повелел джинну разрушить Солнце? Пусть на этот раз он повелит джинну сразу и уничтожить Солнце. Правда, в реальном мире, где господствуют законы физики, возможности джинна не беспредельны. Так, согласно закону сохранения вещества и энергии, даже самый могущественный на свете джинн не в состоянии уничтожить Солнце «бесследно». Вещество, исчезая, превращается в эквивалентное количество энергии, определяемое формулой Эйнштейна  $E = Mc^2$  (гл. 4). Но в волшебном мире «Тысячи и одной ночи» возможно все, и мы поразмыслим над тем, что бы произошло, если бы повеление Ала ад-Дина было исполнено.

Как показано на рис. 5.2, в тот момент, когда Солнце исчезнет, Земля освободится от его гравитационного притяжения. Она немедленно устремится по касатель-

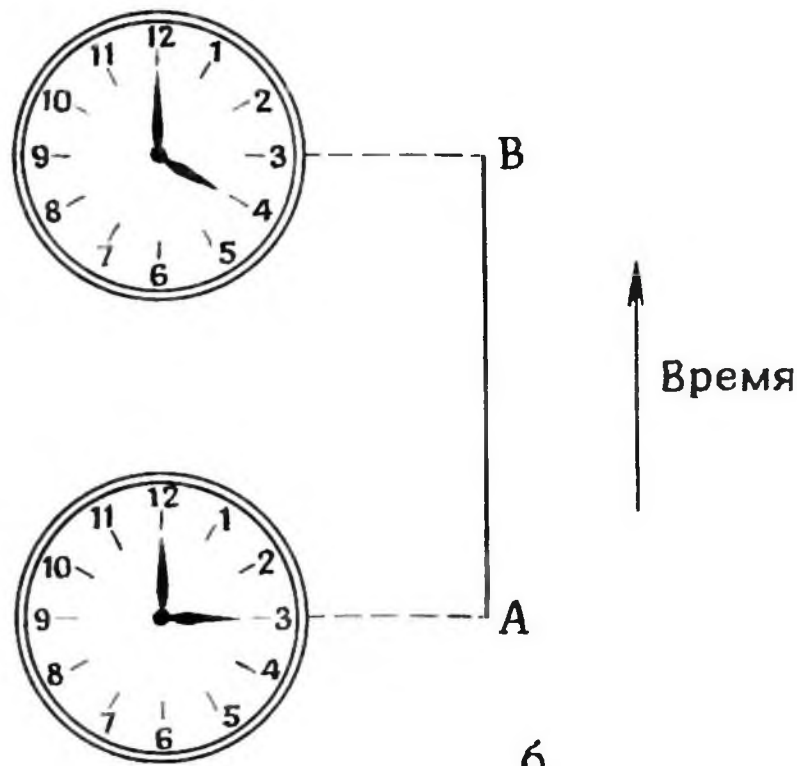
ной к своей эллиптической орбите. Люди, находящиеся на дневном полушарии, заметили бы его исчезновение примерно через восемь минут после его разрушения (столько времени свет распространяется от Солнца до Земли) — ведь день превратился бы в ночь. Значит, гравитация позволила бы наблюдать на Земле событие (исчезновение Солнца) раньше, чем свет.

Это противоречит *специальной теории относительности*, созданной Эйнштейном в 1905 г. В этой теории на скорость, с которой информация о любом событии может передаваться из одной точки пространства в другую, накладывается ограничение сверху. Таким верхним пределом является *скорость света*. Итак, представление о мгновенном распространении гравитационного притяжения на большие расстояния противоречит основному принципу специальной теории относительности. Вот почему, разрабатывая специальную теорию относительности, Эйнштейн был вынужден пересмотреть закон тяготения.

Здесь читатель вправе спросить: «Что такое специальная теория относительности? Почему она так важна, что ради нее мы должны менять закон тяготения, оставшийся непоколебимым более двух веков?» Эта книга посвящена главным



а



б

Рис. 5.3. Измерение перемещений в пространстве (а) и промежутков времени (б) в динамике Ньютона – Галилея.

образом гравитации, и мы не можем уделить много места этим интересным и важным вопросам. Нижеследующее краткое описание, хотя и вполне достаточное для наших целей, не дает представления о той роли, которую играет специальная теория относительности в современной физике. Революция, которую эта теория произвела в современной физике, сравнима с революцией, совершенной Галилеем в аристотелевой физике средневековья.

В специальной теории относительности подверглись пересмотру понятия абсолютного пространства и абсолютного времени. На рис. 5.3, а изображены две точки  $P$  и  $Q$  пространства. Чтобы найти расстояние между  $P$  и  $Q$ , нужно приложить к прямой  $P$  линейку и измерить длину отрезка. На рис. 5.3, б изображены два момента времени  $A$  и  $B$ . Для измерения времени, прошедшего между  $A$  и  $B$ ,

используются часы. Мера промежутка времени между  $A$  и  $B$  определяется тем, сколько колебаний совершит маятник часов от момента  $A$  до момента  $B$ . Интуитивно кажется, что эти измерения носят абсолютный характер, т.е. не зависят от наблюдателя. В частности, если измерения проводят два наблюдателя, которые движутся с различными скоростями, они все равно получают одинаковые результаты. На этом интуитивном представлении была основана физика Ньютона и Галилея. Именно таким взглядам и бросил вызов Эйнштейн.

Бесспорно, многие научные представления обязаны своим происхождением интуиции талантливых ученых, но окончательно их справедливость устанавливается в физических опытах. Напомним, что в гл. 2 уже отмечалось, какое значение придавал экспериментам сам Галилей.

Казалось, что понятия абсолютного



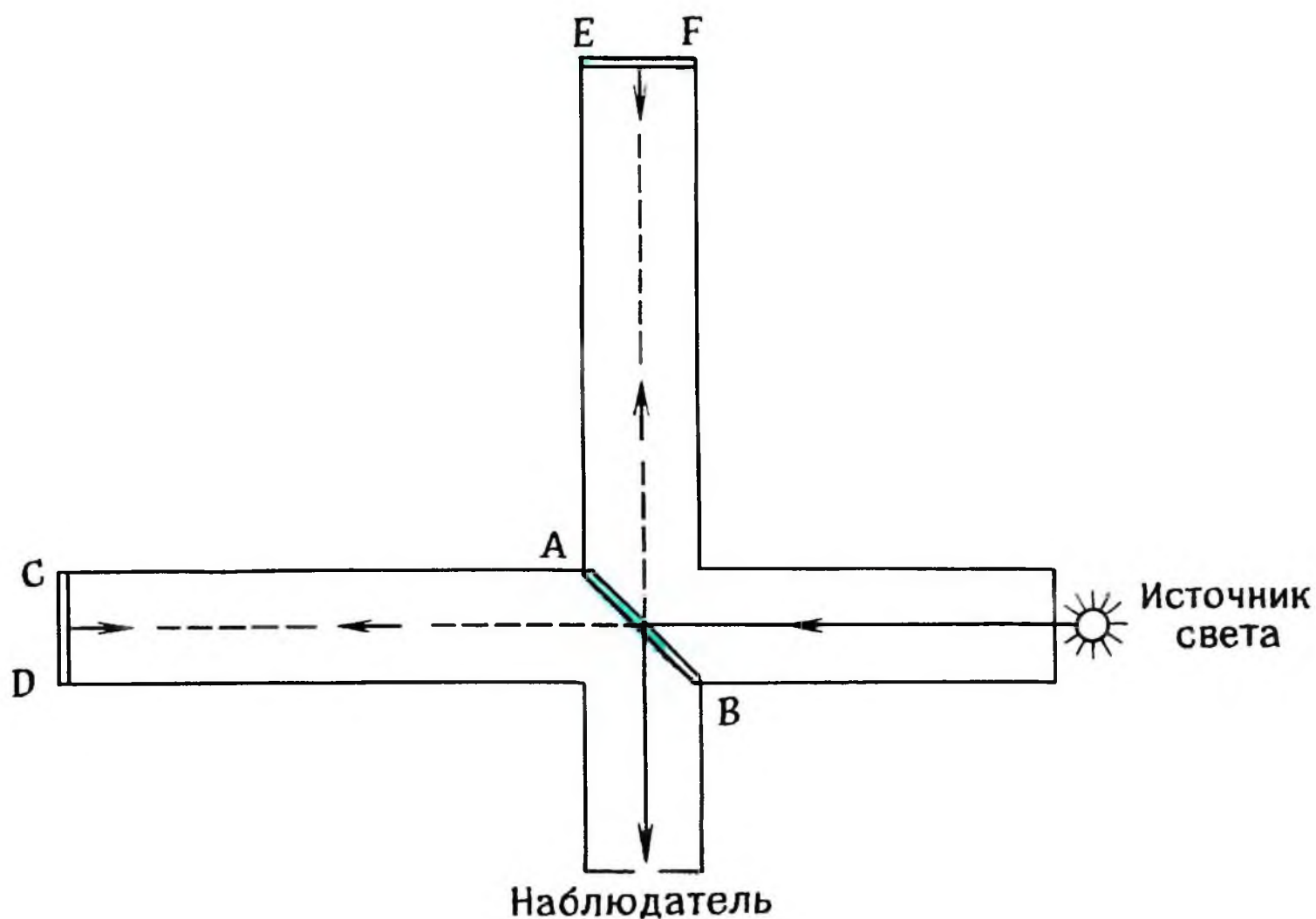


Рис. 5.4. В опыте Майкельсона – Морли луч света падает на полупрозрачное стекло  $AB$  в интерферометре Майкельсона. Отраженный луч изменяет свое направление на  $90^\circ$  и отражается от зеркала  $EF$ . Прошедший луч распространяется в прежнем направлении и отражается от зеркала  $CD$ . Оба луча смешиваются и приходят к наблюдателю. Поскольку свет – это волна, результат такого смешивания существенно зависит от фаз обеих расщепленных волн. В том предельном случае, когда гребни обеих волн совпадают, интенсивность увеличивается, а в противоположном случае при совпадении гребня одной и впадины другой волны луч гаснет. В общем случае наблюдатель видит чередующиеся темные и светлые полосы. Эта интерференционная картина зависит от пройденного каждой из двух волн расстояния и от скорости света. Поскольку оба плеча интерферометра по длине одинаковы, по сдвигу интерференционных полос можно было бы определить ничтожные изменения скорости света. Майкельсон и Морли использовали этот метод для измерения предполагаемой разности времен, затраченных светом на путь в направлениях север–юг и восток–запад. Никакого различия обнаружить не удалось.

пространства и абсолютного времени покоятся на надежном фундаменте. Но к концу XIX в., когда точность лабораторных экспериментов повысилась, в нем стали появляться трещины. Одним из экспериментов, сыгравших в этом решающую роль, был опыт Майкельсона и Морли, проведенный в 1887 г. Этот опыт, проиллюстрированный на рис. 5.4, показал, что время, за которое свет в интерферометре проходит туда и обратно в направлении восток–запад, равно

времени, нужному для такого же путешествия в направлении север–юг. Точность опыта позволяла обнаружить эффект движения земной поверхности (с запада на восток), связанного с вращением Земли, относительно «абсолютного пространства». Неожиданный результат опыта – никакого эффекта обнаружено не было – заставил ведущих физиков XIX в. искать выход из создавшегося положения.

В 1905 г. Эйнштейн объяснил результаты опыта Майкельсона – Морли. Эйнш-

тейн пересмотрел понятия абсолютного пространства и абсолютного времени, исходя из законов для электричества и магнетизма, сформулированных Клерком Максвеллом в 1860-х годах. Он пришел к выводу, что для сохранения симметрии, свойственной законам Максвелла, необходимо пересмотреть ньютоновские представления об абсолютном пространстве и абсолютном времени. Опыт Майкельсона–Морли Эйнштейн истолковал самым прямым и непосредственным образом: скорость света не зависит от движения Земли. Это – частный случай более общего утверждения Эйнштейна, что скорость света одинакова для всех наблюдателей, движущихся относительно друг друга.

Первый закон движения, открытый еще Галилеем, выделяет специальный класс наблюдателей – движущихся прямолинейно и равномерно, т.е. таких, на которых не действует никакая сила. Такие наблюдатели называются *инерциальными*; любые два инерциальных наблюдателя движутся прямолинейно и равномерно относительно друг друга. Согласно Эйнштейну, скорость света, измеренная каждым из них, будет одинакова. Этот вывод – частный случай более общего утверждения, что основные законы физики одинаковы для всех инерциальных наблюдателей.

Если наблюдать за проходящим поездом с платформы железнодорожной станции, то кажется, что он стремительно промчался мимо вас. Если же смотреть на этот поезд из автомобиля, едущего по параллельному шоссе в том же направлении, то уже не будет казаться, что поезд движется так быстро. Дело в том, что скорость поезда относительно автомобиля гораздо меньше, чем относительно неподвижной платформы.

Сравните этот результат с утверждением Эйнштейна, что скорость света неизменна для всех движущихся инер-

циальных наблюдателей, и вы поймете, почему такое утверждение противоречит нашему повседневному опыту. Но как убедительно показал опыт Майкельсона–Морли, природа не всегда считается с интуицией!

Придя к такому поразительному выводу, Эйнштейн был вынужден по-иному взглянуть на проблему измерения пространственных расстояний и промежутков времени. Понятия абсолютного пространства и абсолютного времени в том виде, как они проиллюстрированы на рис. 5.3, не согласуются с постоянством скорости света. Оказывается, результаты измерений в пространстве и времени зависят от движения инерциального наблюдателя, который их проводит. Два движущихся относительно друг друга наблюдателя, проделав измерения наподобие показанных на рис. 5.3, получают разные ответы. Соотношения, посредством которых связаны результаты их измерений, называются *преобразованиями Лоренца* по имени физика Хендрика Антона Лоренца\*. Итак, в специальной теории относительности на смену галилеевским понятиям абсолютного пространства и абсолютного времени пришло понятие единого пространства-времени, в рамках которого ни пространство, ни время сами по себе не являются абсолютными. Из законов движения, выписанных по новым правилам при помощи преобразований Лоренца, вытекало, что в ньютоновскую динамику необходимо внести некоторые изменения. Из них, в частности, следовало, что скорость света – это предельная скорость, с которой может двигаться какая-либо материальная частица или пере-

\* Лоренц вывел эти соотношения, пытаясь объяснить результат опыта Майкельсона–Морли при помощи своей теории. Эйнштейн пришел к этим преобразованиям в специальной теории относительности, но из других соображений.



даваться физическая информация.

Все это и учитывал Эйнштейн, когда с 1905 по 1915 г. пытался построить теорию гравитации, которая, обладая всеми

достоинствами ньютоновой, не противоречила бы специальной теории относительности.

## ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Об одном из затруднений, которое ставило под сомнение ньютоновский закон гравитации в рамках специальной теории относительности, мы уже упоминали. В этой теории особое значение придается постулату, что скорость света является предельной для любых физических взаимодействий, а между тем, согласно Ньютону, действие гравитации должно распространяться мгновенно на сколь угодно большие расстояния. Другая трудность была связана с понятием инерциального наблюдателя. Инерциальный наблюдатель — это тот, на которого не действуют никакие силы. А можно ли на самом деле указать такого наблюдателя или такой физический объект? Рассматривая первый закон Ньютона, мы упоминали силу трения, препятствующую движению. Но в условиях, близких к идеальным, можно добиться, чтобы трение стало

сколь угодно малым. Человек, который пытается идти по скользкому льду, поймет, как это трудно, когда трения почти нет. Пуля, выпущенная в вакуумной камере, не испытывает сопротивления воздуха. Но во всех этих случаях мы упускаем из виду еще одну силу — силу тяготения Земли. Гравитация действует на все материальные тела, этой силой нигде нельзя пренебречь. Даже если улететь от Земли далеко-далеко, придется учитывать другие объекты Вселенной.

Короче говоря, нет такого места во Вселенной, где можно было бы скрыться от силы гравитации; и значит, инерциального наблюдателя, соответствующего нашему определению, вообще не может быть. Поскольку понятие инерциального наблюдателя является отправной точкой специальной теории относительности, может создаться впечатление, что эта тео-



Рис. 5.5. Эйнштейну удалось заткнуть круглое отверстие квадратной пробкой, после того как он подправил и отверстие, и пробку! Его общая теория относительности разрешает конфликты между ньютоновской теорией гравитации и специальной теорией относительности.

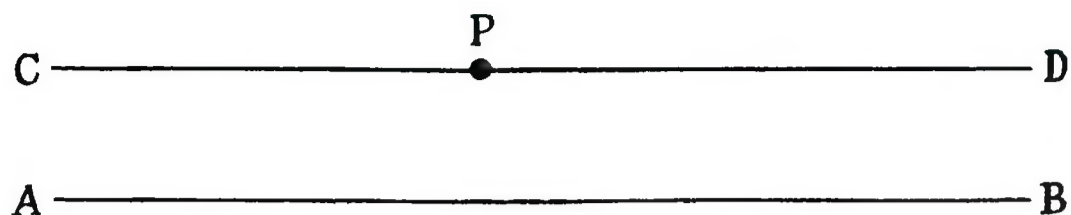


Рис. 5.6. В евклидовой геометрии аксиома о параллельных прямых гласит, что через точку  $P$  можно провести одну и только одну прямую, параллельную  $AB$ .  $CD$  – такая прямая.

рия основана на каких-то фикциях. Итак, специальная теория относительности не только не согласуется с ньютоновским законом гравитации, но само наличие гравитации как бы подрывает ее основы.

Эйнштейн нашел остроумный выход из этого положения, предложив совсем по-другому подойти к явлению гравитации. Его теория гравитации, которая называется *общей теорией относительности*, – это не заплатки, кое-как наставленные на ньютоновский закон и специальную теорию относительности, а радикально новая попытка понять природу тяготения. Попробуем разобраться в соображениях, приведших к этой замечательной теории.

Итак, гравитация вездесуща, и бесполезны старания избавиться от нее где бы то ни было во Вселенной. Эйнштейн счел это ее свойство свидетельством тесной связи с другой охватывающей все вокруг нас сущностью – *пространством-временем*. Он предположил, что связующим звеном между гравитацией и пространством-временем служит *геометрия*.

Геометрия – раздел математики, в котором изучаются пространственные отношения, например расположение и форма тел. Геометрию впервые систематически изложил древнегреческий математик Евклид (около 300 г. до н.э.). Отправляясь от принимаемых без доказательства немногочисленных постулатов и аксиом, Евклид доказал ряд теорем о треугольниках, квадратах, кругах и других фигурах. Долгое время математики беззаветно верили в истинность и неопровержимость

постулатов и аксиом Евклида, а евклидова геометрия занимала исключительное положение, как единственная систематическая модель всех измерений в реальном мире.

Однако аксиомы – это предположения, справедливость которых нельзя доказать. Из любого логически непротиворечивого набора аксиом можно вывести независимый раздел математики. Геометрия Евклида – это лишь один из многих возможных примеров непротиворечивых наборов аксиом.

Так, например, одна из аксиом Евклида связана с существованием параллельных прямых. На рис. 5.6 изображены прямая  $AB$  и точка  $P$  вне ее. Аксиома Евклида гласит, что через точку  $P$  можно провести одну и только одну прямую, параллельную  $AB$ . Изображенная на рис. 5.6 прямая  $CD$  параллельна  $AB$ ; это означает, что  $AB$  и  $CD$  не пересекутся, сколько бы мы их ни продолжали в обоих направлениях. Интуитивно это предположение кажется нам разумным и истинным. Тем не менее это всего лишь предположение. Его нельзя доказать при помощи других аксиом. Правда, многие математики ошибочно считали, что доказать эту аксиому можно, предлагались даже доказательства, впоследствии оказавшиеся неверными. Только в прошлом веке поняли наконец, что евклидову аксиому о параллельных нельзя доказать. Более того, математикам удалось показать, что если отказаться от евклидовой аксиомы о параллельных и исходить из какой-либо другой аксиомы, то можно создать новые, внут-



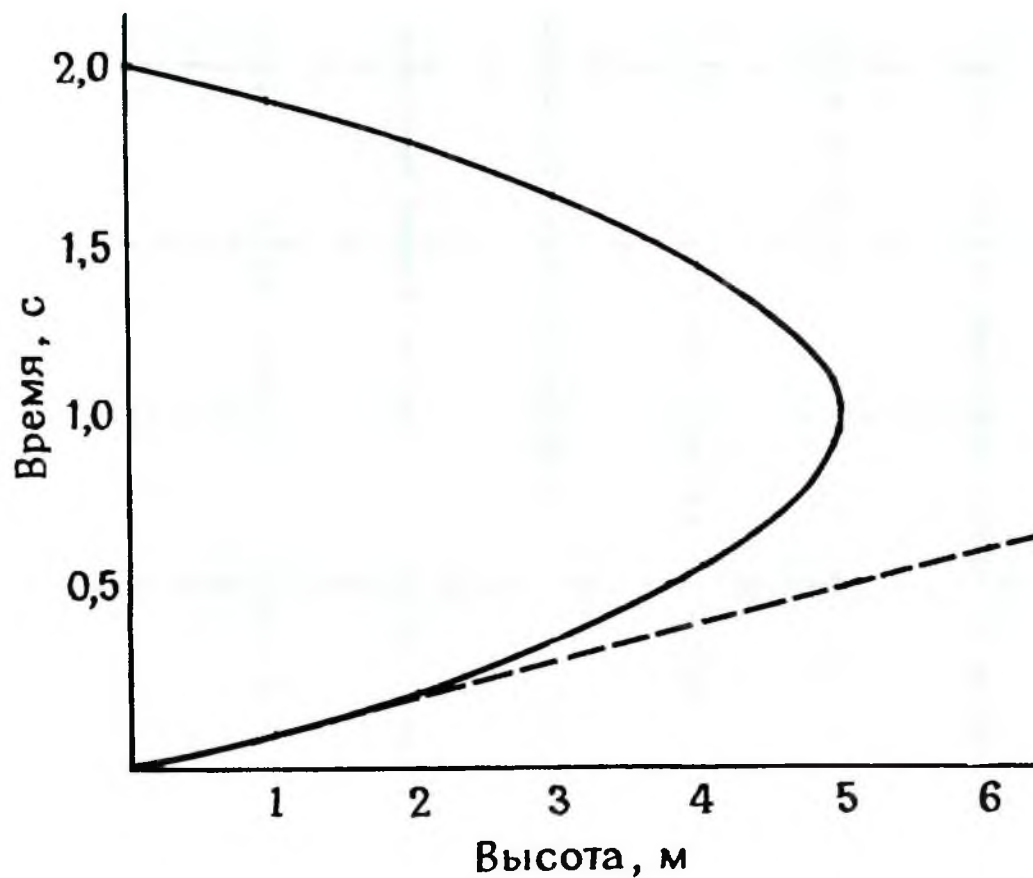


Рис. 5.7. Мировая линия мяча изображена в виде сплошной кривой. Штриховая прямая показывает, какой была бы эта линия в отсутствие гравитации.

ренне непротиворечивые геометрии. К примеру, можно утверждать, что через точку  $P$  нельзя провести ни одной прямой, параллельной  $AB$ , либо что через  $P$  можно провести более одной прямой, параллельной  $AB$ . В работах Лобачевского (1792–1856), Больяй (1802–1860), Гаусса (1777–1855), Римана (1826–1866) и других были построены совсем новые геометрии, отличающиеся от евклидовой аксиомой о параллельных. Эти геометрии стали называть *неевклидовыми*.

Вернемся к Эйнштейну и его попыткам связать гравитацию с пространством-временем. Чтобы проиллюстрировать рассуждения Эйнштейна, вспомним наш пример с баскетболистом из гл. 3. На рис. 5.7 траектория мяча изображена на пространственно-временной диаграмме. Мяч был подброшен с начальной скоростью 10 м/с, достиг высоты 5 м и начал падать. Непрерывная кривая на рис. 5.7 позволяет нам узнать, где находился мяч в любой фиксированный момент полета. Такая траектория называется

*мировой линией* мяча. Мировая линия на рис. 5.7 изображается кривой, которая называется *параболой*.

Поразмыслим теперь, что произошло бы, если бы гравитация внезапно исчезла. По первому закону динамики, мяч продолжал бы двигаться с постоянной скоростью (10 м/с) в вертикальном направлении. Его мировой линией была бы штриховая прямая на рис. 5.7.

Последователь Ньютона сказал бы, что в отсутствие гравитации траектория мяча описывается прямой линией, а под действием гравитации приобретает форму параболы. Эйнштейн ответил бы на это, что от гравитации никуда не скроешься и поэтому штриховая прямая на рис. 5.7 не имеет реального смысла. Единственной физически осмысленной линией является кривая линия. Как же истолковать искривление этой линии?

На этот вопрос Эйнштейн ответил, что в действительности эта линия описывает движение мяча в отсутствие сил, но в пространстве-времени, геометрия кото-

рого изменена гравитацией. Вследствие земной гравитации геометрия пространства-времени стала *неевклидовой*, и в этой геометрии траектория мяча в каком-то смысле прямолинейна.

В это трудно поверить. Ведь сплошная линия на рис. 5.7 явно не прямая. Но поразмыслим над ответом Эйнштейна. Как мы определяем прямую линию в евклидовой геометрии? Это — кратчайшее расстояние между двумя точками. В неевклидовой геометрии расстояние между двумя точками измеряется иначе, чем в евклидовой. Поэтому прямая линия в одной геометрии может оказаться не прямой в другой геометрии, и наоборот. Так что, если бы мы знали структуру неевклидовой геометрии пространства-времени около Земли, можно было бы

проверить, справедливо ли утверждение Эйнштейна, что сплошная линия на рис. 5.7 — прямая. Но как нам досконально изучить эту геометрию?

Общая теория относительности Эйнштейна дает такие способы. Уравнения Эйнштейна позволяют в принципе определить, как связана геометрия пространства-времени с распределением вещества и энергии. Мы говорим «в принципе» потому, что эти уравнения очень сложны и на практике можно найти их точное решение лишь в очень редких случаях. Поэтому вопрос об определении геометрии пространства-времени совсем не прост. Ниже мы рассмотрим одно решение, которое оказалось весьма полезным для проверки теории Эйнштейна.

## НЕЕКЛИДОВЫЕ ГЕОМЕТРИИ

Прежде чем перейти к наблюдаемым следствиям теории Эйнштейна, познакомимся с необычными свойствами неевклидовых геометрий. Для начала рассмотрим поверхность Земли, которую для простоты будем считать идеальной сферой. Представим себе, что Землю населяют плоские двумерные существа, не воспринимающие третьего измере-

ния — высоты. Как бы такие существа определяли прямые линии? Согласно критерию кратчайшего расстояния, двое натягивают между двумя точками веревку так, чтобы она прижималась к поверхности Земли (рис. 5.8). В результате получается дуга большого круга, проходящая через эти точки. Таким же критерием пользуются летчики, чтобы найти кратчай-

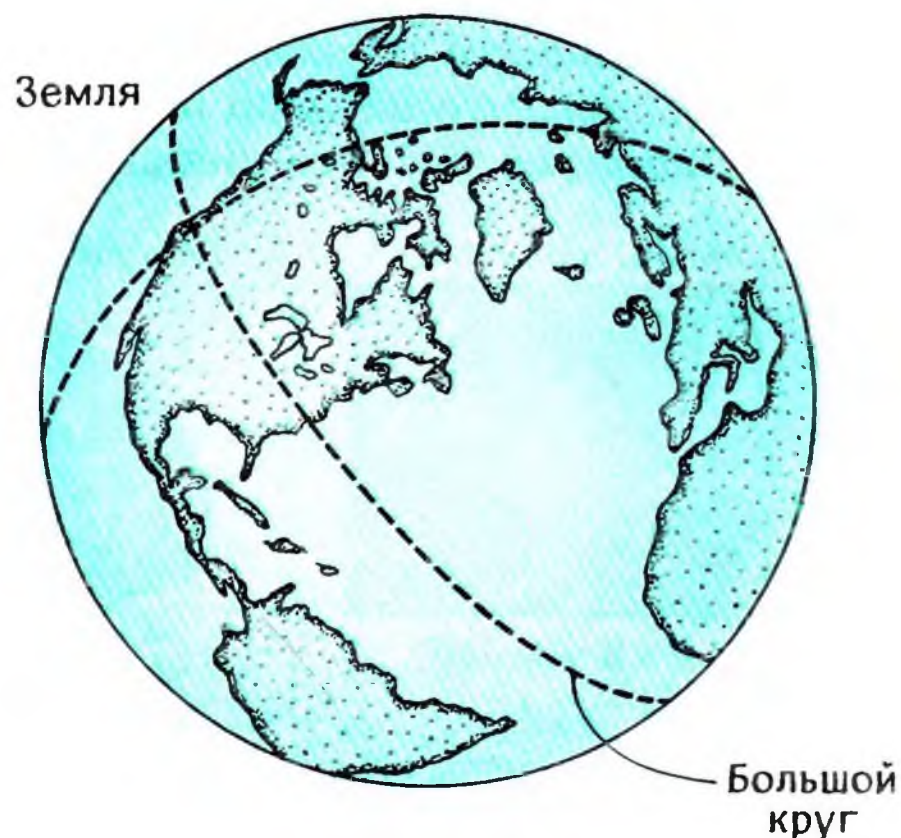


Рис. 5.8. Прямыми на поверхности Земли служат дуги больших кругов, т.е. кругов, плоскости которых проходят через центр Земли. Отметим, что любые два больших круга на поверхности Земли пересекаются.



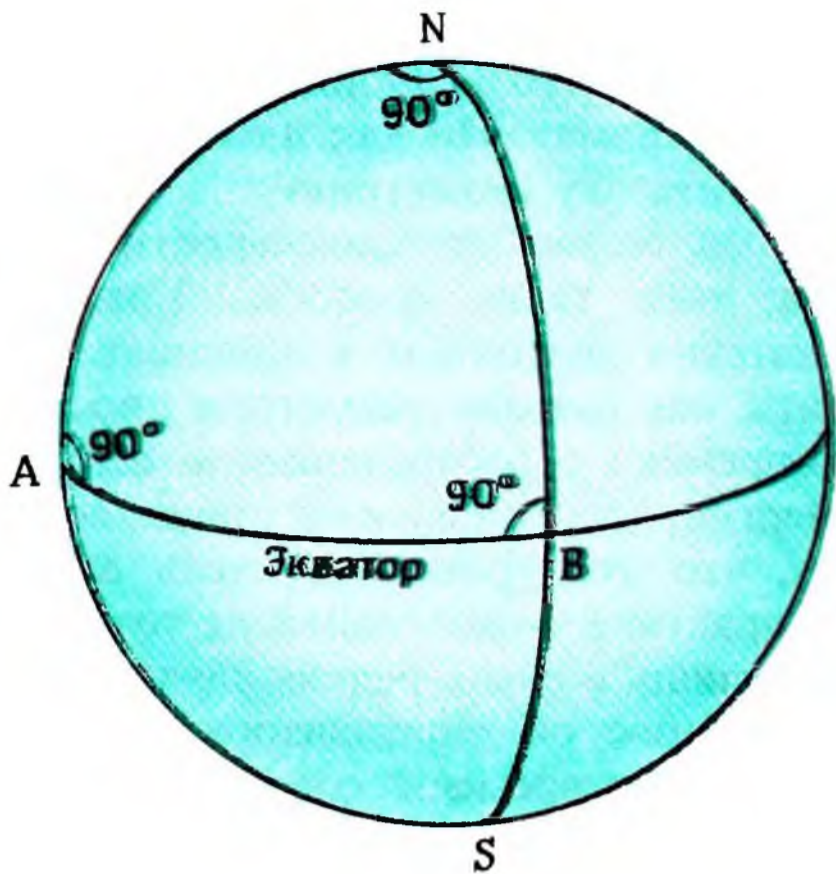


Рис. 5.9. В треугольнике  $NAB$  на сфере три прямых угла.

ший путь между двумя аэродромами. Этот путь отличается от маршрута, проложенного при помощи линейки на плоской географической карте. Снова подтверждается наше замечание: что считать прямой линией — сильно зависит от основных правил геометрии. На географической карте геометрия евклидова, а на поверхности Земли — нет. Чтобы определить путь самолета, нужно пользоваться неевклидовой геометрией.

Есть другой критерий выделения прямых линий. Если при движении направление нашего движения не меняется, мы говорим, что идем по прямой линии. В геометрии Евклида прямая, опре-

деленная при помощи критерия «кратчайшего расстояния», обладает и этим свойством. В неевклидовой геометрии эти два критерия прямой могут отличаться. Однако в неевклидовой геометрии, избранной Эйнштейном (так называемой *римановой геометрии*), оба признака приводят к одному и тому же.

Нет ли какого-нибудь простого приема, с помощью которого можно было бы проверить, является ли геометрия земной поверхности неевклидовой? На рис. 5.8 легко заметить, что *любые две прямые на поверхности Земли пересекаются*. Таким образом, аксиома Евклида о параллельных не выполнена: через точку  $P$  нельзя провести ни одной прямой, параллельной  $AB$ .

Можно убедиться в неевклидовом характере геометрии земной поверхности и иным способом. На рис. 5.9 на поверхности Земли изображен треугольник, который представляет собой маршрут путешествия плоского существа, стартовавшего с Северного полюса  $N$ . Путь пролегал по прямой — меридиану — до экватора. Там существо поворачивает на восток и проходит дугу  $AB$ , равную четверти экваториальной окружности Земли. В точке  $B$  оно поворачивает на север и возвращается на Северный полюс вдоль меридиана  $BN$ . В точке  $N$  оно замечает, что вернулось под прямым углом к первоначальному направлению. В треугольнике  $NAB$  угол при каждой из трех вершин



Рис. 5.10. Примеры двумерных поверхностей нулевой, положительной и отрицательной кривизны. Сумма углов  $A$ ,  $B$  и  $C$  треугольника во всех трех случаях различна.



прямой; между тем три угла евклидова треугольника всегда составляют  $180^\circ$ . Этот пример подводит нас к понятию *искривленного пространства*.

На языке геометрии двумерное пространство – поверхность Земли – искривлено и обладает *положительной кривизной*. Двумерное пространство листа бумаги – *плоское*, или имеет *нулевую кривизну*. Пространство седлообразной поверхности тоже искривлено и обладает *отрицательной кривизной*. Эти поверхности изображены на рис. 5.10. Обратите внима-

ние, что сумма углов треугольника на поверхности отрицательной кривизны меньше  $180^\circ$ . Другой способ определения кривизны двумерной поверхности – положить на нее лист бумаги и попробовать ее ровно расстелить. Если бумага без складок покрывает поверхность, то кривизна поверхности нулевая, если бумага мнется, то кривизна положительна, а если рвется, то отрицательна. Испытайте этот прием на различных искривленных поверхностях.

## ИСКРИВЛЕН ЛИ НАШ МИР?

Вернемся теперь к эйнштейновскому истолкованию гравитации и спросим: существует ли эмпирическое подтверждение того, что мы живем в искривленном пространстве-времени?

В 1916 г., вскоре после того, как Эйнштейн предложил свою теорию относительности, Карл Шварцшильд (1873–1916) решил уравнения Эйнштейна и выяснил, какова геометрия пространства-времени, когда в нем имеется массивный сферический объект. *Решение Шварцшильда* – это аналог решения Ньютона для задачи о гравитационном притяжении тел массивным шаром. Таким образом, этим решением можно пользоваться, например, для описания движения планет вокруг Солнца.

Вспомним эйнштейновскую интерпретацию первого закона движения при наличии тяготения. Согласно этой интерпретации, орбита планеты вокруг Солнца определяется критерием «прямолинейности» в пространстве-времени с геометрией, даваемой решением Шварцшильда. И здесь законы Ньютона и Эйнштейна приводят к сходным результатам. Для любых практических целей орбиты планет, найденные при помощи критерия Эйнштейна и из теории Ньютона, можно

считать одинаковыми! Различия крайне невелики, причем они наиболее заметны у Меркурия, поскольку его орбита лежит ближе всего к Солнцу и имеет наибольший эксцентриситет. Теория Эйнштейна предсказывает, что орбита Меркурия медленно поворачивается в пространстве со скоростью около  $43''$  в столетие.

И действительно, выше мы уже говорили о таком поведении Меркурия. Мы установили, что перигелий его орбиты смещается со скоростью около  $43''$  в столетие и что этот эффект не поддается решению в рамках теории тяготения Ньютона. А вот теория Эйнштейна позволяет все объяснить. Ее предсказания очень хорошо согласуются с наблюдаемой скоростью смещения.

Такой замечательный успех общей теории относительности внушает к ней доверие. Однако справедливость этой теории была установлена с помощью другого астрономического наблюдения. Речь идет об искривлении лучей света вблизи Солнца.

Как известно, свет распространяется по прямой. Если в соответствии с геометрией искривленного пространства определение прямой линии меняется, то и путь луча света должен стать иным, чем



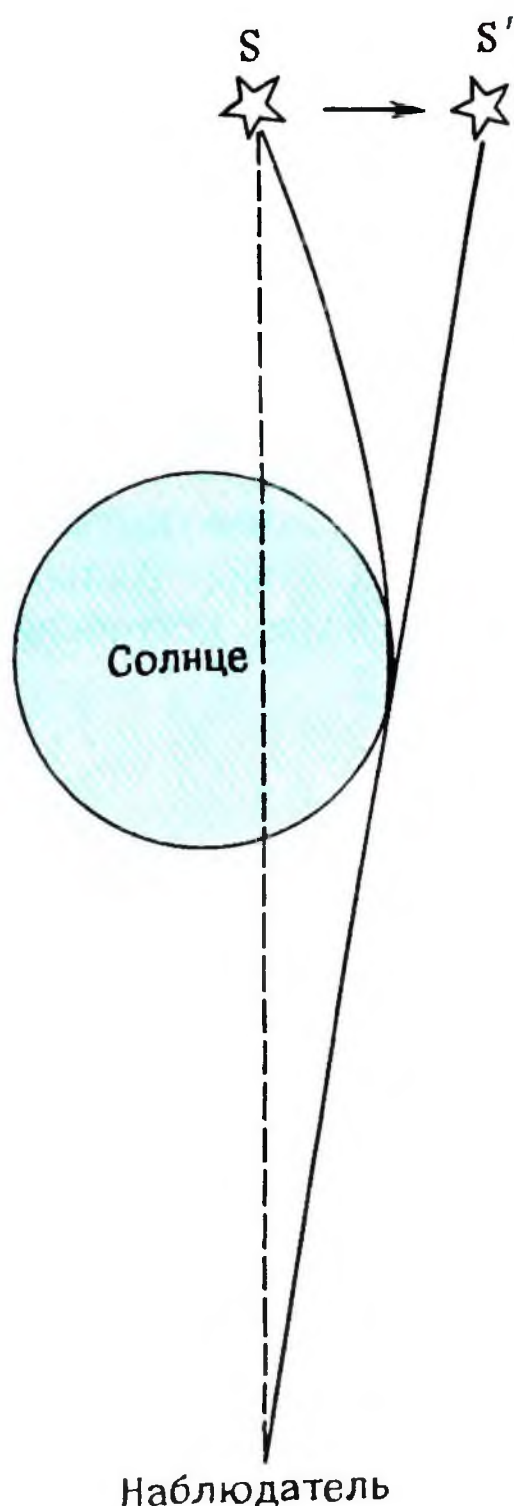


Рис. 5.11. Отклонение луча света в поле тяготения Солнца. При покрытии Солнцем звезды  $S$  кажется, что она смещается относительно других звезд и ее изображение видно в направлении  $S'$ .

в плоском пространстве. На рис. 5.11 изображены два луча света, проходящих вблизи поверхности Солнца. Штриховая линия – траектория луча света в евклидовой геометрии без учета тяготения, кривая линия – траектория луча света в геометрии Шварцшильда. Под влиянием тяготения луч света мог бы отклониться и согласно ньютоновской теории, но это отклонение было бы другим, чем по Эйнштейну из-за кривизны пространства. Какова траектория луча в действительности?

Астрономы могут ответить на этот вопрос при помощи следующего опыта. Допустим, они наблюдают покрытие звезды Солнцем, т.е. звезду, которую Солнце в своем видимом годичном движении по небесной сфере загораживает от

наблюдателя. Когда звезда находится на большом угловом расстоянии от Солнца, различием между геометриями Шварцшильда и Евклида можно пренебречь и траектория испущенного звездой света представляется нам евклидовой прямой линией. На рис. 5.11 изображена ситуация непосредственно перед или сразу после покрытия звезды Солнцем; луч касается солнечного лимба, и его искривление максимально. Поэтому в ходе покрытия будет казаться, что положение звезды меняется относительно других звезд. Ожидаемое, согласно теории Эйнштейна, отклонение очень мало – около  $1,75''$ .

