



*Создавая
картину
Вселенной*

David Layzer

Constructing the Universe

**SCIENTIFIC
AMERICAN
LIBRARY**

*An imprint of Scientific
American Books, Inc.*

New York 1984

Д. Лейзер

Создавая картину Вселенной

*Перевод с английского
канд. физ.-мат. наук С. А. Ламзина*

*под редакцией
д-ра физ.-мат. наук
Л. П. Грищука*



Москва «Мир» 1988

ББК 22.632

Л42

УДК 524.8(0.062)

Лейзер Д.

Л42 **Создавая картину Вселенной: Пер. с англ./Под ред. и с предисл. Л. П. Грищука. — М.: Мир, 1988.—324 с., ил. ISBN-03-001237-0**

Книга известного американского астрофизика Д. Лейзера раскрывает полную драматизма и поиска многовековую историю познания человеком окружающего мира. Автор знакомит читателя с работами выдающихся мыслителей прошлого и современных ученых, трудами которых создана современная картина Вселенной; при этом основное внимание уделяется теории тяготения Ньютона и ее релятивистскому обобщению — общей теории относительности Эйнштейна. Яркие и разнообразные иллюстрации делают повествование наглядным и увлекательным.

Предназначена для читателей, интересующихся проблемами космологии.

Л $\frac{1705050000-439}{041(01)-87}$ 88—87, ч. 1

ББК 22.632

*Редакция научно-популярной и
научно-фантастической литературы*

Оглавление

6	Предисловие редактора перевода
10	Введение
15	Глава 1. Космология и научная истина
39	Глава 2. Аристарх, Коперник и Кеплер
73	Глава 3. Архимед, Галилей и Ньютон
111	Глава 4. Теория Ньютона и астрономическая Вселенная
169	Глава 5. Специальная теория относительности: теория равномерного движения Эйнштейна
205	Глава 6. Теория гравитации Эйнштейна
241	Глава 7. Теория Эйнштейна и Вселенная
269	Глава 8. Космическая эволюция
313	Приложение. Векторная алгебра
317	Литература
319	Предметно-именной указатель

Книга известного американского астрофизика, профессора Гарвардского университета Дэвида Лейзера рассказывает о том, как на протяжении многих веков — со времен Древней Греции до наших дней — складывались представления об окружающем нас мире. Современные взгляды на строение и эволюцию Вселенной можно изложить, лишь проследив за тем, как расширялись границы познанного, как осмысливались факты и создавались великие теории. Поэтому в книге речь идет не только об астрономических наблюдениях, но и о физике и математике. Подчеркивая роль математики в изучении окружающего нас мира, автор отстаивает тезис, согласно которому «книга Природы написана языком математики». Возможно, именно по этой причине здесь несколько больше формул и математических выкладок, чем обычно принято в научно-популярной литературе. Читателя не столько развлекают красочным описанием событий и фактов, которыми так богата многовековая история астрономии, сколько приглашают самого принять участие в поисках истины. Однако эти выкладки не должны его отпугивать, поскольку они вполне понятны любому человеку со знаниями математики в рамках средней школы.

Строением и эволюцией Вселенной занимается специальный раздел науки — космология, эмпирическую основу которой составляют астрономические наблюдения, а теоретический аппарат построен на законах и выводах основных физических теорий. Важнейшую роль в космологии играет теория гравитационного поля, так как именно тяготением определяются распределение и движение масс на космических расстояниях. Центральное место в космологии занимают представления о времени и пространстве. Не удивительно, что в книге Д. Лейзера рассказ о совершенствовании телескопов и изобретении новых инструментов соседствует с изложением теории тяготения Ньютона, а также основ специальной и общей теории относительности. Соотношения, учитывающие принципы теории относительности, называются релятивистскими. Трудности в переходе от классической механики и теории гравитации к их релятивистским обобщениям связаны не столько с чисто математическими усложнениями, сколько с изменением самих понятий и концепций. В обыденной жизни нам не приходится иметь дело со скоростями, близкими к скорости света, или с мощными полями тяготения; поэтому читателю, возможно, будет нелегко привыкать к выводам и положениям теории относительности, которые, хотя и в небольшом числе, встречаются в книге. Однако без них невозможно понять современные представления о Вселенной, и здесь особенно необходим вдумчивый анализ написанного, попытка с карандашом в руках проследить за логикой автора. В некоторых случаях, быть может, полезно обратиться к другим научно-популярным книгам, специально посвященным рассматриваемым вопросам.

На протяжении более двадцати веков конкретная космология сводилась к изучению Солнечной системы. С этой мыслью, казалось бы, трудно согласиться: ведь люди всегда видели звезды. Однако долгое время их рассматривали скорее как красивый фон, чем предмет изучения. И только совсем недавно — в начале нашего столетия — благодаря бурному развитию средств наблюдения люди осознали, что они живут в разнообразном и беспокойном мире галактик.

Рассказывая о мыслителях прошлого, автор прослеживает две линии научного поиска. Первая — это линия Аристарха — Коперника — Кеплера, создателей модели Солнечной системы, главным итогом усилий которых был вывод (на основании результатов наблюдений) законов движения планет. Но наука отвечает не только на вопрос «как?», но и на вопрос «почему?». И вторая линия, Архимед — Галилей — Ньютон, иллюстрирует важнейшие достижения физической науки, построение классической механики и теории тяготения. В книге подчеркивается, что плодотворная научная теория должна быть «избыточной» — в том смысле, что число явлений и фактов, которые она способна объяснить, должно значительно превышать число свободных параметров в теории. Именно к такого рода теориям относится теория тяготения Ньютона, или, как ее еще называют, закон всемирного тяготения. Эта теория применима к обширному кругу физических явлений и астрономических систем: здесь и океанские приливы, и двойные звезды, и шаровые скопления, и галактики.

Однако ньютоновской теории недостаточно для описания наблюдаемой Вселенной как целого, и современная космология должна быть релятивистской, т. е. опираться на релятивистскую теорию тяготения. Простейший критерий применимости теории тяготения Ньютона (малость гравитационного потенциала по сравнению с квадратом скорости света) не выполняется для огромной массы вещества, заключенного в объеме пространства, доступного ныне для наблюдений.

Современная релятивистская теория тяготения составляет суть общей теории относительности Эйнштейна. Построение релятивистской теории тяготения, ее применение к гравитирующим системам наибольших масштабов шли параллельно с изучением пространственного распределения галактик, доказательством нестационарности наблюдаемой системы галактик и их скоплений. Так возникло понятие расширяющейся Вселенной, так возник вопрос о ее прошлом и будущем.

Выводы релятивистской теории тяготения поражают воображение, но (по крайней мере пока) прекрасно согласуются с результатами наблюдений. Возможно, самое удивительное и захватывающее нас ждет впереди, когда удастся осуществить синтез релятивистской теории тяготения и квантовой теории. Такой синтез необходим для описания самых глубинных закономерностей в условиях очень ранней Вселенной. (Это состояние Вселенной, для описания которого потребуется еще не созданная квантовая теория тяготения, иногда условно называют «Большой взрыв»). Физические условия очень ранней Вселенной служат как бы исходными данными для более

поздней эпохи, когда происходило образование структурных единиц типа галактик и скоплений галактик.

Один из самых острых вопросов современной космологии: как и почему образовались астрономические системы разных масштабов, каково направление космической эволюции — «скучивание» или «фрагментация»? Этому вопросу целиком посвящена последняя глава книги Д. Лейзера. Принятая ныне «теория горячей Вселенной», которую автор называет «гипотезой первичного огненного шара», сопоставляется с одним из вариантов «теории холодной Вселенной».

Как видно из самого названия, теория горячей Вселенной исходит из того, что догалактическое вещество было плотным и горячим. Наблюдаемое фоновое микроволновое излучение с температурой примерно 3 К в этой теории просто и естественно интерпретируется как излучение той далекой эпохи, остывшее в результате расширения Вселенной. Напротив, в теории холодной Вселенной принимается, что начальная стадия расширения происходила при температуре, равной абсолютному нулю, а наблюдаемое фоновое излучение с температурой 3 К возникло позднее, в результате «переработки» света, излученного гипотетическими массивными звездами самого первого поколения. Этот процесс интенсивного излучения света автор называет «Большая вспышка».

Один из вариантов теории холодной Вселенной развивается Д. Лейзером на протяжении многих лет. Кратко описывается история создания теории холодной Вселенной и в том числе отмечается, что после открытия микроволнового фонового излучения создатели и многие приверженцы теории холодной Вселенной от нее отказались. Д. Лейзер тем не менее видит некоторые трудности, связанные с моделью горячей Вселенной, и изобретательно находит доводы в пользу своих взглядов. Далеко не со всеми утверждениями автора здесь можно согласиться. Следует, в частности, отметить, что большие отклонения наблюдаемого спектра фонового излучения от кривой распределения Планка, играющие столь важную роль в аргументации Лейзера, не подтверждаются результатами более поздних наблюдений. Иными словами, трудности модели горячей Вселенной сильно преувеличены, а достоинства альтернативной модели выглядят недостаточно убедительными. Однако материал этой главы интересен: он дает читателю представление о методах и задачах современных исследований, о разнообразии идей и мнений.

Книга Д. Лейзера интересна еще и тем, что заставляет задуматься вообще о путях развития науки. Так, в исторической ретроспективе по-иному относишься и к сегодняшней границе между «твердо установленным» и «гипотетическим». Не без удивления обнаруживаешь, как многие правильные идеи надолго забывались, а те, что впоследствии были отвергнуты, господствовали веками. Критический взгляд автора на эти проблемы, несомненно, поучителен и для современного исследователя.