А что дает закон гравитации Ньютона? В его исходной формулировке притяжение света Солнцем вообще не предусматривается, так что никакого отклонения

быть не должно. Однако если принять, что свет состоит из мельчайших частиц, *фотонов*, которые так же подчиняются закону всемирного тяготения Ньютона, как и частицы вещества, то отклонение звезды в описанном эксперименте должно быть ровно вдвое меньше предсказываемого теорией Эйнштейна.

Итак, возможен эксперимент, который в принципе позволяет выяснить, чья интерпретация — Ньютона или Эйнштейна — правильна или что они обе неверны. Его практическое осуществление связано с некоторыми трудностями. Прежде всего, звезда не видна, когда Солнце ярко светит на небе. Единственный шанс поставить эксперимент — дождаться полного солнечного затмения, а это событие нечастое. Кроме того, ожидаемое отклонение чрезвычайно мало, т.е. нужны очень точные измерения. Положение осложняется еще и тем, что горячий газ у самой поверхности Солнца может действовать на лучи света как линза.

Что касается первой трудности, то астрономам не пришлось долго ждать подходящего случая. В 1919 г., через четыре года после создания общей теории относительности и всего через три года после того, как Шварцшильд получил решения уравнений Эйнштейна, удалось наблюдать полное солнечное затмение. Понимая всю важность такого эксперимента, английский астроном Эддингтон взял на себя инициативу по его проведению. Эддингтон и Коттингхэм отправились на Принсипи, остров в Гвинейском заливе, а их коллеги Дэвидсон и Кроммелин — в Собрал, Бразилия, где можно было наблюдать полное затмение. Эти экспедиции стали возможны благодаря субсидии в 1000 фунтов стерлингов, которую удалось получить королевскому астроному сэру Фрэнку Дайсону.

Результаты наблюдений свидетельствовали в пользу теории Эйнштейна, а не Ньютона. Когда Фрэнк Дайсон объявил

эти результаты в переполненном зале Королевского общества в Лондоне, они вызвали настоящую сенсацию. Позднее А.Н. Уайтхед так описывал эту сцену: «Вся атмосфера напряженного интереса близко напоминала греческую драму: мы были хором, толкующим повеление судьбы, явленное в развязке кульминационного эпизода. ...портрет Ньютона на стене напоминал, что ныне, спустя почти два столетия, величайшее из научных обобщений впервые было поставлено под сомнение...».

Теперь в ретроспективе мы понимаем, что, хотя наблюдения затмения 1919 г. и в самом деле сильно укрепили позиции общей теории относительности как жизнеспособной теории гравитации, они вовсе не были решающими. Когда астроном (да и любой ученый) проводит измерения, их результат всегда содержит множество не поддающихся учету или неконтролируемых отклонений, которые обычно называют погрешностями. Лишь в том случае, когда погрешности достаточно малы, можно уверенно говорить, что выполненное измерение подтвердило или опровергло теоретические предсказания. Погрешности в наблюдениях солнечного затмения на Принсипи и в Собрале были так велики, что ньютоновские предсказания в сущности не исключались!

Современная техника позволяет поставить этот опыт гораздо точнее с помощью микроволнового, а не видимого излучения. Вместо звезды в микроволновом диапазоне спектра наблюдался квазар 3С 279 (3С — сокращенное обозначение Третьего кембриджского каталога радиоисточников) в момент покрытия Солнцем. В этом диапазоне собственное излучение Солнца настолько мало, что затмения ждать не нужно. Кроме того, солнечная атмосфера не так сильно преломляет микроволновое излучение, как видимый свет. Измерения, сделанные в 1975–1976 гг. астрономами Националь-



ной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк, Западная Виргиния, США, были столь точны, что теперь можно

с уверенностью утверждать, что прав Эйнштейн, а не Ньютон.

## ИСКРИВЛЕНО ЛИ ВРЕМЯ?

К столетнему юбилею Эйнштейна в 1979 г. астрономы сделали еще одно замечательное открытие, проиллюстрированное на фотографии на с. 61. Являются ли квазары 0957 + 561 А, В на этой фотографии различными объектами или изображениями одного и того же квазара? Совпадение линий в спектрах обоих квазаров заставило многих астрономов склониться к последней возможности. В таком случае перед нами прекрасный пример изгиба световых лучей под влиянием гравитации. Это изгибание мо-

гло быть вызвано галактикой, находящейся между квазаром и Землей и выступающей в роли гравитационной линзы.

Все эти примеры показывают, как можно измерять эффекты искривления пространства-времени. Правда, рассмотренные нами случаи относятся скорее к пространственным измерениям. Нельзя ли узнать, как сказывается отклонение геометрии от евклидовой на измерениях времени? Такие способы есть, но мы обсудим их ниже, в гл. 7.

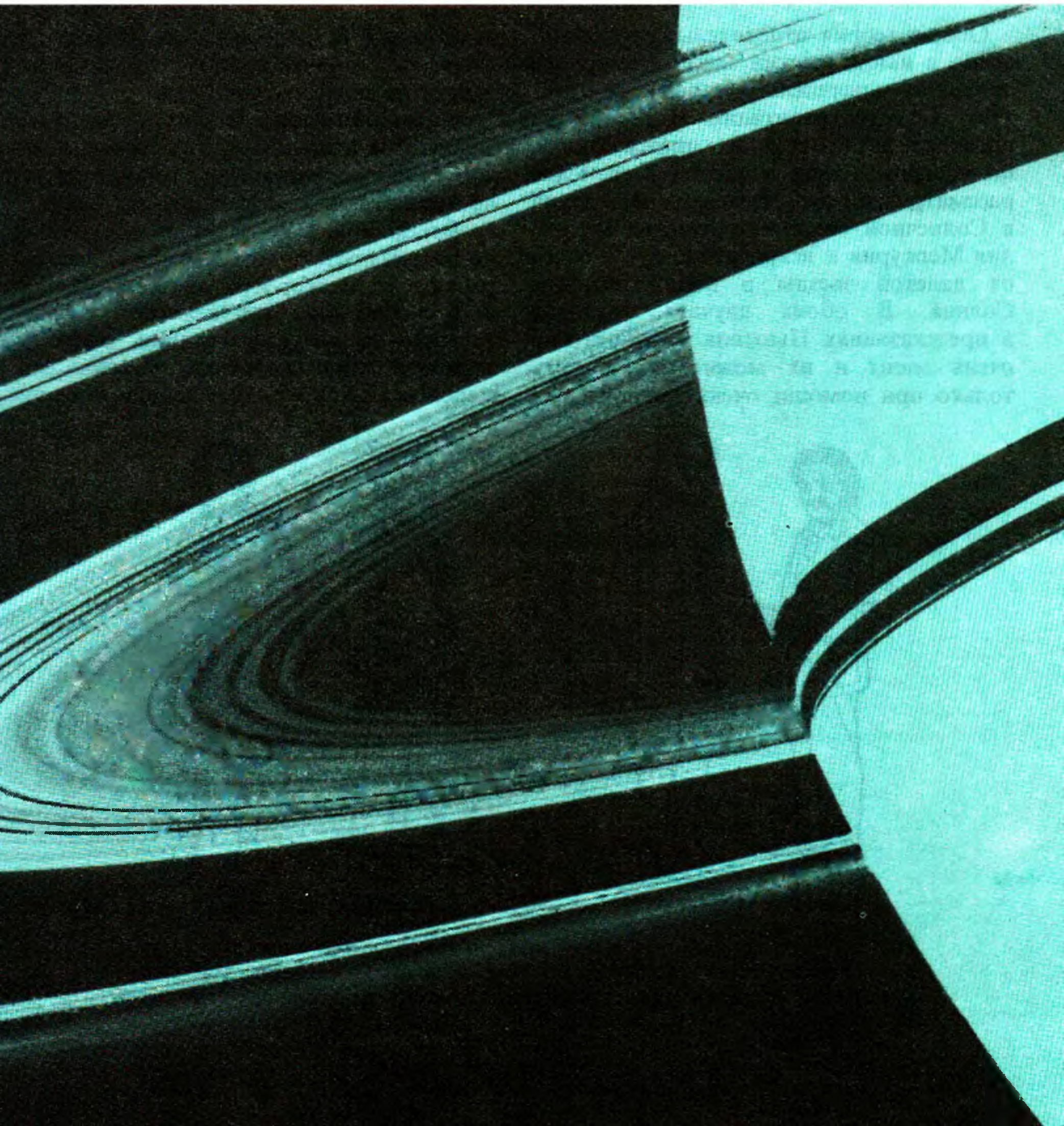




## Океанские приливы и двойные звёзды

---

Кольца и лимб Сатурна, сфотографированные «Вояджером-1» 12 ноября 1980 г. с расстояния 700 000 км. Кольца – превосходная иллюстрация приливного воздействия Сатурна; если бы частицы, из которых состоит система колец, располагались за пределом Роша планеты, из них, вероятно, образовался бы спутник Сатурна, а не кольца. (Фото НАСА.)





## КОГДА НЬЮТОН И ЭЙНШТЕЙН СОГЛАСИЛИСЬ БЫ ДРУГ С ДРУГОМ

Общая теория относительности Эйнштейна и ньютоновский закон всемирного тяготения совершенно по-разному трактуют явление гравитации. И все же на практике различия в их предсказаниях, по-видимому, очень невелики. В гл. 5 мы рассматривали два примера наблюдений в Солнечной системе: смещение перигелия Меркурия и искривление лучей света от далекой звезды в поле тяготения Солнца. В обоих случаях различия в предсказаниях Ньютона и Эйнштейна очень малы и их можно обнаружить только при помощи очень кропотливых

и сложных астрономических измерений. Случайно ли почти полное совпадение результатов обеих теорий?

Математический анализ уравнений Эйнштейна показывает, что согласие между двумя подходами не случайно. Можно доказать, что во всех случаях слабого гравитационного воздействия обе теории почти полностью согласуются. Рассматривая в гл. 3 скорость убегания, мы нашли способ того, как измерить относительную величину гравитации. Воспользуемся и здесь скоростью убегания как мерой различия между «слабой» и «силь-



Слабая гравитация



Сильная гравитация

Рис. 6.1. Если скорость убегания  $V$  мала по сравнению со скоростью света  $c$ , т.е. в случае слабой гравитации, Ньютон и Эйнштейн согласны друг с другом. Когда  $V$  сравнимо с  $c$ , расхождения между их теориями становятся значительными.

ной» гравитацией. Правило простое: сравниваем скорость убегания  $V$  со скоростью света  $c$ . Если отношение  $V/c$  много меньше 1, то гравитационное воздействие слабое. Если это отношение близко к 1, скажем заключено в пределах от 0,1 до 1, то гравитационное воздействие сильное. Обращаясь к табл. 3.2 из гл. 3, мы видим, что гравитационное воздействие всех указанных там объектов, за исключением поверхностей нейтронных звезд, слабое.

Вот почему, несмотря на явные преимущества теории Эйнштейна, закон Ньютона по-прежнему широко используется. Поскольку математический аппа-

рат общей теории относительности гораздо сложнее, чем теории Ньютона, в случаях слабой гравитации астрономы предпочитают последнюю. В этой главе мы опишем несколько явлений слабой гравитации. При этом, если не считать конца главы, мы будем оставаться в рамках теории Ньютона. Однако в следующих главах мы будем в основном заниматься сильной гравитацией и будем следовать теории Эйнштейна. В случае сильной гравитации различие между подходами Ньютона и Эйнштейна становится значительным и мы будем пользоваться той из двух теорий, которую сочтем более надежной.

## ПРИЛИВНАЯ СИЛА

Рассмотрим сначала ситуацию, изображенную на рис. 6.2. Гравитирующий массивный шар  $M$  притягивает три равные

точечные массы  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Как показано на рис. 6.2, *a*, массы  $A$ ,  $B$  и  $C$  расположены на одной прямой, причем  $C$  нахо-

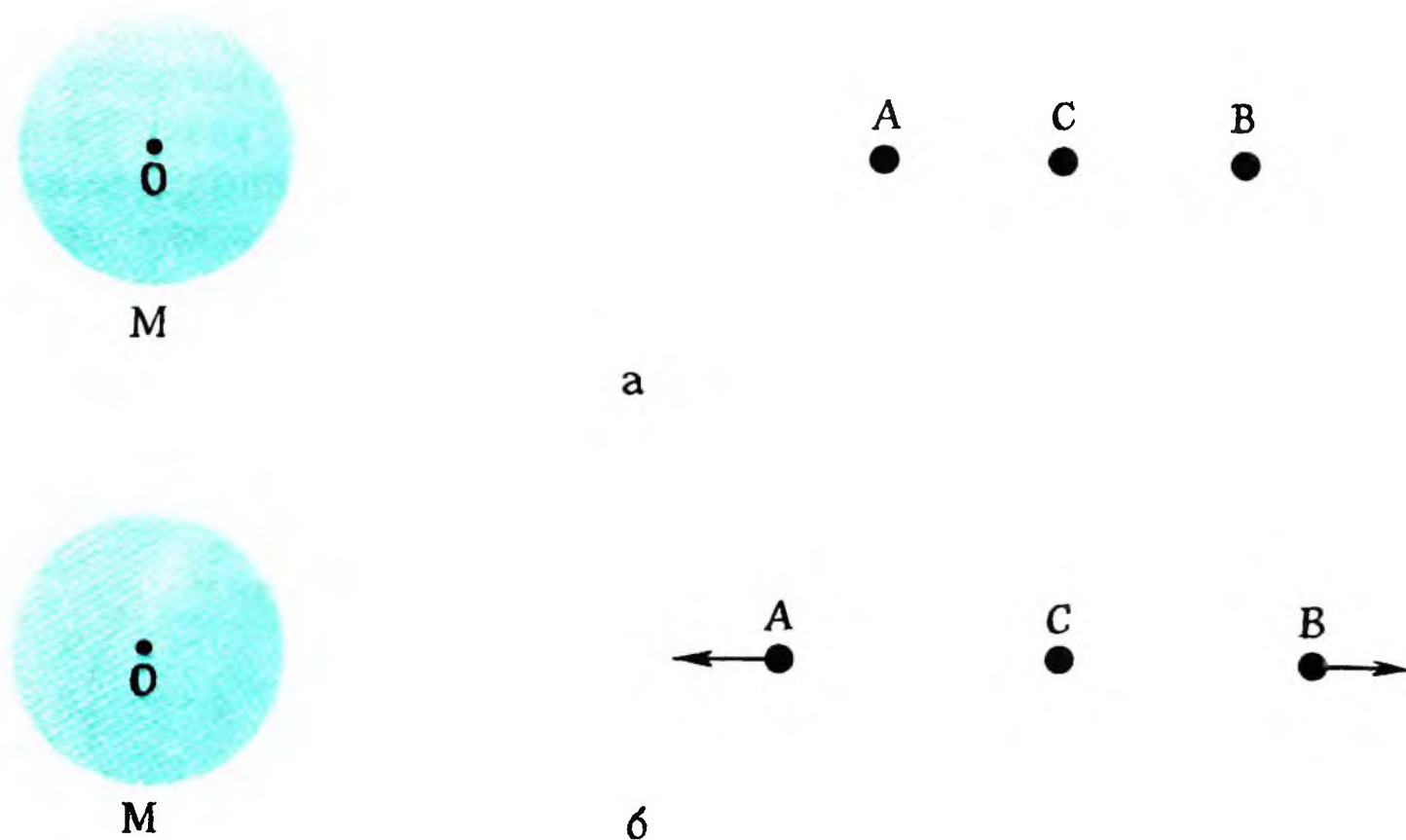


Рис. 6.2. Если приложить к точке  $C$  силу такой величины, чтобы  $C$  оставалась на своем месте, то этой силы будет недостаточно для удержания  $A$  и она будет слишком велика для удержания  $B$  на своих местах. Обе точки,  $A$  и  $B$ , удаляются от  $C$ .



дится посередине между ними. Для иллюстрации разберем простой случай, когда прямая  $АСВ$  проходит через центр  $O$  шара  $M$ .

По закону Ньютона,  $M$  притягивает все три массы  $A$ ,  $B$  и  $C$  так, как если бы вся его масса была сосредоточена в  $O$ . Кроме того, в соответствии с законом обратной пропорциональности квадрату расстояния масса  $A$  (которая ближе всех к  $O$ ) притягивается сильнее всего, а масса  $B$  (которая дальше всех от  $O$ ) — слабее всего. Ясно, что под действием этой силы  $A$ ,  $B$  и  $C$  стремятся упасть на  $O$ .

Постараемся воспрепятствовать этому падению, прикладывая уравнивающую силу. Приложим к точке  $C$  такую равную силе тяготения и противоположно направленную силу, чтобы эта точка оставалась в покое. Если точно такую же

силу приложить к массе  $A$ , то этого будет недостаточно, чтобы уравновесить силу тяготения, вызываемую  $M$ . В результате  $A$  будет по-прежнему приближаться к  $O$ . Если приложить такую же силу к массе  $B$ , то она окажется больше силы тяготения, действующей на  $B$ , и в результате  $B$  начнет удаляться от  $O$ . Другими словами, обе массы,  $A$  и  $B$ , удаляются от  $C$ . Как показано на рис. 6.2, б, расстояние  $AB$  растет.

Если бы частицы  $A$ ,  $B$  и  $C$  принадлежали к одному и тому же телу, этот эффект приводил бы к его растяжению вдоль отрезка  $AB$ . Такая растягивающая сила называется *приливной силой*, с которой тело  $M$  действует на другое тело. Шар  $M$  создает не только притяжение, но и приливную силу, которая стремится исказить форму тела.

## ОКЕАНСКИЕ ПРИЛИВЫ

Термин *приливная сила* возник в связи с приливами на Земле. Пусть в только что рассмотренном примере  $M$  — это Луна, а система из трех масс  $A$ ,  $B$  и  $C$  — Земля (рис. 6.3).

На рис. 6.3 штриховой линией показано, что Земля стремится растянуться вдоль прямой по направлению к центру и от центра Луны. Твердая земная кора не позволяет Земле сильно деформироваться под действием приливной силы.

Однако эта сила проявляет себя в океанских приливах.

Эффект, естественно, усиливается, если Солнце также оказывается примерно на прямой Земля — Луна. Такая ситуация имеет место в полнолуние и в новолуние. В это время океанские приливы достигают наибольшей высоты.

Что является источником энергии движения воды в океанском приливе? Ясно, что источник этой энергии связан с при-

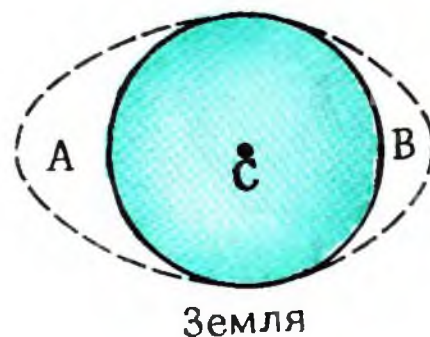


Рис. 6.3. Штриховые линии показывают образование приливных горбов на Земле на концах отрезка  $AB$  прямой, соединяющей центры Земли и Луны. Ср. с ситуацией на рис. 6.2. В обоих случаях приливной эффект в  $A$  больше, чем в  $B$ .

ливной силой, которую гравитация Луны порождает на Земле. В наше время, когда вполне реальна угроза истощения энергетических ресурсов, слишком большая ро-

скошь пренебрегать естественными источниками энергии, один из которых — океанские приливы.

## ЭКСПЕРИМЕНТ ТВИДЛДАМА И ТВИДЛДИ

Приливная сила представляет собой механизм, посредством которого энергия одного астрономического объекта может передаваться другому. Два астрофизика Германн Бонди и Уильям Мак-Кри придумали интересный мысленный эксперимент, иллюстрирующий этот процесс. В их эксперименте участвуют два знаменитых персонажа из «Алисы в Зазеркалье», Твидлдам и Твидлди. Они состоят из пластичного материала и могут менять свою форму. Сначала оба они имели совершенно одинаковую сферическую форму. Их заставили обращаться по сильно вытянутым эллиптическим орбитам один вокруг другого под действием взаимного гравитационного притяжения, причем им приказано всегда оставаться на этих орбитах. Предположим также, что Твидлдам и Твидлди всегда симметричны относительно осей, перпендикулярных плоскости, в которой лежат их орбиты.

Орбиты Твидлдама и Твидлди изображены на рис. 6.4. Орбиты одинаковы, а наши герои кружатся по ним так, что точка, лежащая посередине между ними, остается неподвижной. Это характерно для движения любых двух объектов, связанных взаимным притяжением. Даже в случае Земли и Солнца, хотя обычно

говорят только о движении Земли, Солнце в принципе тоже движется под действием земного тяготения. Однако в системе Земля–Солнце масса Солнца настолько превосходит земную, что его движением можно пренебречь. Центр масс системы Земля–Солнце (барицентр) просто-напросто лежит внутри Солнца.

Но вернемся к Твидлдаму и Твидлди. Будь они твердыми, им ничего не стоило бы подчиниться приказу и все время оставаться на исходных орбитах. Но, поскольку они пластичные, их тела искажаются под действием приливных сил. Присмотримся к этому эффекту повнимательнее.

На рис. 6.5, а показаны два шара А и В. Если на шар В действует приливная сила со стороны А, то на нем образуется вздутие на стороне, обращенной к А. Если, кроме того, на В наложено условие симметрии относительно перпендикулярной к этому направлению оси (как в случае Твидлдама и Твидлди), то он будет равномерно раздуваться вдоль всего экватора, как показано на рис. 6.5, б. То же самое происходит и с шаром А под действием приливной силы В.

Шар, раздувшийся по экватору, как на рис. 6.5, б, превращается в сплюснутый сфероид. Если бы В растянулся на полю-

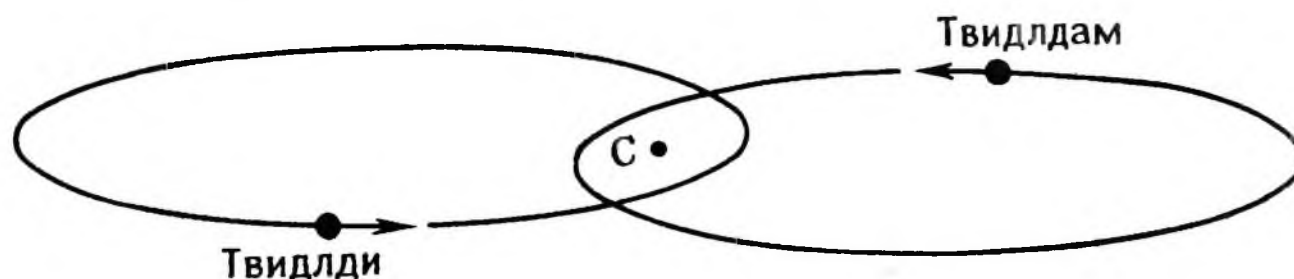


Рис. 6.4. Сильно вытянутые эллиптические орбиты Твидлдама и Твидлди. Они движутся так, что центр их масс, т.е. точка С посередине между ними, остается фиксированным в пространстве.



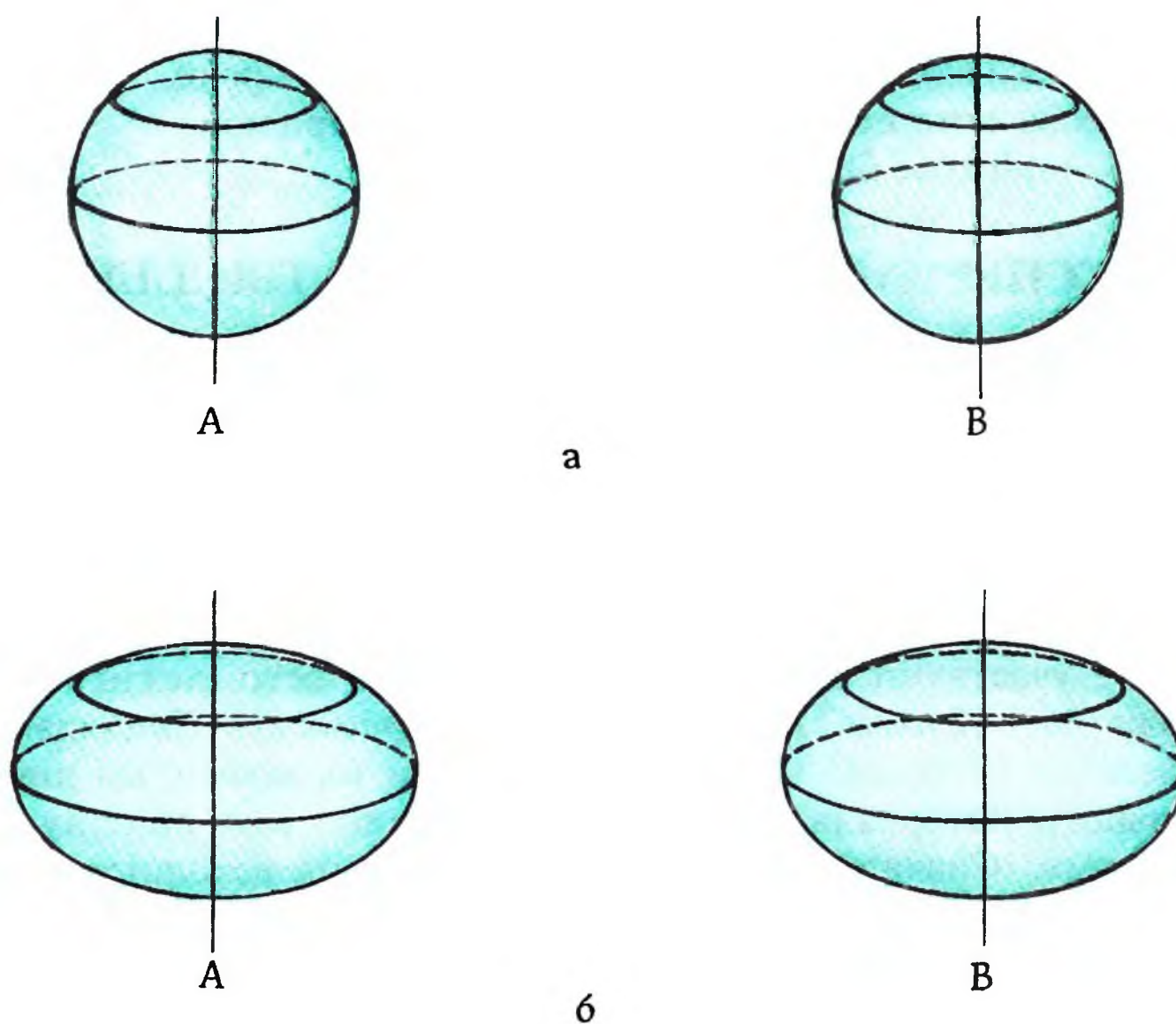


Рис. 6.5. *а*—два сферических объекта *A* и *B*. Под действием взаимных гравитационных приливных сил оба они деформируются. *б*—если на них наложено условие симметрии относительно оси, то они становятся сплюснутыми сфероидами.

сах, он стал бы *вытянутым сфероидом*, который показан на рис. 6.6. Сплюснутый сфероид похож на калорийную булочку, а вытянутый—на яйцо.

Когда два шара превращаются в сфероиды (рис. 6.5, *б*), их взаимное гравитационное притяжение увеличивается. Дело в том, что тело *A* в форме сплюснутого сфероида притягивает *B* сильнее, чем в форме шара. Вот почему задача Твидлда и Твидлди не так проста: обращаясь один вокруг другого, они сплющиваются; сила их взаимодействия растет, а это в свою очередь ведет к изменению орбит. Преодолеть эту трудность можно лишь одним способом. Если один из них становится сплюснутым, другой должен стать вытянутым—вытянутый сфероид притягивает своего соседа слабее, чем шар.

Твидлдам умен и неразборчив в средствах, а Твидлди глуп и простоват. И вот Твидлдам сообразил, как можно на всем этом подзаработать. Он заставляет Твидлди подписать нечестный договор, по которому тот должен становиться сплюснутым, как только Твидлдам становится вытянутым, и наоборот. Какую именно форму ему принимать, будет вычислять и сообщать Твидлдам. В основу расчетов кладется условие неизменности орбит. Сам Твидлди такие расчеты проводить не умеет и недолго думая ставит свою подпись, где указано. Это ошибка, за которую, как мы сейчас увидим, ему придется заплатить дорогой ценой.

Двигаясь по сильно вытянутым орбитам, Твидлдам и Твидлди то сближаются, то удаляются друг от друга. На рис. 6.7, *а* они показаны в момент макси-

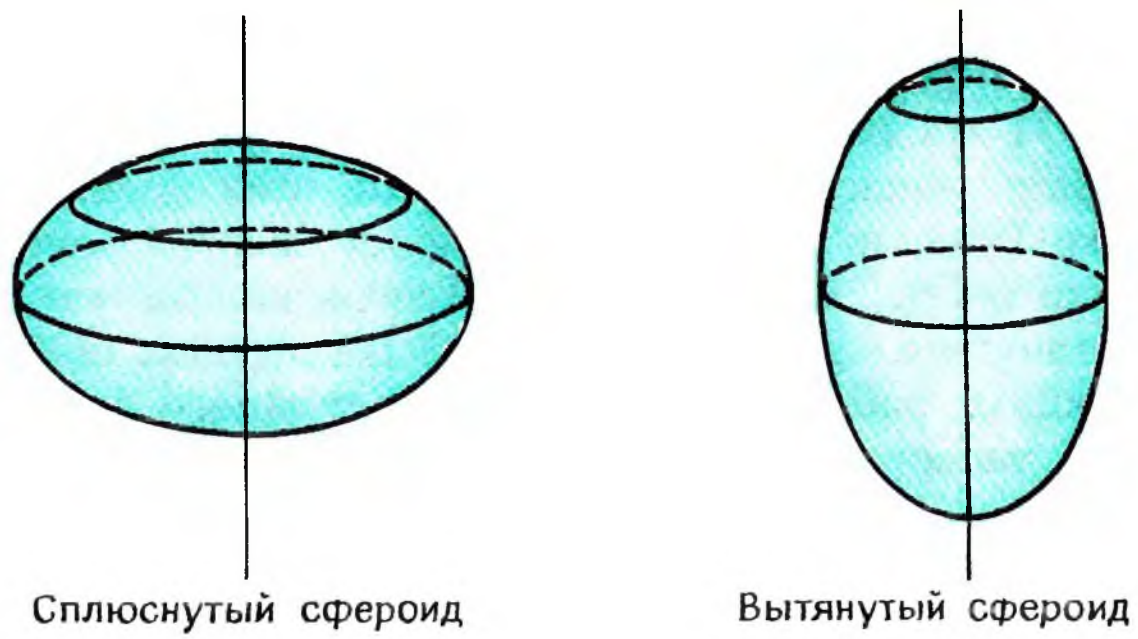


Рис. 6.6. Сплюснутый и вытянутый сфероиды.

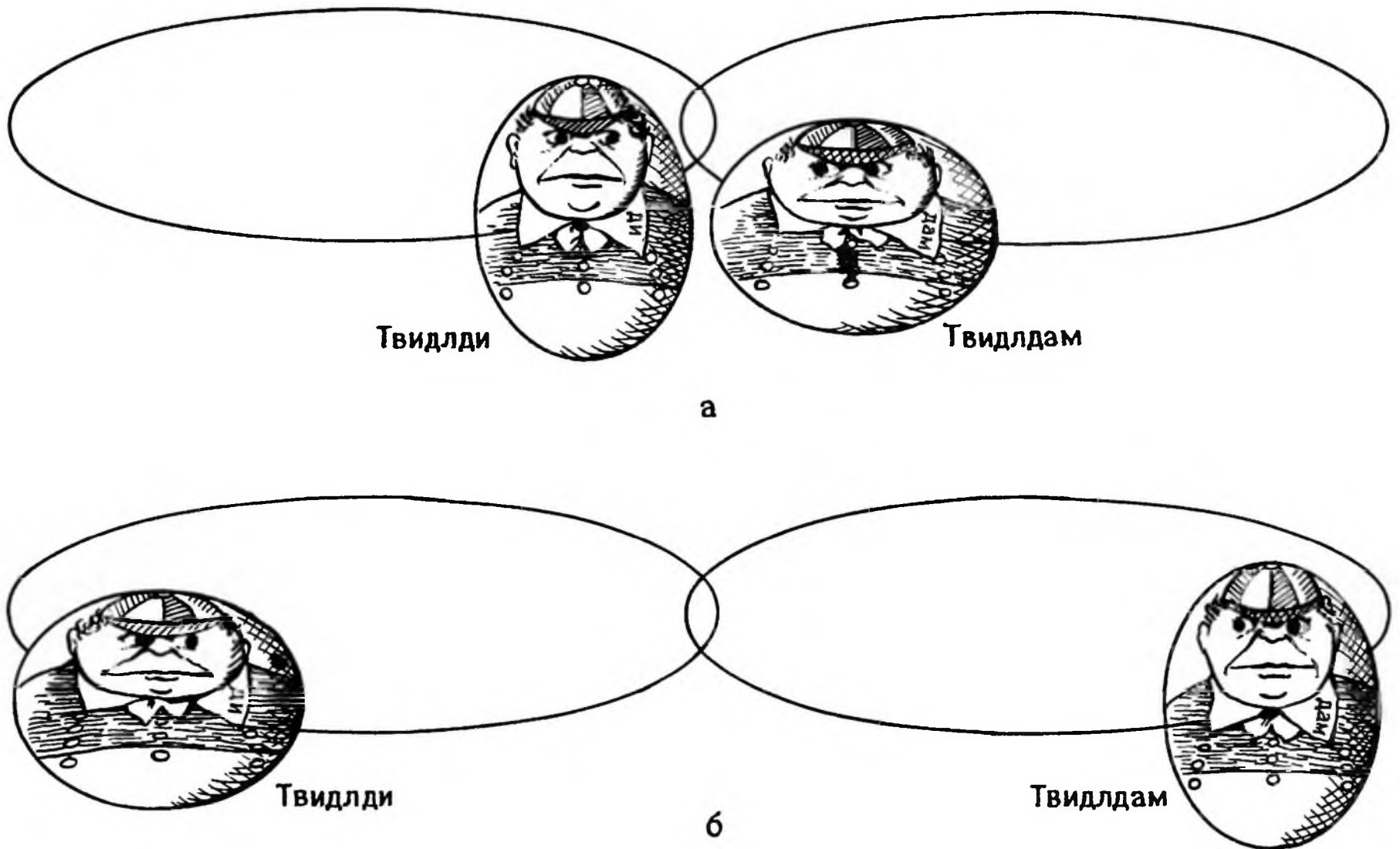


Рис. 6.7. Твидлдам отбирает энергию у Твидлди, меняя форму с учетом приливных сил.



мального сближения. В это время на них действуют большие приливные силы, и как раз тут Твидлдам сплющивается. Никакой работы он, конечно, при этом не совершает: как показано на рис. 6.5, работу по изменению его формы производит приливная сила. И эта работа внешней силы увеличивает запасы энергии Твидлдама. А что же Твидлди? Согласно подписанному им договору, он должен соответственно вытянуться. Для этого ему придется совершать работу против приливной силы, и запас его энергии уменьшается.

Затем они разлетаются. Когда расстояние между ними близко к максимальному, как на рис. 6.7, б, Твидлдам меняет свою форму на вытянутую, тем самым заставляя Твидлди сплющиться. Но те-

перь, на большом удалении, действующие на них приливные силы невелики. Поэтому, хотя Твидлдам и совершает какую-то работу на вытягивание, он расходует на это очень мало энергии. Твидлди соответственно приобретает энергию, поскольку на этот раз приливные силы помогают ему менять форму, но этот прирост энергии мал.

Теперь видите, как несправедлив договор? На каждом обороте Твидлдам приобретает много энергии, а тратит мало, между тем как Твидлди расходует много энергии, но мало приобретает. Вот так с помощью приливной силы Твидлдам ловко «обирает» беднягу Твидлди, который никак не может понять, в чем же несправедливость договора.

## ПРИЛИВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Главное свойство приливной силы, благодаря которому эксперимент «Твидлдам – Твидлди» дает такие интересные результаты, состоит в том, что ее величина очень быстро убывает с расстоянием. Оказывается, эта сила уменьшается обратно пропорционально кубу расстояния. Таким образом, если максимальное расстояние между Твидлдагом и Твидлди больше минимального в десять раз, то приливная сила в случае максимального удаления в тысячу раз меньше, чем в случае минимального. Вот почему Твидлди приходится затрачивать гораздо больше энергии, чем Твидлдаму.

Естественно ожидать, что, если расстояние между двумя астрономическими объектами мало, приливная сила очень велика. На каком расстоянии от звезды может находиться планета? Как близко может подойти спутник к планете, вокруг которой он обращается? Чтобы правильно ответить на эти вопросы, нужно непременно учесть приливную силу. Если спутник подойдет к планете слишком

близко, то приливная сила может разрушить его. То же самое можно сказать о планете и ее звезде. Предел, за которым приливные силы становятся разрушительными, называется *пределом Роша*.

Другая система, в которой приливная сила играет значительную роль, – это двойная звезда. Подобно Твидлдаму и Твидлди, компоненты двойной движутся одна вокруг другой по эллиптическим орбитам. На рис. 6.8, а изображена типичная двойная система. Звезды А и В (массы которых, как правило, различны) обращаются вокруг общего центра масс. Штриховой линией показана так называемая *полость Роша*. Если одна из звезд раздуется настолько, что заполнит свою полость Роша, то приливная сила соседки начнет свою разрушительную работу.

Мы уже упоминали в гл. 4 о том, что в ходе эволюции звезда сильно раздувается и становится красным гигантом. Когда одна из звезд в двойной системе превращается в красный гигант, ее по-

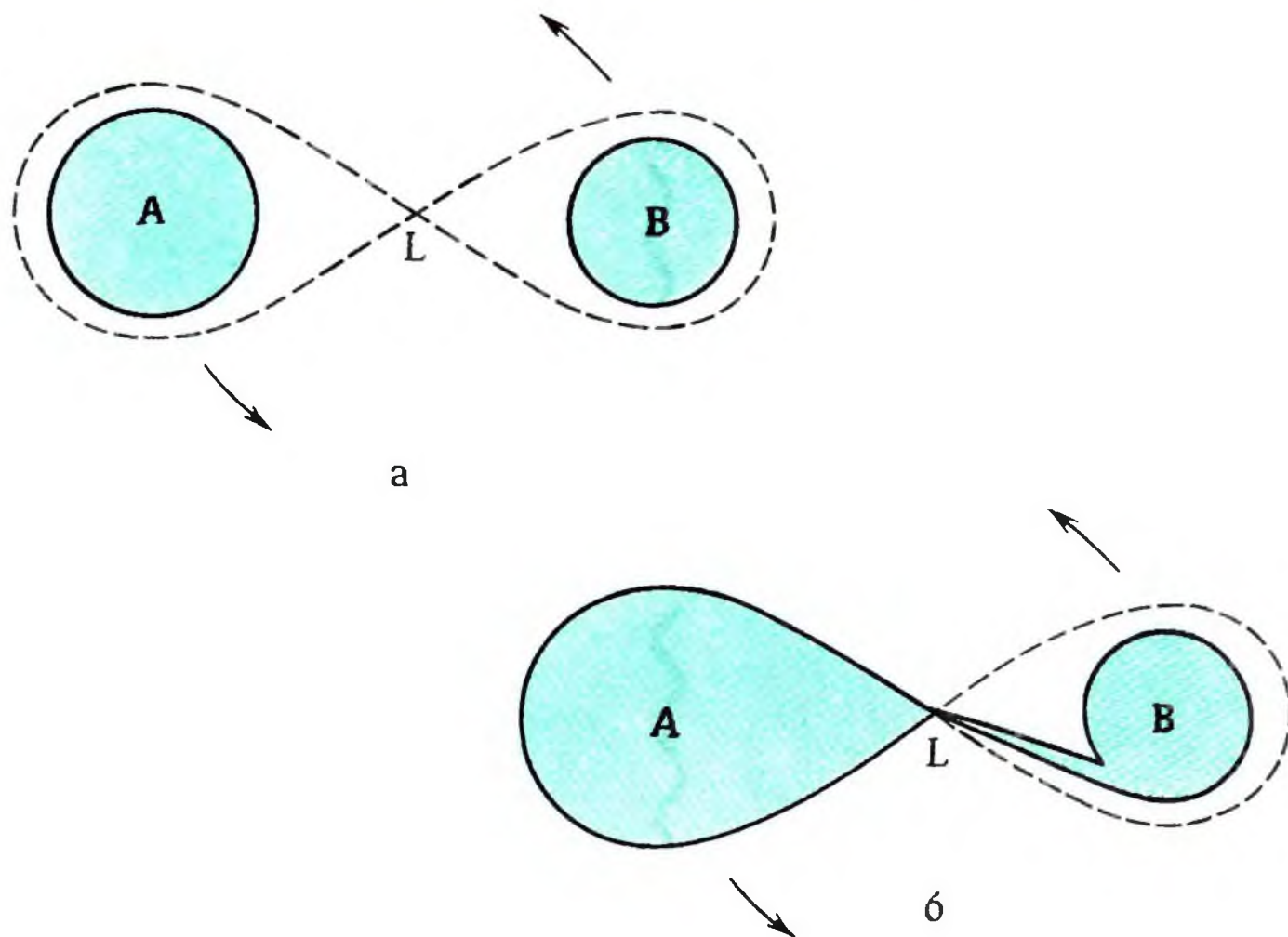


Рис. 6.8. Штриховая линия изображает полость Роша в двойной звездной системе. Точка  $L$  называется точкой Лагранжа. *а* – звезды  $A$  и  $B$  расположены глубоко внутри полости Роша. *б* – звезда  $A$  расширилась и заполнила свою полость Роша. Приливные силы  $B$  захватывают вещество звезды  $A$ , которое через  $L$  падает на  $B$ . Стрелками показано направление обращения звезд двойной системы.