Если читатель захочет глубже познакомиться с затронутыми в книге вопросами, то здесь ему поможет список литературы,

приведенный в конце книги. Многие из названных автором источников переведены на русский язык (соответствующие библиографические данные мы указываем; цитирование этих источников в тексте произведено по имеющимся русским переводам). Со своей стороны хотелось бы обратить внимание читателя на новое издание маленькой энциклопедии «Физика космоса» (М.: Советская энциклопедия, 1986), в которой достаточная научная строгость сочетается с популярностью изложения.

Содержание и прекрасный иллюстративный материал, высокий профессионализм автора и интересная, порою острая, манера изложения — все это позволяет надеяться, что книга «Создавая картину Вселенной» будет с интересом прочитана школьниками и студентами, преподавателями и научными работниками, и всеми, кто задумывается над вопросами, связанными со строением и эволюцией Вселенной.

Л. Грищук

Введение

Эта книга рассказывает о двух великих современных теориях пространства, времени и тяготения — теориях Ньютона и Эйнштейна, а также об основанных на них теориях строения и эволюции Вселенной, их развитии и становлении. Подобно живым организмам, научные теории непрерывно видоизменяются и совершенствуются, и без учета этого обстоятельства невозможно их полное понимание.

Современные представления о строении Вселенной и законах ее развития сформировались благодаря значительным достижениям в четырех различных, но взаимосвязанных областях, а именно: в методике и технике наблюдений и эксперимента, в использовании телескопов для исследования космического пространства, в разработке фундаментальных физических теорий, а также в создании и методах проверки космологических гипотез. Развитие каждого из этих направлений тесно связано с успехами и достижениями других. И хотя эта книга в основном посвящена разработке теорий и гипотез, я надеюсь, что, прочитав ее, вы сможете уяснить, насколько глубока и плодотворна взаимосвязь теории и астрономического наблюдения. Вы увидите, как на критических этапах развития научного мировоззрения достижения в области техники — будь то изобретение телескопа в начале XVII в. или создание маломощных микроволновых радиометров в 50-х годах нашего века — позволяют не просто заглянуть все дальше во Вселенную, но, говоря словами Платона, повышают «зоркость» человеческого разума. И если астрономическим инструментам и наблюдениям в этой книге уделено меньше внимания, чем теориям и гипотезам, то это вовсе не потому, что я считаю их менее важными или меньше разбираюсь в этих вопросах (хотя это и правда). Дело в том, что в книге умеренного объема (а я надеялся, что она будет еще короче!) невозможно с одинаковой полнотой изложить как экспериментальные, так и теоретические аспекты рассматриваемой проблемы.

В своей книге «Характер физических законов» Ричард Фейнман писал: «Объяснить человеку законы природы так, чтобы он почувствовал их красоту, можно лишь тогда, когда он обладает достаточно глубокими познаниями в математике. Как ни жаль, но это именно так». Затем Фейнман начинает просто и вместе с тем вполне точно пояснять некоторые фундаментальные математические идеи, лежащие в основе современных физических теорий. Я стремился следовать его примеру. Вместо того, чтобы ходить вокруг да около основополагающих математических доказательств, я попытался изложить их так, чтобы они были понятны читателям с математической подготовкой в рамках средней школы, которые интересуются математическими выкладками. В то же время я старался построить свой рассказ так, чтобы читатели, не склонные к математике, могли пропустить эти выкладки, не теряя нити повествования.

Фейнман разделяет точку зрения Галилея (см. эпиграф к гл. 1), считая, что «книга Природы написана языком математики». Однако следует иметь в виду, что математические знания Галилея были на уровне таковых у современного учащегося старших классов: так, даже аналитической геометрии во времена Галилея еще не существовало. А Ньютон ничего не знал о векторах, производных или интегралах, когда начал размышлять о кеплеровских законах движения планет. Он ввел эти понятия сам, чтобы описать более общие виды движения, чем те, которые были подвластны математике его времени. Постепенно Ньютон разработал математический язык, необходимый для формулировки законов движения и тяготения, а также для объяснения с помощью этих законов астрономических явлений. Открытия, сделанные Ньютоном в области математики, физики и астрономии, явились составляющими одной теории. Соответственно я и использовал их в этой книге: читатель, прежде не знакомый с понятиями вектора и производной, сможет узнать о них именно в тех частях книги, где рассказывается, как и зачем Ньютон создал их.

Специалисты по истории науки, как правило, рассматривают научные теории с иных позиций, чем ученые, создававшие их. Так, говоря о революции в астрономии в XVI—XVII вв., историки науки редко обращают внимание на математическую структуру теорий Кеплера, Галилея и Ньютона. Их гораздо больше интересуют философские концепции теорий, а математику они рассматривают лишь как язык, позволяющий точнее сформулировать эти концепции. Однако сами ученые придерживались иных взглядов — математика была для них на первом месте. Словесные формулировки, считали они, полезны и даже необходимы, но не это главное.

Ученые, совершавшие революцию в астрономии, рассматривали науку как способ познания мира. Эта точка зрения и по сей день господствует среди ученых. Однако ее не всегда разделяют специалисты по истории науки. Некоторые из них считают, что теории — это не что иное, как удобный, но недолговечный инструмент для научных предсказаний. Другие отказывают науке в объективности, аргументируя это тем, что факты «подгоняются под теорию» и, следовательно, говорить о научной истине — бессмысленно.

Возможно, что историки науки в чем-то правы, а ученые ошибаются в этих спорных вопросах: курица, видимо, не лучший судья снесенному яйцу. Однако суждения ученых от этого не становятся менее важными и интересными, ибо философские концепции Кеплера, Галилея и Ньютона, какими бы наивными они сегодня ни казались, неразрывно связаны с научными достижениями этих ученых. Поэтому в нашей книге речь идет не только о развитии научных теорий, но и о том, как сами создатели этих теорий оценивали научные знания и их связь с истиной.

Последняя глава книги посвящена происхождению и эволюции наблюдаемой Вселенной. Несомненно, это не только наиболее интригующий, но и самый спорный вопрос современной космологии. При изложении этого материала возможны два

подхода: либо подчеркнуть, либо сгладить различие между надежно обоснованными теориями, с одной стороны, и широко распространенными, но до сих пор не имеющими надежного обоснования гипотезами — с другой. Я выбрал первый подход. Я также попытался подробно обосновать собственные воззрения на такие вопросы, как ранние этапы эволюции Вселенной, происхождение астрономических систем и природа фонового космического излучения. Я отнюдь не ставлю целью убедить читателя в том, что моя теория лучше других, а лишь надеюсь, что обсуждение конкурирующих космологических гипотез поможет ему понять, как и почему ученые, основываясь на одинаковых теоретических предпосылках, по-разному интерпретируют одну и ту же совокупность наблюдательных данных. Я также полагаю, что это позволит передать состояние подъема и неопределенности, характерные для развития науки.

Часть этой книги вошла в курс лекций, прочитанных мною студентам, которые, как правило, не готовились к карьере ученых. В основном же изложенный в книге материал использовался при чтении курса для студентов, специализирующихся в области математики, физики и астрономии. Любознательность моих слушателей и дискуссии, сопровождавшие лекции, постоянно стимулировали мою работу.

Я считаю, что книги Библиотечной серии, выпускаемые журналом *Scientific American*, — это плод коллективных усилий, где на долю автора выпадает немало радости, а на долю остальных членов коллектива — в основном черновая работа. Желая поделиться своей радостью, я приношу глубокую благодарность людям, помогавшим мне.

Все началось с намерения Джерарда Пила (издателя журнала *Scientific American*) выпустить небольшую, хорошо иллюстрированную книгу, которая представляла бы «квинтэссенцию» двух толстых томов машинописного текста моих лекций. «Я пришлю к Вам Линду Чапут», — сказал он, и она принялась осуществлять эту идею, проявив такую энергию, энтузиазм и интеллект, что все мы поверили, что книга будет сделана, причем хорошо и к нужному сроку. Джеймс Маурер поддерживал и координировал наши усилия с большим искусством, тактом и воображением при активной помощи Лизы Дуглис, Сары Сегал, Дэниела Такстона, Джил Фелдхейм и Джулии Маквою.

Особенно хочу поблагодарить моего редактора Айдана Келли, который, как опытный штурман, помог мне проложить курс между мелями излишнего упрощения и водоворотами сложных математических рассуждений.

По моему замыслу, большую роль в книге призваны были играть иллюстрации. Это стало возможным благодаря помощи многих людей: Джорджа Келвина, который превратил мои грубые наброски в красивые и ясные рисунки, украшающие страницы книги; специалиста по истории фотографии Дэвида Баркана, который перерыл Манхэттенский фотоархив в поисках прекрасных фотографий, а также моих коллег из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра: Овена Джинджерика, Джона Хакра, Роберта Стэчника, Роберта Ф. К. Вессо, Марты

Лиллер и особенно Кристины Джонс и Уильяма Формана, которые предоставили мне и помогли отобрать рентгеновские снимки, приведенные в гл. 8.

И наконец, я глубоко признателен Джоан Томпсон, которая не только умело и терпеливо подготавливала и обрабатывала, казалось бы, бесконечные варианты рукописи, но и ухитрялась воспринимать каждый новый вариант с улыбкой.

Дэвид Лейзер

Гарвардский университет

8 февраля 1984 г.



Космология и научная истина

«Глубокая философия скрыта в великой книге — Вселенной, всегда открытой нашему пытливому взору. Но прочесть эту книгу можно, лишь научившись разбираться в ее языке, научившись читать буквы, из которых она состоит. А написана она языком математики и ее буквы — это треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без знания которых люди не смогут понять в ней ни единого слова и сбиться с пути познания, словно в темном лабиринте».