верхность «выплескивается» за пределы полости Роша и возникает ситуация, изображенная на рис. 6.8, *б*. Звезда  $B$  действует теперь на  $A$  с такой большой приливной силой, что захватывает вещество

с обращенной к ней стороны  $A$ . Эта сторона деформируется, и вещество «падает» на  $B$ . В гл. 8 мы вернемся к этой интересной ситуации, последствия которой могут быть самыми драматическими.

## ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Явления, описанные выше в рамках ньютоновской теории, почти так же описываются и общей теорией относительности. Мы пользовались теорией Ньютона, поскольку она интуитивно проще. Теперь рассмотрим такой эффект слабой гравитации, который может быть описан только с помощью релятивистского подхода. Речь идет о явлении гравитационного излучения.

В гл. 5 мы критиковали ньютоновский закон тяготения за то, что, согласно этому закону, гравитационные эффекты распространяются мгновенно, т.е. с *беско-*

*нечной скоростью*. По специальной теории относительности Эйнштейна, никакое физическое воздействие не может распространяться быстрее света. Учитывается ли это требование в эйнштейновской теории гравитации, т.е. в общей теории относительности?

Да, учитывается, хотя в случае сильных гравитационных эффектов детальное описание их распространения из  $A$  в  $B$  исключительно сложно. Однако в случае слабого гравитационного поля положение много проще: здесь имеет место аналогия с более привычным электромаг-



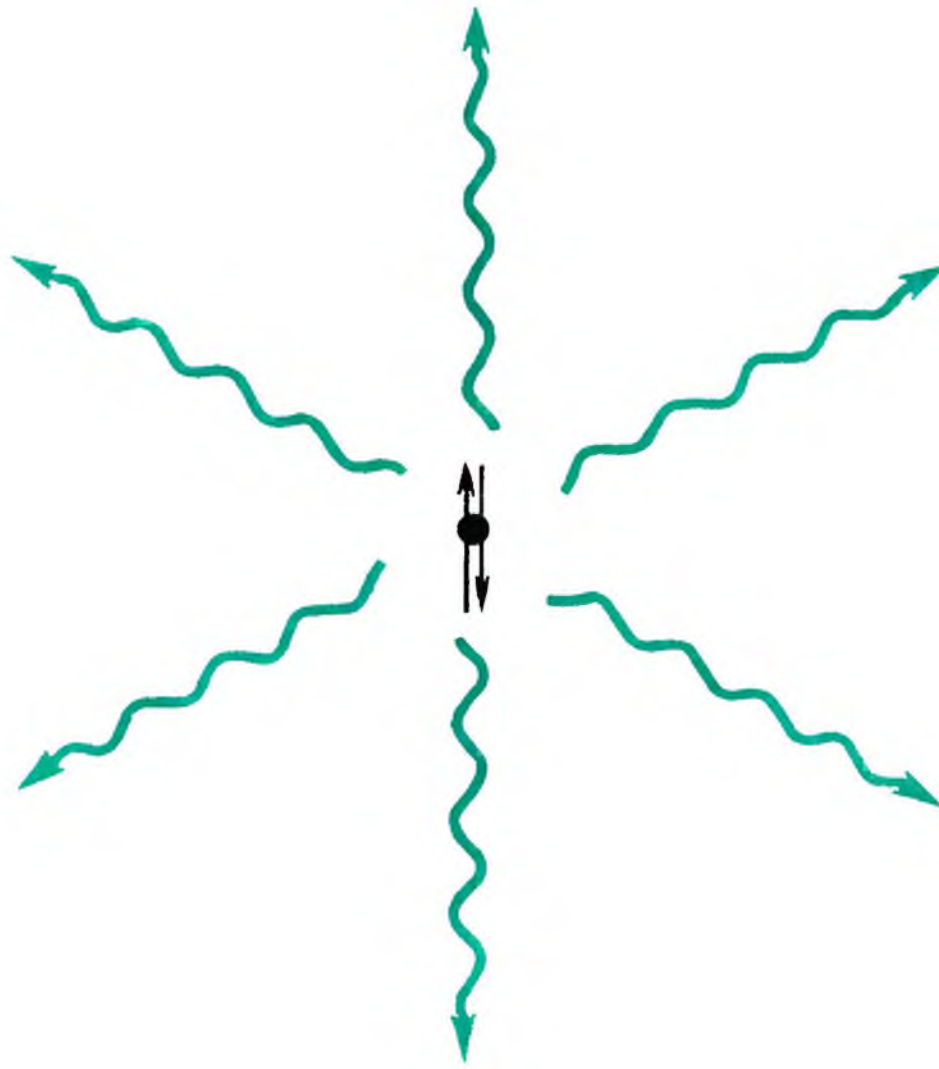


Рис. 6.9. Схематическое изображение электрического заряда. Его движение порождает электрические и магнитные возмущения в окружающем пространстве. Эти возмущения радиально распространяются в виде электромагнитных волн по всем направлениям от движущегося заряда.

нитным излучением. Подобно тому, как мы говорим об электромагнитном излучении, можно говорить и о *гравитационном излучении*.

Простейшая система, порождающая электромагнитное излучение, — это колеблющийся электрический заряд, т.е. заряд, который движется взад-вперед, как обычный маятник. Как показано на рис. 6.9, излучение, возбуждаемое таким движением заряда, представляет собой электромагнитные волны, которые распространяются от него со *скоростью света*. Можно провести грубую аналогию между электромагнитным излучением и волнами, которые возникают на поверхности воды, если в спокойный пруд бросить камешек.

Электромагнитные волны переносят энергию. Откуда она берется? Ее источник — движение заряда. Излучая электро-

магнитные волны, электрический заряд теряет свою кинетическую энергию, и потому его колебания затухают. Точно так же, как из-за сопротивления воздуха маятник качается все медленнее и в конце концов останавливается, излучение вызывает затухание, вследствие которого колебания заряда замедляются.

На рис. 6.10 изображен гравитационный аналог такого явления. Это — уже знакомая нам двойная звездная система. Обращаясь одна вокруг другой, звезды порождают возмущения в геометрии пространства-времени. Эти возмущения распространяются на большие расстояния со скоростью света. Как и в случае электрического осциллятора, они переносят энергию, а это приводит к затуханию движения в двойной системе. Вследствие затухания звезды все сильнее сближаются (их орбиты уменьшаются), а угловая ско-

## Океанские приливы и двойные звезды

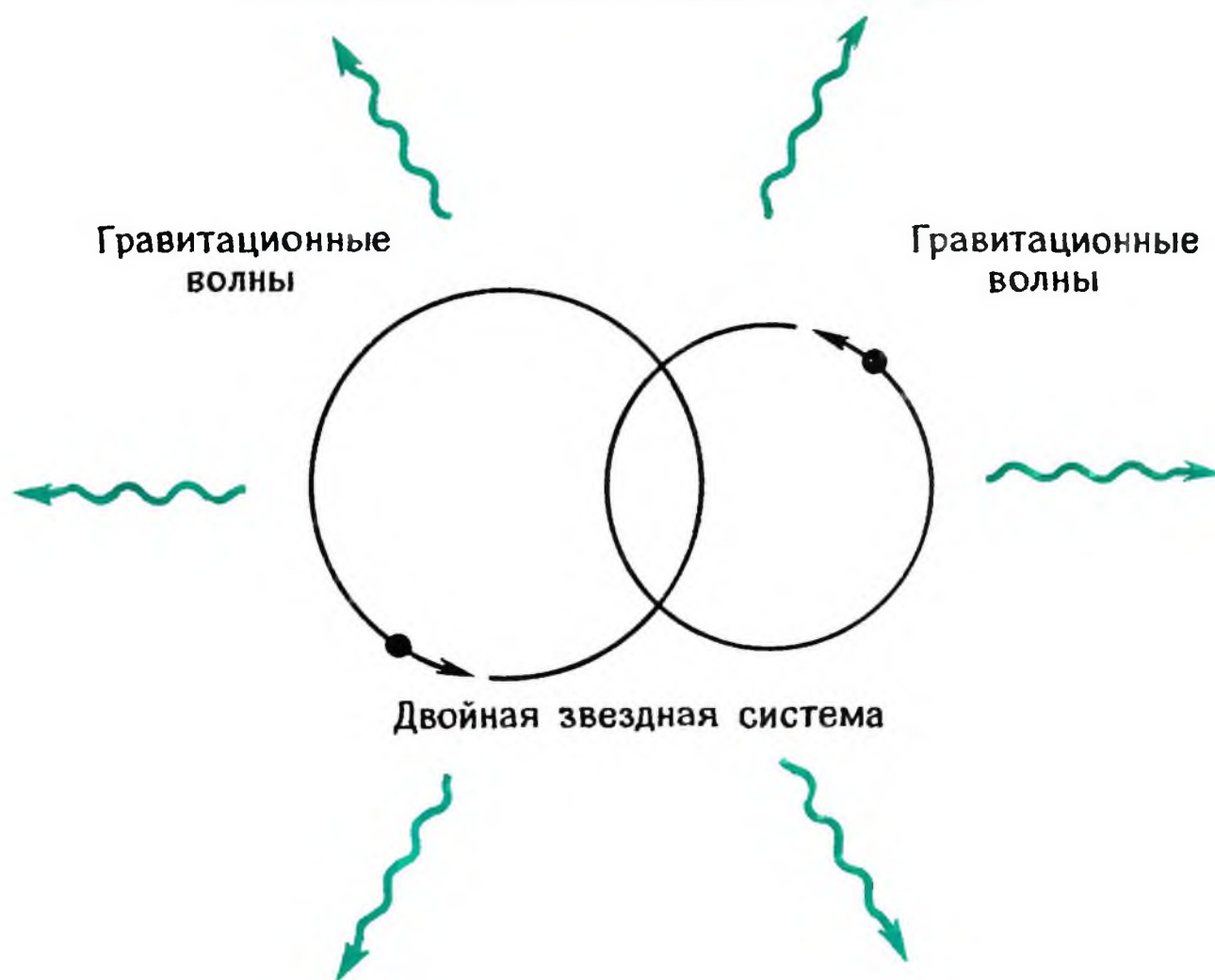


Рис. 6.10. Схематическое изображение гравитационного излучения от двойной звезды.

рость их взаимного обращения возрастает.

Наблюдались ли гравитационные волны в лаборатории? Здесь аналогия с электромагнитным излучением кончается. В отличие от электромагнитного гравитационное излучение так слабо, что создать гравитационные волны в земной лаборатории невозможно. Чтобы понять, в чем тут проблема, представим себе цилиндрический брус радиусом 1 м, длиной 20 м с плотностью, в 7,8 раза превосходящей плотность воды, и массой около 490 тонн (рис. 6.11). Попытаемся генерировать гравитационные волны, вращая эту балку вокруг центра с угловой скоростью, чуть меньшей 4,5 оборота в секунду. Для генерации гравитационного излучения мощностью 20 Вт нам понадобится миллион миллионов миллионов миллионов таких цилиндрических источников!

Тем не менее есть некоторые косвенные свидетельства в пользу гравитационного излучения астрономических объектов.

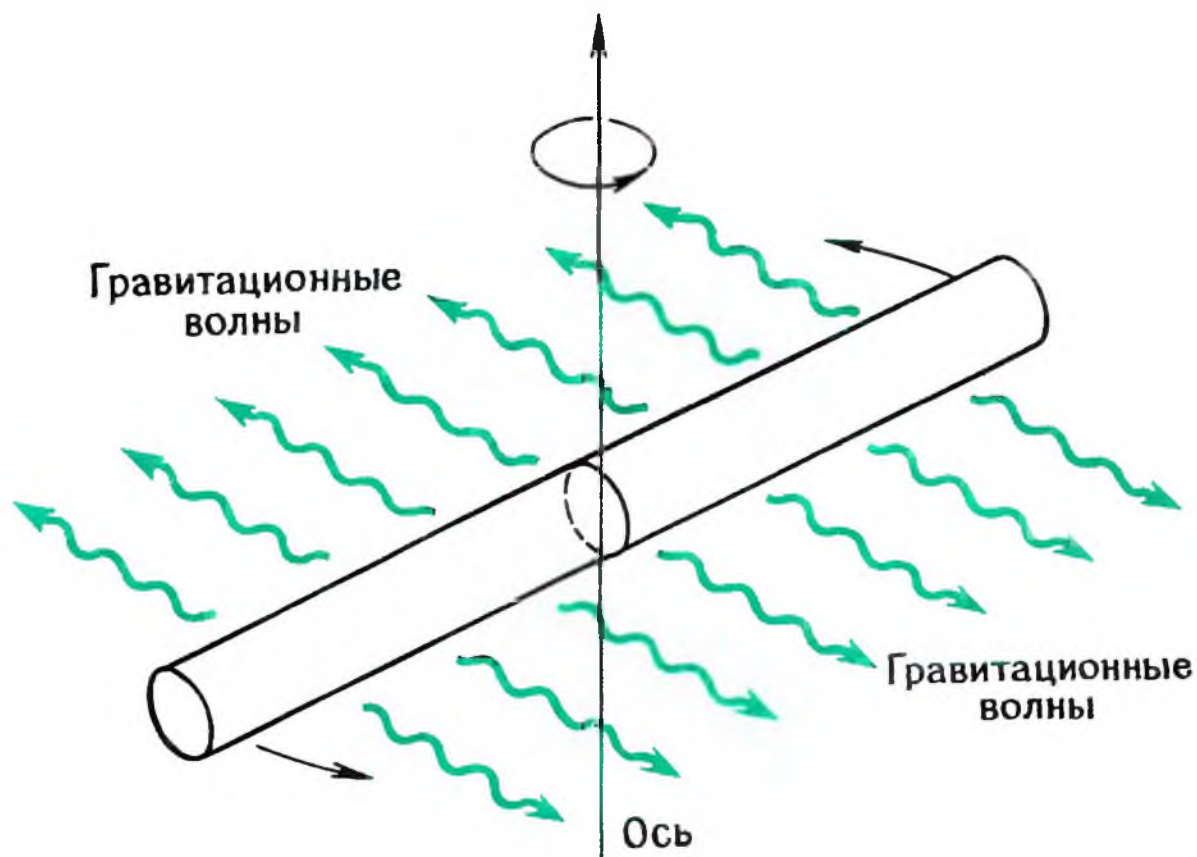
В начале 1979 г. Дж. Х. Тейлор, Л. А. Фаулер и П. М. Мак-Каллох, проводившие наблюдения на 300-метровом радиотелескопе обсерватории Аресибо, Пуэрто-Рико, сообщили, что, наблюдая двойной пульсар PSR 1913 + 16 (состоящий из пульсара и компактной звезды), они обнаружили эффекты, которые можно ожидать при гравитационном излучении\*.

В частности, орбитальный период системы уменьшается в точности так, как предсказывает теория гравитационного излучения. До тех пор, пока не будут полностью исключены другие правдоподобные объяснения, такое истолкование наблюдений не совсем обоснованно. Поэтому, пока лабораторные методы детектирования гравитационных волн не будут достаточно усовершенствованы, придется довольствоваться лишь таким косвенным свидетельством их существования. Чтобы стали возможны прямые измерения гра-

\* PSR – сокращенное обозначение пульсаров. Цифры дают положение пульсара на небе.



Рис. 6.11. Источник гравитационного излучения. Цилиндрический брус, вращающийся вокруг оси, перпендикулярной плоскости вращения, излучает гравитационные волны. Однако этот эффект чрезвычайно слаб.



витационного излучения от таких астрономических систем, существующие лабораторные детекторы должны быть значительно усовершенствованы.

Двойной пульсар PSR 1913 + 16 представляет интерес для физиков-релятивистов и по другой причине. Здесь можно наблюдать эффект, похожий на смещение перигелия планеты Меркурий (см. гл. 5). Оказалось, что направление прямой, соединяющей звезды в момент наибольшего сближения, меняется со временем. (По ньютоновскому закону тяготения, это на-

правление не зависит от времени.) Наблюдаемая скорость этого изменения много выше, чем у Меркурия, — около  $4,2^\circ$  в год. Если удастся точно оценить массы обеих звезд, можно будет сравнить наблюдаемую скорость прецессии с предсказанной теоретически.

Так или иначе, на примере пульсара PSR 1913 + 16 мы видим, что возможные при современной технике точные астрономические измерения позволяют обнаружить даже слабые релятивистские эффекты гравитации.



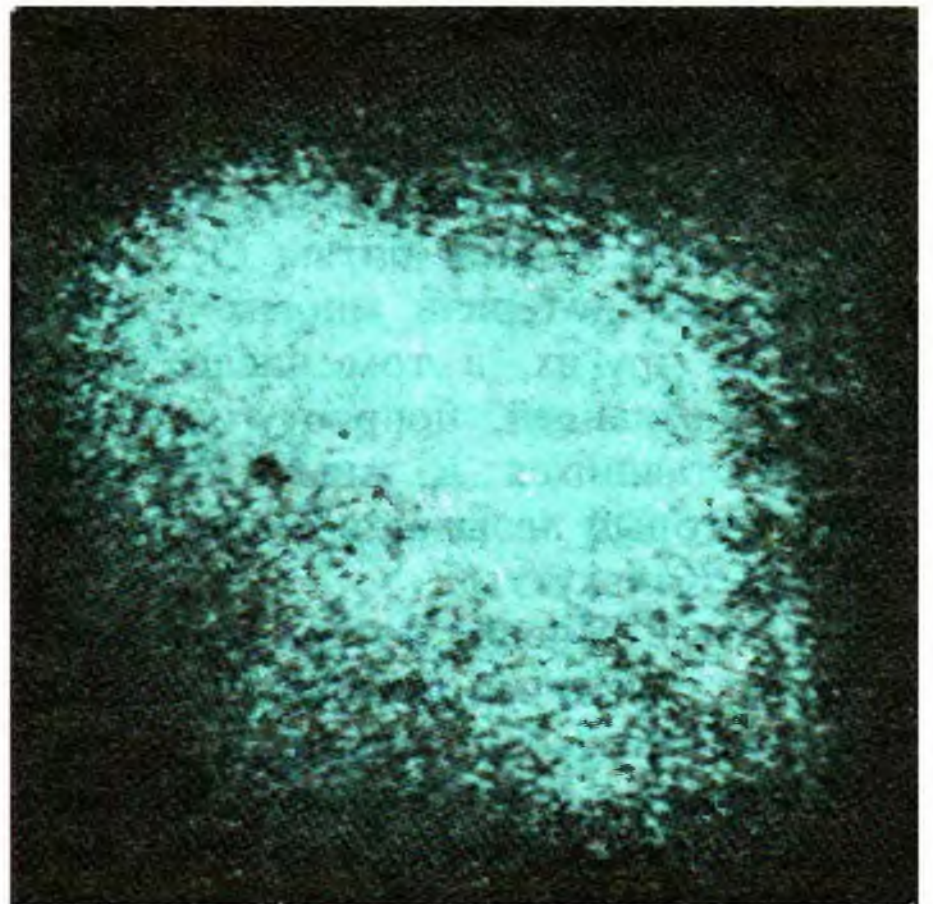
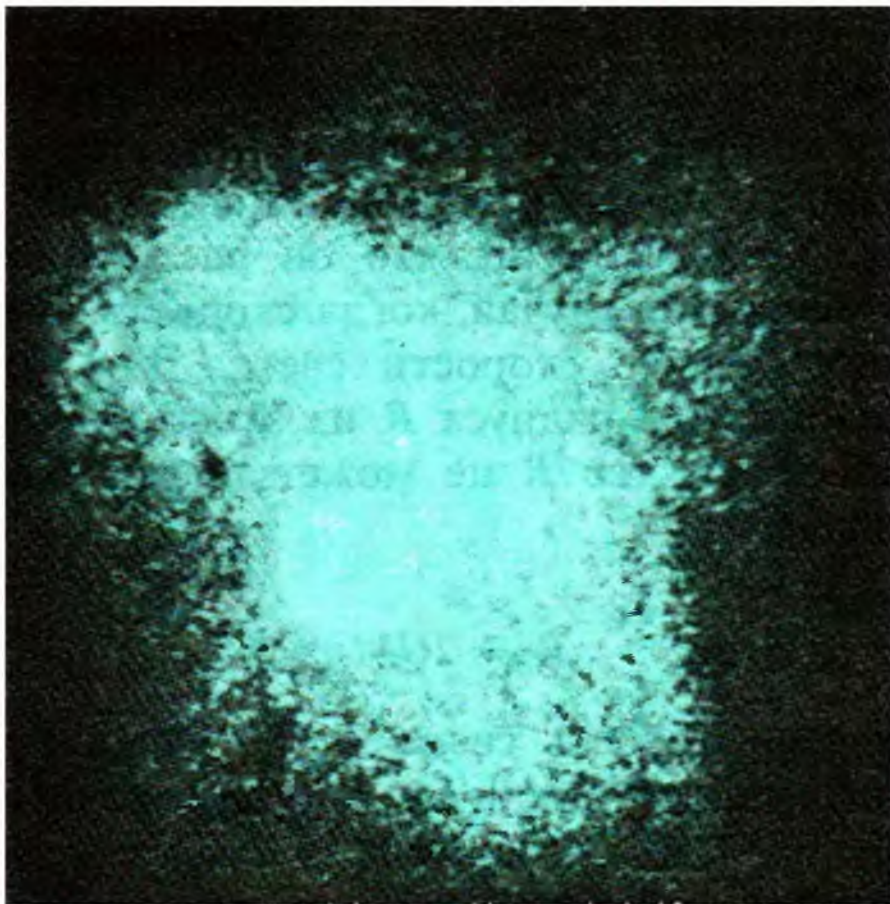
## Удивительный мир черных дыр

Крабовидная туманность – остаток сверхновой, вспыхнувшей в 1054 г. н.э.  
На этой рентгеновской фотографии изображен пульсар – нейтронная звезда,  
образовавшаяся при сжатии центрального ядра сверхновой.

На левой фотографии пульсар виден,  
поскольку излучает свет в сторону Земли; на правой – не виден.

Период колебаний излучения нейтронной звезды равен  $1/30$  с.

(С любезного разрешения Эйнштейновской обсерватории, Гарвардско-Смитсоновский центр астрофизики.)





## ЧЕРНАЯ ДЫРА В ИСТОРИИ И В АСТРОНОМИИ

Самое раннее упоминание о черной дыре содержится не в книгах по физике или астрономии, а в исторической хронике. Летом 1757 г. Наваб Сирадж-Уддаулах, правитель Бенгалии (восточная Индия), пошел на Калькутту силой улаживать спор с Британской Ост-Индской компанией. Небольшой гарнизон в калькуттском Форт-Уильяме не шел ни в какое сравнение с 50-тысячной армией Наваба. В ходе четырехдневной битвы Ост-Индская компания потеряла многих убитыми; немало других, в том числе управляющий компанией, попросту дезертировали. Оставшихся в живых ожидал кошмар, который называют теперь «черной дырой Калькутты».

Разъяренный Наваб, потери которого исчислялись тысячами жизней, приказал заключить пленников в черную дыру, тюремную камеру в Форт-Уильяме. В помещении размерами 6 на 5 м, в которое, бывало, сажали троих-четверых пьяных солдат, затолкали 146 несчастных узников. В камере было всего два маленьких оконца (рис. 7.1). За 10 часов заключения с 8 часов вечера 20 июня до 6 часов утра 21 июня — в самое жаркое время года — 123 пленника погибли. Остались в живых и рассказали обо всем этом только 22 мужчины и одна женщина.

Если отвлечься от ужаса происшедшего, можно указать на некое сходство между «черной дырой Калькутты» и ее астрономическим аналогом: в обоих случаях речь идет о сильной концентрации вещества в малом объеме, из которого

нет выхода. В гл. 3, рассматривая понятие «скорость убегания», мы бегло упомянули о черной дыре. Теперь мы определим ее как объект с таким сильным гравитационным притяжением, что даже свет не может покинуть его поверхность.

В 1799 г. к понятию черной дыры пришел французский математик Лаплас. Хотя при описании подобных объектов термином «черная дыра» Лаплас и не пользовался, ясно, что он рассматривал именно тот случай, когда скорость убегания больше скорости света. Для шара массы  $M$  и радиуса  $R$  из этого свойства вытекает, что  $R$  не может превосходить значение

$$R_S = 2GM/c^2,$$

где  $c$  — скорость света, а  $R_S$  — критическое значение для радиуса лапласовой черной дыры. (Смысл индекса  $S$  станет ясным при рассмотрении черных дыр в рамках общей теории относительности.)

Чтобы дать представление о величине  $R_S$ , приведем пару примеров. Допустим, мы сжимаем Землю до тех пор, пока она не станет удовлетворять этому определению черной дыры. Тогда  $R_S \approx 1$  см! Другими словами, чтобы Земля превратилась в черную дыру, ее радиус должен стать меньше 1 см. Для более массивного тела, такого, как Солнце, величина  $R_S$  составит примерно 3 км. Реальный радиус Солнца почти в 300 000 раз больше  $R_S$ .

Однако, по-видимому, Лаплас не первым заговорил о черных дырах в этом



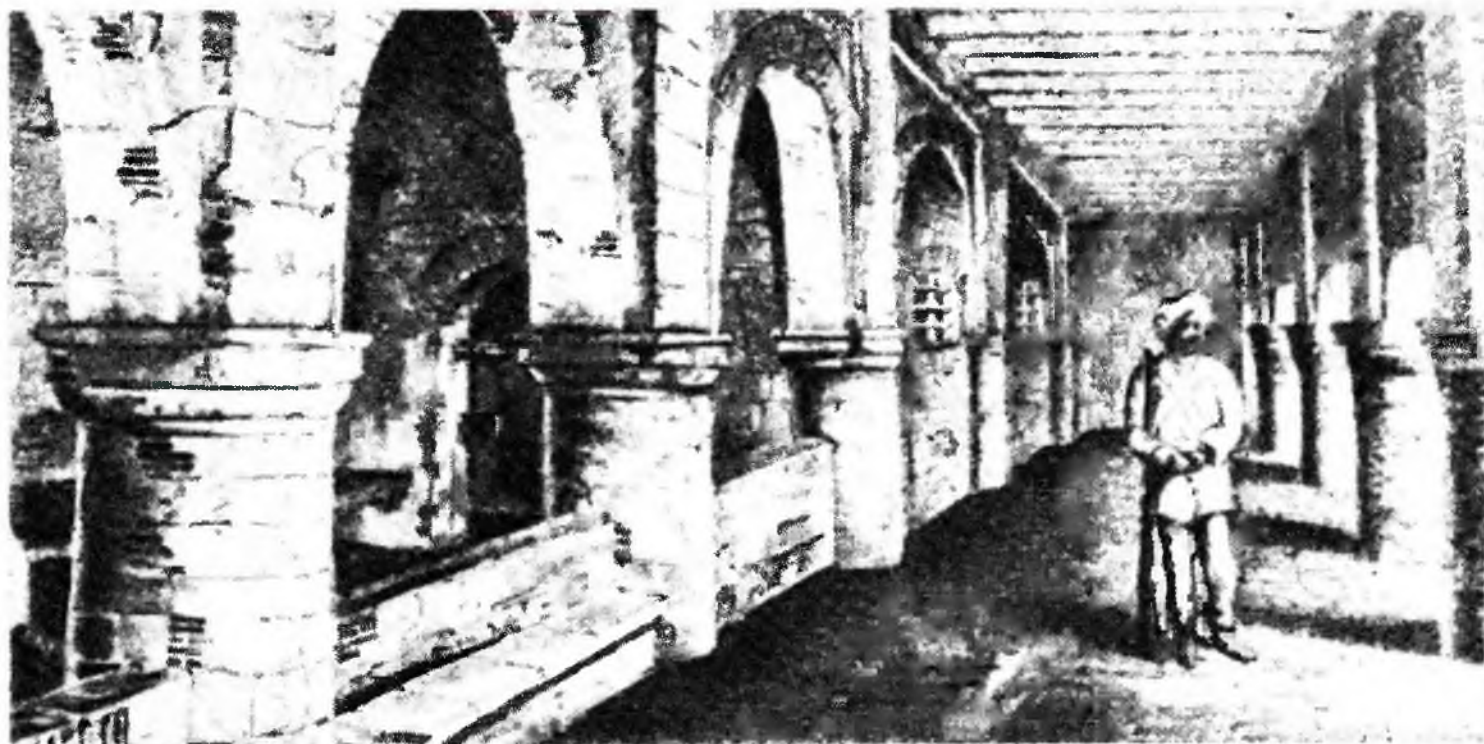


Рис. 7.1. «Черная дыра Калькутты». (N. Barber. The Black Hole of Calcutta. London: Collins.)

смысле. В 1784 г. английский физик Джон Мичелл опубликовал в *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (том 84, с. 35) работу под названием «О способах нахождения расстояния, величины и т.п. неподвижных звезд по уменьшению скорости света, буде таковое уменьшение у какой-либо из них обнаружится, а наблюдения доставят иные данные, для этой цели необходимые». В этой работе, рассматривая звезды вообще, Мичелл, в частности, рассуждал о возможности существования астрономических объектов, масса и радиус ко-

торых подчиняются определению черной дыры.

Эти рассуждения, а также труды Лапласа опирались на ньютоновскую теорию гравитации. Мы уже видели, что в случае сильной гравитации теория Ньютона неприменима, и современные физики предпочитают в этом случае пользоваться общей теорией относительности Эйнштейна. Поэтому рассмотрим явление черных дыр в рамках теории Эйнштейна. Мы увидим, что в этой теории черные дыры – куда более эффектное явление, чем в ньютоновской.

## КАК ОБРАЗУЮТСЯ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ?

Уже на примере Земли и Солнца становится ясно, что черные дыры – это весьма необычные объекты даже в ньютоновской теории. Сами астрономы, привыкшие иметь дело с веществом в экстремальных состояниях, считают черные дыры чрезвычайно экзотическими.

Как следует из табл. 3.2, чем сильнее гравитационное притяжение объекта, тем выше скорость, необходимая, чтобы его покинуть. Для звезд и планет скорость убегания составляет лишь малую долю скорости света. Даже для нейтронных

звезд скорость убегания не превышает двух третей скорости света.

Однако нейтронные звезды дают ключ к пониманию образования черных дыр. В нейтронной звезде плотность достигает значений, в миллион миллиардов раз превышающих плотность воды. Какая же сила поддерживает нейтронную звезду в равновесии? В гл. 4 мы видели, как сильна гравитация в недрах звезды. Так, например, Солнце не могло бы сопротивляться сжатию под действием собственной силы гравитации и сохранять свои



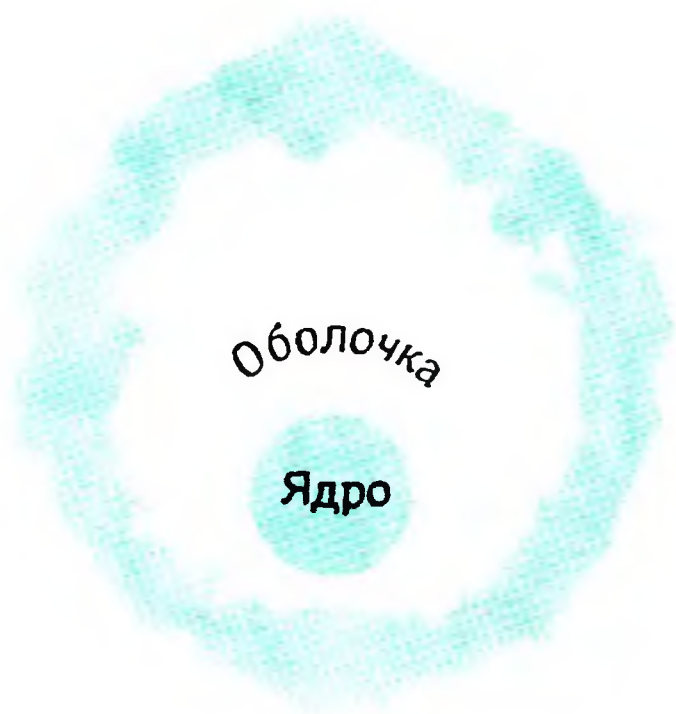


Рис. 7.2. Остаток взрыва сверхновой может превратиться в нейтронную звезду.

нынешние размеры, если бы в его недрах не было теплового давления. Происходящие в глубинах Солнца термоядерные реакции не только поставляют энергию, достаточную для поддержания его светимости, но и создают направленное наружу стабилизирующее давление, препятствующее его гравитационному коллапсу. В нейтронной звезде термоядерных реакций нет. Ведь нейтронная звезда образуется в конце жизни обычной звезды, после того как она взрывается, как сверхновая.

В гл. 4 мы довели рассказ о звездной эволюции до стадии сверхновой. Мы не обсуждали вопрос о том, что остается от звезды после взрыва сверхновой: здесь заняться этим более уместно, чем в гл. 4, где звезда рассматривалась в роли термоядерного реактора.

Пока что наши знания о том, как происходит взрыв сверхновой, еще далеки от совершенства; однако из проведенных в этой области астрофизики теоретических исследований выяснилось, что остатком взрыва является горячее центральное ядро звезды (рис. 7.2). Это ядро сжимается и превращается в нейтронную звезду, *если внутреннее давление способно уравновесить сокрушительную силу самогравитации.*

Как возникает внутреннее давление в нейтронной звезде? При плотности,

в миллион миллиардов раз превышающей плотность воды, вещество в звезде существует главным образом в виде нейтронов и в каждом кубическом сантиметре тесно упаковано до  $10^{39}$  нейтронов.

Поведение вещества в атомном и ядерном масштабах описывается законами квантовой механики. Эти законы накладывают некоторые ограничения на возможные способы упаковки одинаковых частиц в данном объеме. Если рассчитать, что дают эти ограничения (впервые открытые физиком Вольфгангом Паули) для нейтронов, упакованных в нейтронной звезде, то окажется, что в таком веществе возникает новый вид давления. Это давление препятствует более тесному сближению нейтронов. Направленная наружу сила давления противодействует самогравитации звезды и поддерживает ее равновесие.

Но не уклонились ли мы от ответа на вопрос об образовании черных дыр? Не создалось ли у вас впечатления, что вместо этого мы принялись объяснять, как образуется и как сохраняется в равновесии нейтронная звезда? Нет, мы не ушли от нашей темы! Сценарий, по которому происходит образование черной дыры, уже почти готов.

Говоря о внутреннем давлении в нейтронной звезде, мы указали, что это давление стремится поддерживать равнове-

сие. Но не всякая попытка бывает успешной! Есть ограничения на вес, который такое давление может выдержать. Расчеты показывают, что если масса нейтронной звезды выше утроенной массы Солнца ( $3M_{\odot}$ ), то равновесие сохраняться не может. Возможно, предел массы  $3M_{\odot}$  — завышенная оценка, не исключено, что он составляет около  $2M_{\odot}$ .

Что же происходит, если масса остатка от взрыва сверхновой превышает этот предел? Ясно, что остаток не сможет существовать в виде нейтронной звезды. Давление не в силах противостоять сокрушительной самогравитации. Звезда продолжает сжиматься и становится черной дырой.

## ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

Рассмотрим процесс сжатия звезды в черную дыру подробнее. На рис. 7.3 показаны две стадии сжатия звезды. На стадии I звезда только начинает сжиматься, поскольку ее внутреннее давление оказалось не в состоянии уравновесить направленную внутрь силу гравитации. Скорость сжатия еще невелика. На более поздней стадии II звезда значительно меньше. Согласно теории Ньютона, при переходе от стадии I к стадии II гравитация в звезде существенно усиливается, поскольку все частицы ее вещества сближаются. Хотя за время сжатия направленная наружу сила давления может увеличиваться, она растет медленнее, чем направленная к центру звезды сила самогравитации. Другими словами, несоответствие двух противоположных сил, возникшее на стадии I, на стадии II увеличивается. Поэтому звезда сжимается бы-

стрее, чем раньше, и *темпы сжатия непрерывно возрастают.*

Такой процесс обычно называют *гравитационным коллапсом*. Начав сжиматься потихоньку, звезда доходит до катастрофического падения к центру («взрыва внутрь»); ее самогравитация становится настолько сильной, что уже никакая сила не способна предотвратить коллапс.

Правда, для объяснения понятия гравитационного коллапса мы пользовались ньютоновской теорией тяготения. Поскольку речь идет об очень сильных гравитационных эффектах, лучше было бы описывать его в рамках общей теории относительности. При этом выяснилось бы, что качественно звезда ведет себя по-прежнему. Однако теория относительности вносит и некоторые поправки, которыми уже нельзя пренебрегать.

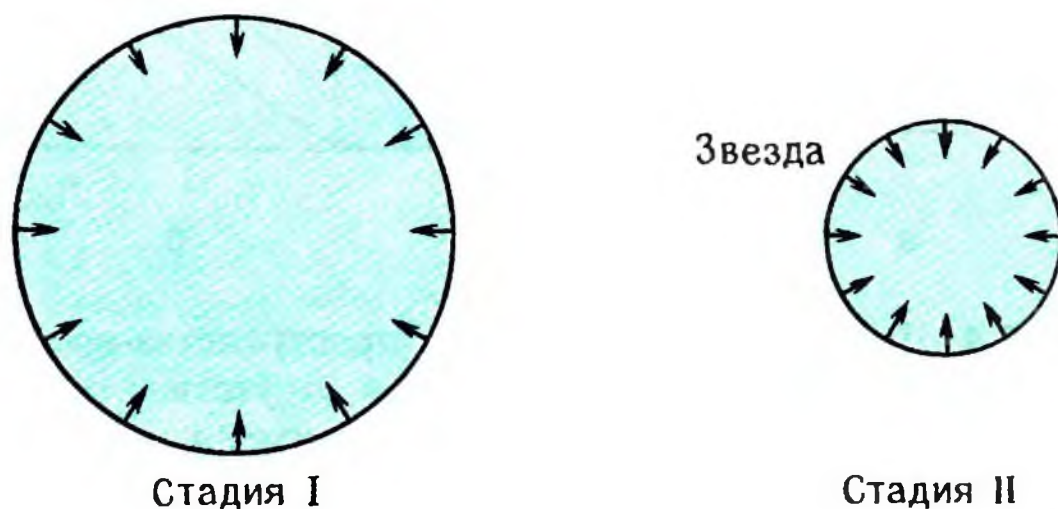


Рис. 7.3. На стадии I гравитация начинает преобладать над внутренним давлением звезды. На стадии II гравитация намного превысила внутреннее давление и полностью определяет динамику звезды. Звезда подвергается гравитационному коллапсу.



## ГРАВИТАЦИОННОЕ КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

В гл. 5, говоря о неевклидовой геометрии пространства-времени, мы ограничивались только измерениями в пространстве. Пришло время описать влияние неевклидовой геометрии на измерения времени.

На рис. 7.4,а изображена пространственно-временная диаграмма для вообразаемого случая отсутствия гравитации, т.е. для плоского мира. Прямые  $a$  и  $b$  — мировые линии двух покоящихся наблюдателей  $A$  и  $B$ . Пусть наблюдатель  $B$  раз в секунду по своим часам посылает наблюдателю  $A$  световые сигналы. Штриховые линии — это траектории световых лучей, идущих из  $B$  в  $A$ . Через какие интервалы времени наблюдатель  $A$  принимает эти сигналы? Траектории лучей и мировые линии  $a$  и  $b$  образуют последовательность параллелограммов. В лю-

бом параллелограмме противоположные стороны равны, поэтому, по часам  $A$ , сигналы от  $B$  приходят с интервалом в одну секунду.