Галилео Галилей

Ночное небо выглядит сегодня так же, как и 400 лет назад, однако мы смотрим на него другими глазами. Вот как оно представлялось Лоренцо, персонажу комедии Шекспира «Венецианский купец», написанной в 1596 г.:

*Сядь, Джессика. Взгляни, как небосвод
Весь выложен кружками золотыми;
И самый малый, если посмотреть,
Поет в своем движенье, словно ангел,
И вторит юнооким херувимам.
Гармония подобная живет
В бессмертных душах, но пока она
Земною, грязной оболочкой праха
Покрыта, мы ее не слышим*.*

Современный Лоренцо мог бы объяснить своей Джессике (как, впрочем, и она ему), что звезды — это газовые шары, которые удерживаются как целое силой гравитации, действующей между атомами газа; он мог бы сказать, что все наблюдаемые нами звезды сами представляют собой своего рода атомы, из которых состоит гигантская звездная система — Галактика, по форме напоминающая Солнечную систему, но в триллионы раз более массивная и в сотни миллионов раз более протяженная. Он, вероятно, добавил бы, что Галак-

* Шекспир В. Собрание сочинений. Т. 3. — М.: Искусство, 1958. С. 300. (Перевод Т. Щепкиной-Куперник.)

тика, в свою очередь, — это один из бесчисленного множества подобных атомов в «газе», простирающемся бесконечно во всех направлениях, что этот газ и пространство, им заполняемое, непрерывно расширяются, так что каждые 20 млрд. лет расстояние между любыми двумя галактиками удваивается. И наконец, он мог бы сказать, что наблюдаемая Вселенная возникла 10 млрд. лет назад в виде бесструктурного образования с невообразимо высокой плотностью энергии.

Современная космологическая теория берет свое начало в работах Николая Коперника (1473—1543) и Иоганна Кеплера (1571—1630). Однако картина мира, основанная на теориях этих астрономов, пожалуй, ближе к той, что нарисована Шекспиром, чем к современной. Ранние научные теории строения Вселенной, пришедшие на смену древним представлениям о мироздании — которые восходят к древним грекам, а частично к еще более ранним цивилизациям, — по существу сохранили их многие основные черты. Познакомимся же поближе с некоторыми из этих представлений.

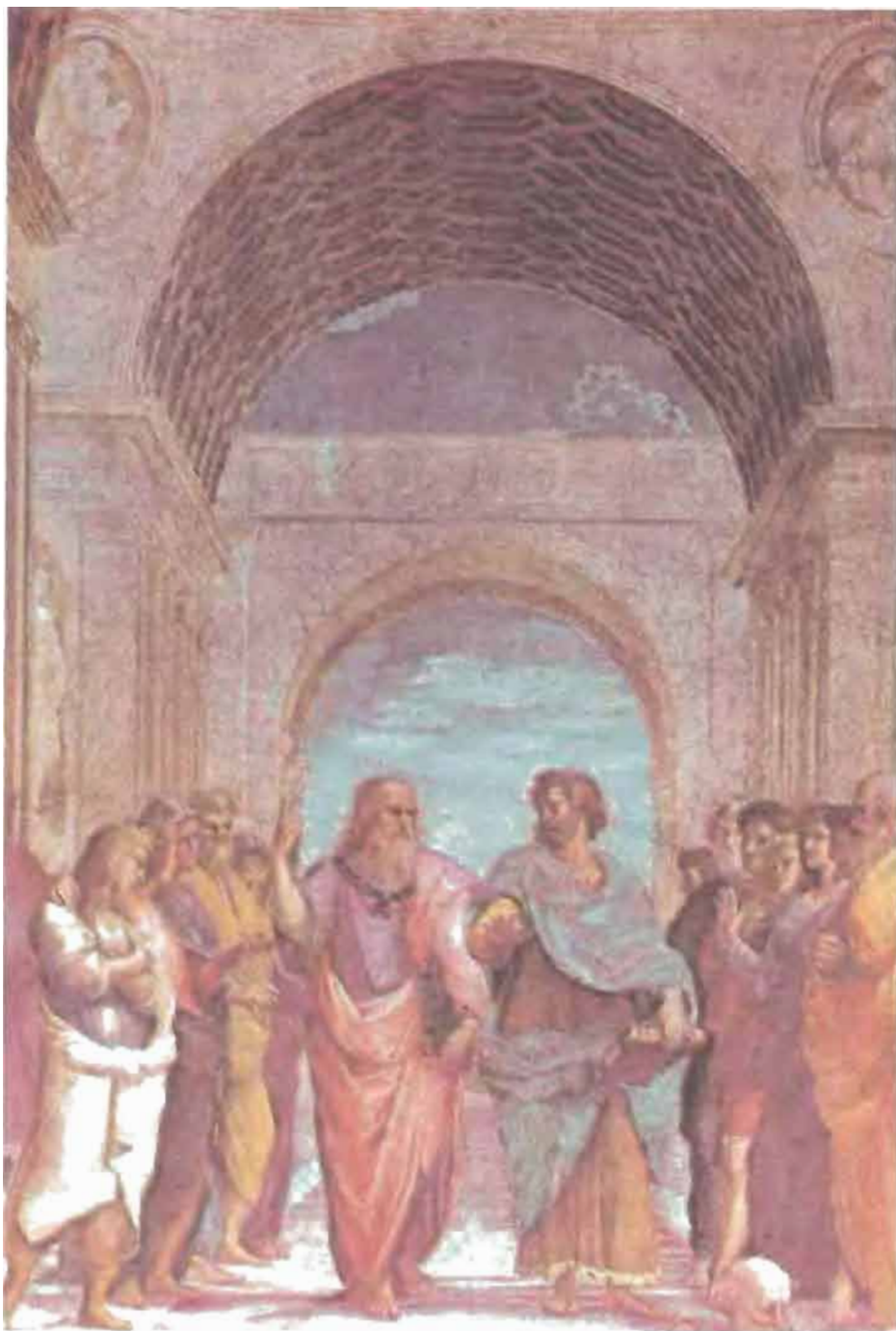
Повторяющиеся идеи в космологии

В монологе Лоренцо Шекспир упоминает четыре основных принципа античной космологии. Первый из них — представление о *небесном своде*. В космологических теориях древних вавилонян, иудеев, египтян и греков предполагалось, что Земля находится в центре Вселенной, а твердый небесный свод служит опорой для звезд и отделяет Небо от Земли. Большинство звезд неподвижно прикреплено к небесному своду, но Солнце, Луна, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн перемещаются относительно фона неподвижных звезд. Кстати, слово «планеты» произошло от древнегреческого слова «блуждающий». В эпоху Платона (427—347 гг. до н. э.) греческие астрономы отводили каждому блуждающему светилу свою прозрачную, твердую сферу. Вращение этих сфер считалось основной причиной наблюдаемого перемещения блуждающих светил относительно небесного свода. Евдокс (408—355 гг. до н. э.), один из наиболее оригинальных математиков своего времени, попытался более точно воспроизвести характер этих перемещений, предположив, что с каждым из светил связано несколько вращающихся с разной скоростью концентрических сфер, искусно соединенных воедино. Его ученик Каллипус ввел дополнительные сферы, а ученик Платона Аристотель (384—322 гг. до н. э.) добавил новые, доведя полное число сфер до 55.

Представление о небесном своде («сфере неподвижных звезд») сохранилось в системе мира, построенной Коперником, хотя он и перенес центр Вселенной с Земли на Солнце, объяснив суточное перемещение Солнца вращением Земли вокруг своей оси. Век спустя Кеплер обошелся вообще без небесного свода, однако не отказался от мысли, что все звезды сосредоточены в тонкой сферической оболочке, в центре которой находится Солнце.

Второй космологический принцип, отмеченный героем Шекспира, — это идея об *одухотворенности небесных тел*. Платон верил, что звезды, как и другие тела, движущиеся без видимых причин, обладают душой. Аристотель, похоже, разделял это мнение, однако в своих основополагающих трудах первопричиной движений звезд и планет Аристотель называл некий неподвижный движитель. Коперник мыслил более конкретно. В своей книге «Об обращениях небесных сфер» он писал:

В середине всего находится Солнце. Действительно, в таком великолепнейшем храме кто мог бы поместить этот светильник в другом и лучшем месте, как не в том, откуда он может одновременно все освещать. Ведь не напрасно некоторые назы-

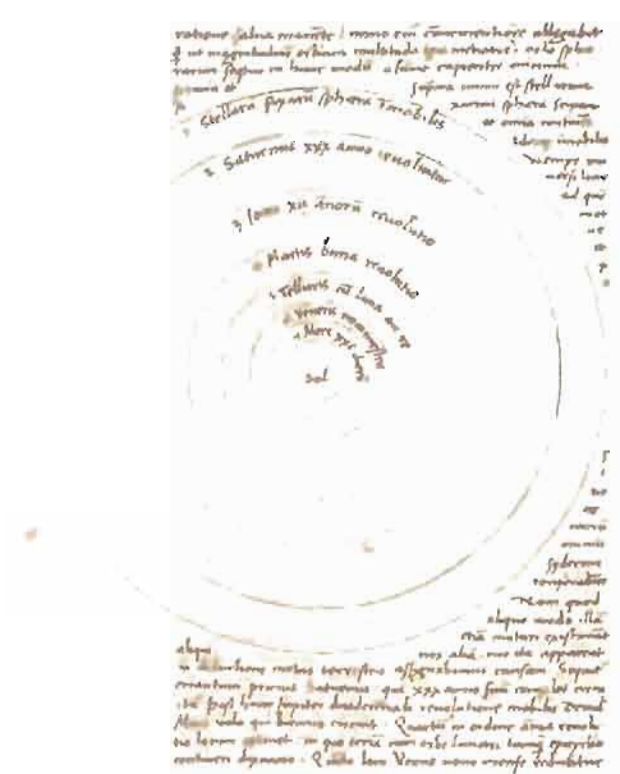
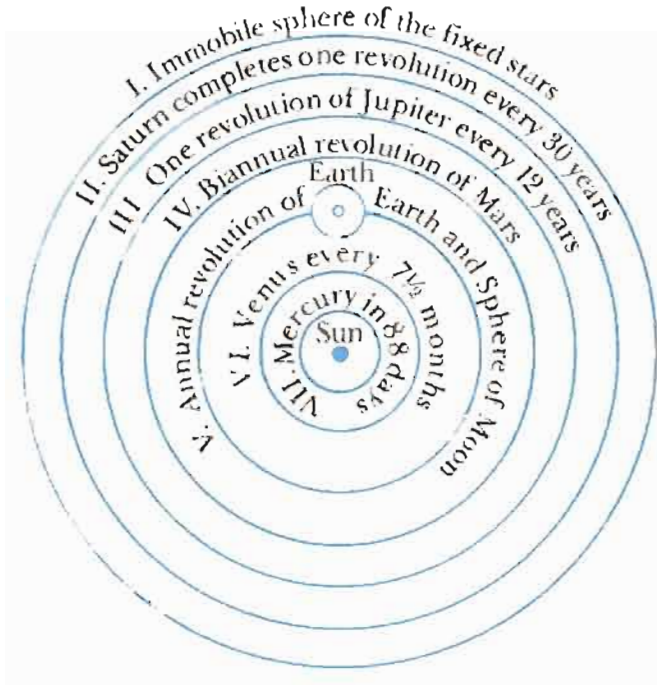


Фреска Рафаэля «Афинская школа» (1509—1510), на которой изображены Платон и Аристотель. Свои суждения о том, что математические законы выражают глубинную сущность реального мира, Галилей и Кеплер рассматривали как продолжение традиций древнегреческой философии, представителями которой они считали Пифагора и Архимеда. Аристотель, напротив, полагал, что основополагающие истины об окружающем мире познаются лишь логическим осмыслением повседневных наблюдений и не нуждаются в математической формулировке. (Коллекция Грейнджера.)

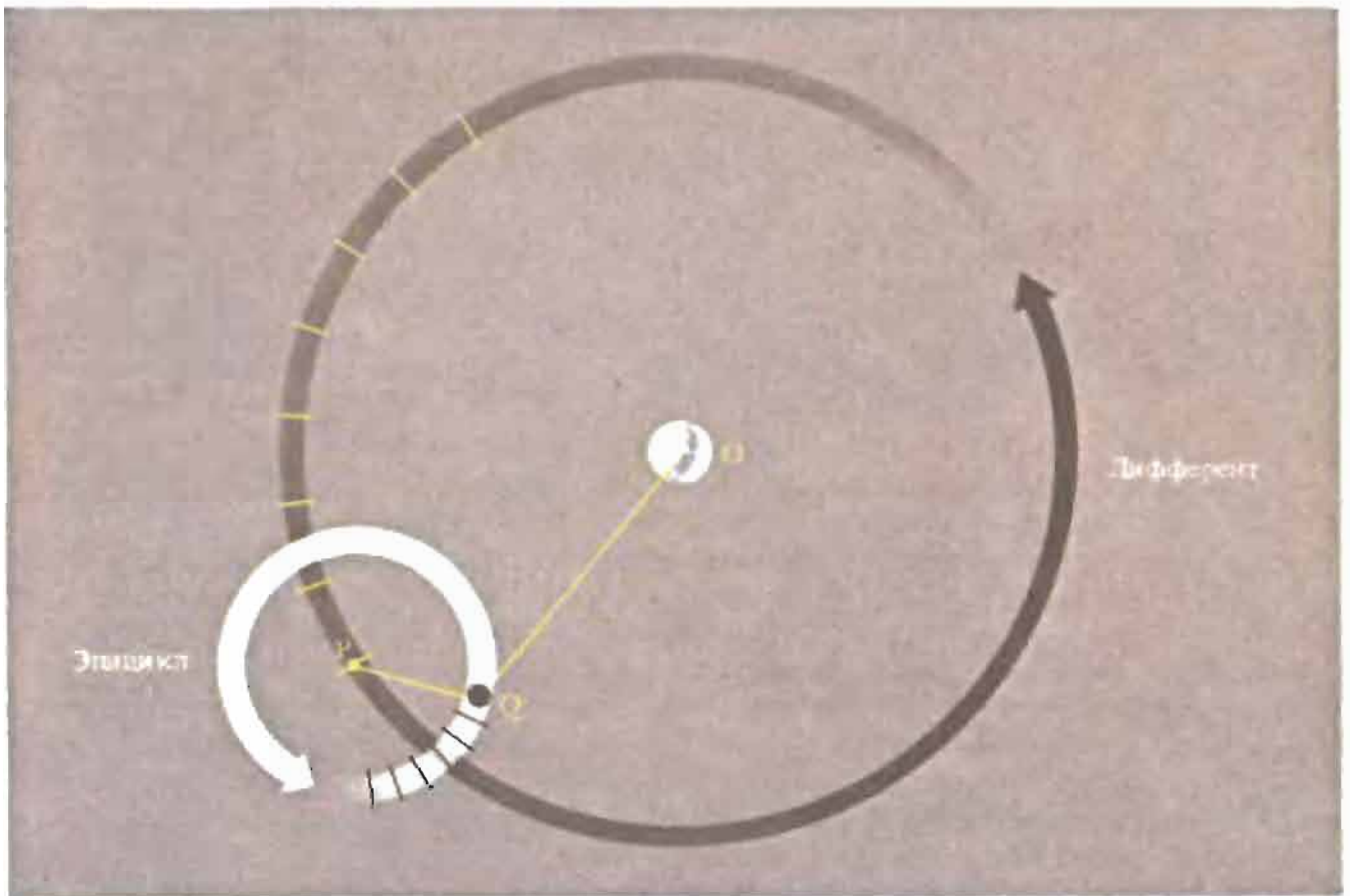
вают Солнце светильником мира, другие — умом его, а третьи — правителем. Гермес Трисмегист называет его видимым богом, а Софоклова Электра — всевидящим. Конечно, именно так Солнце, как бы восседающая на царском троне, правит обходящей вокруг него семьей светил. ([4], с. 35.)

Кеплер в молодые годы также считал планеты «одухотворенными сущностями», но впоследствии пришел к убеждению, что причина движения планет имеет чисто физический характер, — она связана с вращением Солнца вокруг оси.

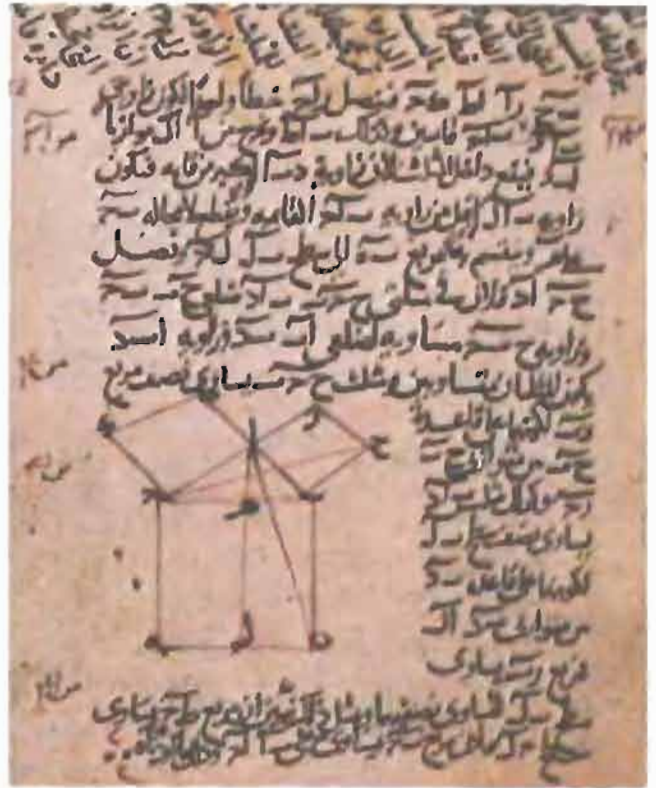
Третий космологический принцип — *принцип небесного совершенства*. Платон и Аристотель, как и другие философы того времени, верили, что небеса идеальны во всех отношениях. Исходя из этой доктрины, они считали, что небесные тела и поддерживающие их опоры должны состоять из вечной, неразрушаемой субстанции — эфира. Форма небесных тел должна быть сферической, поскольку сфера — это единственное геометрическое тело, все точки поверхности которого равноудалены от центра. Основываясь на том же



Факсимиле страницы книги Коперника «Об обращениях небесных сфер» с собственной иллюстрацией автора. Слева воспроизведен тот же рисунок, но уже с латинскими надписями. (Коллекция Грейнджера)



Пояснение принципа равномерного движения по окружности. Планета Q движется с постоянной скоростью по малому кругу (эпициклу), центр которого P, с постоянной скоростью движется по большому кругу (деференту), в центре которого (точка O) находится неподвижная Земля.