Вывод сделан на основе геометрии Евклида и потому непригоден для случая, изображенного на рис. 7.4,б, где показано искривленное пространство-время вблизи массивного сферического объекта. Геометрию искривленного пространства-времени впервые описал Карл Шварцшильд (см. гл. 5). Голубая область указывает на присутствие массивного объекта. Отправитель сигналов  $B$  находится теперь на поверхности объекта, а наблюдатель  $A$  — далеко от него. Наблюдатели  $A$  и  $B$  неподвижны относительно массивного объекта, а отрезки на их мировых линиях — это промежутки времени, измеренные тем и другим по собственным ча-

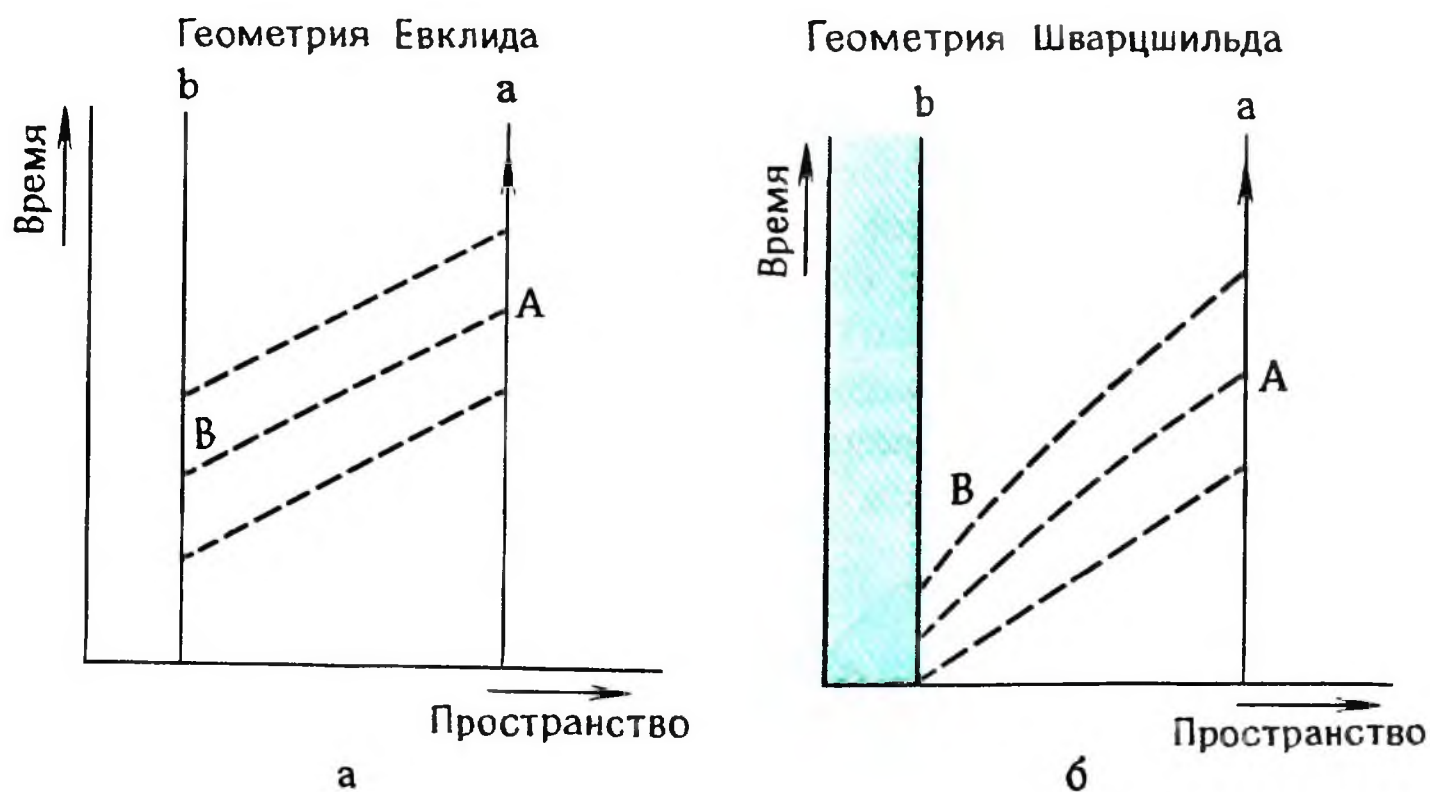


Рис. 7.4. Два примера геометрии пространства-времени: а — геометрия Евклида, применимая в отсутствие гравитации, б — геометрия Шварцшильда, применимая вблизи массивного сферического объекта, который изображен в виде голубой области. В обоих случаях интервалы времени измеряются двумя наблюдателями  $A$  и  $B$  с мировыми линиями  $a$  и  $b$  соответственно. Штриховые линии — траектории световых сигналов, которые  $B$  посылает через одинаковые интервалы времени.

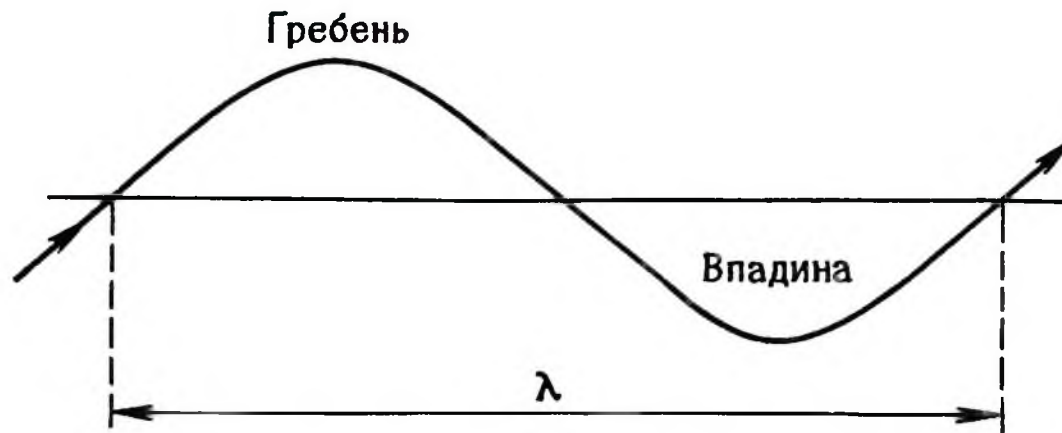


Рис. 7.5. Профиль типичной волны. С нулевого уровня волна вздымается до максимальной высоты (гребня), затем спадает через нулевой уровень до минимальной высоты (впадины) и снова поднимается. Длина волны  $\lambda$  — это расстояние между исходным и конечным нулевыми положениями. Она также равна расстоянию между соседними гребнями или впадинами. Если за одну секунду через данную точку пройдет  $\nu$  гребней волн, то в целом волна распространится на расстояние  $\nu\lambda$ . Это — скорость волны.

сам. Штриховые линии изображают траектории света из  $B$  в  $A$ .

В плоскости рис. 7.4 эти траектории не выглядят прямыми, однако законы геометрии уже не евклидовы. Согласно геометрии Шварцшильда, штриховые линии — это прямолинейные траектории света, но точки их пересечения с мировой линией  $A$  расположены дальше друг от друга, чем точки пересечения с мировой линией  $B$ . Это различие означает, что, хотя  $B$  посылает сигналы с интервалом в одну секунду по своим часам, для наблюдателя  $A$  интервалы времени между приемами сигналов больше чем одна секунда, скажем  $(1+z)$  секунды. Добавка  $z$  называется *гравитационным красным смещением*.

Пусть вместо того, чтобы каждую секунду посылать к  $A$  сигналы, наблюдатель  $B$  все время шлет световые волны определенной частоты  $\nu$ . Это означает, что каждую секунду от  $B$  к  $A$  отправляется  $\nu$  гребней волн. Эти же гребни наблюдатель  $A$  будет регистрировать через  $(1+z)$  секунды. Иными словами, частота волн, приходящих к  $A$ , уменьшится до  $\nu/(1+z)$ .

Между частотой  $\nu$  и длиной  $\lambda$  световой

волны имеется простое (проиллюстрированное на рис. 7.5) соотношение:

$$\nu \times \lambda = c$$

На рис. 7.4,  $b$  частота световой волны, пришедшей от  $B$  к  $A$ , уменьшилась в  $(1+z)$  раз. Поэтому длина волны в  $(1+z)$  раз увеличилась. Таким образом, если  $\lambda_B$  и  $\lambda_A$  — длины световой волны, измеренные соответственно наблюдателями  $B$  и  $A$ , то

$$\lambda_A = (1+z)\lambda_B.$$

Если бы световой сигнал наблюдателя  $B$  охватывал весь видимый диапазон спектра (как излучение звезд), то к  $A$  этот свет приходил бы с длинами всех волн, одинаково увеличенными в  $(1+z)$  раз. Из всех цветов, составляющих видимый спектр, самая большая длина волны у красного цвета, поэтому спектр, принимаемый наблюдателем  $A$ , будет смещен относительно спектра  $B$  к красному концу. Вот почему  $z$  называется *красным смещением*. А поскольку этот эффект вызван гравитацией массивного объекта, его называют *гравитационным красным смещением*.

Для Солнца этот эффект крайне мал. В общем случае при слабой гравитации



для  $z$  имеется простая формула:

$$z = GM/c^2 R.$$

Таково красное смещение света, идущего с поверхности объекта массы  $M$  и радиуса  $R$ . Для Солнца  $z$  равно двум миллионным.

У некоторых других звезд этот эффект заметнее. С практической точки зрения наилучший пример — белые карлики. У них

$z$  лежит между  $10^{-5}$  и  $10^{-3}$ . Так, гравитационное красное смещение, вызываемое белым карликом Сириус В, составляет 300 миллионных. Как ни мало это по сравнению с 1, но все же гравитационное красное смещение свидетельствует о влиянии неевклидовой геометрии на измерения времени.

## ГОРИЗОНТ СОБЫТИЙ

Теперь мы подходим к более экзотическим следствиям гравитационного красного смещения, которые обнаруживаются в сильном гравитационном поле. Рассмотрим звезду, претерпевающую гравитационный коллапс. Поместим наблюдателя  $B$  на поверхность звезды и попросим его посылать сигналы через каждую секунду. Другого наблюдателя  $A$  мы поместим далеко от звезды на одном радиальном направлении с  $B$ . Эта ситуация, проиллюстрированная на рис. 7.6, напоминает случай гравитационного красного смещения лучей света, испущенного с поверхности белого карлика. Единственное различие между белым карликом и нашей коллапсирующей звездой состоит в том, что поверхность, на которой расположен наблюдатель  $B$ , проваливается. В ходе коллапса гравитация, действующая на  $B$ ,

непрерывно усиливается.

Из формулы для гравитационного красного смещения следует, что при сжатии звезды и уменьшении ее радиуса  $R$  красное смещение  $z$  увеличивается. Однако по сравнению с белым карликом здесь есть одно важное различие. Приведенная для  $z$  формула справедлива только при слабой гравитации. Но коллапсирующая звезда, радиус которой все уменьшается, скоро попадает в условия сильной гравитации. В этом случае формула для  $z$  будет иметь другой, довольно сложный вид:

$$z = (1 - 2GM/c^2 R)^{-1/2} - 1.$$

Сплошная кривая на рис. 7.7 изображает зависимость красного смещения от радиуса в соответствии с этой формулой. В действительности красное смещение, наблю-

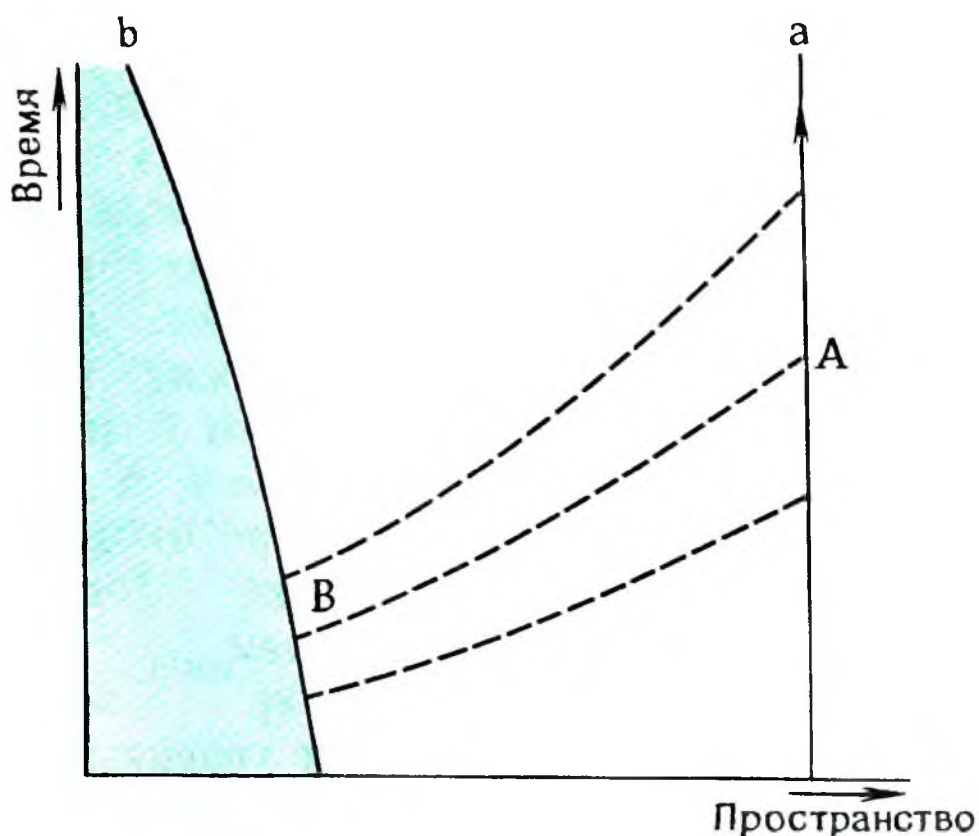
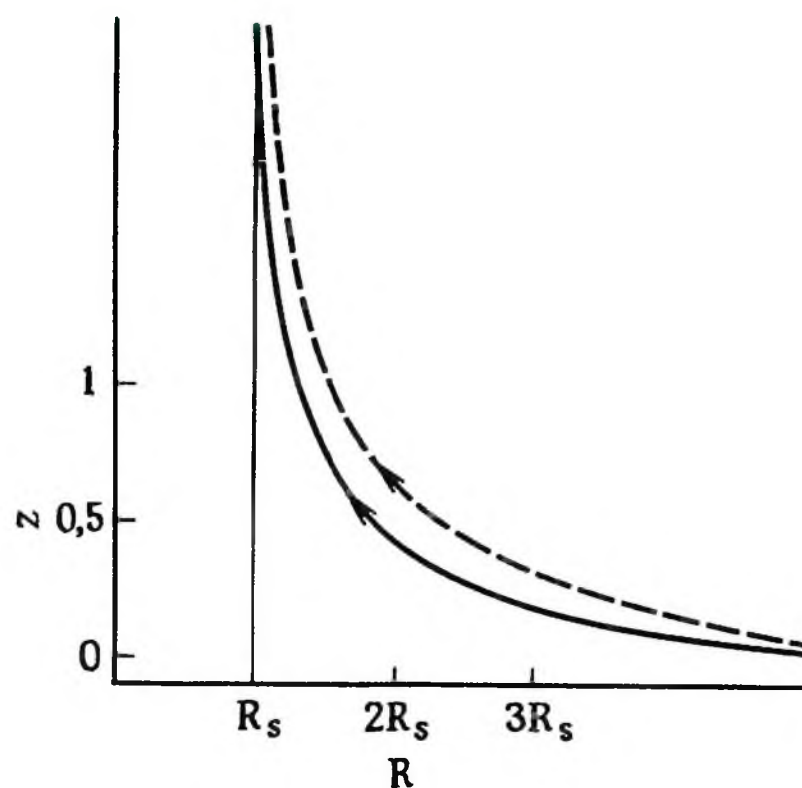


Рис. 7.6. Распространение сигналов от  $B$  к  $A$  в случае, когда наблюдатель  $B$  расположен на поверхности коллапсирующего объекта (голубая область). Хотя  $B$  посылает сигналы через равные промежутки времени,  $A$  они достигают через все более длительные промежутки, по часам  $A$ .

Рис. 7.7. Увеличение красного смещения при сжатии коллапсирующей звезды. Сплошная кривая описывает рост красного смещения при медленном сжатии. Штриховая кривая показывает рост красного смещения в случае быстрого гравитационного коллапса звезды.  $R_S$  — радиус Шварцшильда. Когда  $R$  (радиус звезды) стремится к  $R_S$ , красное смещение стремится к бесконечности как для сплошной, так и для штриховой линии.



даемое  $A$ , будет выше, чем вычисленное по формуле; график наблюдаемого смещения проведен штриховой линией. Это происходит потому, что наблюдатель  $B$  не покоится относительно  $A$ , а удаляется от него.

Всякий раз, когда источник света удаляется от наблюдателя, наблюдатель видит этот свет смещенным в красную сторону. Это явление называется *эффектом Доплера*. Эффект Доплера можно наблюдать и у источников звука. На рис. 7.8 мы видим наблюдателя, стоящего у железнодорожного переезда, мимо которого проходит поезд. Тембр гудка паровоза кажется наблюдателю высоким при приближении и низким при удалении поезда. В этом примере повышение или понижение тона соответствует увеличению и уменьшению частоты звуковых волн. Аналогичные эффекты для света носят название *фиолетового и красного смещений*. В случае коллапсирующей звезды сигналы наблюдателя  $B$  обладают красным смещением как вследствие эффекта Доплера, так и за счет гравитации.

И сплошная, и штриховая кривые круто поворачивают вверх, когда  $R$  стремится к величине

$$R_S = 2GM/c^2,$$

т. е. красное смещение становится бесконечно большим при  $R = R_S$ . Это свойство

$R_S$  впервые установил Шварцшильд, поэтому  $R_S$  часто называют радиусом Шварцшильда (что и означает индекс  $S$ ). При  $R$ , стремящемся к  $R_S$ ,  $z$  стремится к бесконечности. Чтобы понять смысл этого утверждения, вспомним, что множитель  $(1 + z)$  равен отношению темпов хода часов  $A$  и  $B$ . Промежуток времени между соседними сигналами составляет одну секунду для  $B$  и  $(1 + z)$  секунд для  $A$ . С ростом  $(1 + z)$  наблюдателю  $A$  все дольше приходится ждать следующего сигнала от  $B$ . Когда  $(1 + z)$  станет бесконечным,  $A$  будет вынужден ожидать очередной сигнал от  $B$  вечно! Иначе говоря, после того, как  $B$  пересечет сферу Шварцшильда радиуса  $R = R_S$ , никакие сигналы от  $B$  уже никогда не достигнут  $A$  (рис. 7.9, а).

В этом смысле поверхность шара радиуса  $R_S$  представляет собой *горизонт событий*. Внешний наблюдатель  $A$  никогда не увидит того, что происходит в пределах горизонта событий. Здесь можно провести аналогию с земным горизонтом. Как показано на рис. 7.9, б, из-за кривизны земной поверхности область, обозреваемая с любой данной высоты, ограничена. Когда корабль, наблюдаемый в открытом море с башни маяка, выходит за пределы этой области, он исчезает из вида. Подобно тому, как невидим корабль, находящийся за горизонтом Земли, невидимым становится



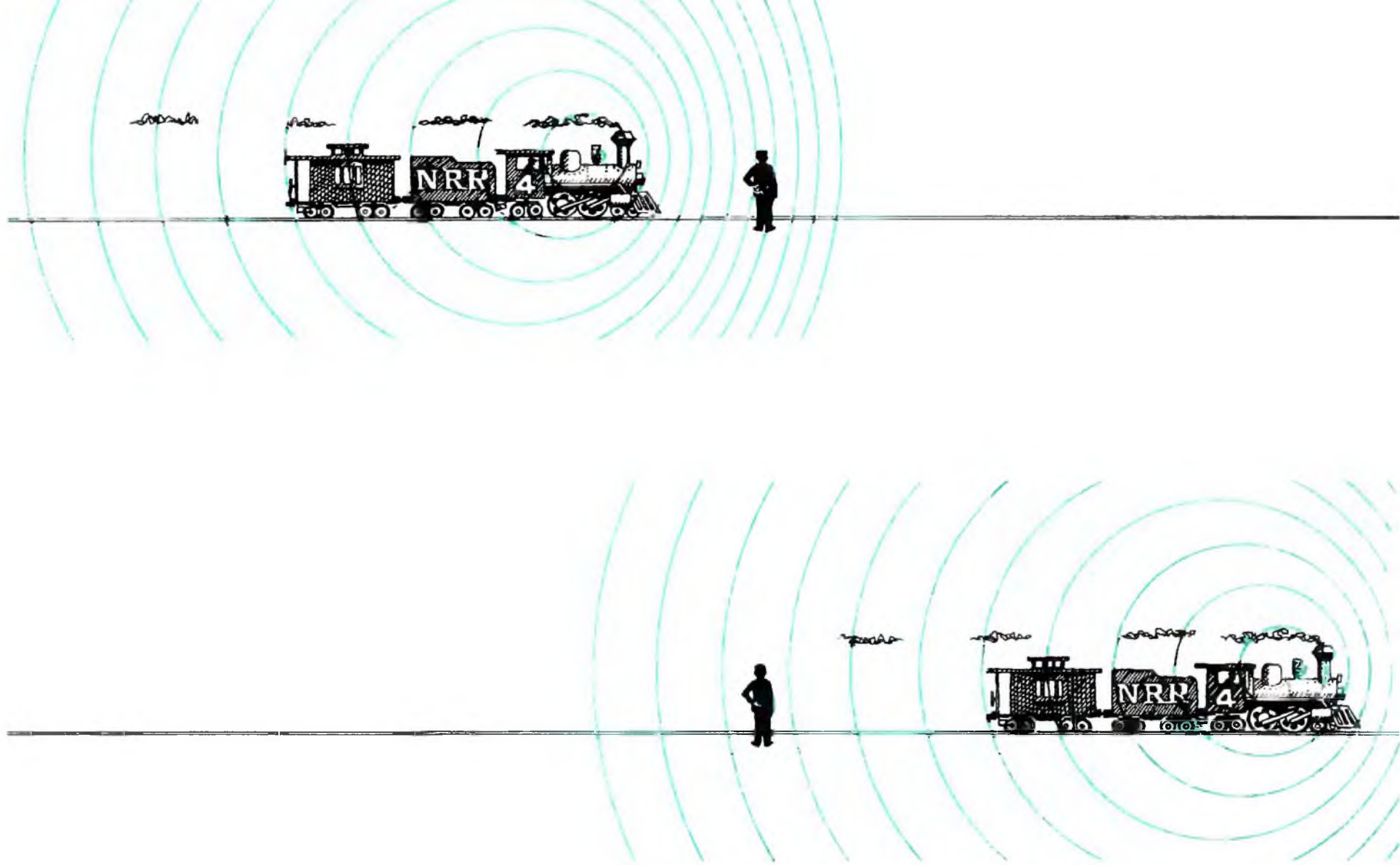


Рис. 7.8. Эффект Доплера. Когда поезд приближается к наблюдателю, звуковые волны, создаваемые свистком паровоза, догоняют друг друга. На рисунке это показано при помощи уменьшения интервалов между соседними фронтами волн, движущихся от свистка к наблюдателю. Противоположный эффект наблюдается при удалении паровоза от наблюдателя.

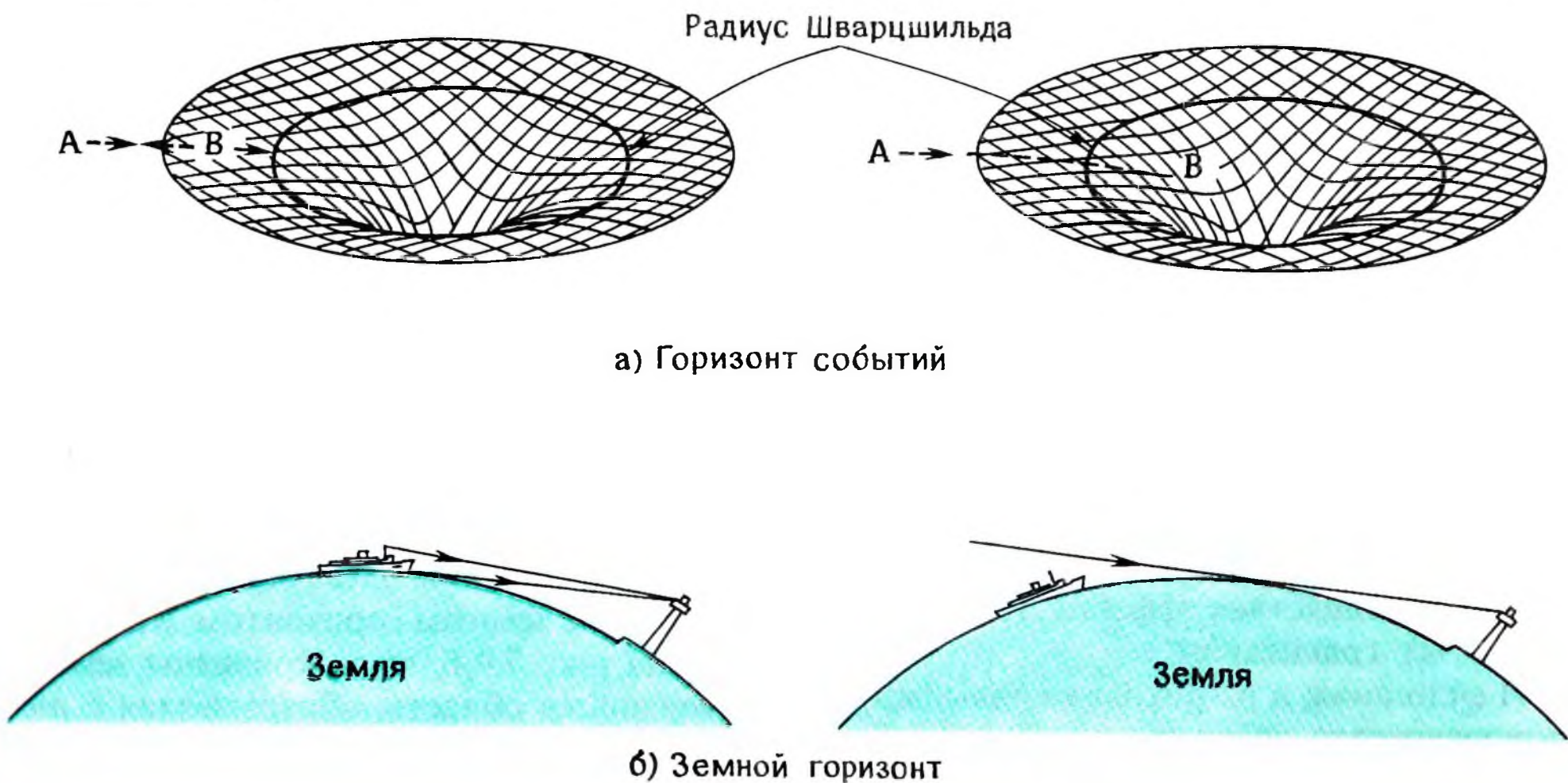


Рис. 7.9. Два горизонта: а – слева наблюдатели *A* и *B* могут общаться друг с другом по двустороннему каналу связи, изображенному стрелками. Однако *B* удаляется от *A* в область, где пространство-время все сильнее искривляется. Справа – *B* пересек сферу Шварцшильда (жирная замкнутая линия). После этого сигналы от *B* не достигают *A*, но *B* может получать сигналы от *A*. Сфера Шварцшильда является горизонтом событий. б – земной горизонт ограничивает поле зрения вследствие кривизны поверхности Земли.



и наблюдатель  $B$ , когда он пересекает горизонт событий.

Рассматриваемую ситуацию можно в шутку сравнить и с таким явлением из повседневной жизни. Пусть  $A$  испрашивает субсидию в очень бюрократическом правительственном учреждении,  $B$  — бюрократ, которому поручено дело  $A$ . Тогда время для  $A$  и для  $B$  течет по-разному. Если  $A$  ждет ответа на свое прошение через день, то  $B$  может спокойно протянуть много дней, прежде чем удостоит его вниманием. Для  $B$ , неторопливо достающего дела из долгого ящика, такая задержка неощутима. Этот «эффект» можно назвать

«бюрократическим красным смещением». Расследование, проведенное в одном из индийских штатов, показало, что, как правило, письмо проводит под сукном у бюрократов до отправления ответа в среднем 288 дней! Если положить множитель  $(1 + z)$  равным 288, то бюрократическое красное смещение составит 287!

Но вернемся к нашей звезде: в ходе коллапса ее гравитационное красное смещение превысит даже такую большую величину. После того как ее поверхность пересекает горизонт событий (т.е. когда красное смещение становится бесконечным), она превращается в черную дыру.

## У ЧЕРНОЙ ДЫРЫ НЕТ ВОЛОС

Удастся ли внешнему наблюдателю  $A$  точно определить момент исчезновения  $B$ ? По правде говоря,  $A$  может ждать вечно, но никогда не будет вправе сказать: «Теперь я знаю, что звезда стала черной дырой». Сигналу, посланному наблюдателем  $B$  в самый момент пересечения горизонта событий, не суждено достигнуть  $A$ . Однако факты биографии  $B$ , предшествующей этому решающему моменту, доступны наблюдателю  $A$ , если последний будет ждать достаточно долго.

Астрономы и астрофизики часто говорят, что в такой-то астрономической системе есть черная дыра. Насколько в свете только что сказанного оправданы эти утверждения? Ведь ясно, что каждый человек, наблюдающий с Земли некоторое астрономическое событие, похож на наблюдателя  $A$ . Никогда в жизни (сколько бы она ни продолжалась) он не сможет заявить, что черная дыра уже образовалась. В таком узком смысле утверждения о существовании черных дыр, которые можно найти в популярной или специальной литературе, неверны.

Однако приближенно эти утверждения все же справедливы. Даже до пересечения горизонта событий звезда может стать

практически невидимой для внешнего наблюдателя  $A$  — дело в том, что из-за гравитационного красного смещения резко падает светимость звезды.

Мы знаем, что частота света, излучаемого с поверхности звезды, к моменту его прихода к  $A$  уменьшается в  $(1 + z)$  раз. Энергию, которая содержится в луче света данной частоты, можно измерить, подсчитав число фотонов в луче (рис. 7.10). Фотон — элементарная частица, которая переносит свет в виде энергетического пакета. Каждый пакет обладает определенной энергией, равной произведению частоты на универсальную константу, которая называется постоянной Планка (и обычно обозначается через  $h$ ). Итак, пока луч света распространяется от  $B$  до  $A$ , его энергия уменьшается во столько же раз, во сколько и частота. Когда поверхность звезды приближается к горизонту событий, знаменатель  $(1 + z)$  становится очень большим.

Вследствие резкого уменьшения энергии, еще до того как звезда достигает горизонта событий, она уже кажется почти черной. Поскольку у всех астрономических приборов есть порог чувствительности и они не способны регистрировать источники излучения, поток энергии от которых



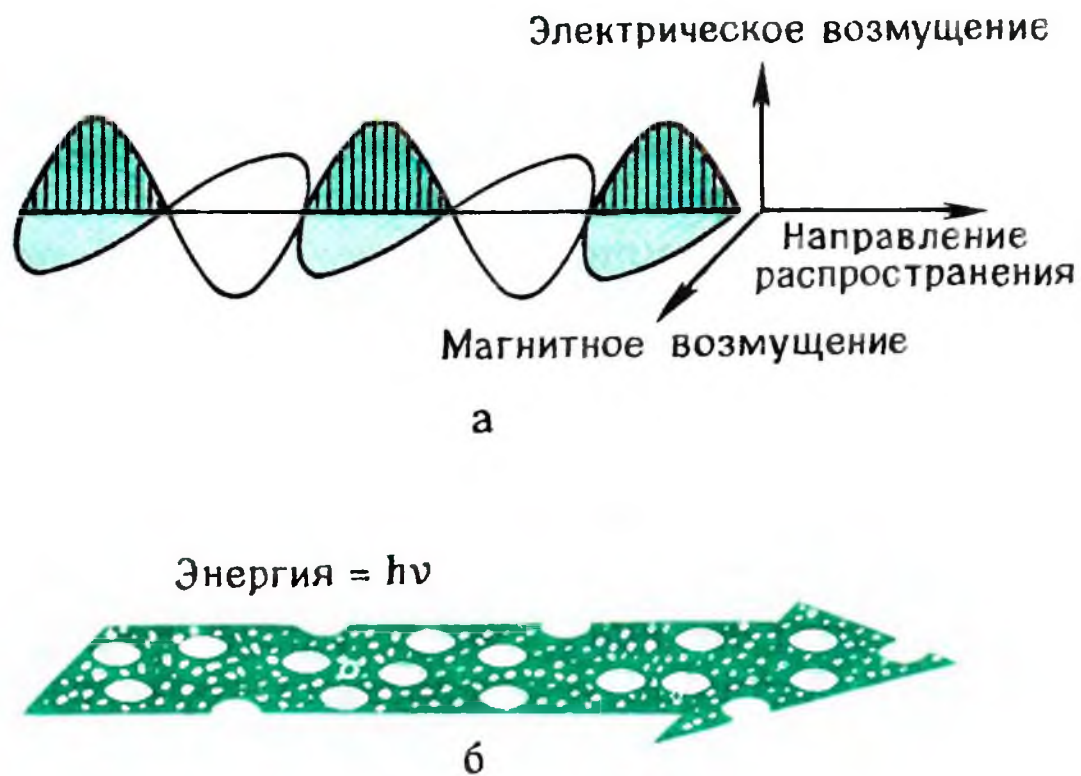


Рис. 7.10. Свет обладает двойственной природой. *а* – свет изображен в виде волны, в которой электрические и магнитные возмущения распространяются волнообразно во взаимно перпендикулярных плоскостях. Положительные полуволны заштрихованы; их максимумы – это гребни волн. Число гребней в секунду равно частоте  $\nu$  света. *б* – свет состоит из энергетических пакетов, которые называются фотонами. Энергия фотона света с частотой  $\nu$  равна  $h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка.

ниже этого порога, как только поток энергии от коллапсирующей звезды станет ниже порогового, она исчезнет из вида еще до пересечения горизонта событий. В этом смысле допустимо сказать, что звезда стала черной дырой. Именно в таком смысле мы и будем понимать этот термин.

Даже если звезда и превратилась в черную дыру, т. е. если ее излучение стало неувловимо слабым, о ее существовании можно судить по другим косвенным признакам. В частности, влияние ее гравитации сохраняется. Если у звезды есть планетная система, то планеты будут по-прежнему обращаться вокруг нее по тем же орбитам. В гл. 3 было описано, как, зная размеры орбиты и период обращения Земли, можно оценить массу Солнца. Подобным же образом можно в принципе оценить и массу звезды, даже ставшей черной дырой.

А какую еще информацию о черной дыре можно получить? Да почти никакой, если, конечно, верны результаты некоторых

исследований в этой области! В нашем примере гравитационного коллапса мы предполагали, что звезда – идеальный шар. Коллапс сферического объекта описывается при помощи уравнений Эйнштейна, которые решаются в явном виде. Однако если форма коллапсирующего тела неправильна, если оно вдобавок вращается или в нем имеются электрические заряды, токи и сопутствующие им магнитные поля, то решить уравнения коллапса оказывается невероятно трудно. Другими словами, по начальным условиям такого коллапса нельзя точно найти последовательные стадии, через которые проходит данный объект, превращаясь в черную дыру.

В исследованиях, о которых мы только что упоминали, речь идет о весьма ограниченном наборе начальных условий. Рассматриваются случаи, когда отклонение от сферичности очень невелико. Результаты, которые в основном принадлежат Ричарду Прайсу, можно изложить так:





Рис. 7.11. *а* – даже если форма коллапсирующего тела неправильна, внешний наблюдатель не получает об этом никакой информации. Он может измерить лишь его массу. *б* – вращающееся тело обладает моментом количества движения; его внешний наблюдатель может определить даже у черной дыры. *в* – хотя в теле могут существовать электрические токи (штриховые линии) и магнитное поле (сплошные линии), эти подробности теряются. Внешний наблюдатель измеряет лишь суммарный заряд тела. (F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics–Astronomy Frontier. © 1980. W. H. Freeman and Co.)

На рис. 7.11 изображены начальные стадии коллапса объекта неправильной формы. Присутствуют все различные нерегулярности, о которых говорилось выше. Но какая же информация остается доступной для внешнего наблюдателя *A* на заключительной стадии, когда объект уже стал черной дырой? Для *A* черная дыра будет иметь массу, момент импульса и электрический заряд. При помощи подходящих экспериментов *A* сможет найти эти три величины – и ничего более! Информация обо всех остальных известных на на-

чальных этапах особенностях исчезла. Джон Уилер высказал по этому поводу такое часто цитируемое замечание: «У черной дыры нет волос!».

Поскольку внешний наблюдатель располагает лишь очень скудными сведениями о черной дыре, надежды на ее обнаружение связаны главным образом с косвенными данными. Это, впрочем, не мешает ученым сочинять остроумные сценарии, в которых черным дырам отводится важная роль. Несколько примеров мы приведем в следующей главе.

## СИНГУЛЯРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

Мы закончим эту главу коротким рассказом о том, что происходит с наблюдателем *B*, после того как он пересек горизонт событий. Следует напомнить, что, хотя наблюдателю *A* понадобится целая вечность, чтобы убедиться в уходе *B* за горизонт, для самого *B* время вовсе не течет так медленно. По его часам, переход под горизонт событий занимает очень мало времени. Например, по часам *B*, время гра-

витационного коллапса Солнца от современных размеров до конечного точечного состояния (в том маловероятном случае, если давление в недрах Солнца внезапно исчезнет) составит всего 29 мин. Время коллапса нейтронной звезды и того меньше – порядка  $1/20\,000$  с, по часам *B*.

Есть, однако, другие эффекты, действию которых подвергнется наблюдатель *B*, падая с коллапсирующей звездой, и они ока-



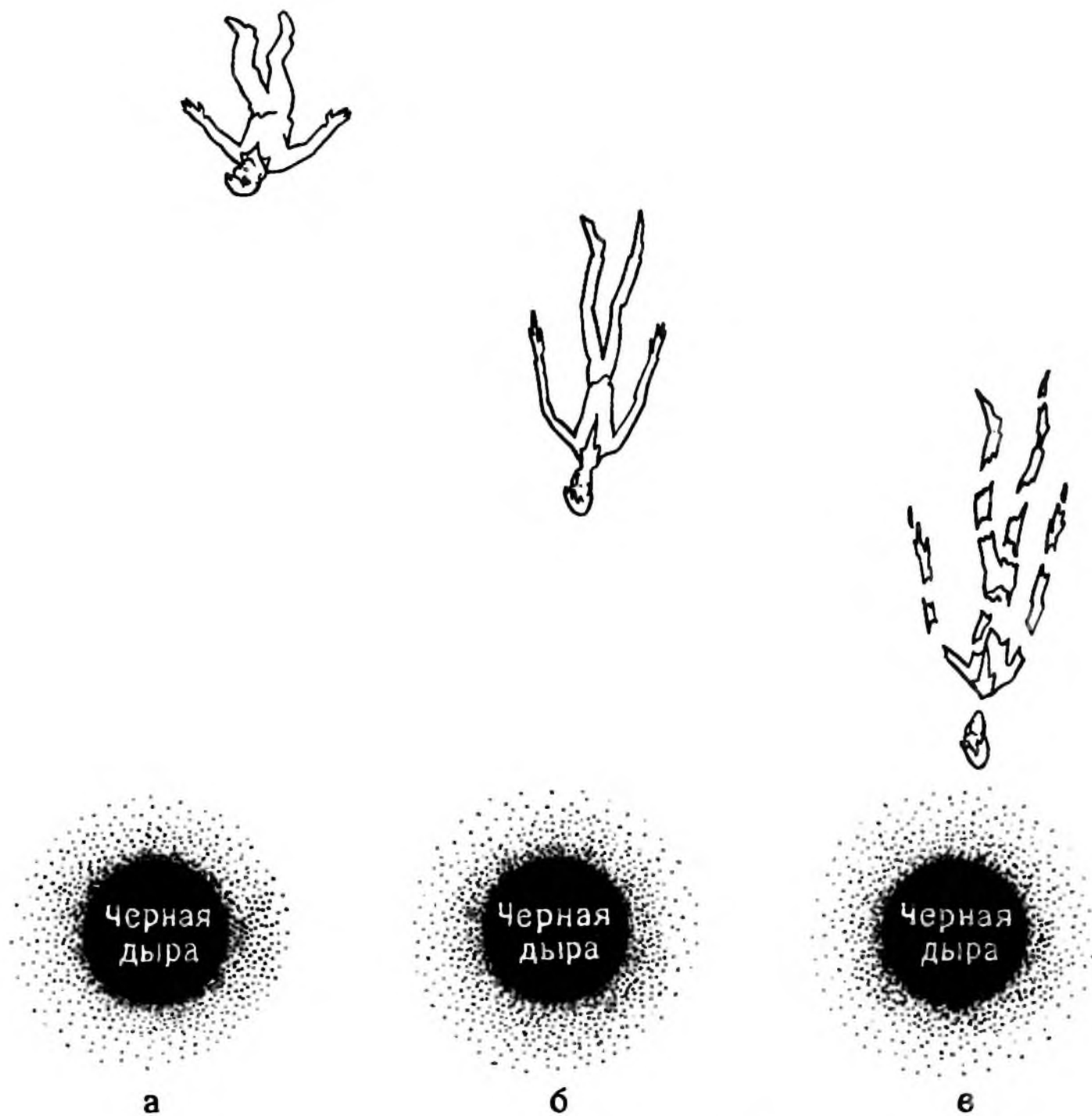


Рис. 7.12. Печальная судьба, уготованная наблюдателю  $B$ , разрываемому огромными приливными силами коллапсирующего объекта, постигает и человека, свободно падающего в черную дыру.  $a$  — вдали от черной дыры человек почти не чувствует ее приливной силы.  $b$  — в достаточной близости от черной дыры приливная сила растягивает его.  $c$  — вблизи черной дыры приливная сила разрывает его на части.

жуются весьма неприятными. В гл. 6 были описаны приливные силы. Эти силы (рис. 7.12) будут растягивать  $B$  в радиальном направлении. Насколько они велики? Для звезды массой три солнечных приливное растяжение к моменту, когда радиус звезды равен  $40R_S$ , в 100 раз больше атмосферного давления на поверхности Земли. Ни один человек не выдержит такого разрывающего напряжения. А по достижении радиуса Шварцшильда это напряжение усилится в 64 000 раз!

Даже если  $B$  каким-то чудом избежит приливного разрушения, ему уготована еще худшая участь. При сжатии звезды под горизонтом событий геометрия пространства-времени вокруг  $B$  становится

все более экзотической. (Рост приливной силы это лишь одно из ее проявлений.) Кульминационный момент — это сжатие звезды в точку, означающую «конец» и для звезды, и для  $B$ .

Ибо здесь бесконечна не только плотность звезды, но и кривизна пространства-времени в ее окрестности. Математики называют такое состояние *сингулярностью*. В этом состоянии неприменимы никакие математические уравнения. Известные нам законы физики в момент достижения сингулярности перестают действовать. Вслед за этим моментом будущее непредсказуемо. Во всех отношениях можно считать, что по достижении сингулярности карьере звезды и наблюдателя  $B$  приходит конец.

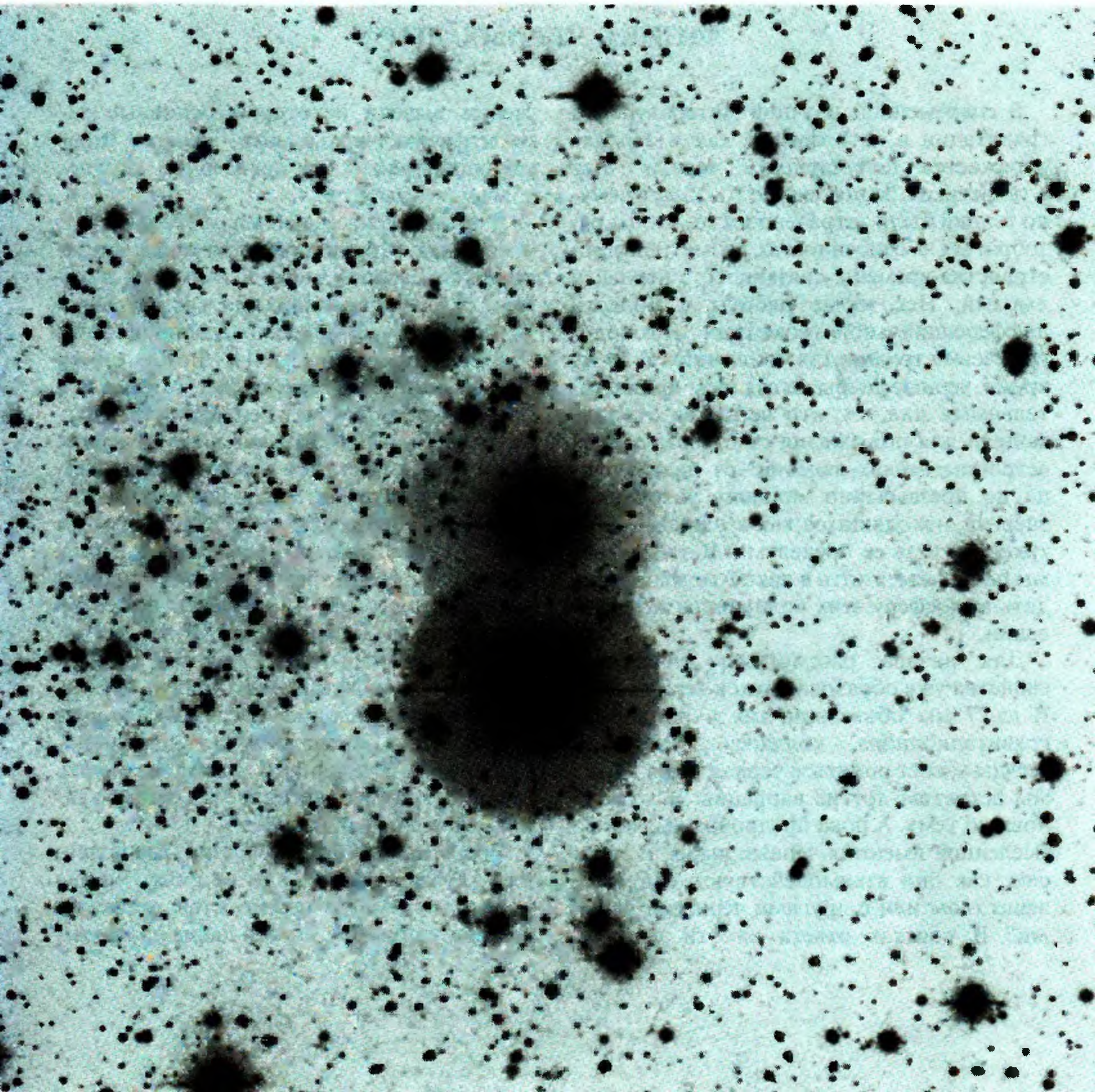


# 8

## Черные дыры – космические генераторы энергии

Большой темный объект в центре негатива фотографии – гигантская звезда HD 226868 в созвездии Лебедя. Около нее обращается компактный объект массой  $8M_{\odot}$ , который аккрецирует вещество из внешних слоев звезды и испускает рентгеновские лучи и радиоволны. Этот объект, Лебедь X-1, в настоящее время считается лучшим кандидатом в черные дыры.

(С любезного разрешения Дж. Кристиана, обсерватории Маунт-Вилсон и Лас-Кампаньяс, Институт Карнеги в Вашингтоне.)





## ФИЗИКА ЧЕРНЫХ ДЫР

В современной научной литературе по гравитации и астрофизике как в зеркале отражается популярность черных дыр у теоретиков. За последние 10–15 лет немало усилий было затрачено на то, чтобы разобраться в особенностях геометрии пространства-времени, связанного с черными дырами. Некоторые работы в области дифференциальной геометрии и топологии весьма трудны для понимания. В то же время черные дыры оказались привлекательными для тех, кто пытается строить модели для объяснения самых различных астрономических явлений – от недр Солнца до чрезвычайно мощных источников энергии, находящихся как в нашей Галактике, так и за ее пределами. В этой главе мы попытаемся хоть в какой-то мере передать атмосферу этих волнующих исследований.

Для начала рассмотрим физические свойства уже образовавшихся черных дыр. В гл. 7 мы объясняли, как в результате гравитационного коллапса массивной звезды может родиться черная дыра. Ниже мы встретим другие вариации на эту основную тему. А пока предположим, что во Вселенной имеются черные дыры, и спросим, как они взаимодействуют с другим веществом или с другими черными дырами? В поисках ответа на эти вопросы

ученые вывели некоторые основные законы физики черных дыр – законы, управляющие физическим поведением этих необычных объектов.

*Первый закон физики черных дыр* гласит, что черная дыра подчиняется таким же законам сохранения энергии, импульса и момента количества движения, какими определяется динамическое поведение обычного вещества (см. гл. 1). Вот пример применения этого закона: рассмотрим, что произойдет, если кусок вещества столкнется с черной дырой. Мы видели, что черная дыра держит мертвой хваткой даже свет. Поэтому всякое материальное тело, после того как пересечет горизонт событий (рис. 8.1), «проглатывается» черной дырой. При этом, с точки зрения внешнего наблюдателя (например,  $A$  из гл. 7), вещество пропадает из вида. Однако из закона сохранения энергии следует, что потеря энергии при «проглатывании» должна возмещаться увеличением массы  $M$  черной дыры. В гл. 7 отмечалось, что внешний наблюдатель в принципе может измерить  $M$  и проверить справедливость первого закона физики черных дыр.

*Второй закон физики черных дыр* позволяет глубже проникнуть в их природу. Чтобы понять, в чем он заключается, вернемся к нашему примеру черной дыры из преды-

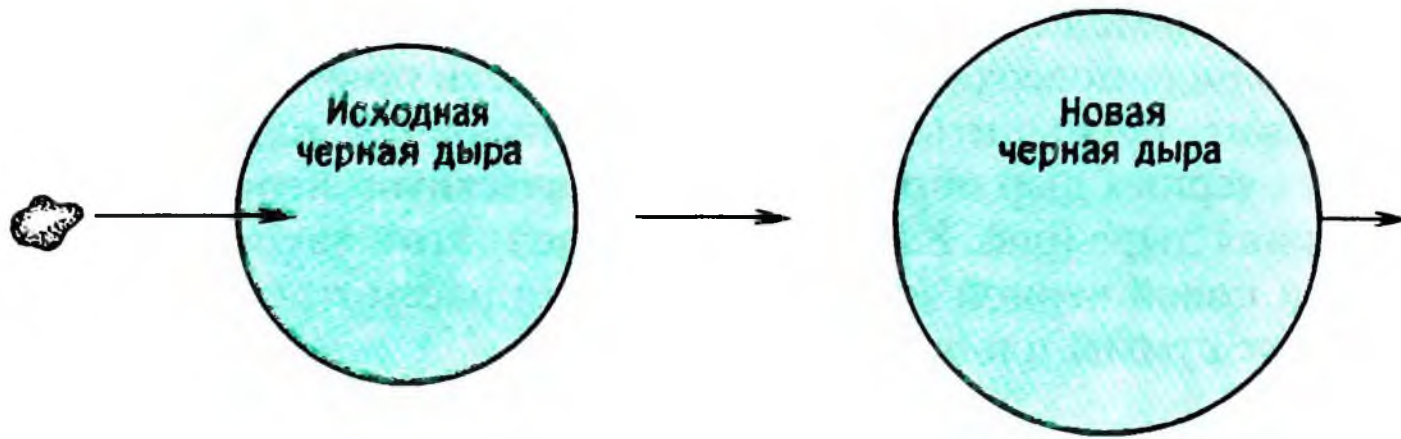


Рис. 8.1. Когда кусок вещества (изображенный на рисунке) падает в черную дыру, энергия и импульс системы не меняются. Это означает, что после того, как черная дыра «проглотит» кусок, ее масса увеличится и она приобретает импульс, направленный в сторону движения куска. Так утверждает первый закон физики черных дыр.

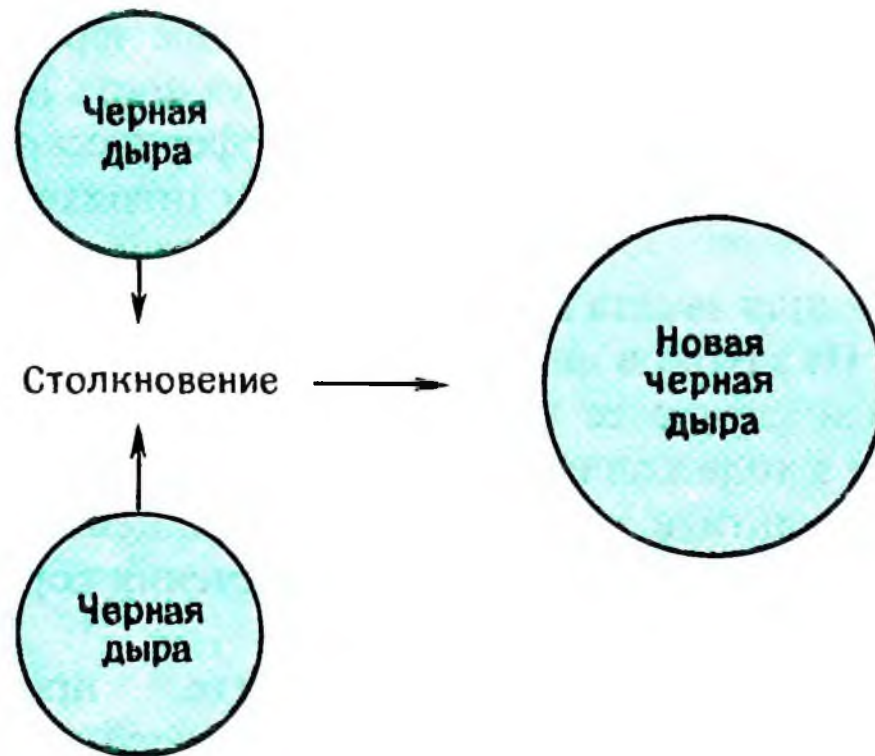


Рис. 8.2. Пример применения второго закона физики черных дыр. Две одинаковые сферические черные дыры сталкиваются и сливаются в одну черную дыру. Площадь поверхности новой черной дыры будет не меньше суммы исходных поверхностей. Отсюда, как легко подсчитать, следует, что радиус Шварцшильда новой черной дыры должен по крайней мере на  $\approx 41,5\%$  превосходить радиус Шварцшильда каждой из исходных черных дыр.

дущей главы. У сферической черной дыры массы  $M$  имеется сферический горизонт событий радиуса

$$R_S = 2GM/c^2.$$

Площадь сферической поверхности радиуса  $R_S$  в геометрии Шварцшильда равна

$4\pi R_S^2$ . Значит, площадь поверхности нашей черной дыры составляет

$$A = (16\pi G^2/c^4) M^2.$$

По мере заглатывания новых порций вещества черной дырой ее масса  $M$  растет, а значит, увеличивается и площадь ее поверхности  $A$ .



Второй закон физики черных дыр гласит, что ни в каком взаимодействии с другим веществом площадь поверхности черной дыры не может уменьшиться. При столкновении двух черных дыр образуется более крупная черная дыра (рис. 8.2). Площадь поверхности новой черной дыры не может быть меньше суммы площадей по-

верхностей обеих составляющих ее черных дыр.

Область применения второго закона не исчерпывается одними описанными уже сферическими черными дырами. Чтобы оценить этот закон во всей его полноте, следует рассмотреть вращающиеся черные дыры.

## КЕРРОВСКАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

При описании гравитационного коллапса звезды предполагалось, что в течение всего сжатия она остается сферической. Образующаяся при этом черная дыра также будет сферической. Геометрия в окрестности сферической черной дыры оказывается шварцшильдовской, поэтому ее называют *шварцшильдовской черной дырой*. Все ее свойства полностью определяются массой  $M$ .

А что, если коллапсирующая звезда вращается вокруг своей оси? Из законов динамики вытекает, что в этом случае ее момент количества движения в ходе коллапса должен сохраняться. В результате звезда, сжимаясь, будет вращаться все быстрее и быстрее. Не исключено, что такой процесс приведет к разрушению звезды, и стадия черной дыры вообще не наступит. Но если разрушения не произойдет, то получившаяся черная дыра будет обладать моментом количества движения.

Подробности процесса (если такой вообще существует), посредством которого вращающийся объект достигает состояния черной дыры, далеко не ясны, поэтому нельзя надежно описать условия образования вращающейся черной дыры. Тем не менее можно сказать, как выглядит вращающаяся черная дыра, если она уже образовалась. В 1963 г. Рой Керр описал геометрию пустого пространства-времени вокруг вращающегося объекта, симметричного относительно оси вращения. Решение Керра помогло понять свойства

вращающейся черной дыры, которую часто называют *керровской*.

На рис. 8.3 изображены два сечения керровской черной дыры. На рис. 8.3, а показано меридиональное сечение, т. е. сечение, проходящее через ось вращения. Внутренняя окружность (сплошная линия) — это сечение сферического *горизонта событий*. Внешняя штриховая кривая — сечение границы так называемой *эргосферы*. Смысл этого термина станет ясен ниже. На рис. 8.3, б приведено сечение черной дыры на данной широте. Внутренняя и внешняя окружности, общий центр которых лежит на оси вращения, соответственно изображают сечения горизонта событий и эргосферы.

Давайте представим себе двух наблюдателей —  $B_1$  и  $B_2$ . Как показано на рис. 8.3, б,  $B_2$  располагается вне эргосферы, а  $B_1$  — внутри нее, но вне горизонта событий. Утверждение о том, что черная дыра вращается вокруг своей оси, имеет смысл только в какой-то системе отсчета, например в системе, связанной с далекими звездами. Предположим, что  $B_1$  и  $B_2$ , которые могут видеть эти звезды, хотят оставаться неподвижными в этой системе отсчета. Удастся ли им это сделать?

Грубая аналогия — самолет, летящий над вращающейся Землей (рис. 8.4). Самолет, который летит над земной поверхностью, увлекается в направлении вращения Земли, т. е. с запада на восток. Иначе путешествовать на запад было бы очень просто: само-

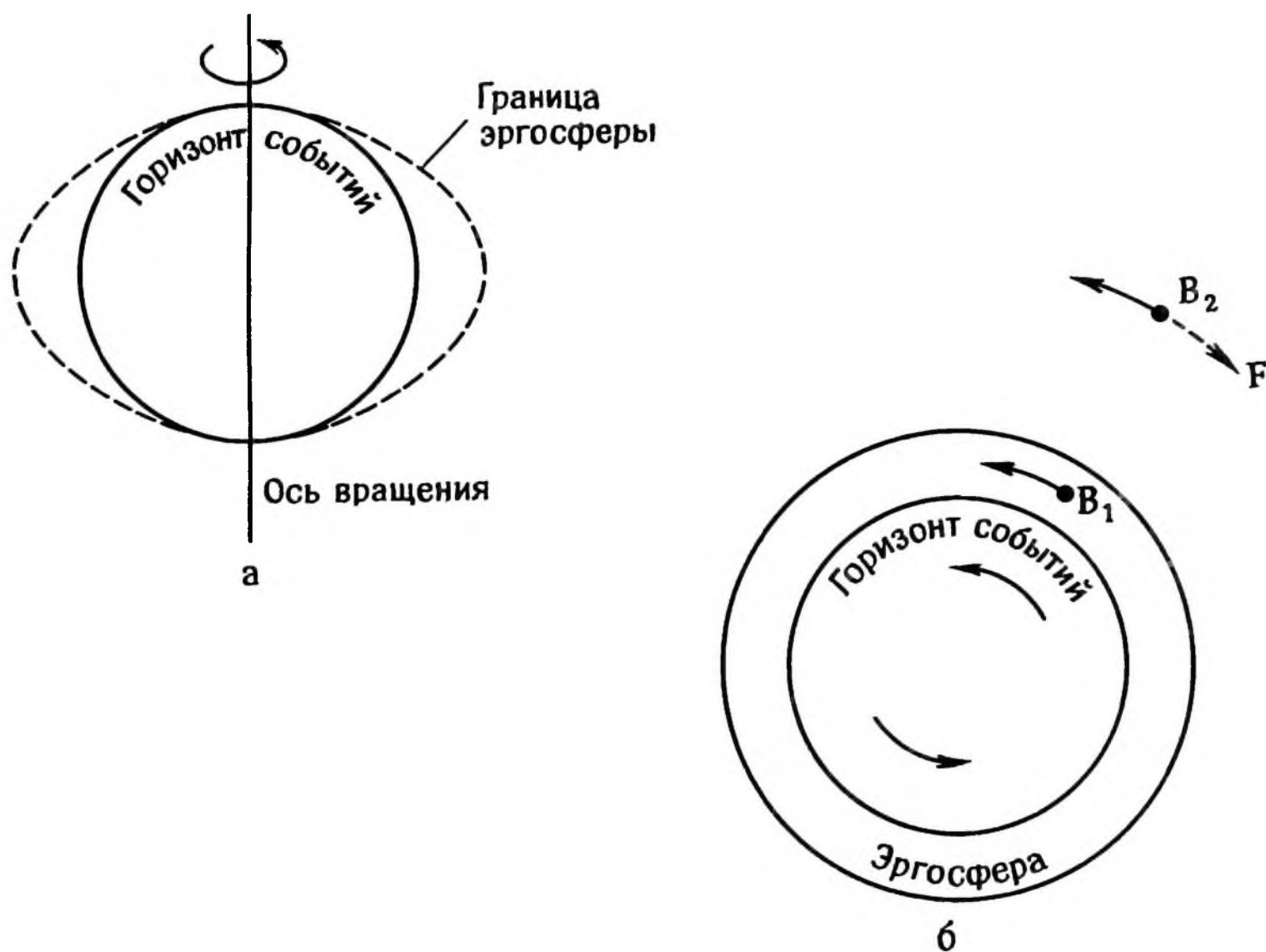


Рис. 8.3. Меридиональное (а) и широтное (б) сечения керровской черной дыры. б – два наблюдателя  $V_1$  и  $V_2$  пытаются остаться неподвижными относительно далеких звезд. Оба наблюдателя увлекаются вращением черной дыры в направлении, показанном сплошными стрелками. Наблюдатель  $V_2$ , который находится вне эргосферы, может добиться успеха, если приложит достаточно большую противоположно направленную силу  $F$ . Наблюдателю  $V_1$ , находящемуся внутри эргосферы, это не удастся. Внешняя граница эргосферы, которая называется *статическим пределом*, – это самая близкая к вращающейся черной дыре поверхность, которой  $V_2$  может достичь и при этом не будет вовлечен в ее вращение.



Рис. 8.4. Самолет даже в полете сносится в направлении вращения Земли.



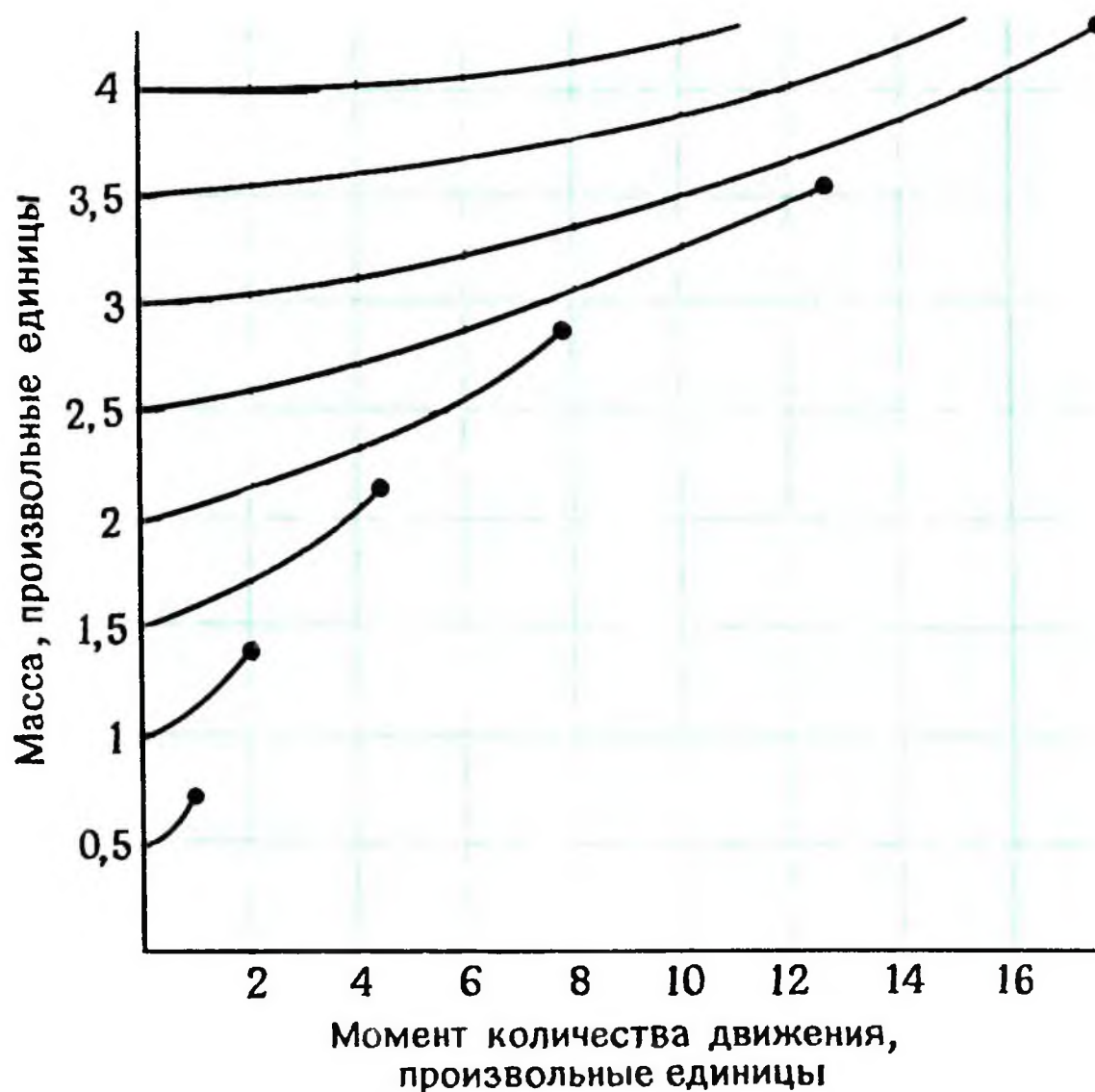


Рис. 8.5. Кривые постоянной площади для керровских черных дыр. Двигаясь вдоль любой кривой справа налево, черная дыра проходит последовательность состояний с уменьшающимися массой и моментом количества движения, но с одинаковыми площадями поверхности. Слева все кривые оканчиваются на оси масс. Эти конечные состояния соответствуют невращающимся, т. е. шварцшильдовским черным дырам. Второй закон физики черных дыр допускает движение вдоль любой данной кривой или переход с нижних кривых на верхние, но не наоборот.

Справа все кривые оканчиваются в некоторых фиксированных точках. Они представляют собой *экстремальные* керровские черные дыры. Хотя второй закон позволяет двигаться вдоль кривой постоянной площади в обоих направлениях, согласно третьему закону физики черных дыр, крайнего правого конца кривой нельзя достичь при помощи конечного числа физических операций. Здесь можно провести знакомую всем физикам аналогию с температурой: «Абсолютный нуль температуры недостижим за конечное число физических операций».

лету достаточно было бы взлететь и стараться удержаться на одном месте, а затем, когда место назначения появится под ним, совершить посадку.

В случае керровской черной дыры оба наблюдателя  $B_1$  и  $B_2$  сносятся в направлении ее вращения. Чтобы оставаться на одном месте, оба они должны прикладывать дополнительные усилия — например

запускать реактивные двигатели и тем самым не давать черной дыре увлекать их в направлении, показанном стрелками. До тех пор, пока наблюдатель  $B_2$  находится вне эргосферы, он может таким способом добиться неподвижности. Однако наблюдатель  $B_1$  внутри эргосферы не сможет оставаться неподвижным относительно далеких звезд, какими бы мощными двига-

телями он ни пользовался. Такой наблюдатель неумолимо вовлекается во вращение черной дыры.

Какова площадь поверхности керровской черной дыры? Как и в случае шварцшильдовской черной дыры, речь идет о площади горизонта событий. Ответом для керровской черной дыры является такое математическое выражение

$$A = (8\pi G^2 M^2 / c^4) [1 + (1 - S^2 c^2 / G^2 M^2)^{1/2}].$$

Обратите внимание на то, что площадь зависит теперь от двух параметров черной дыры: ее массы  $M$  и ее момента количества движения  $S$ . На рис. 8.5 изображены кривые постоянной площади для вращающихся черных дыр. Двигаясь вдоль любой кривой справа налево, мы получаем последовательность черных дыр с уменьшаю-

щимися массой и моментом количества движения. Второй закон физики черных дыр допускает переход с нижних линий на верхние, но не наоборот.

С учетом этого ограничения, налагаемого вторым законом физики черных дыр, можно сказать, что никакой физической процесс не позволяет уменьшить поверхность черной дыры; в лучшем случае она останется постоянной. Тогда черная дыра может последовательно проходить состояния, связанные одной и той же кривой. При движении справа налево черная дыра теряет массу и момент количества движения; при движении слева направо происходит обратное: черная дыра приобретает массу и момент количества движения. Этим-то и определяется возможность извлечения энергии из вращающейся черной дыры.

## МЕХАНИЗМ ПЕНРОУЗА

Английский специалист по теории относительности Роджер Пенроуз предложил механизм, посредством которого можно извлекать энергию из вращающейся черной дыры. Все дело в том, чтобы суметь воспользоваться кривыми  $A = \text{const}$  на рис. 8.5, двигаясь по одной из которых справа налево, мы получаем последовательные стадии черной дыры с убывающими массой и моментом количества движения.

В механизме Пенроуза в результате описываемого ниже процесса масса и момент количества движения черной дыры уменьшаются. Отбираемую у черной дыры массу можно получить в виде энергии согласно формуле Эйнштейна  $E = Mc^2$  (см. гл. 5).

Принцип, на котором основан механизм Пенроуза, проиллюстрирован на рис. 8.6. Во вращающуюся черную дыру забрасывают материальное тело, энергия и момент количества движения которого достаточно, чтобы оно вошло в эргосферу

и начало обращаться вокруг оси вращения черной дыры. Предусматривается, что в какой-то момент тело разделится на две части. Одна из них провалится под горизонт событий и навсегда исчезнет. Другая же приобретет кинетическую энергию, достаточную для выхода из эргосферы во внешнее пространство.

Как показал Пенроуз, параметры этого процесса можно подобрать так, что полная энергия вылетающего из эргосферы фрагмента будет выше, чем энергия всего исходного тела перед входом в эргосферу! В таком процессе вылетающий фрагмент уносит часть момента количества движения и энергии черной дыры. По окончании процесса черная дыра перейдет в состояние с меньшими массой и моментом количества движения. Поэтому в принципе технологически развитая цивилизация могла бы использовать вращающуюся черную дыру как энергетическую установку: достаточно подбрасывать в нее кусочки вещества и получать обратно их части



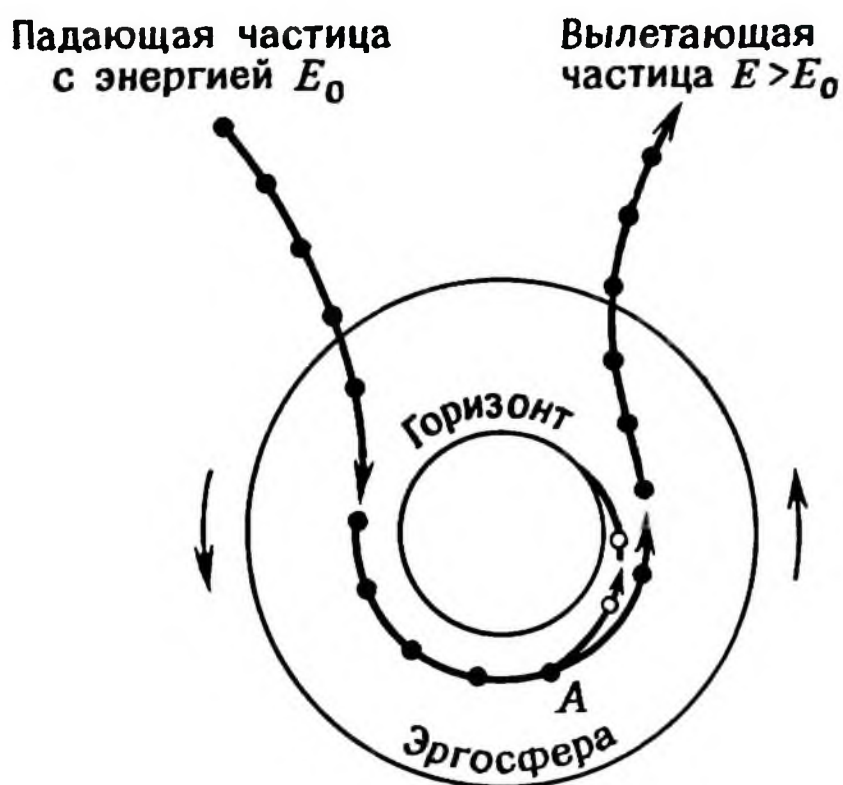


Рис. 8.6. Схема извлечения энергии из вращающейся черной дыры при помощи механизма Пенроуза. (F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics - Astronomy Frontier. © 1980. W. H. Freeman and Co.)

с большей энергией, чем та, которая потребовалась на запуск.

Но вечно продолжаться такой процесс не может. С помощью рис. 8.5 можно установить, какие ограничения на него наложены. Если действовать со стопроцентным КПД, площадь черной дыры остается постоянной. Однако любая кривая  $A = \text{const}$  оканчивается на оси масс там, где черная дыра теряет весь свой момент количества движения, т. е. получается не что иное, как сферически симметричная шварцшильдовская черная дыра, рассмотренная в гл. 7. Это состояние без вращения называют *неприводимым*, так как дальнейшее извлечение энергии из черной дыры становится невозможным. Масса черной дыры в таком состоянии называется *неприводимой массой*.

Если процесс Пенроуза осуществляется не со стопроцентным КПД, то площадь поверхности черной дыры возрастает. На рис. 8.5 мы будем перепрыгивать с одной кривой на другую, соответствующую

большему значению  $A$ . В таком случае окончательное неприводимое состояние достигается раньше, а неприводимая масса оказывается выше, чем при постоянной площади поверхности. Кроме того, за низкий КПД приходится платить: получаемая от черной дыры энергия будет меньше, чем та, которую можно было извлечь, если бы площадь ее поверхности удалось сохранить постоянной.

Как ни остроумен механизм Пенроуза, это все же некая экзотика. До сих пор никому из астрономов не удалось «состряпать» сценарий по «рецепту» Пенроуза. Однако в целом ряде работ по астрофизике высоких энергий вращающиеся черные дыры выступают в роли источников энергии. Из приводимых ниже примеров выяснится, что главное свойство черных дыр, благодаря которому они могут служить генераторами энергии, — это колоссальная концентрация вещества в очень маленьком объеме.

## ЛЕБЕДЬ X-1

В гл. 6 мы описывали приливные эффекты в двойной звездной системе. Продолжим теперь наш сценарий.

Напомним, что в двойной системе,

изображенной на рис. 6.8, ее компоненты  $A$  и  $B$  обращаются один вокруг другого по эллиптическим орбитам. Звезда  $B$  компактна, а звезда  $A$  расширяется. Когда

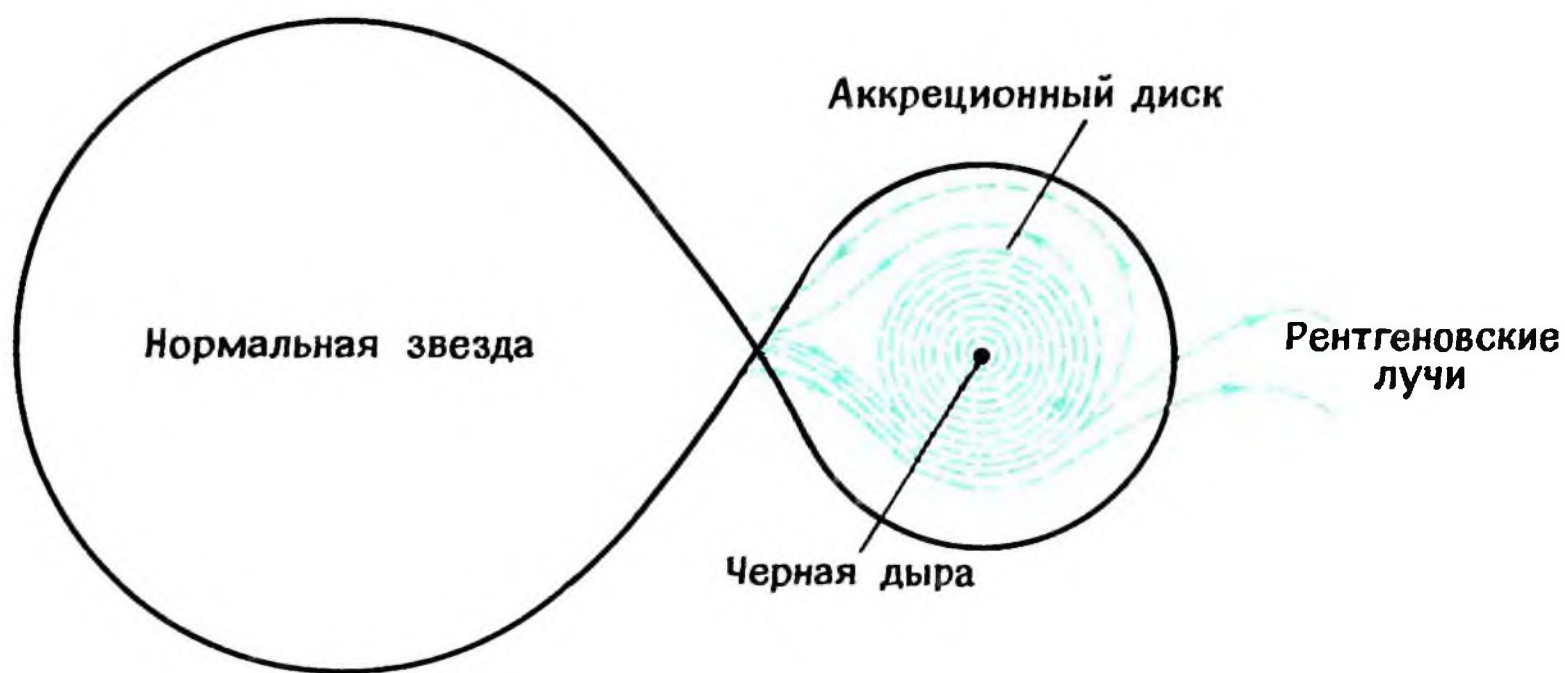


Рис. 8.7. Образование аккреционного диска вокруг черной дыры в двойной звездной системе. (F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics – Astronomy Frontier. © 1980. W. H. Freeman and Co.)

А переполняет свою полость Роша, роль приливных эффектов особенно велика. В этом случае компактная звезда *B* перетягивает к себе вещество с поверхности звезды *A*. Что происходит с этим веществом?

Это схематически изображено на рис. 8.7. Если бы в двойной звездной системе не было вращения, то вещество звезды *A* прямо падало бы на звезду *B*. Однако вследствие вращения это вещество не летит к *B* прямо, а вынуждено обращаться вокруг *B*. Как показано на рис. 8.7, вещество *A* долго кружится вокруг *B* преимущественно в их общей экваториальной плоскости, где приливный эффект самый сильный. В конце концов оно падает на звезду *B*. В результате такого процесса образуется диск из падающего на звезду *B* вещества.

В 1940-х годах Германн Бонди, Рэймонд Литтлтон и Фред Хойл исследовали различные ситуации, при которых звезда в своем движении сквозь межзвездное пространство *аккрецирует* из него вещество. Эта аккреция объясняется сильным гравитационным воздействием звезды на окружающее вещество. Вопросы, затронутые этими астрофизиками, касались главным образом сферической аккреции, т. е. аккре-

ции со всех направлений на сферическую звезду. Классическая работа Бонди 1951 г. послужила отправным пунктом для современных теорий аккреции вещества.

Рассмотрим то же понятие аккреции в применении к двойной звездной системе. Различие здесь в том, что аккреция происходит не со всех направлений, а образуется аккреционный диск. Размеры диска определяются различными параметрами, такими, как темп аккреции, т. е. темп падения вещества на звезду *B*, ее масса и т. п. Если темп аккреции меняется, размеры диска могут колебаться. Но вот интересный эффект, возникающий в диске: вследствие трения вещество разогревается и излучает. Частота излучения зависит, помимо всего прочего, от температуры диска. Расчеты показывают, что излучение происходит в основном в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра.

Главную роль в этой картине играет, конечно, звезда *B*. Чтобы вокруг нее образовался излучающий аккреционный диск, она должна быть очень компактной. В начале 1960-х годов в астрофизике бурно обсуждались нейтронные звезды; в конце 1960-х годов в центре внимания оказались черные дыры. И нейтронные звезды,



и черные дыры – неплохие кандидаты на роль звезды  $B$  в механизме образования аккреционного диска.