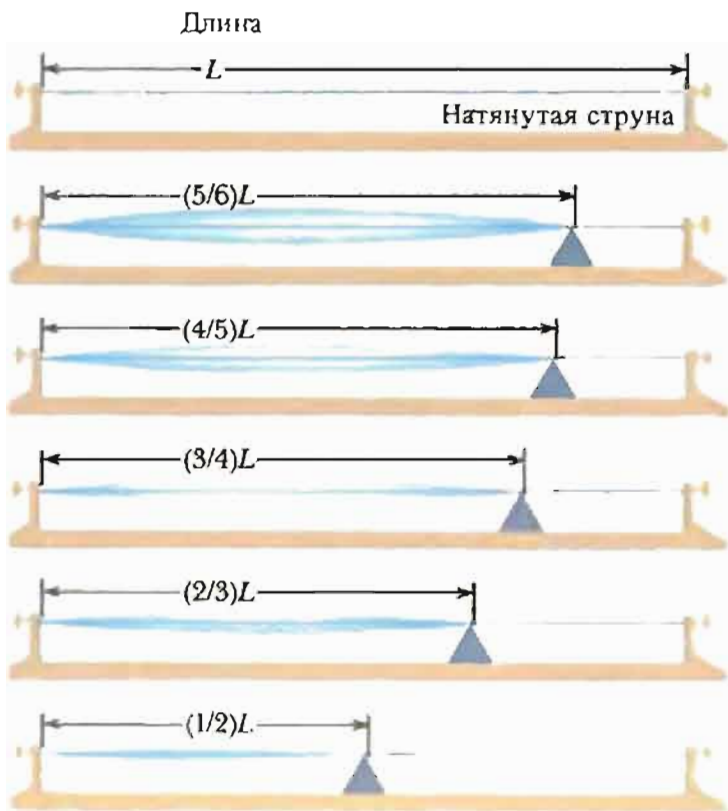


На этой французской гравюре, созданной в 1584 г., изображен Пифагор (ок. 580—500 гг. до н. э.) с магическим талисманом в руках. Пифагор не только доказал знаменитую теорему, носящую его имя, и открыл законы музыкальной гармонии, но и разработал целую систему взглядов, согласно которой фундаментальная структура мира заключена в математических соотношениях. Его учение привлекло к себе немало сторонников, которые основали весьма влиятельную религиозно-философскую общину. Справа воспроизведен фрагмент рукописи (1258) арабского ученого Аль-Туси, где изложено доказательство теоремы Пифагора. (Коллекция Грейнджера.)

принципе, древнегреческие астрономы во времена Платона сформулировали *догмат равномерного движения по окружности*: движение небесных тел происходит по окружности с постоянной скоростью либо представляет собой комбинацию двух или более движений такого рода. Например, планета Q (см. приведенную здесь диаграмму) может равномерно двигаться по окружности, центр которой, точка P , в свою очередь равномерно движется по окружности большего радиуса вокруг покоящейся Земли (точка O). Это представление господствовало в астрономии на протяжении 2000 лет. Коперник был одним из наиболее убежденных и непоколебимых ее сторонников. И величайшей заслугой Кеплера, видимо, следует считать введение иного, и, как оказалось, более совершенного способа описания движений планет, в чем мы убедимся в гл. 2.

Четвертый принцип — это *музыка сфер*. Слова Лоренцо о небесном хоре, в котором каждая сфера «поет ... словно ангел», обязаны своим происхождением «Тимею» — последнему из космологических диалогов Платона, переведенных Цицероном на латинский язык. Тимей был последователем Пифагора, жившим во второй половине VI в. до н. э. В основном диалог «Тимей» представляет собой изложение космологических воззрений пифагорейцев — религиозно-философской школы, основанной Пифагором. Пифагорейцы, в частности, считали, что музыкальная гармония и движения планет обусловлены одними и теми же математическими законами.

Пифагор открыл замечательную связь между числами и законами музыкальной гармонии. Он обнаружил, что высота тона колеблющейся струны,



Зажатая часть струны	Интервал
C	—
E \flat	Малая терция
E	Большая терция
F	Кварта
G	Квинта
C'	Октава

Диаграмма, иллюстрирующая установленную Пифагором зависимость между длиной колеблющейся струны и высотой тона возбуждаемого звука.

концы которой закреплены, простым образом зависит от ее длины. Уменьшение длины колеблющейся части скрипичной струны вдвое приводит к повышению тона рождаемого ею звука на октаву. Уменьшение длины струны на одну треть повышает тон звука на чистую квинту, уменьшение на одну четверть повышает тон на чистую кварту; если длина струны сокращается на одну пятую, то тон повышается на большую терцию, а при уменьшении длины на одну шестую — на малую терцию. На основании подобного рода закономерностей Пифагор и его последователи детально разработали теорию музыкальной гаммы и гармонии. Успехи этой теории укрепили их веру в то, что в основе наблюдаемых небесных явлений лежат математические закономерности. Существование восьми небесных сфер (одной — для неподвижных звезд и семи — для Солнца, Луны и пяти ярких планет) и такого же числа тонов диатонической гаммы, казалось, подтверждали подобные суждения. В сочинении «Государство» Платон рассказывает историю Эра — павшего в бою солдата, который после путешествия по небесам был возвращен богами на Землю. «На каждом из кругов, — рассказывает Эр, — стоит Сирена, которая, перемещаясь вместе с ним, поет одну ноту, и восемь нот сливаются в гармонию». В «Тимее» изложена теория небесной гармонии, которая включает метод построения двенадцатитоновой гаммы.

Космологические представления, распространенные во времена Шекспира, вскоре сокрушила революция, происшедшая в астрономии. Хотя сам Коперник и верил в существование твердого небесного свода, его последователи отказались от этой «излишней детали» в разработанной им системе мира. Внезапное появление и последующее угасание ярких новых звезд в 1572 г. (Сверхновая Тихо Браге) и в 1604 г. (Сверхновая Кеплера), а также воз-



Бронзовый бюст Демокрита (ок. 460—370 гг. до н. э.) работы древнегреческого мастера. Демокрит развил учение Левкиппа (V в. до н. э.), утверждавшего, что мир состоит из неделимых и неуничтожимых атомов, движущихся в пустоте. Эту точку зрения впоследствии разделял и Ньютон. (Коллекция Грейнджера.)

никновение и исчезновение на поверхности Солнца темных пятен неправильной формы — открытое Галилеем с помощью телескопа — явно указывали на то, что небесные тела не столь уж неизменны и совершенны. Новая физика, путь которой проложили Кеплер и Галилей, постепенно взяла верх над платоновской доктриной души как универсального объяснения небесных явлений. И хотя идея неизменной математической гармонии, лежащей в основе наблюдаемых явлений, продолжала вдохновлять исследователей (и вдохновляет до сих пор), после Кеплера ни один из великих ученых не искал в движении небесных тел аналогий с музыкой.

Однако революция в астрономии изъела из употребления не все принципы античной космологии — некоторые из них играют такую же важную роль в современной космологии, как и во времена древних греков. Один из этих неизменных мотивов: *пустота или заполненность (Void versus Plenum)*. Древнегреческие философы, размышляя о структурной основе мира, разделились на две противоборствующие школы. Левкипп и Демокрит, жившие в конце V в. до н. э., полагали, что вещество состоит из крошечных, невидимых атомов, движущихся в окружающем пустом пространстве. Различие в непосредственно ощущаемых свойствах тел — таких, как цвет, вкус, структура, вес, температура, — они объясняли различием их атомного состава. По мнению же их противников (гораздо более многочисленных), мир заполнен одной или несколькими субстанциями, образующими сплошную среду. Аристотель, например, полагал, что часть мира, расположенная внутри сферы Луны, состоит из земли, воды, воздуха, и огня, тогда как небеса состоят из пятой субстанции — эфира. По его мнению, эфир неизменяем и не имеет структуры, тогда как остальные четыре субстанции могут превращаться друг в друга. В частности, вода (которой свойственны холод и влажность) путем нагревания превращается в воздух (обладающий теплотой и влажностью), а воздух при осушении переходит в огонь.

Научная революция, происшедшая в XVII—XVIII вв., скорее возродила, чем разрешила конфликт между атомистами, которые рассматривали мир как вакуум, заполненный невидимыми, далеко отстоящими друг от друга атомами, и теми, кто считал, что пространство заполнено сплошной, бесструктурной субстанцией. Исаак Ньютон (1642—1727) был бескомпромиссным приверженцем атомистической теории. Он полагал, что как свет, так и вещество состоят из невидимых частиц, а теплота обусловлена их движением. Он также верил



«Затемнив комнату, я проделал в ставнях маленькое отверстие, пропускающее в комнату достаточное количество солнечного света. На пути солнечного луча я поместил призму, так чтобы луч преломлялся к противоположной стене». С помощью этого и других экспериментов Исаак Ньютон в 1666 г. доказал, что белый свет представляет собой совокупность лучей разного цвета, каждый из которых характеризуется своим коэффициентом преломления. Гравюра XIX в. (Коллекция Грейнджера.)



Рене Декарт. Он и Пьер Ферма (1601—1665) независимо друг от друга создали аналитическую геометрию. Космология Декарта, получившая большее признание, чем космология Ньютона, основывалась на представлениях об эфире, заполняющем Вселенную, и отрицала принцип дальнего действия. Декарт считал, что все физические свойства тел обусловлены протяженностью и движением. (Архив Беттмана.)

в существование всеобъемлющего эфира, состоящего исключительно из света и быстродвижущихся частиц. С другой стороны, Рене Декарт (1596—1650) был убежден, что все пространство между твердыми телами заполнено сплошной эфирной средой, завихрениями которой и обусловлено взаимодействие между твердыми телами.