Одновременно с теорией развивалась и космическая техника. Это позволило астрономам наблюдать космические рентгеновские источники. Поскольку атмосфера Земли поглощает приходящие извне рентгеновские лучи, их наблюдения возможны лишь при помощи приборов, вынесенных за пределы атмосферы. Такие наблюдения проводились с 1960-х годов. Важнейшим вкладом в рентгеновскую астрономию стали исследования со спутника «Ухуру»\*, запущенного 12 декабря 1970 г. В этих исследованиях было найдено много рентгеновских источников, и среди них – один в созвездии Лебедя. Этот объект, который называют Лебедь X-1, является лучшим примером описанного выше рентгеновского источника в двойной звезде.

Двойная звезда, к которой принадлежит Лебедь X-1, состоит из сверхгиганта  $A$  и компактного объекта  $B$ . Звезда  $A$  – или HD 226868 по каталогу Генри Дрейпера – единственный видимый компонент в этой двойной. Ее масса не меньше  $20M_{\odot}$ , она обращается вокруг второго компонента с орбитальным периодом около 5,5 дня. Компонент  $B$  невидим, но его существование подтверждается косвенно. Именно этот объект так взволновал астрофизиков, занимающихся изучением черных дыр.

Тщательные определения элементов орбиты этой двойной показывают, что масса  $B$  не меньше  $8M_{\odot}$ . Это значительно выше теоретического верхнего предела для

массы нейтронной звезды, который, как известно, не превосходит  $3M_{\odot}$ , а возможно, близок к  $2M_{\odot}$ . Поэтому  $B$  не может быть нейтронной звездой. Что же это за объект? Остающаяся возможность – черная дыра. Вот почему Лебедь X-1 часто упоминается как лучшее наблюдательное подтверждение существования черных дыр.

Хотя многие астрономы согласны с таким выводом, некоторые возражают им, указывая на то, что наши знания о состоянии вещества при очень высоких плотностях (в миллион миллиардов раз больше плотности воды) все еще крайне приближены. Дополнительные данные могут заставить нас пересмотреть верхний предел для массы плотной, компактной звезды. Кроме того, для большинства других рентгеновских источников в двойных системах вполне приемлемо предположение о том, что  $B$  – нейтронная звезда. Таким образом, Лебедь X-1 выглядит исключением. (Другой, менее надежный кандидат в черные дыры – Циркуль X-1.) Быть может, в системе, содержащей Лебедь X-1, имеется не две звезды, а больше, причем масса каждого из компактных компонентов не превышает предела для нейтронных звезд? Если верны указания на дополнительные периодичности в этом объекте, то они могли бы возникнуть в тройной звездной системе.

Тем не менее, если объяснение Лебедя X-1 при помощи черной дыры и кажется несколько умозрительным, другие возможные объяснения – еще большая натяжка. Во всяком случае, Лебедь X-1 вдохновил многих астрофизиков; осмелев, они стали применять аккреционные диски для истолкования гораздо более крупномасштабных явлений. Приведем несколько примеров.

\* Ухуру – «свобода» на суахили, языке Кении, с территории которой этот спутник был запущен в День независимости Кении.



## СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Описывая звездную эволюцию, мы пришли к понятию черных дыр с массами в несколько солнечных. Масса черной дыры, которая, возможно, является компонентом двойной звездной системы, связанной с Лебедем X-1, равна  $8M_{\odot}$ . Теперь мы рассмотрим черные дыры, гораздо более массивные, чем те, к которым приводят конечные стадии звездной эволюции. Масса таких черных дыр, которые бычно называют *сверхмассивными*, составляет от тысяч до миллиардов солнечных масс; предполагается, что они существуют в шаровых скоплениях, в ядрах галактик и в квазарах. В этих астрономических системах они могли бы играть роль генераторов энергии.

На рис. 8.8 приведено изображение шарового скопления, а на рис. 8.9 – галактики М 87 (М – сокращенное обозначение каталога Мессье). Шаровое скопление – это совокупность сотен тысяч звезд, связанных взаимной гравитацией. В нашей Галактике содержится много шаровых скоплений, и изображенное на рис. 8.8 весьма типично. Самая сильная скученность звезд наблюдается в центре, а на периферии скопления она меньше. Есть мнение, хотя и не подкрепленное пока никакой подробной теорией, что вследствие огромной концентрации вещества в центре шарового скопления может образоваться черная дыра. Масса черной дыры в шаровом звездном скоплении вполне может достигать  $1000M_{\odot}$ .

Массы сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик типа М 87 еще больше. Считается, что масса черной дыры в М 87 достигает  $5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ! Но чем, помимо общих слов, можно подкрепить подобные предположения?

Прежде всего попытаемся понять, на что способны такие сверхмассивные черные дыры. Вообще говоря, если они действи-

тельно образуются, то должны возникать в результате гравитационного коллапса целой совокупности звезд. Такая совокупность обладает полным моментом количества движения, который сохраняется при образовании черной дыры. Поэтому получается вращающаяся (керровская) черная дыра. А вращающаяся черная дыра не только притягивает окружающее ее вещество, но и заставляет его двигаться вокруг оси вращения. Этот эффект наиболее заметен в экваториальной плоскости черной дыры, где вещество образует аккреционный диск. Аккреционный диск качественно подобен диску, который образуется около черной дыры в двойной системе, хотя его размеры и масса несравненно больше. Как и в двойной системе, разогревая диск, черная дыра может генерировать энергию.

В шаровых скоплениях есть рентгеновские источники. Известно, например, что в шаровом скоплении NGC 6624 (рис. 8.8) содержится рентгеновский источник 3U 1820–30 (U – сокращенное обозначение каталога «Ухуру»). Такой источник в шаровом звездном скоплении вполне может возникать за счет излучения аккреционного диска, окружающего черную дыру.

Что же касается М 87, то две группы астрономов, пользуясь различными методами наблюдений, пришли в 1978 г. к выводу, что результаты их наблюдений лучше всего объясняются наличием в ядре галактики черной дыры массой около  $5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ . Одна группа из Обсерваторий Хэйла и Лаборатории реактивного движения измеряла яркость видимого света по всей галактике. Хотя измерения яркости уже проводились для многих галактик, чувствительность, достигнутая в 1978 г., оказалась значительно выше, чем раньше, и это позволило астрономам



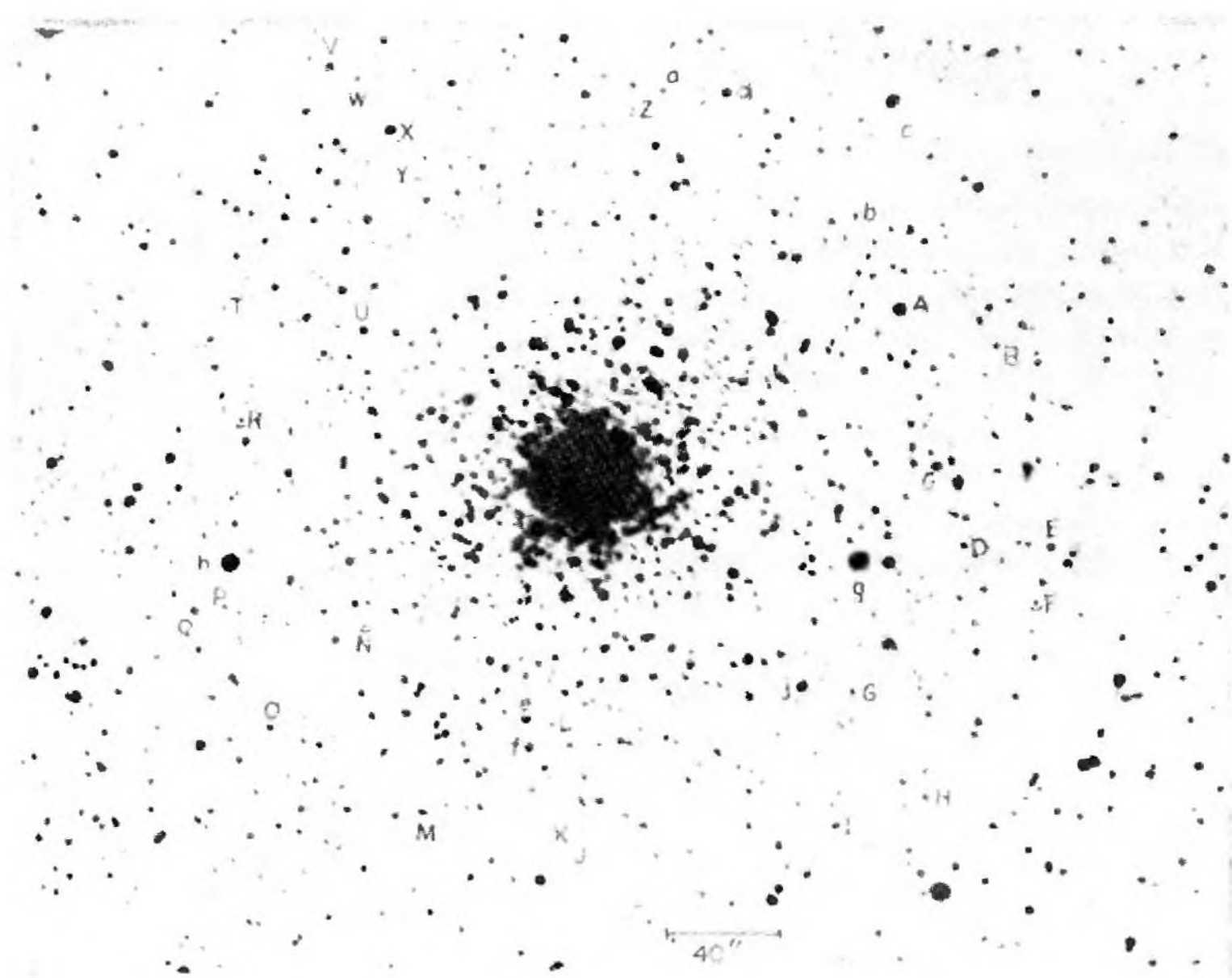
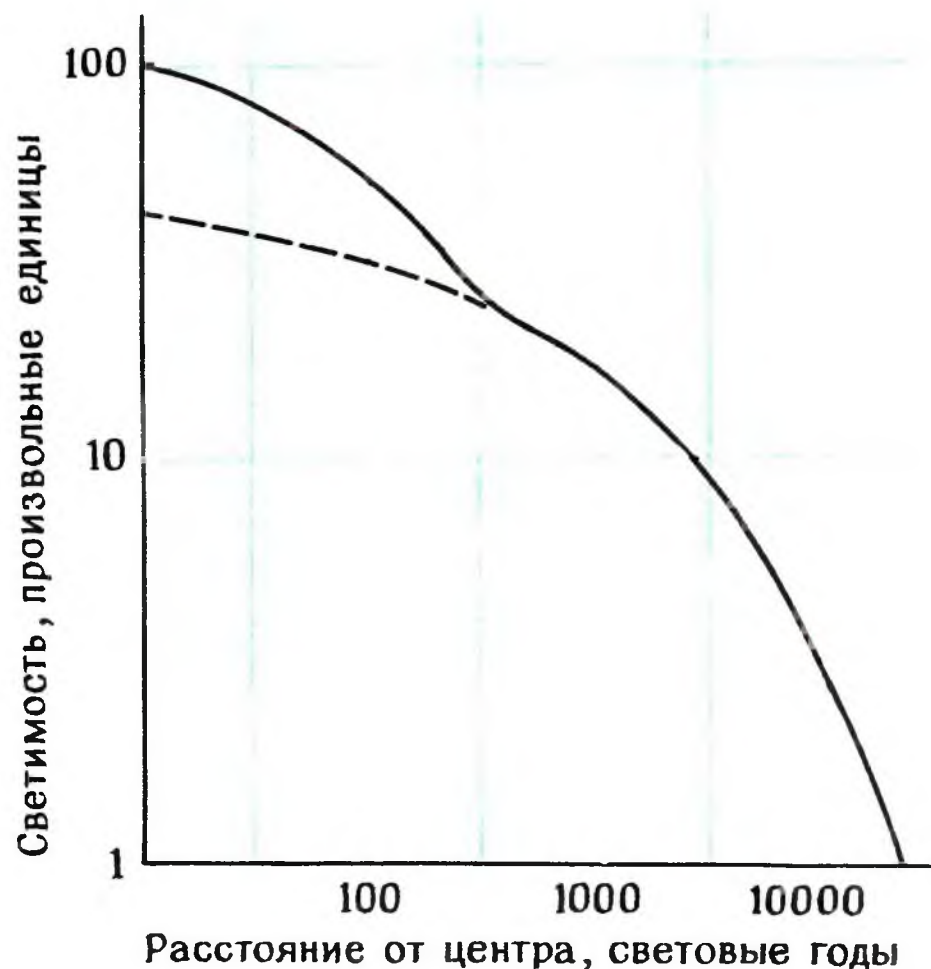


Рис. 8.8. Фотография шарового скопления NGC 6624. (М. Н. Liller, В. W. Carney. *Astrophys. J.*, **224**, 385. С любезного разрешения М. Лиллера.)



Рис. 8.9. Фотография галактики М 87. Обратите внимание на выброс, исходящий из центра. Тщательные исследования центральной области этой галактики наводят на мысль, что в ее ядре может находиться черная дыра массой 5 млрд. масс Солнца. (Фото Маунт-Паломарской обсерватории.)

Рис. 8.10. Профиль светимости М 87. Обратите внимание на то, что кривая отклоняется от плоского плато, показанного штриховой линией. Светимость вблизи центра резко повышается, указывая на присутствие в центре М 87 компактного источника энергии. Напрашивается объяснение, что этот источник – черная дыра. И светимость, и расстояние приведены в логарифмической шкале. От внешней границы галактики к центру светимость возрастает в 100 раз.



лучше изучить область ядра галактики. Они обнаружили, что профиль яркости галактики, вместо того чтобы стать более плоским, резко повышается к центру, как показано на рис. 8.10. Такое повышение свидетельствует о сильном сгущении звезд в области ядра, что в свою очередь указывает на присутствие массивного гравитирующего объекта, который и заставляет звезды сгущаться в центре. Что же это за объект? Рассмотрев несколько возможностей, наблюдатели решили, что черная дыра в данном случае подходит лучше всего.

Другая группа астрономов (из Обсерваторий Хэйла, Национальной обсерватории Китт-Пик, Университетского Колледжа в Лондоне и университета Виктории) провела спектроскопические исследования области ядра. Их измерения позволили оценить разброс скоростей звезд в этой области. Разброс оказался больше ожидаемого, и это снова дало основания полагать, что он вызван наличием в ядре галактики М 87 сверхмассивной черной дыры.

## СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ?

Совсем недавно теорию сверхмассивных черных дыр стали применять и в других областях астрономии, там, где обнаружилось, что большие количества энергии поступают из малых объемов. Примерами таких приложений могут служить квазары и центральные области радиогалактик.

Насколько велико доверие к весьма

умозрительным теориям, которые мы рассматривали в этой главе и в гл. 7? Не секрет, что многие ведущие астрономы считают, что надежды, возлагаемые на черные дыры, несколько преувеличены. Поскольку черные дыры (по определению!) ненаблюдаемы, их существование приходится выводить из косвенных измерений. Все это – хорошая иллюстрация



к афоризму Шерлока Холмса, знаменитого сыщика из книг Артура Конан Дойла, который можно перефразировать так: «Когда все остальные правдоподобные астрофизические объяснения отпадают, версия черной дыры, какой бы причудливой она ни казалась, должна приниматься как истинная».

Некоторые астрономы считают, что другие правдоподобные астрофизические

объяснения еще не исчерпаны, поэтому для вывода о существовании черных дыр нет достаточных оснований. Этот скептицизм по поводу астрономических черных дыр, связанный отчасти с их фантастичностью, снова напоминает о «черной дыре Калькутты». Ее описание настолько кошмарно, что некоторые историки сомневаются в том, что это событие действительно произошло!

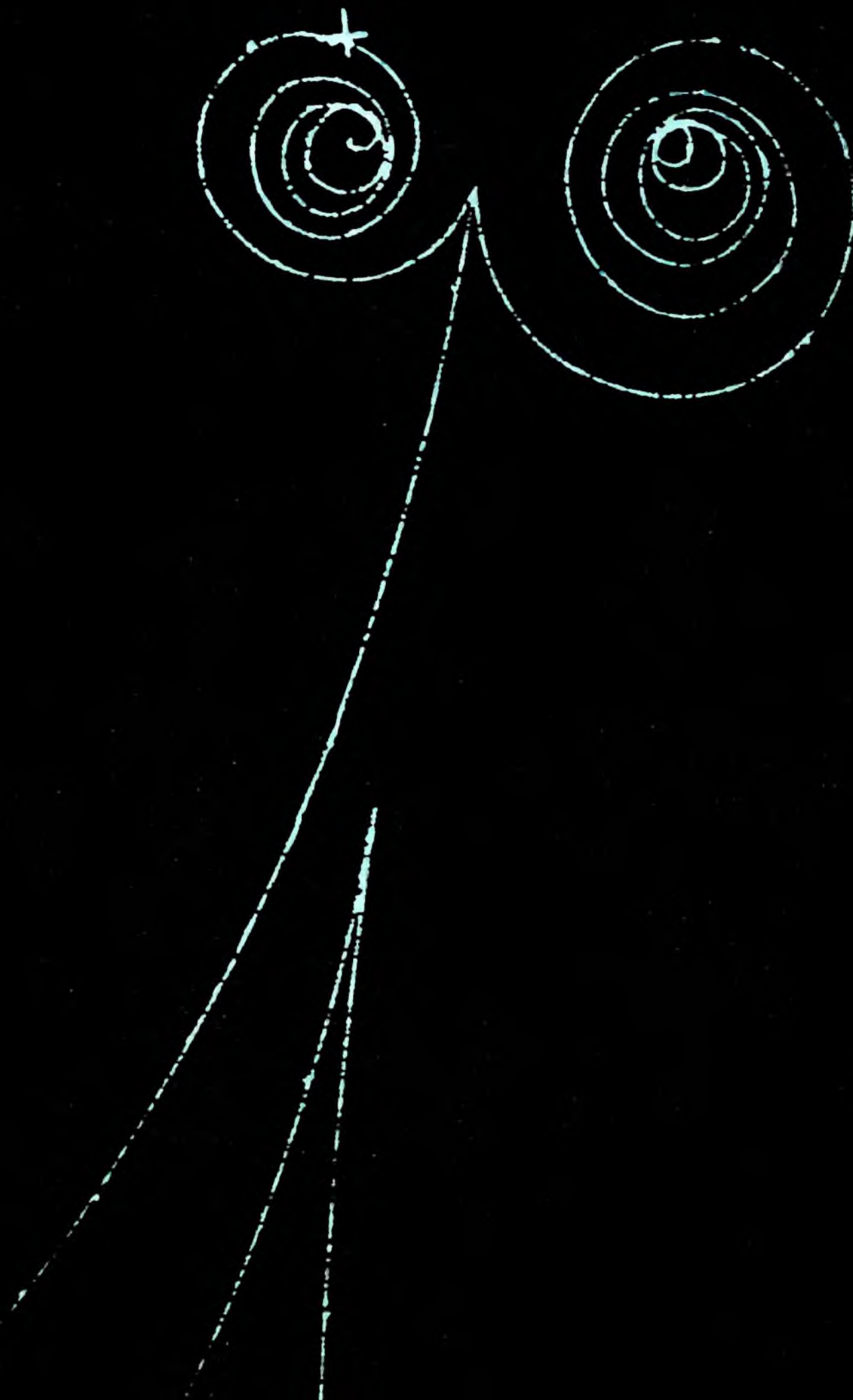


## Белые дыры – миф или реальность?

Рождение пары частица – античастица в лаборатории.

Гамма-квант высокой энергии сталкивается с электроном (вверху в центре), порождая энергичный электрон отдачи (слева в центре) и электрон-позитронную пару (вверху слева и справа). Второй гамма-квант порождает еще одну электрон-позитронную пару (в центре).

(С любезного разрешения Лаборатории Лоренс, Беркли, Калифорнийский университет.)





## МОГУТ ЛИ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ БЫТЬ БЕЛЫМИ?

До 1974 г. физики думали, что черная дыра — это воплощение тьмы. Горизонт событий представляет собой непроницаемую преграду, которая не позволяет узнать, что творится внутри черных дыр. Даже сингулярность пространства-времени (рассмотренная в гл. 7) скрыта от внешнего наблюдателя под горизонтом событий. По-видимому, «космическая цензура» не дремлет и не допускает никакой утечки информации из-под горизонта событий!

В начале 1974 г. кембриджский ученый Стивен Хокинг нанес этим представлениям тяжелый удар, получив один замечательный результат. Проделав сложные

вычисления, Хокинг пришел к заключению, что *черная дыра излучает!* Черной дыре любого вида — вращающейся и не вращающейся — можно приписать «температуру», и если она будет окружена областью с более низкой температурой, то она будет излучать энергию.

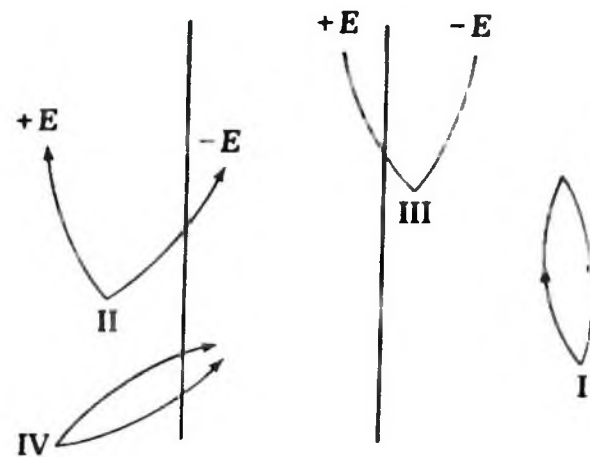
Чем же так отличались вычисления Хокинга от других, что привели его к совсем другим выводам? Попробуем, хотя бы качественно, понять, в чем тут различие.

На рис. 9.1, *а* приведена пространственно-временная диаграмма для пустоты, или *вакуума*. Как и следовало ожидать, на ней нет ничего! Но эти ожидания ос-



Рис. 9.1. Пространственно-временные диаграммы для: *а* — классического вакуума и *б* — квантового вакуума. В классическом вакууме ничего не происходит. В квантовом вакууме непрерывно рождаются и аннигилируют пары частица — античастица. Отметим, что ни частица, ни античастица не могут жить долго, и в среднем эти флуктуации в любой момент времени дают нулевой эффект.

Рис. 9.2. Вертикальные линии обозначают границу черной дыры. Случаи I–IV – четыре возможных исхода при возникновении в вакууме пары частица – античастица. Конечный результат определяется законами квантовой механики в искривленном пространстве-времени черной дыры.



новываются на законах движения и взаимодействия классической физики, которые применимы к окружающему нас макромиру. Именно из наблюдений макромира возникли у Галилея и Ньютона представления о движении, а у таких физиков, как Кулон, Ампер, Фарадей и Максвелл, – законченная картина электромагнитных взаимодействий. Однако к концу XIX в. изучение микромира, т.е. изучение свойств атомов и молекул, стало выявлять трещины в классическом фундаменте. Согласно новым правилам квантовой теории, строение микромира оказалось куда сложнее, чем можно было себе представить, исходя только из наблюдений макромира. На рис. 9.1, б показано, например, представление о вакууме в квантовой теории. Это вовсе не пустота, а мешанина из виртуальных частиц и античастиц. Виртуальная частица или античастица не существует постоянно – вскоре после рождения пара частица – античастица аннигилирует. Как показано на рис. 9.1, б, в вакууме постоянно идет рождение и аннигиляция частиц и античастиц. И, хотя, как и в классическом случае на рис. 9.1, а, в целом средний эффект нулевой, флуктуации вокруг нулевого состояния значительны, и ими пренебрегать нельзя. В ряде экспериментов в атомной физике их проявления четко наблюдаются.

В процессе Хокинга квантовые флуктуации играют ключевую роль. На рис. 9.2 показана черная дыра в квантовом вакууме. Две прямые изображают

горизонт событий на пространственно-временной диаграмме. Здесь также происходят квантовые флуктуации. В случае I на рис. 9.2 пара частица – античастица, как и прежде, рождается и аннигилирует; черная дыра на эту пару не влияет. В случае II одна из частиц пары притягивается черной дырой и проваливается под горизонт событий. Ее античастице удается спастись и впоследствии достичь удаленных от черной дыры областей.

Как воспримет внешний наблюдатель случай II? Он зарегистрирует появление частицы, которая кажется порожденной черной дырой! Если одна из частиц виртуальной пары обладает энергией  $E$ , то энергия другой равна  $-E$  (полная энергия пары равна нулю). Если уцелела частица с энергией  $E$ , то черная дыра генерировала в этом процессе энергию  $E$ .

А что произошло при этом с энергией черной дыры? Поскольку она поглотила объект с энергией  $-E$ , ее полная энергия уменьшилась на величину  $E$ . В целом кажется, что черная дыра породила частицу с энергией  $E$  и одновременно потеряла энергию  $E$  из своего запаса.

А что, если черная дыра поглощает частицу с энергией  $E$  и остается парная частица с энергией  $-E$ ? В этом случае – обозначим его цифрой III – черная дыра приобретает энергию. Наконец, можно представить себе и такой процесс (случай IV), при котором обе частицы пары падают в черную дыру.

В своих вычислениях Хокинг подсчитал скорости, с которыми могут идти все эти



процессы. Получилось, что в конечном счете преобладает случай II, т.е. черная дыра в вакууме порождает частицы с положительной энергией.

Количественные расчеты сложны и связаны с некоторыми еще не окончательно решенными проблемами. Однако специалисты в этой области соглашаются, что предсказанный Хокингом эффект должен иметь место. Попытаемся поэтому понять, какие следствия вытекают отсюда для физики черных дыр.

Прежде всего, в отличие от механизма Пенроуза для извлечения энергии из черных дыр (см. гл. 8) процесс Хокинга годится для черных дыр любого типа. Для простейшей из них — шварцшильдовской — излучение энергии от черной дыры массы  $M$  оказывается таким же, как от тела, нагреваемого до постоянной температуры, равной

$$T = 6 \cdot 10^{-8} M_{\odot} / M \text{ кельвинов.}$$

В этой формуле температура измеряется по абсолютной (кельвиновской) шкале. Нуль по абсолютной шкале соответствует примерно  $-273^{\circ}\text{C}$ , а градуировка этих шкал одинакова. Например, вода (на уровне моря) кипит при  $100^{\circ}\text{C}$ , т.е. при  $373\text{ K}$  по абсолютной шкале.

Какова температура черной дыры? Мы знаем, что масса черных дыр, образующихся при коллапсе звезд, превышает  $3 M_{\odot}$ . Значит, температура черной дыры массой  $6 M_{\odot}$  равна  $10^{-8}\text{ K}$ , т.е. одной стомиллионной доле градуса. Какое уж там излучение при таких низких температурах! Поэтому результат Хокинга не влияет на наше представление о крошечной тьме черных дыр — по крайней мере звездного происхождения и сверхмассивных. Но пока мы никаких других типов черных дыр и не встречали. Значит ли это, что процесс Хокинга представляет лишь академический интерес?

Заметим, что температура черной дыры

растет с уменьшением ее массы. Если бы существовали черные дыры массами значительно меньше  $1 M_{\odot}$ , они были бы много горячее. Так, например, черная дыра массой восемь триллионных массы Солнца имела бы температуру около  $7200^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре тело раскаляется добела. Итак, черная дыра с достаточно низкой массой раскалена добела!

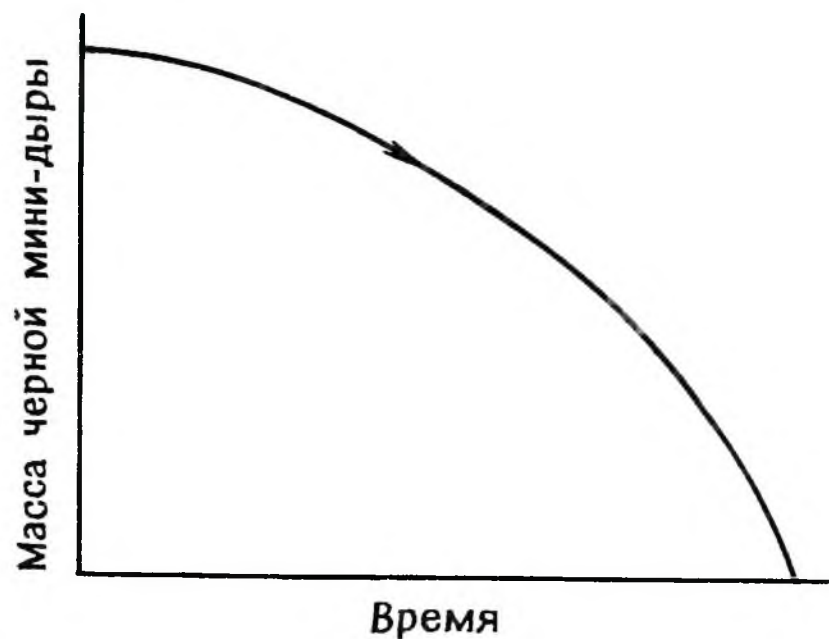
Могут ли такие маломассивные черные дыры вообще возникать? Некоторые ученые считают, что в первые несколько мгновений после рождения Вселенной (гл. 10) геометрия пространства-времени могла быть очень неоднородной. На этой ранней стадии геометрические неоднородности могли проявиться как крошечные черные дыры. Масса таких черных мини-дыр могла составлять всего  $10^{14}\text{ г}$ . Естественно, что для них процесс Хокинга имеет большое значение.

На рис. 9.3 показано, что происходит с массой черной мини-дыры со временем. Излучая энергию, она теряет массу. Вследствие потери массы в соответствии с только что выписанной формулой температура черной дыры поднимается. Поэтому черная дыра начинает терять энергию еще быстрее. Темп процесса нарастает, и за конечный промежуток времени черная дыра целиком «испаряется».

Может ли этот промежуток быть достаточно долгим, чтобы такая первичная черная дыра дожила до наших дней? Возраст Вселенной — около 10 млрд. лет (см. гл. 10). Какой должна быть масса черной мини-дыры, чтобы она смогла продержаться столько времени? Ответ: по меньшей мере около  $10^{14}\text{ г}$ .

Предполагалось, что первичная черная дыра массой около  $10^{14}\text{ г}$  должна находиться «при последнем издыхании» и поэтому ее «испарение» должно быть очень быстрым. Наблюдаемо ли оно? Расчеты показывают, что продуктами испарения

Рис. 9.3. На графике видно, как уменьшается масса черной мини-дыры со временем из-за излучения в ходе процесса Хокинга. На последних стадиях скорость уменьшения велика. (Масштаб произвольный.)



будут частицы и излучение очень высокой энергии. С начала 1970-х годов помещенные на спутниках детекторы гамма-лучей фиксировали вспышки гамма-излучения. В типичной вспышке гамма-кванты, т. е. фотоны очень высоких энергий, излучаются источником в течение очень короткого промежутка времени

(порядка 1–10 с). Не вызваны ли эти вспышки испарением первичных черных дыр? Подробные исследования Б. Карра дают отрицательный ответ; тем не менее первичные черные дыры на последних стадиях жизни, возможно, создают и другие наблюдаемые эффекты.

## БЕЛЫЕ ДЫРЫ

Поскольку черные дыры Хокинга быстро выделяют энергию и должны быть видны как очень яркие объекты, их иногда называют белыми дырами. Это приводит к некоторой путанице, потому что термином *белая дыра* пользовались уже задолго до открытия Хокинга для описания другого явления.

Эти белые дыры тоже взрывообразно выделяют энергию, но в отличие от черных мини-дыр квантовые эффекты тут ни при чем. Чтобы понять, как действуют эти *классические белые дыры*, нужно вспомнить явление гравитационного коллапса, приводящего к образованию черной дыры (см. гл. 7).

Рассматривая это явление, мы помещали одного наблюдателя, *B*, на поверхность коллапсирующей звезды, а другого, *A*, — вдали от нее. Посылаемые от *B* к *A* световые волны претерпевали *красное смещение* по двум причинам: частично за

счет гравитации, а частично за счет эффекта Доплера.

Белая дыра — это *обращенный во времени коллапсирующий объект*, с точки зрения *B*. Что такое обращение во времени? Наблюдая любое природное явление, мы видим выстроенную в хронологическом порядке последовательность состояний (того, что мы наблюдаем). Хороший пример — кинофильм, при просмотре которого нам кажется, что на экране происходит некоторое событие. Но кинолента представляет собой последовательность неподвижных кадров, которые быстро сменяют друг друга перед нашими глазами. Если прокрутить эту последовательность кадров в обратном порядке, то фильм будет идти от конца к началу. Обратив порядок, в котором происходит заснятое на пленку событие, в полученном фильме мы увидим новое событие.

Во многих кинопроекторах ленту мож-



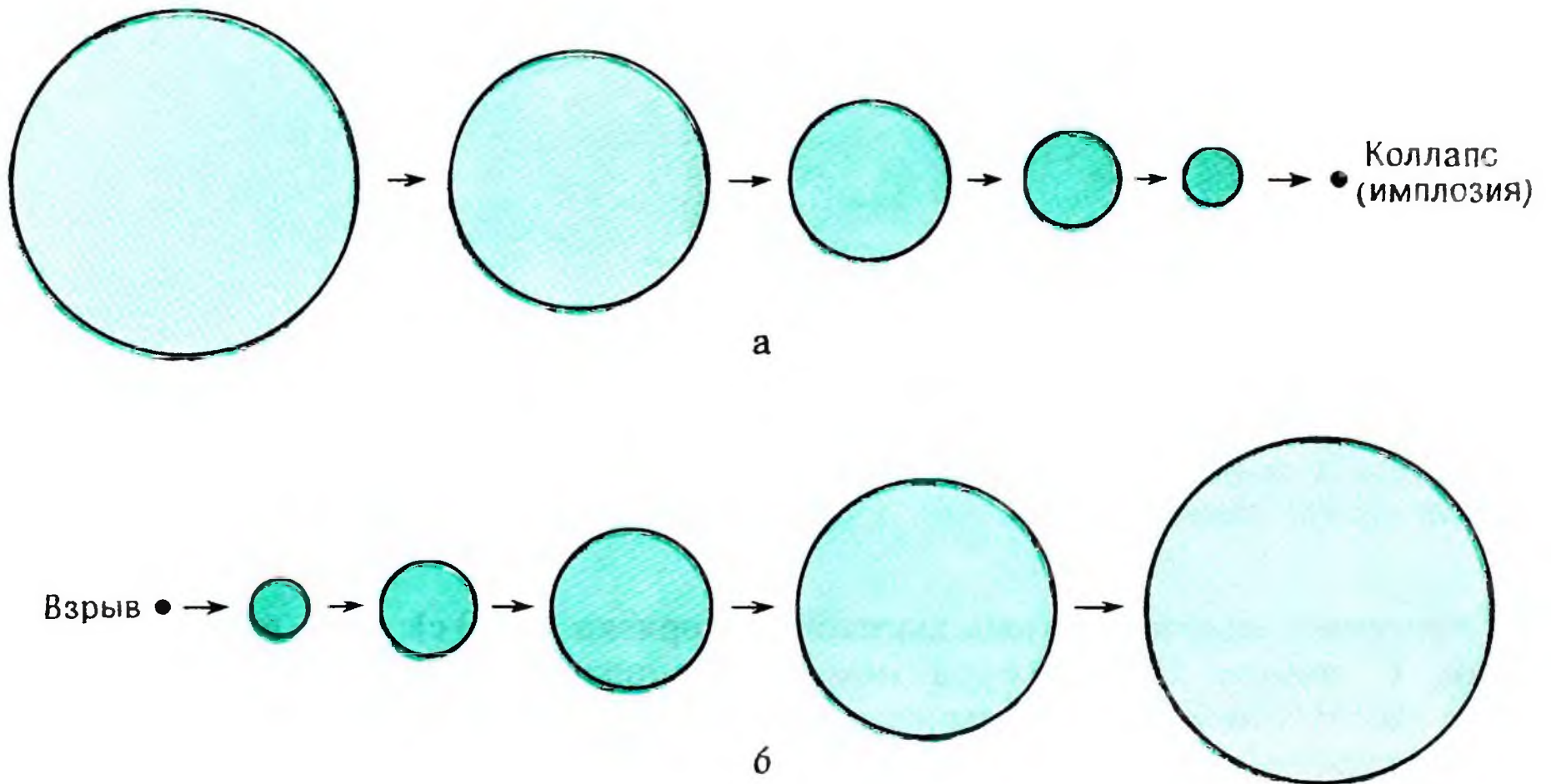


Рис. 9.4. *a* – несколько стадий коллапса звезды в сингулярность изображены в хронологическом порядке. *б* – обращенная во времени последовательность тех же стадий. Теперь кажется, что объект рождается в результате взрыва и затем расширяется. Время измеряется в системе координат, связанной с наблюдателем на поверхности звезды.

но запускать и в обратную сторону. Этим нередко пользуются для того, чтобы показывать на экране новые забавные ситуации: люди шагают задом наперед, еда вынимается изо рта, а воды Ниагарского водопада текут вспять!

События, которые мы видим, прокручивая кинофильм в обратную сторону, – это обращенная во времени последовательность нормальных событий. Для физика обращение во времени полно глубокого смысла. Почти все основные законы физики, будь то законы гравитации, электричества, магнетизма или законы взаимодействия в атомном ядре, *симметричны во времени*. Это означает, что у всякого события, происходящего согласно этим законам, есть обращенная во времени версия, которая по тем же самым законам тоже может происходить. Законы, взятые сами по себе, не делают различий между событием и его обращением во времени. Почему же, если такие

«странные» события тоже возможны, они не происходят в действительности? Считается, что, несмотря на временную симметрию основных физических законов, во Вселенной действует какой-то процесс отбора, в силу которого некоторые события оказываются допустимыми, а их обращения во времени – нет.

На рис. 9.4, *a* изображены отдельные стадии коллапса массивной сферической звезды. Это как бы кадры кинофильма о гравитационном коллапсе. На рис. 9.4, *б* эти «кадры» переставлены в противоположном порядке и мы видим последовательность стадий расширения. Вместо коллапса в сингулярность, показанного на рис. 9.4, *a*, теперь происходит взрыв из сингулярности. Обратите внимание на то, что сингулярное состояние, которое было конечным состоянием коллапса, теперь стало начальным состоянием взрыва.

Поскольку общая теория относительности Эйнштейна симметрична относи-

тельно времени, она допускает как событие со взрывом (рис. 9.4, б), так и с коллапсом (рис. 9.4, а). Эта симметрия позволяет нам говорить о белой дыре как об обратном во времени явлении черной дыры.

Следует, однако, обратить внимание на то, что события, изображенные на

рис. 9.4, симметричны лишь в системе отсчета, связанной с наблюдателем на поверхности – с нашим наблюдателем *B* из гл. 7. Для внешнего наблюдателя *A* черная и белая дыры не кажутся взаимобратными по времени. Сейчас мы увидим почему.

## ФИОЛЕТОВОЕ СМЕЩЕНИЕ ОТ БЕЛЫХ ДЫР

Посмотрим, как решается задача о распространении света в случае белой дыры. На рис. 9.5 изображена радиальная световая волна, распространяющаяся от *B* к *A*. Как и в случае коллапсирующего объекта, свет идет из области сильной гравитации в область слабой гравитации. Поэтому если бы наблюдатель *B* покоился относительно *A*, то свет, посылаемый от *B* к *A*, испытывал бы гравитационное красное смещение (см. гл. 7).

Однако *B* не покоится относительно *A*. Поверхность, на которой находится *B*, вследствие расширения движется к *A*, и, значит, следует учитывать изменения длины волны, вносимые эффектом Доплера. Эффект Доплера учитывался и в рассмотренной в гл. 7 задаче о коллапсе; различие в том, что теперь эффект Доплера приводит к увеличению частоты, т. е. к уменьшению длины волны идущего от *B* к *A* света. Если говорить о видимом

свете, то можно ожидать, что вследствие эффекта Доплера все длины волн сместятся к фиолетовому концу спектра (поскольку фиолетовый цвет соответствует самым коротким волнам видимого света).

Таким образом, имеются два противоположных эффекта – гравитационный, который способствует увеличению длины световой волны, идущей от *B* к *A* (красное смещение), и эффект Доплера, оказывающий противоположное влияние (фиолетовое смещение). Какой же из них будет преобладать?