Свои представления об эфире Декарт, как и Аристотель, строили на двух, как им казалось, самоочевидных истинах: во-первых, природа не терпит пустоты и, во-вторых, взаимодействие на расстоянии невозможно. Со второй половины XVII в. и на протяжении всего XVIII в. сторонники Декарта отстаивали эти и другие принципы его космологии в борьбе с «математической философией» Ньютона. Декартова космология была качественной, довольно запутанной и содержала множество *ad hoc* (специально подобранных) положений. В отличие от нее теория Ньютона давала полное и точное описание мира, основанное на нескольких простых математических законах, причем теоретические предсказания и результаты наблюдений хорошо согласовались. Тем не менее Ньютон признавал, что с его концепцией действия на расстоянии трудно согласиться.

В XIX в. пустоту заполнили новые физические сущности: гравитационное поле, электрические и магнитные поля, электромагнитное излучение и «новый эфир» — среда, где распространяются электромагнитные волны. Физика XX в. отказалась от эфира; теперь пространство заполнилось качественно новыми видами полей и объектами совершенно нового типа. В современной физике

«вакуум» настолько сложное понятие, что теоретики до сих пор не в состоянии дать его полное и самосогласованное описание.

Еще один принцип космологии древнегреческих атомистов и Аристотеля, который остается столь же фундаментальным и в современной науке, гласит, что *в основе изменений лежит неизменность*. В современной физике считается, что ни атом, ни субатомные частицы, не могут исчезать бесследно. Электрон и его античастица позитрон, столкнувшись, исчезают, порождая квант света, однако *свойства* электрона, которые создают то, что Платон назвал бы *Формой* и *Идеей*, универсальны и неизменны. Современной аналогией древних субстанций — земли, воздуха, воды и огня — можно считать сохраняющиеся величины, такие, как энергия и электрический заряд.

И наконец, дилемма «*центризм* или *однородность*», существовавшая в античной космологии, жива и в современной науке. Находимся ли мы в центре Вселенной? Мир Платона и Аристотеля напоминал луковицу, в сердцевине которой находилась Земля, тогда как сфера неподвижных звезд составляла ее внешнюю оболочку. С другой стороны, Левкипп и Демокрит полагали, что звезды — это далекие солнца, свет которых приходит к нам из бесконечного пространства. Историк науки Александр Койр в книге «От замкнутого мира к бесконечной Вселенной» утверждал, что переход от одного мировоззрения к другому был ключевым моментом научной революции. Однако имел ли место подобный переход на самом деле?

В XIII в. сочинения Фомы Аквинского изменили направленность христианской теологии: отказавшись от идей Платона, которые претерпели значительное изменение за прошедшее тысячелетие, религия нашла опору в философии Аристотеля, в результате чего последняя приобрела религиозный оттенок. «Ад» Данте и «Потерянный рай» Мильтона дают нам представление о теологической космологии, безраздельно господствовавшей вплоть до XV в. Альтернативная космология пришла в Европу, так сказать, через третьи руки. В 1417 г. после долгого забвения была опубликована стихотворная поэма Лукреция (99—55 гг. до н. э.) «О природе вещей». Ее автор, римский философ и поэт, был последователем Эпикура (341—270 гг. до н. э.), который, в свою очередь, воспринял физические и космологические представления Левкиппа и Демокрита. Лукреций представлял Вселенную как пустоту, не густо, но равномерно заполненную абсолютно твердыми, неделимыми и неуничтожимыми частицами материи, разлетающимися во все стороны. «Вселенная, — говорил Лукреций, — не имеет центра и содержит бесконечное множество обитаемых миров». Более того, он утверждал, что Вселенная и происходящие в ней события неподвластны богам.

Самым знаменитым последователем Лукреция был Джордано Бруно (1548—1600), трагическая жизнь и смерть которого явились результатом его конфликта с церковью. Монах доминиканец, он был обвинен в ереси и изгнан из ордена. Последовали долгие годы скитаний по Европе. Кальвинистская церковь Женевы заточила его в тюрьму, а лютеранская в Германии подвергла отлучению. И наконец, в феврале 1600 г., после семилетнего заточения, по приказу инквизиции его заживо сожгли на костре. Космологические воззрения Джордано Бруно были скорее эклектичными, нежели оригинальными. Представления Лукреция о бесконечности пространства и множестве обитаемых миров он объединил с мистическими, магическими и анимистическими* традициями оккультизма, восходящими к Гермесу Трисмегисту. Бруно верил, что звезды и планеты наделены душой и высмеивал утверждения о том, что математические рассуждения могут способствовать пониманию небесных тайн.

* Анимизм — одухотворение природных явлений. — Прим. перев.



Эпикур (341—270 гг. до н. э.) — последователь атомистической философии Левкиппа и Демокрита; на основании ее он создал новую этику и так называемую циклическую космологию. Философия Эпикура отражена в поэме Лукреция (ок. 96—95 гг. до н. э.) «О природе вещей» (*De Rerum Natura*). (Коллекция Грейнджера.)



Отстаивая идею бесконечности Вселенной и множественности обитаемых миров, Джордано Бруно (1548—1600) вступил в конфликт с научными и церковными авторитетами. (Архив Бетмана.)

Как мы уже говорили, Коперник представлял Вселенную в виде сферы, в центре которой находится Солнце, а Кеплер считал, что звезды заключены внутри тонкой сферической оболочки, окружающей Солнце. Галилей предумышленно умалчивал о форме и размерах звездной Вселенной. В своем «Диалоге о двух главнейших системах мира: Птолемеевой и Коперниковой» он тактично предоставил Симпличио, персонажу, выступающему с позиций Аристотеля и церкви, высказать окончательное мнение по этому поводу.

Сальвиати: Что же мы теперь сделаем, синьор Симпличио, с неподвижными звездами? Рассеем ли мы их по огромным безднам вселенной на разных удалениях от какой-нибудь определенной точки или же соберем их на одной поверхности, сферически расположенной вокруг своего центра так, что каждая из них будет равно отстоять от одного и того же центра?

Симпличио: Скорее я выбрал бы средний путь и отвел бы им сферу с определенным центром, ограниченную двумя шаровыми поверхностями, т. е. одной внешней вогнутой и другой нижней выпуклой. Между ними я поместил бы все бесчисленное множество звезд, но все же на разной высоте; это могло бы называться сферой вселенной, заключающей внутри себя орбиты планет, уже обозначенные нами.

Сальвиати: Итак, синьор Симпличио, к настоящему моменту мы уже расположили мировые тела в точном соответствии с системой Коперника; сделано это было вашей собственной рукой... (см. [1] к гл. 2, с. 419.)

В письме, написанном в 1640 г., за два года до своей смерти, Галилей отнес вопрос о размерах Вселенной к категории таких, «которые, как и вопросы о предопределенности бытия, свободе воли и им подобные, недоступны несовершенному человеческому разуму, и не исключено, что ответы на них может дать лишь священное писание и божественное откровение». Декарт полагал, что Вселенная безгранична, но не бесконечна. А по мнению Ньютона,

звезды — это далекие светила, подобные Солнцу, которые возникли в результате конденсации вещества, первоначально «равномерно заполнявшего бесконечное пространство». Согласно Ньютону, Вселенная не только безгранична, но и однородна, т. е. в среднем ее свойства одинаковы во всех точках и по всем направлениям. Аналогичных взглядов придерживались Лукреций и Джордано Бруно, который писал: «Центр — везде, периферия — нигде». Декарт был согласен со второй половиной этого афоризма, но не признавал первой, и в этом смысле его космология оставалась аристотелевой.

Хотя физика Декарта и не могла конкурировать с физикой Ньютона, геоцентрические представления Аристотеля не сразу уступили место представлениям о строении мира, унаследованным Ньютоном от древнегреческих атомистов. На протяжении XVIII—XIX и даже в начале XX вв. большинство ученых, непосредственно занимающихся астрономией, т. е. ведущих наблюдения в телескоп или выполняющих астрономические расчеты и измерения, основывались скорее на представлениях о строении мира Коперника, Кеплера, и Галилея, нежели Ньютона. Убедившись, что звезды — это далекие солнца, они продолжали считать, что наше Солнце расположено в центре Вселенной или по крайней мере вблизи него. Впрочем, тогда казалось, что и наблюдения свидетельствуют в пользу такого представления. Когда же в 1918 г. Харлоу Шепли обнаружил, что Солнце находится вблизи края громадной сферы, образованной шаровыми звездными скоплениями, астрономы переместили центр Вселенной в центр этой сферы. Первое убедительное свидетельство в пользу ньютоновского постулата об однородности пространства, полученное из наблюдений, дал в 1929 г. Эдвин Хаббл. Однако противоположная точка зрения (согласно которой Вселенная имеет центр и мы находимся неподалеку от него) отстаивалась некоторыми учеными вплоть до конца 60-х годов нашего столетия.

Описание или объяснение

Если научная революция XVII в. не привела к замене античных космологических представлений более «научными», то в чем же она заключалась? Чем современная научная космология отличается от древних мистических описаний мира и его происхождения? По-видимому, большинство физиков и астрономов ответили бы на этот вопрос примерно одинаково.

Научная космология и лежащие в ее основе физические теории не просто более или менее правильно описывают Вселенную — они дают *истинную* картину Вселенной. Конечно, не все современные гипотезы о строении Вселенной впоследствии подтвердятся, ибо, как показывает история, научные представления непрерывно изменяются. Изменяются и физические теории, лежащие в их основе (например, теория гравитации), хотя и не столь быстро. Однако как физические, так и космологические теории содержат зерно истины. Это зерно непрерывно разрастается, и нет предела широте и глубине познания физической Вселенной.

Этот взгляд на процесс научного познания Галилей и Декарт отчетливо и убедительно сформулировали еще в начале XVII в., и до сих пор большинство естествоиспытателей более или менее бессознательно его придерживаются.

Английский философ Дэвид Юм (1711—1776) привел веские логические доводы в пользу того, что познание причинных связей между наблюдаемыми событиями невозможно, если, как он постулировал, все наше знание получено из опыта. (Суть его аргументации сводится к тому, что опыт не позволяет



Эрнст Мах (1838—1916) — физик, историк науки и философ, выступавший вслед за Локком, Беркли и Юмом с позиций позитивизма. Он считал, что физические законы — это не более чем удобные «рецепты», позволяющие трактовать проведенные эксперименты и предсказывать результаты новых опытов. (Архив Беттмана.)

нам непосредственно знать, что событие *A* является причиной события *B*; мы можем только сказать, что событие *A* обычно предшествует событию *B*.) Немецкий философ Иммануил Кант (1724—1804) пытался защитить науку от критики Юма, доказывая, что научное знание основано на неких универсальных положениях, которые, однако, приобретаются не из опыта. В противоположность Юму и Аристотелю Кант полагал, в частности, что представление о времени и пространстве мы получаем не опытным путем. По мнению Канта, мы скорее всего не можем не ощущать внешний мир «в пространстве», а наш внутренний мир — «во времени». Пространство и время суть «формы» внешнего и внутреннего восприятия, своего рода «фильтры», встроенные в аппарат чувственного восприятия человека. Наряду с этими «категориями восприятия» Кант постулировал наличие «категорий познания» — неких фильтров, благодаря которым мы в процессе познания наделяем мир по крайней мере первоосновой того, что принято называть физическими законами. Например, теорема Пифагора и ньютоновский закон всемирного тяготения есть истины, которые упорядочивают жизненный опыт, но, согласно Канту, не извлекаются из оногo. Они несут истину не о внешнем мире, а о способах взаимодействия субъекта с этим, по существу, не познаваемым миром.

Уже в наше время значительное влияние на представления о роли науки оказал Эрнст Мах (1838—1916), который внес также большой вклад в физику и психологию. Мах был позитивистом; подобно Фрэнсису Бэкону (1561—1626) и Огюсту Конту (1798—1857), он полагал, что цель науки состоит в накоплении и упорядочении фактов, и в этом смысле «научный метод» является единственным источником истинных знаний. Мах доказывал, что научные законы — это не что иное, как краткое обобщение накопленного опыта, которое полезно для предсказания результатов будущих экспериментов. Теория, согласно Маху, не должна *объяснять* явления — она призвана только *описывать* их. Утверждать, что успешно применяемая теория отражает некоторую истину, лежащую в основе явления, — значит впасть в метафизику, поскольку такого рода утверждения не могут быть проверены наблюдениями или экспериментами.

Отказ Маха признать за научными теориями право на любое фундаментальное предназначение находит отклик у некоторых современных специалистов по истории и философии науки, которые в остальном не разделяют идей

позитивизма. Так, в книге «Структура научных революций» американский философ Томас Кун пишет:

Приходится часто слышать, что сменяющие друг друга теории все более приближаются к истине, все лучше ее аппроксимируют... У меня нет сомнений... в том, что ньютоновская механика усовершенствовала аристотелеву, а эйнштейновская — ньютонову как средство для решения конкретных задач. Однако я не могу усмотреть в их чередовании никакого последовательного направления в развитии учения о бытии. Наоборот, в некоторых, хотя, конечно, и не во всех, отношениях общая теория относительности Эйнштейна ближе к теории Аристотеля, чем любая из них к теории Ньютона.

Конфликт между наивными представлениями о науке как о накоплении знаний и позитивистским утверждением о чисто описательной ее функции начался не с Маха в XIX в. и даже не с Беркли и Юма в XVIII в. — он восходит к самым истокам современной науки. Великая книга Коперника «Об обращениях небесных сфер» (*De Revolutionibus Orbium Caelestium*), опубликованная в 1543 г., через несколько месяцев после смерти ее автора, начинается с обращения «К читателю, интересующемуся гипотезами этого сочинения», где по существу излагаются позитивистские взгляды на математический аппарат астрономии:

Задача астронома заключается в том, чтобы путем искусственных и тщательных наблюдений собрать воедино историю небесных движений, а затем — поскольку он не в состоянии никакими умозаключениями дойти до истинных причин этих движений — придумать или сконструировать какую-либо причину или гипотезу по своему разумению, чтобы на ее основе вычислить из геометрических принципов движения светил как в прошлом, так и в будущем... Если [математическая астрономия] и изобретает причины — а для этого, конечно, приходится много и напряженно думать, — то она тем не менее делает это не для того, чтобы убедить кого-либо в их истинности, а для того, чтобы создать подходящую основу для вычислений. А пока гипотезы преходящи, не будем ожидать чего-либо несомненного от астрономии, ибо астрономия не может предложить нам ничего определенного.

Это высказывание принадлежит не самому Копернику, а протестантскому священнику Андреасу Оссиандеру, который наблюдал за печатанием труда Коперника (это было установлено Кеплером полвека спустя). Намерения Оссиандера очевидны. Лютер предал идеи Коперника анафеме, ибо они противоречили Библии, где Иисус Навин приказывает остановиться Солнцу, а не Земле. Написав такое «покаянное» предисловие, Оссиандер хотел убедить читателя, что астрономия Коперника не претендует на истинность, что ее единственная цель — описать, а не объяснить движения Солнца, Луны и планет.

Некоторые из современных историков и философов науки разделяют точку зрения Оссиандера. Однако сам Коперник подходил к гелиоцентрической системе мира с иных позиций. В посвящении, адресованном папе Павлу III, он объясняет причину своей неудовлетворенности геоцентрическими моделями мира. Они неудовлетворительны потому, считает он, что в различных моделях для достижения одного и того же конечного результата используются различные способы вычислений, и ни в одной из них не соблюдается строго принцип равномерного кругового движения.

И самое главное, они не смогли определить форму мира и точную соразмерность его частей. Таким образом, с ними получилось то же самое, как если бы кто-нибудь набрал из различных мест руки, ноги, голову и другие члены, нарисованные хотя и отлично, но не в масштабе одного и того же тела; ввиду полного несоответствия

друг с другом из них, конечно, скорее составилось бы чудовище, а не человек. ([4], с. 13.)

Обнаружив, что пифагорейская школа древних греков объясняла движение небесных тел движением самой Земли, Коперник вдохновился этой идеей и решил проверить ее, и таким образом

... наконец, после многочисленных и продолжительных наблюдений обнаружил, что если с круговым движением Земли сравнить движения и остальных блуждающих светил и вычислить эти движения для периода обращения каждого светила, то получатся наблюдаемые у этих светил явления. Кроме того, последовательность и величины светил, все сферы и даже само небо окажутся так связанными, что ничего нельзя будет переставить ни в какой части, не произведя путаницы в остальных частях и во всей Вселенной.

... В этом расположении мы находим удивительную соразмерность мира и определенную гармоничную связь между движением и величиной орбит, которую иным способом нельзя обнаружить. ([4], сс. 14, 35.)

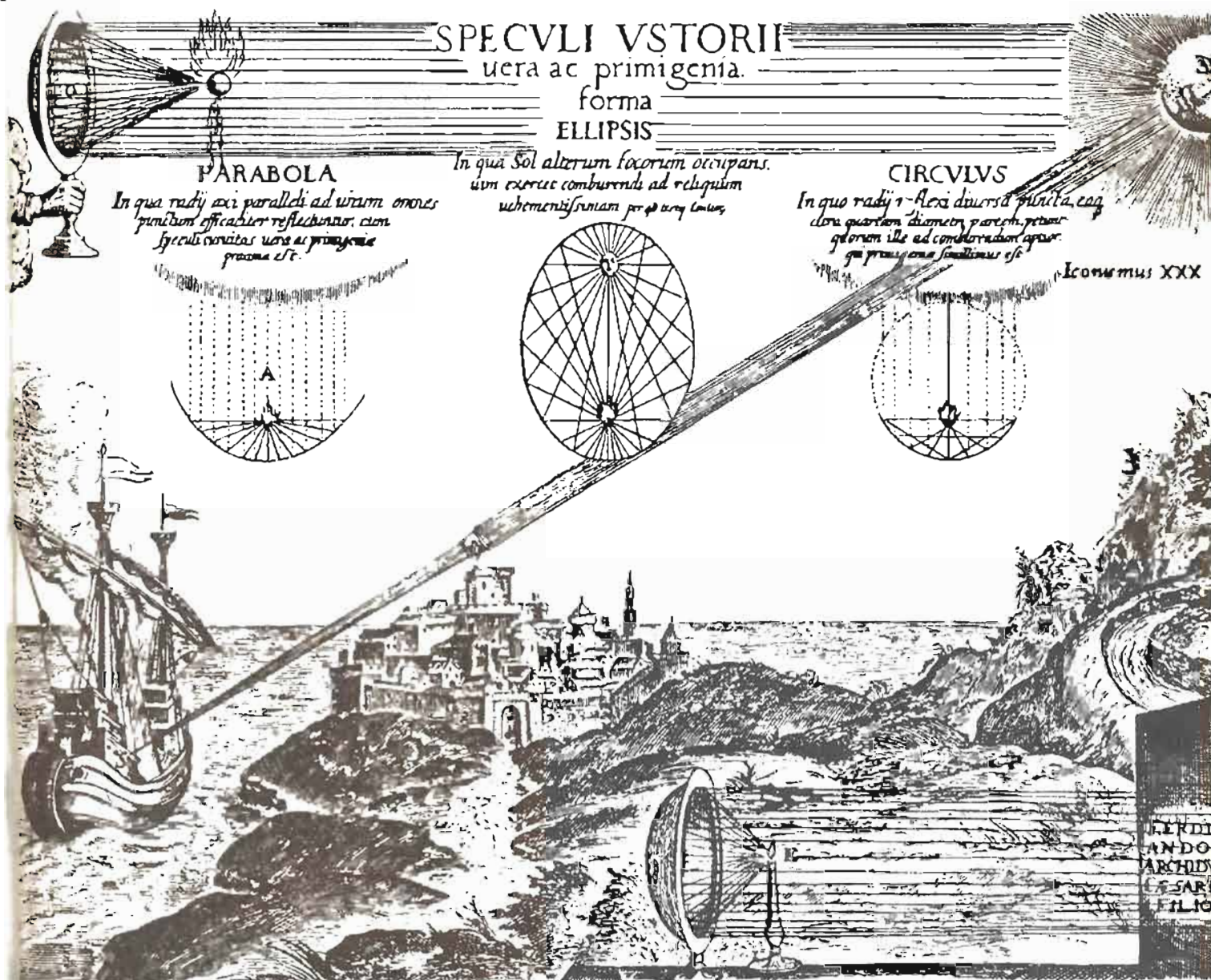
В своей книге Т. Кун признает, что, отстаивая истинность своей системы, Коперник приводит доводы, основанные на соображениях математической гармонии. Вместе с тем он пишет: «„Гармония“ — довольно странное основание для доказательства движения Земли, особенно если учесть, что гармония едва проглядывает сквозь множество кругов, из которых состоит система Коперника. Его аргументы обращены не к здравому смыслу астронома-практика, а к его эстетическому чувству и только к нему... Они обращены прежде всего к той ограниченной и, по-видимому, иррационально мыслящей группе математиков-астрономов, чья неоплатоническая тяга к математической гармонии способна преодолеть многие страницы математических выкладок, конечный результат которых — количественное предсказание, чуть лучшее, чем уже известное».