Качественно ответ на этот вопрос дает рис. 9.6. Здесь изображена зависимость  $\lambda_A/\lambda_B$ , отношения длины волны, принятой *A*, к длине волны, излученной *B*, от радиуса белой дыры в момент излучения. Штриховая прямая соответствует  $\lambda_A = \lambda_B$ . Выше этой прямой смещение красное, а ниже – фиолетовое. Ясно, что на

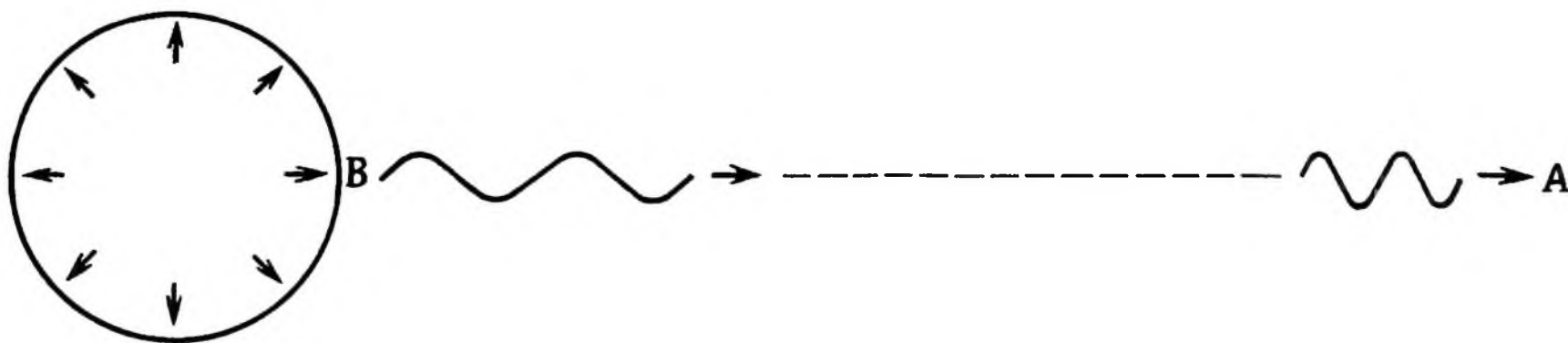


Рис. 9.5. Свет, посланный наблюдателем *B* и *A* в радиальном направлении на начальных стадиях эволюции белой дыры, может испытывать фиолетовое смещение. Показано фиолетовое смещение излучения от *B*: к моменту прихода к *A* его длина волны уменьшится вдвое.



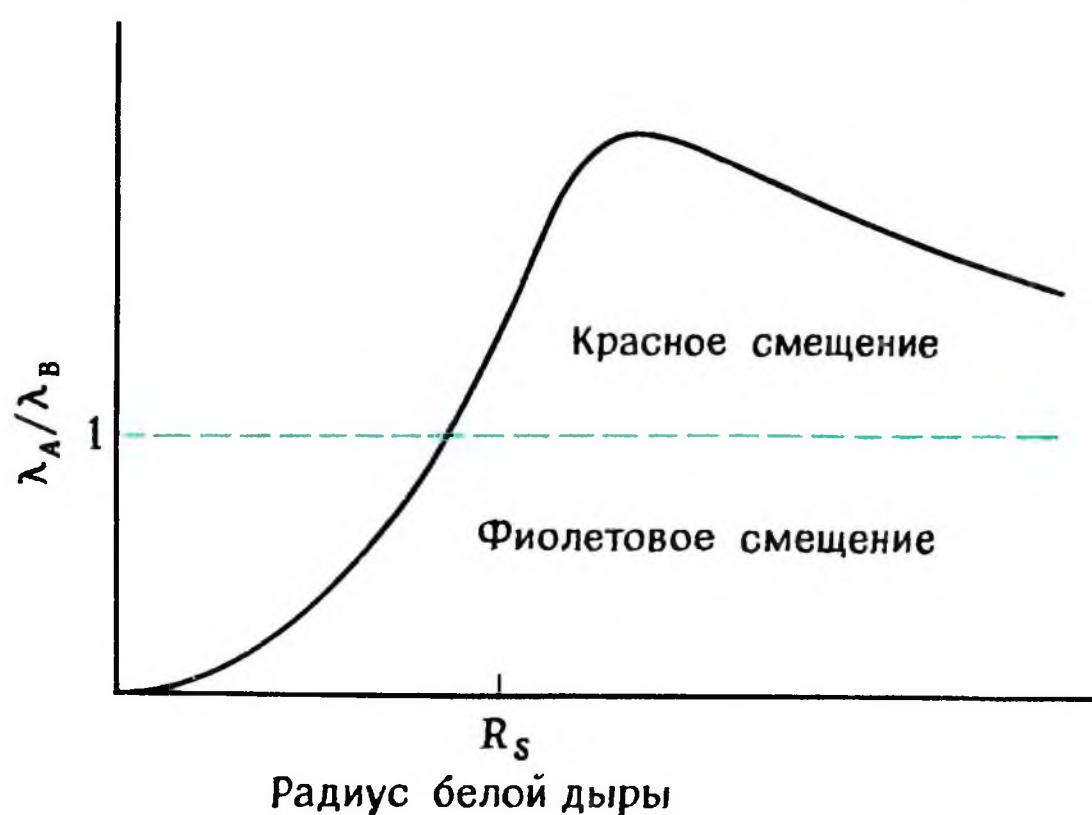


Рис. 9.6. На ранних стадиях расширения белой дыры  $\lambda_A/\lambda_B$  очень мало, т.е. имеют место большие фиолетовые смещения. С замедлением расширения белой дыры это отношение растет. Оно может стать равным 1 либо до того, либо после того, как белая дыра вырвется из-под своей сферы Шварцшильда радиуса  $R_S$ . (На рисунке это происходит до того, как достигается радиус Шварцшильда.) Затем начинает преобладать гравитационное красное смещение. На поздних стадиях взрыва отношение  $\lambda_A/\lambda_B$  падает, поскольку гравитационное красное смещение также ослабевает.

ранних стадиях расширения, когда скорость движения  $B$  к  $A$  велика, преобладает эффект Доплера и в итоге получается фиолетовое смещение. На более поздних стадиях расширение замедляется, и гравитационное красное смещение берет верх над доплеровским фиолетовым смещением.

Свет с поверхности белой дыры вырывается из глубин сферы Шварцшильда с  $R = R_S$ , причем несет тем большую энергию, чем глубже поверхность. Таким образом, горизонт событий, который в физике черных дыр играет роль «космического цензора», не мешает сигналам от  $B$  ускользать с поверхности белой дыры.

Тому, кто привык лишь к черным дырам, такое поведение белых дыр может показаться странным. Тем не менее дело обстоит именно так.

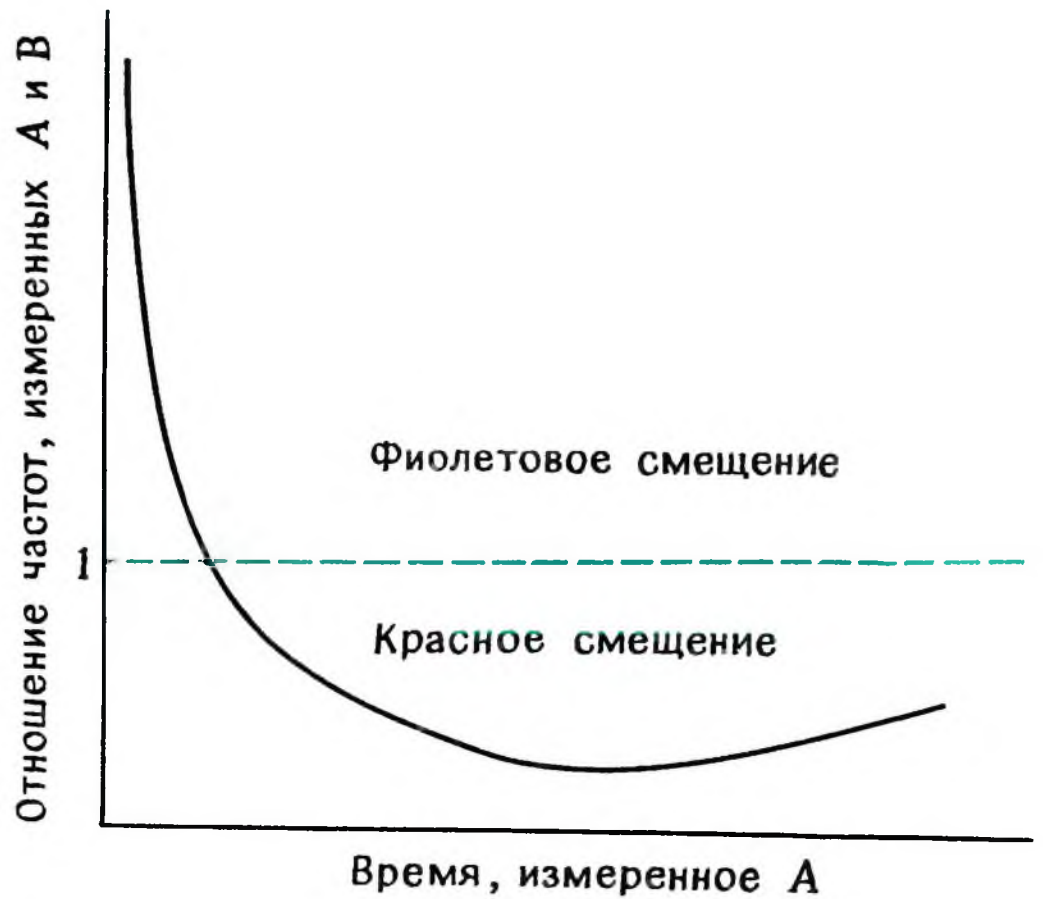
В 1964 г. Фред Хойл, Джон Фолкнер и автор этих строк впервые высказали предположение, что благодаря этому свойству белые дыры — идеальные претенденты на роль генераторов излучения и частиц высоких энергий. Десять лет спустя Кришна Аппарао, Нареш Дадхик и автор продолжили эти исследования. Прежде чем закончить эту главу, мы вкратце обсудим, насколько правдоподобно предположение о белых дырах как о генераторах частиц высоких энергий.

## БЕЛЫЕ ДЫРЫ КАК УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ

В космосе встречается несколько типов источников частиц или излучения высоких энергий. Частицами самых высоких энергий в бомбардирующих земную атмосферу космических лучах являются протоны; энергия некоторых из них достигает  $10^{20}$  эВ. Чтобы представить себе, сколь велико это число, достаточно

вспомнить, что оно примерно в сто миллиардов раз больше, чем энергия покоящегося протона. Энергия возрастает столь сильно потому, что протон движется со скоростью, очень близкой к скорости света. Что заставляет его мчаться с такой огромной скоростью? Обычные известные астрономам источники — взры-

Рис. 9.7. Здесь приведена зависимость отношения измеренных наблюдателями  $A$  и  $B$  частот от времени по часам  $A$ . Фиолетовое смещение имеет место в течение очень короткого промежутка времени в самом начале расширения. Это означает, что если белая дыра и порождает частицы и излучение высоких энергий, то очень малое время, т. е. вспышкообразно. (Масштаб произвольный.)



вающаяся сверхновая (гл. 4) или быстро вращающийся пульсар (гл. 7) — вряд ли способны породить столь энергичные частицы.

С тех пор как начала развиваться рентгеновская и гамма-астрономия, стали обнаруживаться потоки фотонов высоких энергий. Особый интерес для нас здесь представляют «вспыхивающие» источники, т. е. источники, испускающие рентгеновские или гамма-лучи в течение очень коротких — порядка секунды или меньше — промежутков времени. Любой астрономический объект с таким коротким характерным временем изменений с необходимостью должен быть компактным. Общее правило, по которому можно «на пальцах» прикинуть линейный размер  $L$  источника, записывается в виде простого неравенства

$$L < cT,$$

т. е.  $L$  не превосходит произведения скорости света  $c$  на характерное время изменений  $T$ . Например, размер источника с характерным временем изменений  $T = 1$  с не превышает 1 световой секунды (равной 300 000 км).

Что же это за механизм, который, действуя в небольшом объеме, может породить вещество и излучение таких высоких энергий? По-видимому, из многих других рассматриваемых кандидатур нужным требованиям отвечает белая дыра.

Белая дыра создает очень большие фиолетовые смещения у световых волн, распространяющихся наружу с ее поверхности (рис. 9.6). Однако фаза больших фиолетовых смещений длится лишь до тех пор, пока размеры белой дыры очень малы. На рис. 9.7 мы видим, что этот промежуток времени крайне мал, и поэтому излучение белой дыры носит характер *вспышки*. На ранних стадиях фиолетовое смещение может быть достаточным, чтобы превратить видимое излучение в рентгеновские или даже в гамма-лучи.

Тот же эффект способен разогнать частицы, вылетающие с поверхности белой дыры, до тех высоких значений, которые наблюдаются в космических лучах. Как и в случае излучения, этот эффект заметен лишь на ранних стадиях взрыва белой дыры.





Рис. 9.8. Фотография галактики NGC 5128, отождествляемой с радиоисточником Центавр А. Этот радиоисточник (как и многие ему подобные) мог возникнуть в результате взрыва. (Фото Маунт-Паломарской обсерватории.)

Белые дыры могли бы существовать в астрономических объектах с явными признаками взрывов. Квазары, радиога-

лактики и ядра сейфертовских галактик — вот возможные вместилища белых дыр (рис. 9.8 и 9.9).

### СУЩЕСТВУЮТ ЛИ БЕЛЫЕ ДЫРЫ?

Несмотря на всю свою привлекательность для астрофизики высоких энергий, белые дыры не завоевали такого признания, какого они заслуживают. В отличие от черных дыр, наблюдения которых по

необходимости должны быть косвенными, белые дыры можно было бы наблюдать непосредственно. Почему же астрономы явно пренебрегают белыми дырами?





Рис. 9.9. Сейфертовская галактика NGC 1068, в ядре которой, как полагают, видны признаки взрыва. На нижней половине та же фотография недодержана, чтобы показать только область ядра галактики. (Индийский институт астрофизики.)

Есть несколько причин, по которым белые дыры были встречены прохладно. Одна, вполне понятная, состоит в том, что мы не знаем, что заставляет белую дыру взрываться. Ясно, что ее начальное состояние – сингулярность. Но как возникло это состояние в ходе нормальной астрономической эволюции? Другое де-

ло – черные дыры: для них, по крайней мере для звездных черных дыр, известен способ образования. В гл. 7 мы видели, что такие черные дыры образуются в конце эволюции массивных звезд.

В 1964 г. Нееман и И. Д. Новиков независимо высказали предположение, что белые дыры это области «запоздавшего»



расширения вещества – запоздавшего по отношению к той эпохе, когда около 10 млрд. лет назад начала расширяться вся Вселенная (см. гл. 10). Тогда сингулярность, породившая белую дыру, – это «задержавшаяся» часть общей сингулярности Вселенной, которая начала расширяться сравнительно недавно.

После работ Д.М. Эрдли в США, а также К. Лейка и Р. Редера в Канаде возможности такого сценария запоздавшего ядра для белых дыр, по-видимому, значительно сузились. Вот в чем трудность: на ранних стадиях расширения белой дыры ее внешняя поверхность может сталкиваться с окружающим веществом. Относительно поверхности белой дыры это вещество движется внутрь, и даже небольшой плотности его достаточно, чтобы подавить стремление поверхности белой дыры к расширению. В результате движение наружу замедляется, и в конечном счете объект коллапсирует в черную дыру. Исследователи пришли к выводу, что по этой причине белые дыры оказываются очень неустойчивыми объектами,

если только они возникают не сразу после рождения Вселенной. В таком случае польза, которую они могут принести для объяснения современных астрономических явлений, невелика.

Нам, однако, кажется преждевременным выносить приговор белым дырам на основании одних только этих возражений. В упомянутых исследованиях наши представления об устойчивости экстраполировались на ситуации, в которых геометрия пространства-времени была совсем иной, чем теперь. Даже в теории черных дыр – а их астрофизики рассматривали очень подробно – остались неясности. Белые дыры также достойны дальнейшего изучения.

Несмотря на сомнения, связанные с белыми дырами ограниченных размеров, астрономы без колебаний рассматривают самую большую белую дыру из всех возможных. Как мы увидим в гл. 10, согласно современным теориям, сама Вселенная может быть гигантской, безграничной белой дырой!



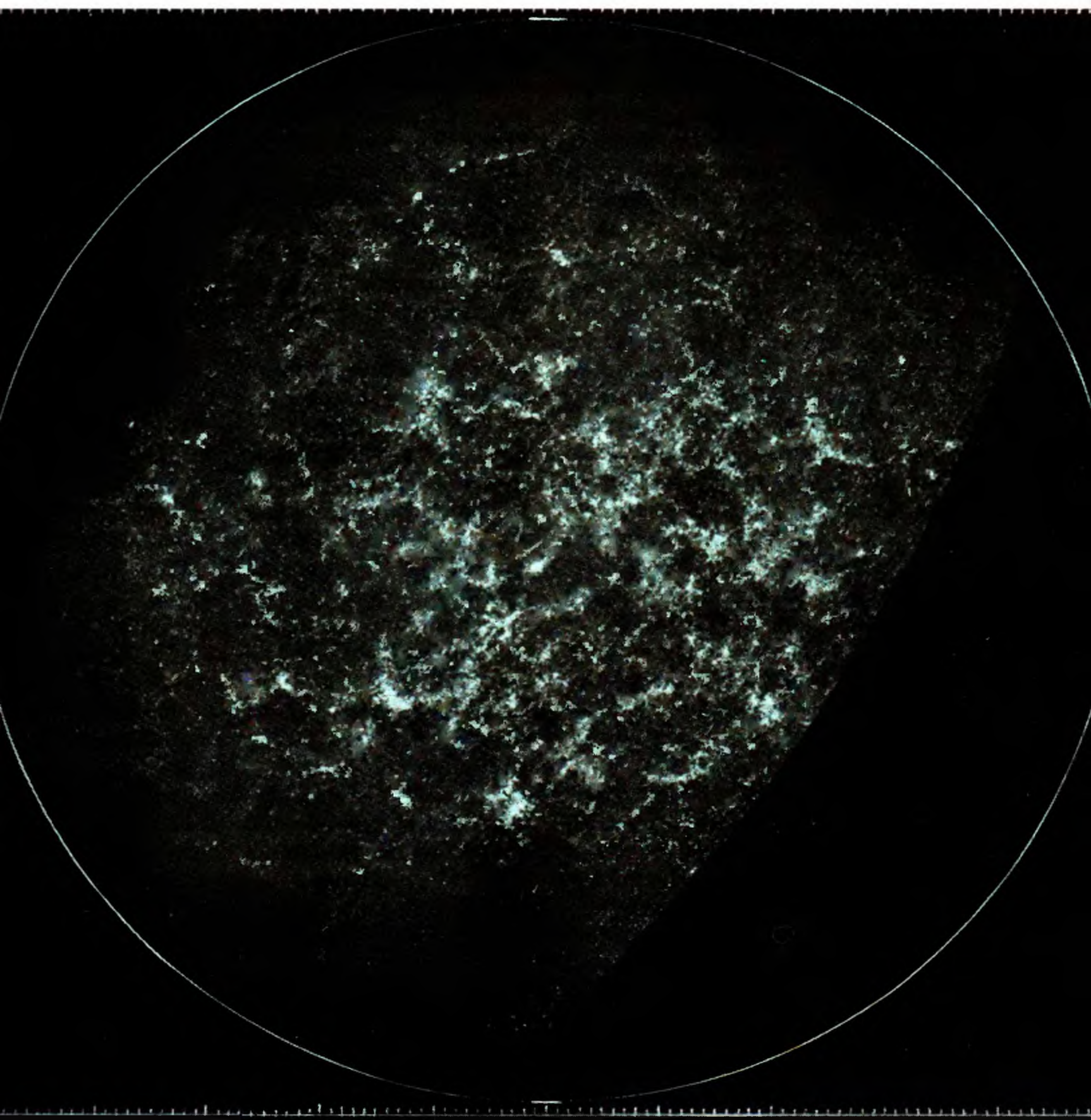
# 10

## Расширяющаяся Вселенная

Карта галактик в северном галактическом полушарии,  
изображающая крупномасштабную структуру Вселенной.

На карту нанесены все галактики вплоть до 19-й звездной величины.

Несмотря на явное наличие многочисленных скоплений галактик, в самом крупном масштабе  
распределение галактик выглядит равномерным. (С любезного разрешения Ф. Дж. Э. Пиблса.)





## СТАЦИОНАРНАЯ ВСЕЛЕННАЯ В ТЕОРИИ НЬЮТОНА

В 1690-х годах Исаак Ньютон попытался применить свой закон гравитации для решения весьма необычной задачи. При помощи своей теории Ньютон намеревался описать самую большую физическую систему, какую только можно представить, — Вселенную. Насколько же преуспел Ньютон в своей попытке?

В письме к Ричарду Бентли, датированном 10 декабря 1692 г., Ньютон описывал свои затруднения в следующих словах:

«Мне кажется, что если бы вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было бы равномерно рассыпано по всем небесам и каждая частица обладала бы природным тяготением ко всем остальным, а все пространство, по которому было бы рассыпано вещество, было конечным, то тогда вещество с краев пространства тяготело бы ко внутреннему веществу и вследствие этого падало к середине всего пространства и там соединялось бы в большую шаровидную массу. Но, если бы вещество было равномерно рассеяно по бесконечному пространству, оно никогда не собралось бы в одну массу».

Понять затруднение Ньютона поможет рис. 10.1, на котором изображено конечное и однородное распределение изначально покоящегося вещества в шаре. Будет ли шар всегда покоиться? Содержащееся в нем вещество обладает собственной силой гравитации, из-за которой различные участки шара притягиваются друг к другу, вследствие чего весь он

в целом сжимается. Такую самогравитацию мы встречали у звезд (гл. 4) и при образовании черной дыры (гл. 7). В случае звезды внутреннее давление противодействует самогравитации и поддерживает звезду в стационарном состоянии. При образовании черной дыры давление ничтожно мало по сравнению с самогравитацией, в результате чего наступает гравитационный коллапс объекта. А что произойдет с распределением вещества на рис. 10.1?

В силу нашего предположения об однородности силы давления в этой системе вообще не действуют! Поэтому шар претерпевает гравитационный коллапс: он не может оставаться стационарным. Шар не только сожмется сам, но притянет к себе любые частицы вещества, расположенные снаружи, как и отмечал Ньютон в своем письме.

Однако между нашей конечной системой, изображенной на рис. 10.1, и бесконечной Вселенной есть важное различие. Конечный шар коллапсирует к своему центру. А к чему будет коллапсировать Вселенная? Немного подумав, мы поймем, что в однородной бесконечной Вселенной *нет центральной точки*. А потому нет и общей тенденции к коллапсу!

Можно объяснить это и по-другому. Рассмотрим произвольную точку внутри шара на рис. 10.1. Если сложить все силы притяжения, действующие на нее со стороны остальных точек шара, мы получим, что она притягивается к центру ша-

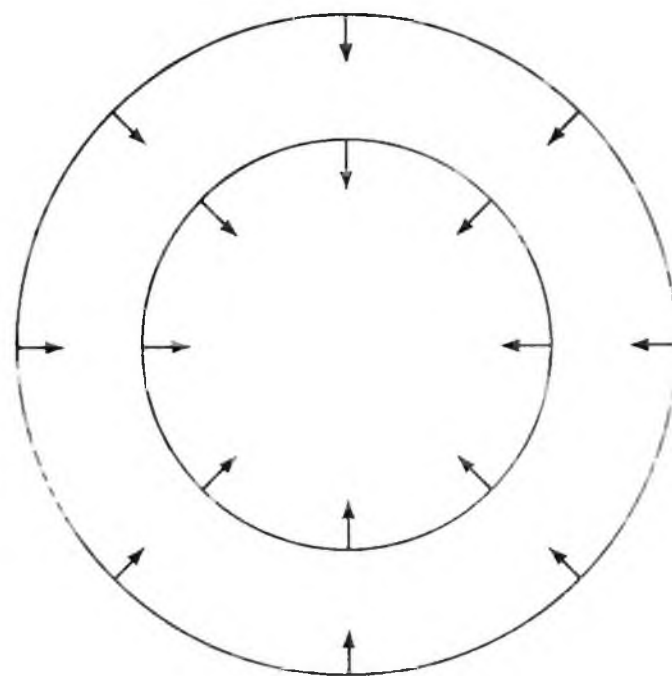


Рис. 10.1. В отсутствие давления, противодействующего гравитации, конечный сферический объект сжимается. На рисунке показаны граница шара и типичная сфера, концентрическая с граничной и лежащая внутри. Стрелками указано направление сжатия.

ра (в направлении, указанном стрелками). Однако произвольная точка в бесконечной Вселенной испытывает одинаковое притяжение в любом направлении и потому остается на месте.

Хотя из подобных рассуждений вытекает, что стационарная Вселенная теоретически возможна, Ньютон понимал, что она была бы крайне неустойчива. Небольшое отклонение от однородности приводило бы к усилению этого возмущения. В результате Вселенная распалась бы на отдельные сгустки вещества конечных размеров, которые, как и шар на

рис. 10.1, претерпели бы гравитационный коллапс. В следующем письме к Бентли, от 17 января 1693 г., Ньютон упоминает об этой неустойчивости:

«И еще труднее вообразить, что все частицы в бесконечном пространстве располагались бы одна меж другими так точно, что оставались бы неподвижными в полном равновесии. Ибо я полагаю это столь же трудным, как заставить не одну, а бесконечное множество иголок (столько, сколько частиц в бесконечном пространстве) стоять в точном равновесии на своих остриях».

## ВСЕЛЕННАЯ ЭЙНШТЕЙНА

В 1917 г., всего через два года после того, как была сформулирована общая теория относительности (гл. 6), Альберт Эйнштейн приступил к грандиозной задаче: построению модели Вселенной. Как и Ньютон, Эйнштейн считал, что в больших масштабах Вселенная стационарна. Как и в той модели, которую пытался построить Ньютон, во вселенной Эйнштейна предполагалось однородное и изотропное распределение вещества.

Термины *однородный* и *изотропный* означают следующее. Предполагается, что Вселенная, из какой бы точки ее ни рассматривали, в крупном масштабе выглядит одинаково. Во Вселенной нет пред-

почтительного положения, все позиции наблюдения равноправны. Это и есть свойство *однородности*. Далее возникает вопрос: заметим ли мы, наблюдая Вселенную из любой точки, какие-либо различия в ее строении, связанные с тем или иным направлением? Если никаких различий в зависимости от направления нет, то мы говорим, что Вселенная *изотропна*. Иными словами, если в однородной и изотропной Вселенной вы переместитесь с завязанными глазами из одной точки в другую, то, сняв повязку, вы не сможете сказать, куда вы попали и в каком направлении смотрите.

Обратите внимание, как резко отли-



чается такое представление от понятия Вселенной в греческой космологии. Греки придавали особое значение положению Земли; кроме того, земные наблюдатели видели совсем разное на севере, на юге, на востоке или на западе. Вселенная греков не была ни изотропной, ни однородной.

Даже с учетом этих упрощающих предположений о крупномасштабной структуре Вселенной модель Эйнштейна должна была количественно описывать реальный мир. Для этого Эйнштейн воспользовался своей теорией гравитации – общей теорией относительности.

В гл. 5 мы видели, что в окрестности массивного объекта, такого, как Солнце, геометрия пространства-времени отличается от евклидовой. В этом и заключается основная идея общей теории относительности: любое распределение вещества (и энергии) влияет на геометрию окружающего мира. Поэтому Эйнштейн ожидал, что геометрия крупномасштабной структуры Вселенной будет определяться распределением вещества (в виде звезд, галактик и т.п.). Но тут он столкнулся с одной принципиальной трудностью.

Из уравнений общей теории относительности, выведенных Эйнштейном в 1915 г., следовали модели Вселенной, которые были бы однородны и изотропны, но не стационарны. По сути дела, эта трудность ничем не отличалась от той, что беспокоила Ньютона двумя столетиями раньше: как может вещество оставаться стационарным при наличии самогравитации? Сомнения Ньютона, сформулированные в рамках его теории гравитации, хорошо иллюстрирует цитата, приведенная в начале этой главы.

Чтобы уравновесить самогравитацию Вселенной, Эйнштейн изобрел новую силу – силу *отталкивания*, описываемую так называемым  $\Lambda$ -членом. Согласно Эйнштейну, эта сила растет прямо пропорцио-

нально расстоянию между любыми двумя материальными телами. Универсальная постоянная  $\Lambda$  определяет величину этой силы отталкивания.

Согласно Эйнштейну, вещество Вселенной удерживается в равновесии двумя противоположно направленными силами – силой гравитационного притяжения и силой отталкивания, описываемой  $\Lambda$ -членом. Эйнштейн установил, что такая Вселенная может быть стационарной, если она конечна, но неограниченна.

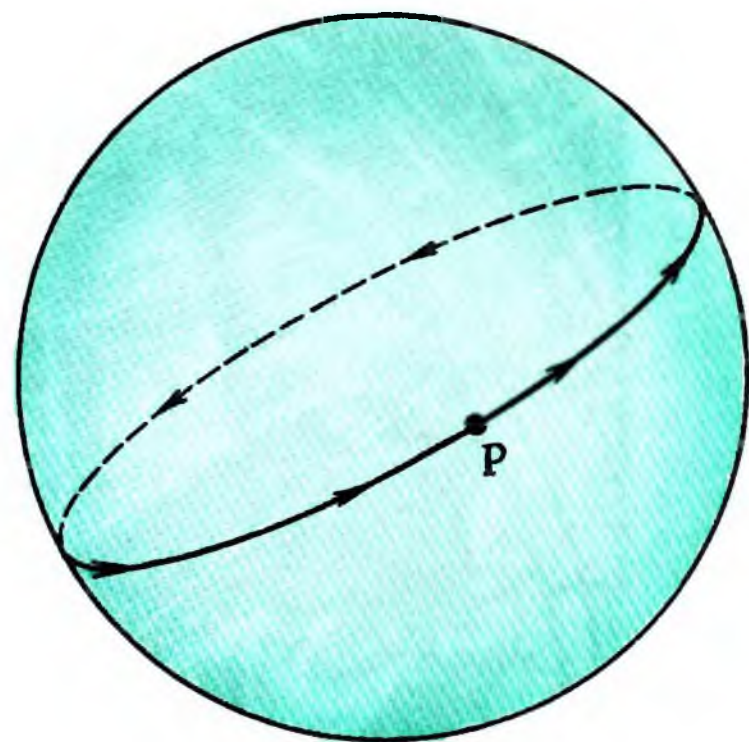
Может ли объект быть конечным и не иметь границ? Вот, например, сфера: площадь ее конечна, но где ее граница? Еще проще – окружность: ее длина тоже конечна, но ни начала, ни конца у нее нет! Окружность и сфера – это примеры одномерного и двумерного пространств. Можно ли по аналогии представить себе пространство трех измерений с конечным объемом, но без границ? Хотя наши органы чувств не способны помочь нам нарисовать интуитивную картину, но мы можем смело довериться математике. Математик скажет, что пространство, которое мы пытаемся вообразить, – это трехмерная граница (*гиперсфера*) четырехмерного гипершара. Точно так же, как окружность и сфера суть множества точек, равноудаленных от фиксированной точки пространства, называемой центром, гиперсфера – это трехмерная совокупность точек, каждая из которых находится на одном и том же расстоянии от центра. Если это расстояние, которое называется радиусом гиперсферы, равно  $R$ , то ее трехмерный объем

$$V = 2\pi^2 R^3.$$

У этого пространства нет границ! Подобно тому, как, двигаясь по обычной сфере, скажем вдоль меридиана (или любого большого круга), мы в конце концов вернемся в начальную точку, отправившись «по прямой» во вселенной Эйнштейна, мы тоже вернулись бы в исходное



Рис. 10.2. Луч света во вселенной Эйнштейна обходит всю вселенную и возвращается в исходную точку. Большой круг представляет собой «прямую линию» в неевклидовой геометрии сферы. Луч света, вынужденный двигаться по двумерной поверхности шара, пойдет по такому пути. Выйдя из  $P$ , он снова вернется в  $P$ . Нечто подобное нужно себе представить и в трехмерном пространстве вселенной Эйнштейна.



положение (рис. 10.2). Какой путь пришлось бы нам пройти, чтобы совершить один оборот по вселенной Эйнштейна? Ответ таков: длина пути равна  $2\pi R$ .

Уравнения Эйнштейна позволяют выразить  $R$  через  $\Lambda$ . Формула получается простая:

$$R = c/(3\Lambda)^{1/2}.$$

Если известно  $\Lambda$ , то известно и  $R$ . Как найти  $\Lambda$ ?

Из уравнения Эйнштейна можно получить еще одно соотношение — между  $\Lambda$  и средней плотностью вещества во Вселенной  $\rho$ . Это соотношение выглядит так:

$$\Lambda = 4\pi G\rho/3.$$

Итак, если известно  $\rho$ , то известно и  $\Lambda$ , а значит, и  $R$ . Астрономы утверждают, что средняя плотность видимого вещества во Вселенной — около  $10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>. Это плотность вещества, заключенного

в галактиках, квазарах, радиогалактиках и т.п., т.е. в объектах, существование которых устанавливается прямыми наблюдениями. Если учесть вещество слабых звезд и черных дыр, то эта оценка может увеличиться. Но у астрономов нет уверенной оценки массы невидимого вещества Вселенной.

Полагая  $\rho = 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, получаем  $R \approx 3,3 \cdot 10^{28}$  см. Тогда один оборот вокруг Вселенной Эйнштейна равен приблизительно 200 млрд. световых лет. Значит, свету понадобится 200 млрд. лет, чтобы один раз обойти Вселенную! Первая оценка самого Эйнштейна, основанная на доступной ему в то время информации, составляла всего около 10 млн. лет.

Вселенная Эйнштейна положила начало современной космологии. Он проложил дорогу другим исследованиям крупномасштабной структуры Вселенной средствами физики.

## ВСЕЛЕННАЯ НЕ СТАЦИОНАРНА

Однако вселенной Эйнштейна не суждено было долго оставаться общепринятой моделью реальной Вселенной. Не прошло и 12 лет с ее появления на свет, как астрономы стали делать открытия, противоречившие ее основной предпосыл-

ке о стационарности Вселенной.

В 1929 г. Эдвин Хаббл, астроном обсерватории Маунт-Вилсон (ныне часть обсерваторий Маунт-Вилсон и Лас-Кампаньяс) близ Пасадены, Калифорния, опубликовал статью под названием «Соот-



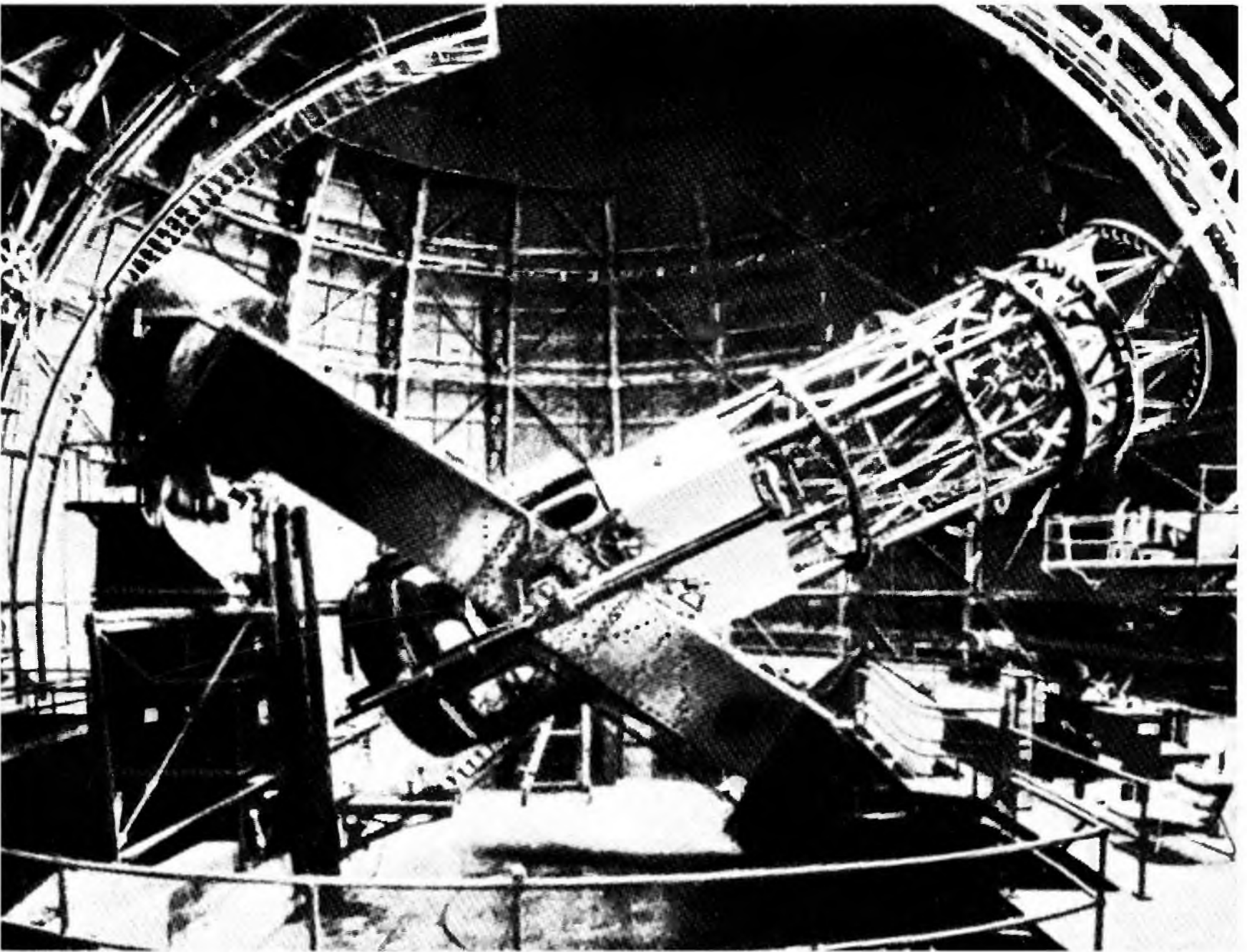


Рис. 10.3. 2,5-метровый телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, которым пользовался Хаббл при исследовании галактик. (С любезного разрешения обсерваторий Маунт-Вилсон и Лас-Кампаньяс, Институт Карнеги в Вашингтоне.)

ношение между расстоянием и лучевой скоростью у внегалактических туманностей» в журнале *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*. В этой статье описывалось замечательное открытие, которое было сделано после нескольких лет наблюдений на установленном тогда на обсерватории Маунт-Вилсон 2,5-метровом телескопе (рис. 10.3). Был проведен систематический анализ спектров света от далеких галактик\*.

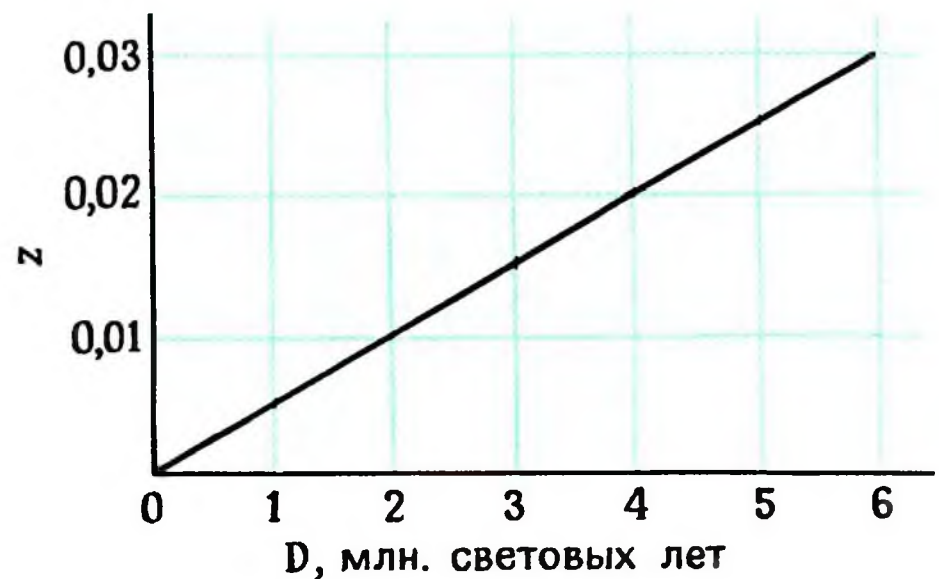
В этих спектрах обнаружилось уже рас-

\* О галактиках см.: *W.J. Kaufmann III. Galaxies and Quasars*, San Francisco, Freeman and Co., 1979.

смотренное нами красное смещение (см. гл. 7). Разыскивая в спектре далекой галактики знакомые линии, мы находим их не на тех длинах волн, на которых они обычно наблюдаются в земной лаборатории, а на более длинных волнах. Например, линии кальция H и K должны находиться на длинах волн 3933 и 3968 Å соответственно. (Å – ангстрем, единица измерения, равная одной стомиллионной сантиметра.) В спектре галактики из скопления Гидры Хаббл и его сотрудник Милтон Хьюмсон обнаружили эти линии на длинах волн соответственно 4537 и 4578 Å. Таким образом, согласно нашему определению красного смещения как относительного увеличения длины волны



Рис. 10.4. График, построенный Хабблом по данным измерений красного смещения галактик  $z$  и расстояния  $D$  до них. Впоследствии выяснилось, что Хаббл сильно недооценил расстояния до галактик. По современным (тоже не окончательным) оценкам, эти галактики в пять-десять раз дальше от нас, чем принимал Хаббл.



(см. гл. 7), красное смещение этой галактики  $z = 0,15$ .

Хаббл открыл еще одно замечательное свойство этих галактик. Оказалось, что чем слабее яркость галактики, тем больше ее красное смещение. Но если предположить (как Хаббл и сделал), что светимость галактик примерно одинакова, то низкая яркость галактики указывает на ее удаленность. Чем дальше от нас галактика, тем меньше ее яркость.

Связав яркость с расстоянием, Хаббл получил способ приближенного измерения расстояний до ближайших галактик\*. Затем он построил график зависимости красного смещения типичной галактики от ее расстояния от нас. График Хаббла зависимости красного смещения  $z$  от расстояния  $D$  приведен на рис. 10.4. Точки, полученные Хабблом из наблюдений, легли близко к изображенной на рисунке прямой, что позволило ему предсказать простое соотношение между  $z$  и  $D$ :

$$cz = HD.$$

## ТЕОРИЯ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

Нет, закон Хаббла не возвращает нас к докоперниковским временам. Хотя красное смещение галактики растет с ее удалением от нас, это вовсе не ставит нас

Этот закон, называемый теперь законом Хаббла, можно истолковать так. Если предположить (следуя Хабблу), что красное смещение галактики вызвано эффектом Доплера, то  $cz$  — мера скорости удаления галактики. Тогда, по закону Хаббла, галактика удаляется от нас со скоростью, которая растет прямо пропорционально ее расстоянию от нас. Коэффициент  $H$ , так называемая *постоянная Хаббла*, — это скорость галактики на единичном расстоянии.

Вселенная, в которой действует закон Хаббла, совсем не похожа на стационарную Вселенную Эйнштейна. Она оказывается динамичной, галактики разлетаются от нас, как будто мы находимся в очень непривлекательном месте. Означает ли это, что мы возвращаемся к какой-то новой версии древнегреческой космологии, в которой мы, жители Земли, занимали как наблюдатели космоса особое положение?

\* Подробнее об измерениях астрономических расстояний см. в книге: F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics—Astronomy Frontier San Francisco: Freeman and Co. 1980.

в какое-то выделенное положение. Если бы мы наблюдали Вселенную из другой галактики, то же явление разбегания обнаружилось бы и из нового положения. Иными словами, для наблюдения эффекта Хаббла одинаково подходят все галактики — у нашей Галактики никаких привилегий нет.



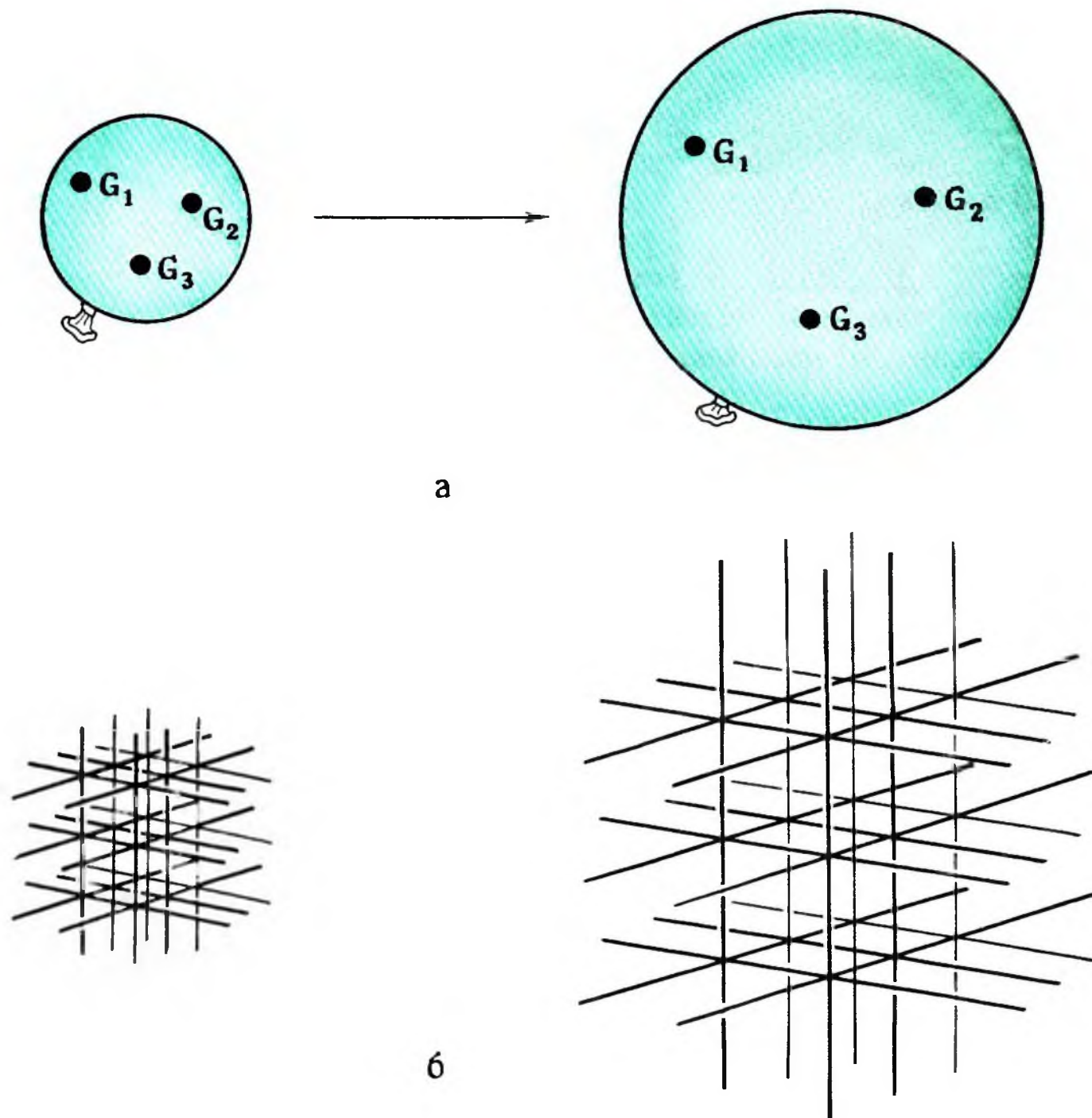


Рис. 10.5. Два примера расширения, аналогичного расширению Вселенной. *а* – когда мы надуваем воздушный шарик, точки  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$  на его поверхности удаляются друг от друга. Ни одна точка на поверхности раздувающегося шарика не занимает особого положения. *б* – при нагревании проволочная решетка расширяется. Все узлы решетки удаляются друг от друга. И снова ни одна из точек решетки не занимает привилегированного положения. (F. Hoyle, J. V. Narlikar. The Physics – Astronomy Frontier. © 1980. W. H. Freeman and Co.)

Обычно, чтобы описать разбегание галактик, говорят, что *Вселенная расширяется*. Пространство, в котором помещаются галактики, расширяется, и расстояние между любыми двумя галактиками растет. На рис. 10.5 эффект расширения проиллюстрирован двумя примерами. При надувании воздушного шарика нарисованные на нем точки расходятся (рис. 10.5, *а*); при этом ни одна из них не занимает особого положения. Кубическая

проволочная решетка расширяется при нагревании (рис. 10.5, *б*), ее узлы удаляются друг от друга. Третий пример – полоска из специальной пластмассы, размеры которой при нагревании в печи увеличиваются втрое. Любая фигура, нарисованная на полоске, тоже расширяется. На рис. 10.6 мы видим такую полоску с нанесенными на нее точками до и после нагревания. Точки разошлись, как галактики в расширяющейся Вселенной.

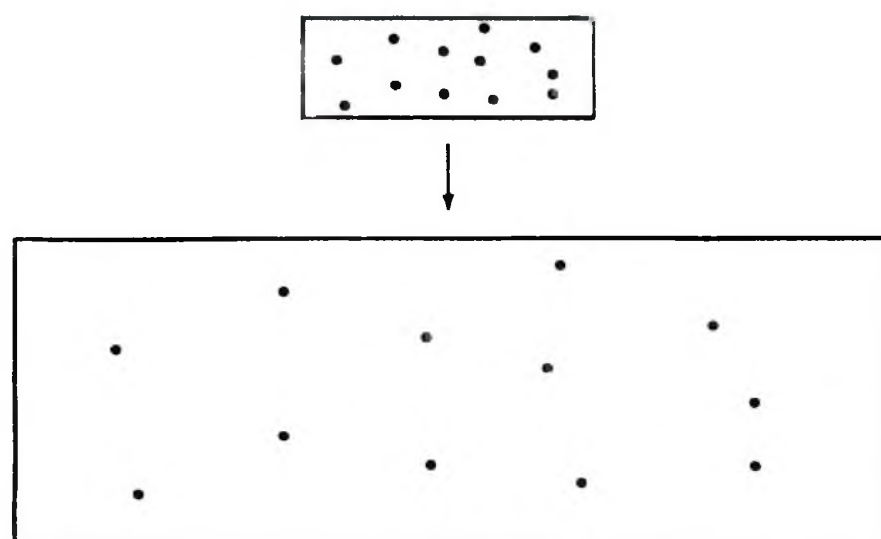


Рис. 10.6. При расширении пластмассовой полоски в три раза (в длину и в ширину) точки на ней раздвигаются.

Если принять, что галактики действительно разбегаются, то естественно возникает вопрос, в чем причина этого расширения. Происходило ли оно в прошлом? Будет ли продолжаться в будущем? Ответы на такие вопросы можно получить, строя для расширяющейся Вселенной математические модели подобно тому, как Эйнштейн построил модель стационарной Вселенной. На помощь ученому здесь снова приходит общая теория относительности Эйнштейна.

Еще до опубликования Хабблом своих результатов русский физик Александр Фридман построил такие модели. Фридман пользовался предположениями Эйнштейна об однородности и изотропии Вселенной, но от ее стационарности он отказался. В моделях Фридмана  $\Lambda$ -член, введенный Эйнштейном в стационарной модели, не нужен: они строятся на основе старых уравнений Эйнштейна 1915 г.

Если единственной силой в этих космологических моделях является гравитация, под действием которой объект сжимается, а не расширяется, то как же удалось Фридману создать модели расширяющейся Вселенной? Понять ответ на этот вопрос можно при помощи простого примера. Вспомним нашего баскетболиста из гл. 3. Баскетболист бросает мяч вертикально вверх. Хотя земная гравитация тянет мяч вниз, в течение какого-то времени он летит вверх. Происходит это

потому, что его подбросили с направленной вверх начальной скоростью. Он будет подниматься до тех пор, пока запас его кинетической энергии полностью не иссякнет.

Аналогично, несмотря на наличие гравитации, Вселенная расширяется потому, что на начальном этапе в направленном наружу взрыве приобрела большую кинетическую энергию. Представьте себе гигантский космический взрыв, разбросавший то, что составляло Вселенную, во все стороны. Все, что мы видим сегодня, — это остатки космического взрыва. Вселенная Фридмана была создана взрывом.

Если бы гравитации не было, скорости разбегания галактик оставались бы неизменно большими. Однако гравитация во Вселенной существует, и за счет нее разбегание замедляется — точно так же, как за счет земного тяготения замедляется полет мяча вверх. Продолжая аналогию, мы можем на примере мяча представить и дальнейшее поведение Вселенной.

В гл. 3 мы видели, что, если не подбросить мяч с достаточно большой скоростью, он упадет на Землю. Критическая скорость, которой определяется, упадет мяч обратно или нет, — это *скорость убегания*. Если скорость мяча превышает скорость убегания, он уже никогда не вернется на Землю, а будет вечно удаляться от нее.

В теории расширяющейся Вселенной



также имеется критический параметр, от величины которого зависит, будет ли Вселенная вечно расширяться, хотя и с уменьшающейся скоростью, или расширение прекратится и сменится сжатием.

## ОТКРЫТА ИЛИ ЗАМКНУТА ВСЕЛЕННАЯ?

Пространство стационарной вселенной Эйнштейна имеет конечный объем, но не ограничено. В этой Вселенной луч света, двигаясь в любом направлении, совершает в пространстве полный оборот и возвращается в исходную точку. Вселенная с такими свойствами называется *замкнутой*. Кривизна пространства в такой Вселенной положительна (см. гл. 5).

Кривизна пространства в расширяющейся вселенной Фридмана может быть положительной, нулевой и отрицательной. Обозначим эти возможности соответственно *A*, *B* и *C*. Фридмановская модель Вселенной типа *A* замкнута, как и эйнштейновская. Модели типов *B* и *C* *открыты*. Они *бесконечны* и *неограниченны*. При этом модели всех трех типов в каждую эпоху удовлетворяют условиям однородности и изотропии. Другими словами, размещенные в любую эпоху по всей Вселенной наблюдатели сообщают, что вид космоса в крупном масштабе повсюду один и тот же. Кроме того, для любого наблюдателя Вселенная выглядит одинаковой во всех направлениях\*.

Влияние геометрических особенностей на расширение Вселенной отражено на рис. 10.7; здесь  $S$  – характерный масштабный фактор расширяющейся Вселенной.

\* Речь идет о строении Вселенной в масштабе нескольких миллионов световых лет или больше. В более мелком масштабе мы замечаем неоднородности – например форму нашей Галактики, наше собственное положение на ее периферии и т.п. Эти «локальные неоднородности» не влияют на крупномасштабную динамику Вселенной.

Как и следовало ожидать (помня о «геометрическом уклоне» эйнштейновской теории), динамическое поведение Вселенной связано с ее геометрией.

Расстояние между двумя типичными галактиками пропорционально  $S$ , поэтому увеличение  $S$  со временем означает расширение Вселенной.

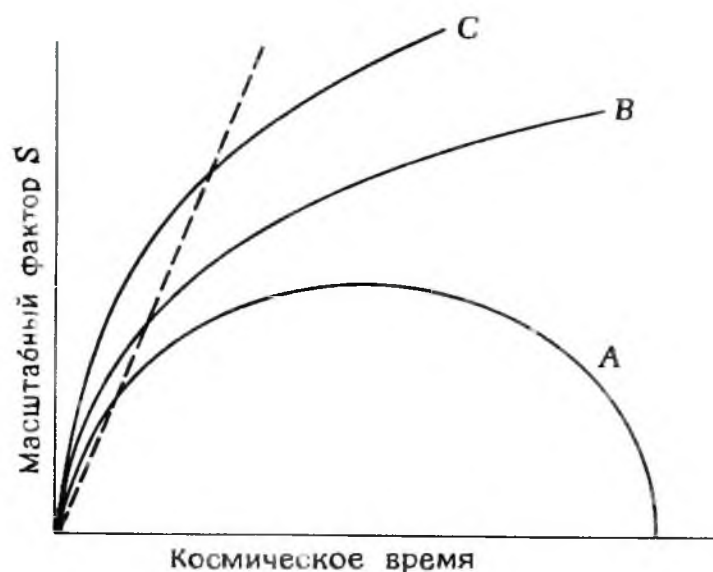
На рис. 10.7 начало всех моделей *A*, *B* и *C* соответствует  $S = 0$ ; затем  $S$  растет со временем. Но в случае *A* расширение прекращается и сменяется сжатием. Таким образом, в замкнутой модели Вселенной за фазой расширения наступает фаза сжатия. Открытые модели продолжают расширяться вечно. Сравним поведение Вселенной с рассмотренным ранее движением мяча.

Как и следовало ожидать, во всех трех моделях расширение замедляется под действием гравитации. Эпоха, соответствующая  $S = 0$ , – это момент рождения Вселенной из состояния, когда все ее вещество было сжато в очень малом объеме, момент сингулярности, отмечающий начало расширения Вселенной. В этот момент можно включить космические часы, так что на рис. 10.7  $t = 0$  на оси времени при  $S = 0$ .

Эпоха сингулярности при  $t = 0$  и последующее расширение Вселенной очень напоминают теорию белой дыры (гл. 9). В момент сингулярности каждая конечная область Вселенной подобна белой дыре, взрывающейся из точки в пространстве. Эта аналогия и привела к предположению, что белые дыры могут оказаться расширением из сингулярного состояния, которое происходит в пространстве уже после момента  $t = 0$ .

Штриховая прямая на рис. 10.7 показывает поведение  $S$  в отсутствие гравитации.

Рис. 10.7. Космологические модели трех типов. Модель *A* описывает замкнутую Вселенную, расширение которой прекращается и сменяется сжатием. *B* и *C* – модели открытой Вселенной, которая расширяется вечно. Штриховая линия соответствует расширению Вселенной в отсутствие гравитации.



Такая скорость расширения соответствует пустой модели Фридмана. Чем выше плотность вещества во Вселенной, тем сильнее гравитация замедляет расширение. Поэтому естественно ожидать, что в замкнутых моделях плотность выше, чем в открытых. Существует *критическая плотность*, по которой можно судить, открыта Вселенная или замкнута. В современную эпоху эта критическая плотность равна

$$\rho_c = 3H^2/8\pi G.$$

Если плотность Вселенной больше  $\rho_c$ , то Вселенная замкнута, если она равна  $\rho_c$  или меньше  $\rho_c$ , то Вселенная открыта. У моделей *A*, *B* и *C* на рис. 10.7  $\rho > \rho_c$ ,  $\rho = \rho_c$  и  $\rho < \rho_c$  соответственно.

В принципе вопрос о том, открыта или замкнута Вселенная, решить можно – нужно только знать с достаточной точностью плотность  $\rho$  вещества во Вселенной и постоянную Хаббла  $H$ . К сожалению, ни  $\rho$ , ни  $H$  точно не известны. Мы уже приводили оценку  $\rho \approx 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup> для видимого вещества Вселенной. А чему равна постоянная Хаббла  $H$ ?

На этот вопрос у ученых нет единого ответа. Величина  $1/H$  имеет размерность времени и представляет собой верхний предел для возраста Вселенной. Это оз-

начает, что время, прошедшее от начала расширения ( $t = 0$ ) до нашей эпохи, не может превосходить  $1/H$ . Согласно современным данным,  $1/H$  лежит в диапазоне от 10 до 20 млрд. лет.

Нижней границе этого промежутка соответствует плотность  $\rho_c \approx 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. При верхнем значении получается значение  $\rho_c$ , в четыре раза большее. Отметим, что в обоих случаях  $\rho < \rho_c$ , поэтому на первый взгляд мы живем в открытой Вселенной типа *C*.

Однако вопрос, открыта или замкнута Вселенная, совсем не такой простой! Стронники замкнутой Вселенной утверждают, что приведенная нами оценка  $\rho$  – лишь оценка снизу. Если во Вселенной достаточно много невидимого вещества, то  $\rho$  может оказаться значительно выше. А если плотность превышает  $\rho_c$ , то Вселенная замкнута.

Другой способ узнать, какая из моделей *A*, *B* или *C* верна, – измерить темп замедления расширения Вселенной. Для моделей типа *A* скорость замедления выше, а для моделей типа *C* – ниже, чем для моделей типа *B*. Однако провести необходимые измерения очень трудно, и ни к каким определенным выводам прийти пока не удалось.



## БЫЛО ЛИ НАЧАЛО РАСШИРЕНИЯ?

Тех, кто занимается космологией, часто спрашивают: имеются ли прямые астрономические свидетельства начала расширения Вселенной?

Наблюдая отдаленные области Вселенной, астрономы видят ее не такой, какая она теперь, а такой, какой она была в далеком прошлом. Дело в том, что при астрономических наблюдениях регистрируется свет, скорость которого конечна. Свету, несущему информацию от далекого источника, требуется время, чтобы достичь Земли. Например, свет от галактики, удаленной от нас на миллиард световых лет, идет к нам миллиард лет. Следовательно, астроном видит галактику такой, какой она была миллиард лет тому назад.

На Земле в нашей повседневной жизни задержки, связанные с конечностью скорости света, редко бывают заметны, так как расстояния очень малы. Тем не менее люди, пользующиеся международной телефонной связью через спутники, замечают, что ответы собеседника, которые передаются радиоволнами со скоростью света, чуть-чуть запаздывают.

Поскольку с самого рождения при  $t = 0$  Вселенная расширялась, в прошлом масштабный фактор  $S$  был меньше, чем теперь. Нет ли какого-нибудь прямого способа сравнить значение масштабного фактора, которое он имел миллиард лет назад, с современным? Есть! Это можно сделать при помощи простого следствия общей теории относительности Эйнштейна. Предположим, что мы измерили красное смещение галактики, находящейся от нас на расстоянии миллиард световых лет, и оно оказалось равным  $z$ . Тогда отношение современного масштабного фактора к его значению миллиард лет назад в точности равно  $1 + z$  (рис. 10.8).

Таким образом, чем больше красное

смещение наблюдаемого объекта, тем меньше был масштабный фактор Вселенной в тот момент, когда свет покидал этот объект. Следовательно, эпоха начала расширения соответствует бесконечному красному смещению.

Самое большое измеренное на сегодняшний день красное смещение  $z = 3,53$  у квазара OQ172. Сейчас вопрос о расстояниях до квазаров еще вызывает споры. Но даже если предположить, что они находятся на очень больших расстояниях, то самый удаленный из известных объектов не уводит нас в такое уж давнее прошлое!

Есть, однако, косвенное свидетельство о гораздо более ранних стадиях эволюции Вселенной. Кратким рассказом об этом важном явлении мы и завершим главу.

До сих пор мы интересовались лишь геометрическими свойствами Вселенной. Космологи идут дальше: они пытаются понять и ее физические свойства. В 1940-х годах Джордж Гамов впервые рассмотрел физическое состояние Вселенной через несколько мгновений после начала расширения.

В начале расширения подразумевается высокая активность, и физики задумались над тем, какую форму она принимала. Здесь приходится рассматривать самые элементарные состояния вещества – возможно, даже *кварки*, которые могли существовать в свободном состоянии до того, как образовались электроны, протоны и другие элементарные частицы. Впрочем, Гамов начал со стадии, на которой эти частицы уже образовались. На раннем этапе, всего через одну секунду после начала расширения, элементарные частицы находились в тепловой бане с исключительно высокой температурой – порядка  $10^9$  К. У этой ранней стадии

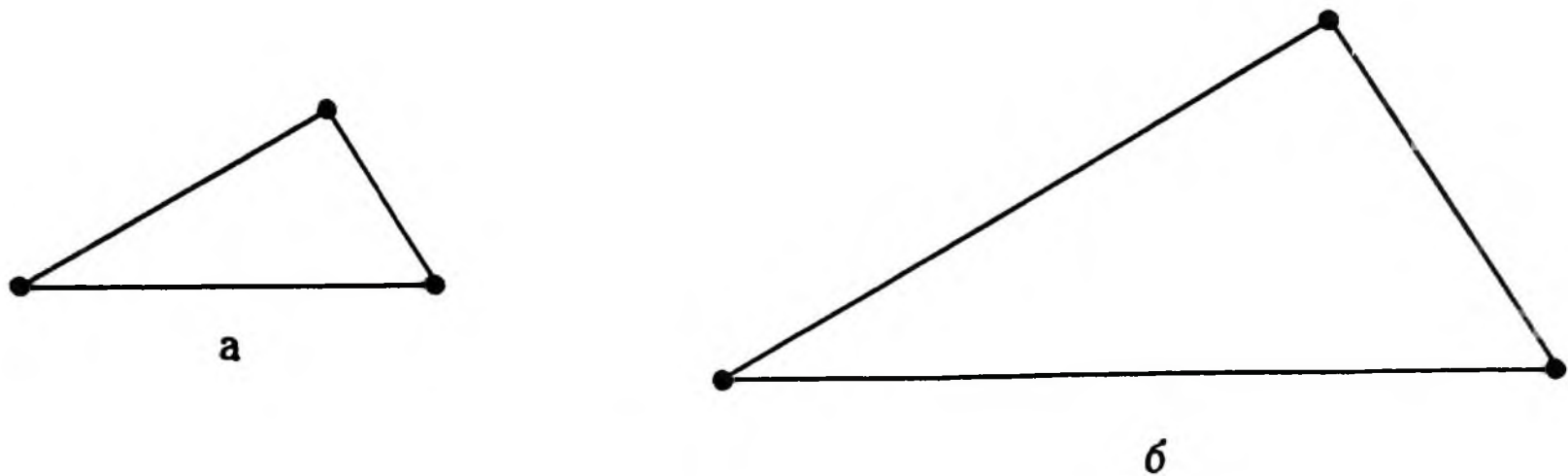


Рис. 10.8. *a* – треугольник, образованный тремя галактиками. *b* – треугольник расширился в два раза, так что каждая галактика оказалась вдвое дальше от остальных. Это произошло вследствие расширения Вселенной. Если свет от любой из этих галактик отправился в путь в эпоху *a* и достиг другой в эпоху *b*, он будет обладать красным смещением  $z = 1$ . (Это – частный случай общего результата, приведенного в тексте.)

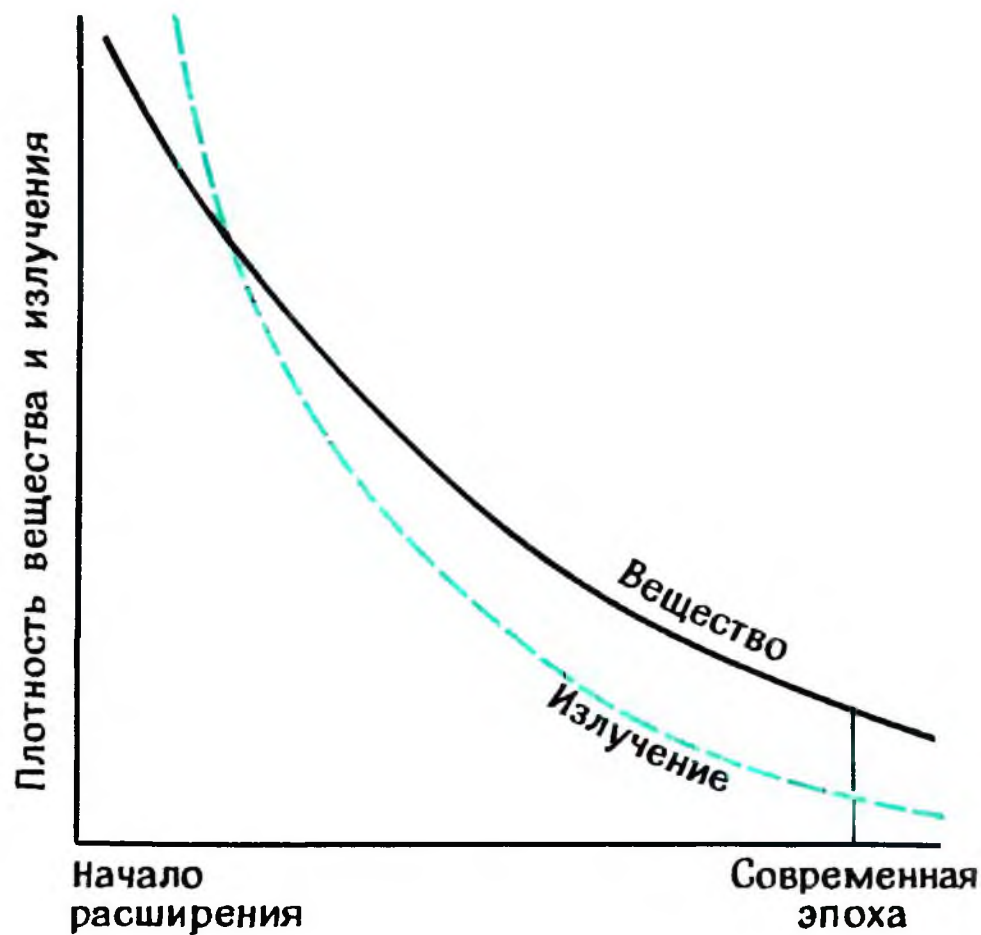


Рис. 10.9. Схематическая диаграмма, показывающая уменьшение плотности вещества (сплошная линия) и излучения (штриховая линия) в расширяющейся Вселенной. На ранних стадиях во Вселенной преобладало излучение, в современную эпоху преобладает вещество. Это происходит потому, что по мере расширения Вселенной плотность излучения падала быстрее, чем плотность вещества. (Масштаб произвольный.)



была еще одна замечательная особенность – преобладание излучения над веществом; этим она отличалась от современного состояния Вселенной, при котором преобладает вещество. На рис. 10.9 показано, как в ходе расширения Вселенной произошел переход от ранней радиационно-доминированной эпохи к эпохе с преобладающей ролью вещества.

Гамов высказал догадку, что от раннего горячего излучения должны остаться следы – реликтовый остаток в виде остывшего излучения. Какова его температура? Исходя из имевшейся тогда информации, Гамов и его сотрудники Ральф Альфер и Роберт Германн предсказали, что в наши дни температура излучения должна равняться примерно 5 К. При такой температуре излучение попадает преимущественно в микроволновый диапазон.

Первые серьезные указания на то, что такое излучение существует, были получены в 1965 г., когда Арно Пензиас и Роберт Уилсон из лабораторий фирмы «Белл Телефон» в Холмдейле, Нью-Джерси, случайно открыли реликтовое фоновое излучение на длине волны 7 см с температурой около 3,5 К. Учитывая важные

космологические следствия этого открытия, несколько групп астрономов поспешили измерить фоновое излучение на других длинах волн. На сегодняшний день проведены измерения на длинах волн от 70 см до 1 мм и короче. Измерения на столь коротких волнах удалось осуществить благодаря самым последним достижениям в области космической техники.

Параметры этого излучения близки к ожидаемым для излучения, сохранившегося от начала расширения. Температура не очень отличается от предсказанной Гамовым и его сотрудниками. Излучение оказывается фоновым, т.е. изотропно приходит со всех направлений во Вселенной, что свидетельствует о его космическом происхождении.

Кое-что остается пока неясным. Если удастся удовлетворительно решить вопросы, связанные с истолкованием различных наблюдений, то фоновое излучение станет для астрономов косвенным подтверждением справедливости теории расширяющейся Вселенной и адекватности моделей Вселенной, построенных на основе эйнштейновской теории гравитации.



# 11

## Многоликая гравитация

«Голконда» (1953),  
картина бельгийского художника Рене Магритта (1898–1967).  
(Частная коллекция, США. Фото Тейлора и Далла, Нью-Йорк.)





Знакомство с гравитацией началось с падающего яблока и увело нас от океанских приливов к планетам, кометам и спутникам Солнечной системы, к различным стадиям звездной эволюции, к искривленному пространству-времени общей теории относительности, к удивительным явлениям, связанным с черными и белыми дырами, и, наконец, к крупномасштабной структуре самой Вселенной. Такого широкого поля приложений нет ни у одной другой из основных физических сил. Хотя гравитация, бесспорно, самое слабое из четырех основных физических взаимодействий, ее эффекты самые впечатляющие.

Интересно поразмыслить над тем, как выглядел бы мир, не будь вообще гравитации! Повлияло бы это на атомы и молекулы? Насколько нам известно, гравитация не играет решающей роли в существовании и устойчивости микромира. Главные силы на этом уровне – сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия. Даже в макром мире на уровне предметов, окружающих нас в повседневной жизни, гравитация не столь уж существенна. В конце концов, космонавты доказали, что можно жить в условиях невесомости. Ни космонавты, ни их космические корабли не распадаются при этом на части. Основной силой связи на этом уровне остается электромагнитная.

Но дальше без гравитации уже не обойтись. Если отказаться от гравитации на других уровнях, всюду нас будут под-

стерегать катастрофы. Если исчезнет гравитация Земли, то ничто уже не будет связывать Землю в единый сферический объект или удерживать нас на ее поверхности. У живущих на Земле существ есть сложные биологические системы, которые развивались в условиях земной гравитации и приспособились к ней. Без гравитации Земля потеряет и защищающую ее атмосферу.

Если говорить о явлениях более крупного масштаба, то в отсутствие гравитации Солнце не притягивало бы Землю, и, вместо того чтобы обращаться вокруг Солнца, она улетела бы по прямой. Само Солнце не сможет сохранить устойчивость и рассеется в пространстве. Без гравитации не смогут существовать ни Солнце, ни другие звезды, ни более крупные системы, такие, как галактики и квазары. И это – лишь несколько соображений по поводу Вселенной без гравитации. При всей их неполноте они дают какое-то представление о той важной роли, которую играет гравитация в физическом мире.

Несмотря на эту важную роль, гравитация по-прежнему окутана тайной. Сформулировав закон всемирного тяготения, Ньютон уклонился от попытки объяснить, почему действует именно этот закон. Эйнштейн остроумно связал гравитацию с геометрией пространства-времени, но и он признавал, что такое описание уводит гравитацию еще дальше от всей остальной физики. В теории Эйн-

штейна гравитация перестает быть силой. Вместо того чтобы влиять на движение и равновесие тела, как приличествует всякой физической силе, гравитация изменяет геометрию окружающего пространства-времени вокруг тела. Чтобы заполнить брешь между гравитацией и другими физическими силами, Эйнштейн пытался построить *единую теорию поля* для всех физических взаимодействий. Несмотря на долгие годы исследований, сделать это ему не удалось.

Тем не менее мечта об объединении преследует и вдохновляет физиков и поныне. Недавний успех теории Вайнберга–Салама (названной в честь Стивена Вайнберга и Абдуса Салама, пришедших к ней независимо), в которой объединены электромагнитное и слабое взаимодействия, внушил многим физикам мысль о том, что теперь уже недалеко и до единой теории всех физических взаимодействий. Есть обнадеживающие указания на то, что в будущем удастся связать с электромагнитным и слабым сильное взаимодействие, которое удерживает частицы в ядре атома. Физики называют такой альянс теорией великого объединения.

Но гравитация по-прежнему остается в стороне и от этой цепочки достижений – в значительной степени из-за ее необычного описания как геометрического свойства пространства-времени, а не как обычной силы. До некоторой степени трудности связаны и с выяснением квантовых свойств гравитации. Квантовая теория обычно описывает явления микромира. На уровне частиц гравитация очень слаба. Как же физикам изучать такие явления?

Разгоняя частицу до высоких скоростей, мы увеличиваем и ее энергию. При этом, как правило, возрастает и сила ее взаимодействия с другими частицами. Для изучения различных взаимодействий элементарных частиц физики используют уско-

рители, в которых заставляют частицы, разогнанные до высоких энергий, сталкиваться. При энергиях частиц  $10^{11}$  эВ становится интенсивным слабое взаимодействие – его уже можно сравнивать с электромагнитным. Но энергия, при которой гравитация становится столь же заметной, как, скажем, электромагнитное взаимодействие, равна примерно  $10^{28}$  эВ, что на 17 порядков выше предельной энергии существующих ускорителей.

Эти цифры показывают, как трудно постичь природу гравитации в земной лаборатории. Отсюда следует, что еще очень долго все дальнейшие шаги в изучении этой таинственной силы будут связаны с астрономией.

В этой книге мы рассмотрели несколько примеров основных гравитационных эффектов в астрономии. Теперь мы закончим ее перечислением нескольких нерешенных проблем в этой области.

Немало работ за последние десять лет было посвящено физике и астрофизике черных дыр. Частично эти исследования мы рассмотрели в гл. 7–9. Некоторые энтузиасты верят, что черные дыры дадут возможность окончательно решить все энергетические проблемы. Скептики, однако, до сих пор не уверены, что черные дыры вообще существуют или могут быть обнаружены. Защитники черных дыр возражают, что все свидетельства здесь по необходимости являются косвенными и ничего большего нельзя и ожидать. Тем не менее нотка осторожности, которой должны сопровождаться всякие ссылки на косвенные подтверждения, часто отсутствует во фразах типа «в таком-то объекте существует черная дыра»; недостаточно учитываются и альтернативы теории черных дыр.

В отличие от черных дыр белые дыры, как предсказывает теория, можно было бы наблюдать непосредственно. Однако



многие астрономы весьма сомневаются в их существовании; кроме того, нет хорошей теории, описывающей, при каких обстоятельствах белая дыра могла бы образоваться.

Наконец, ясно, что теория расширяющейся Вселенной не дает ответа на очень важный вопрос о происхождении наблюдаемой Вселенной. В чем причина расширения? Почему, как и когда вещество впервые появилось во Вселенной? Можно ли настолько доверять известным физическим законам, чтобы по ним судить о том, какой была Вселенная на ранних стадиях эволюции?

Многие сторонники теории расширяющейся Вселенной считают, что происхождение Вселенной не может быть предметом научного изучения. Это напоминает подход Ньютона. Столкнувшись с подобными затруднениями, он постулировал «божество». Отказ Ньютона от научного анализа таких вопросов радовал религиозных людей, но вызывал протест со стороны некоторых ученых, его

современников (таких, как Лейбниц).

Вопрос о происхождении Вселенной все еще тревожит некоторых физиков. В связи с этим Герман Бонди, Томас Гоулд и Фред Хойл выдвинули в 1948 г. теорию стационарной Вселенной. Это Вселенная без начала и без конца. Вещество в ней создается не все сразу, а непрерывно, понемногу, повсюду во Вселенной и во все времена.

В настоящее время теория стационарной Вселенной не в почете — в основном потому, что в рамках этой теории не найдено удовлетворительного объяснения описанного в гл. 10 микроволнового фонового излучения. Открытие этого излучения как будто подтверждает теорию расширяющейся Вселенной, но многие вопросы еще не решены.

На этом мы заканчиваем наш рассказ о многоликости гравитации. Тем, кто изучал гравитацию, природа открыла уже немало, но многие тайны еще скрыты в ожидании своего часа.

# Оглавление

Предисловие

5

От автора

7

Глава 1

Почему движутся тела

9

Глава 2

От падающего яблока к «Аполлону-11»

23

Глава 3

Какова сила гравитации

37

Глава 4

Термоядерные реакторы в космосе

47

147



Оглавление

**Глава 5**

Жизнь в искривленном мире

61

**Глава 6**

Океанские приливы и двойные звезды

77

**Глава 7**

Удивительный мир черных дыр

89

**Глава 8**

Черные дыры –  
космические генераторы энергии

103

**Глава 9**

Белые дыры – миф или реальность?

117

**Глава 10**

Расширяющаяся Вселенная

129

**Глава 11**

Многоликая гравитация

143

**УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!**

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2, изд-во «Мир».



Джайант Нарликар

ГРАВИТАЦИЯ БЕЗ ФОРМУЛ

Ст. научный редактор М. Я. Рутковская

Художник В. Н. Конюхов

Ст. художественный редактор В. И. Шаповалов

Технический редактор Е. Н. Петрунина

Корректор И. И. Дериколенко

ИБ № 4041

Сдано в набор 12.06.84. Подписано к печати 26.12.84.

Формат 70 × 90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 1.

Гарнитура таймс. Печать офсетная.

Объем 4,75 бум. л. Усл. печ. л. 11,12. Усл. кр.-отт. 23,06.

Уч.-изд. л. 9,71. Изд. № 27/3433.

Тираж 50000 экз. Зак. 591. Цена 65 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли

143200, Можайск, ул. Мира, 93.

Издательство «Мир»  
выпускает в 1985 г. книгу

**П. Девис. Случайная Вселенная: Перевод с англий-  
ского**

Почему Вселенная именно такова, какой мы ее наблюдаем? Почему в ней существуют галактики, звезды и планеты? Случайно ли появление человека? Есть ли другие вселенные, познаваемые разумными существами? Какой была бы Вселенная, если бы фундаментальные физические постоянные имели значения, хотя бы немного отличающиеся от известных ныне значений?

На эти вопросы пытается дать ответ известный английский астрофизик и популяризатор науки.

Книга доступна широкому кругу читателей, интересующихся проблемами современной науки.



Издательство «Мир»  
выпустит в 1985 г. книгу

Шапиро С., Тьюколски С. **Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды.** В 2-х частях: Пер. с англ.

В книге известных американских астрофизиков, профессоров Корнеллского университета (США) изложены основы физики плотных космических объектов — уже открытых белых карликов и нейтронных звезд и предсказанных теоретиками «черных дыр». Все эти экзотические объекты с удивительными свойствами — конечные продукты «нормальной» звездной эволюции, и изучая их, мы проникаем в будущее нашего Солнца, звезд и Вселенной в целом. Вот почему эта проблема волнует и астрономов, и физиков, и математиков.

Книга написана на основе курса лекций, читавшихся авторами в течение ряда лет; ее отличает четкое изложение, умение авторов выделить основное физическое содержание и использование достаточно простого математического аппарата.

Для специалистов и студентов соответствующих специальностей. Может служить учебным пособием по релятивистской астрофизике.