Но не является ли истина просто иллюзией, рожденной в умах математиков? Или, быть может, гармония — в том смысле, как ее понимают математики, — и есть признак истины?

Математическая гармония как критерий научной истины

Гармония и соразмерность — критерии истины как в повседневной жизни, так и в науке. Предположим, что, оглядев наполненную людьми комнату, я говорю себе: «Здесь Джейн». Я сформулировал некую гипотезу, связывающую несколько отрывочных впечатлений «узами гармонии». Моя гипотеза побуждает меня сделать дополнительные наблюдения. Я вспоминаю о пристрастии Джейн к серому цвету и потому, заметив на женщине, стоящей в дальнем конце комнаты, серый шарфик, прихожу к выводу, что моя гипотеза подтвердилась.

Научные обобщения происходят аналогичным образом. Допустим, я замечаю, что вспышка молнии всегда сопровождается — иногда сразу же, а порой с запаздыванием на несколько секунд — ударом грома. Однако, исходя из повторения подобного рода наблюдений, я не ограничиваюсь формулировкой общего правила: молния всегда предшествует грому. Зная, что свет распространяется быстрее звука, я выдвигаю более общую гипотезу: вспышка молнии и гром — следствия одного и того же атмосферного процесса. Я проверяю эту гипотезу, наблюдая за тем, каким образом запаздывание грома относительно молнии связано с силой грома и высотой вспышки молнии над горизонтом.



Гравюра Киршнера (XVII в.) с изображением системы зеркал, с помощью которой Архимед поджигал вражеские корабли, фокусируя на них солнечные лучи. Зеркало, форма которого образована вращением параболы вокруг оси симметрии, фокусирует пучок лучей, параллельный этой оси. Сферическое зеркало сводит почти в точку пучок параллельных лучей, приходящих с любых направлений. Эллиптическое зеркало действует так, что лучи, вышедшие из одного его фокуса, после отражения сходятся в другом. (Архив Бетмана.)

Хорошая научная теория или гипотеза, словно развязка в детективном романе, не только объединяет все факты, но и вскрывает неожиданную связь между явлениями, казалось бы, независимыми. Такого рода научные теории более убедительны, чем отдельные факты. «Теории подобны воздушным шарам, плавающим на поверхности моря, тогда как факты можно уподобить линкорам, — говорил Артур Стэнли Эддингтон. — Случается, что воздушный шар сталкивается с линкором и линкор тонет».

Со времен Гиппарха (II в. до н. э.) и вплоть до эпохи Тихо Браге (конец XVI в.) неоспоримым фактом считалось, что звезды на своде ночного неба имеют определенный видимый размер — так называемый угловой диаметр. По



Готфрид Вильгельм фон Лейбниц (1646—1716) — современник Ньютона, который одновременно с ним (и независимо) создал дифференциальное исчисление. Резко расходился с Ньютоном во взглядах на время и пространство, считая их скорее «относительными», чем абсолютными понятиями. (Коллекция Грейнджера.)

данным Тихо Браге угловой диаметр звезд первой величины равен $2'$ (минуты дуги), что составляет $\frac{1}{15}$ углового диаметра Солнца или Луны. Этот древний «линкор» столкнулся сначала с теорией Аристарха, а затем и с теорией Коперника, но оставался на плаву до тех пор, пока Галилей, посмотрев на звезды в телескоп, не обнаружил, что размер даже их *увеличенных* изображений гораздо меньше $2'$.

Гармония, которую ученые ощущают во всех современных физических теориях, — это гармония особого рода: математическая гармония. Представления Пифагора о неизменном «математическом узоре», лежащем в основе совокупности всех наблюдаемых явлений, стали важным элементом философии Платона; вполне возможно, что именно они заставили его поверить в существование мира вечных и неизменных форм — объектов истинного знания. Однако наиболее отчетливо идеи Пифагора проявились в математических моделях мира, созданных такими астрономами, как Филолай, Экфант, Гераклит и Аристарх, а также в математических и физических теориях знаменитых математиков древности — Евклида и Архимеда. Далее, в главах 2—3, мы увидим, что наследниками научных традиций, заложенных этими учеными, считали себя Коперник, Кеплер, Галилей, Гюйгенс и Ньютон. Сущность этих традиций заключается в том, что математические закономерности представляют собой не абстрактное выражение внешних проявлений вещей, как полагал Аристотель, а отражают их глубинную сущность.

Так, в предисловии к книге «Об обращениях небесных сфер» Коперник заранее отвергает критику «досужих болтунов, несведущих в математике», выражая при этом уверенность, что «талантливые и эрудированные математики признают справедливость» его теории, если возьмут на себя труд досконально в ней разобраться. «Математика, — замечает он, — пишется для математиков». Позднее Галилей — в ответ на критические замечания, аналогичные тем, которые предвидел Коперник, — выразил ту же мысль более изящно (см. эпиграф к этой главе).

Галилей черпал вдохновение непосредственно в трудах Архимеда; как удачно выразился А. Койр, «он отдал себя в ученики Архимеду». «Две новые науки» Галилея, подобно архимедовым статике и гидростатике, служат дополнением к «Началам» Евклида и «Коническим сечениям» Аполлония. Хотя свыше восемнадцати веков отделяют Галилея от Архимеда, очевидна преемственность духа, стиля и содержания между книгой Архимеда «О плавающих телах» и сочинением Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки».

Ньютон также полагал, что в основе физических законов лежат математические закономерности. В ответ на критику тех, кто говорил о противоречии его теории гравитации философским принципам Декарта и Лейбница (в частности, принципу, гласившему, что взаимодействие двух тел возможно лишь при соприкосновении), Ньютон заявил: «Достаточно того, что гравитация реально существует, действует в соответствии с открытым нами законом и вполне объясняет всевозможные движения небесных тел и земных морей».

Развитие науки

Развитие человеческой культуры — процесс, в чем-то подобный эволюции органической материи и вместе с тем продолжающий ее. Способность создавать культуру и передавать ее следующим поколениям — это своего рода «эволюционная адаптация» к условиям окружающей среды, причем не менее важная, чем прямохождение приматов или бинокулярное зрение. Безусловно, язык, обычаи, социальную организацию, орудия труда и произведения искусства, которые в совокупности и составляют культуру, в строгом смысле нельзя называть эволюционным приспособлением — хотя бы потому, что информация о них не записана в молекулах ДНК. Тем не менее существует глубокая параллель между эволюцией органической материи и развитием культуры, на что указывали Э. Мэйр, Т. Добжанский, Г. Л. Стеббинс и многие другие биологи-эволюционисты. Естественные науки можно уподобить специализированному органу в сложном «организме» — человеческой культуре в целом.

Можно назвать три ключевых аспекта эволюции органического мира, которые имеют более или менее адекватную аналогию в процессе развития науки, а именно: сохранение благоприобретенных функций и структур; быстрая эволюция качественно новых структур и функций, позволяющих популяции по-новому взаимодействовать с окружающей средой, и, наконец, эволюционная динамика изменчивости и отбора.

Рассмотрим сначала первый из этих аспектов. Как правило, новые биологические структуры не заменяют целиком своих предшественников, а включают их в себя. Некоторые обеспечивающие способность к адаптации свойства, которые были присущи самым первым из известных форм жизни, сохранились почти у всех их потомков. Например, все известные формы жизни — от амебы до высших растений и животных — используют одну и ту же основную химическую стратегию: информация, необходимая для специфического развития организма, кодируется в нуклеиновых кислотах одного вида (ДНК), считывается нуклеиновыми кислотами другого вида (РНК), а затем в соответствии с универсальным кодом и с помощью узкоспециализированных органических катализаторов (ферментов) расшифровывается. Химический механизм этих процессов в основном одинаков у всех живых существ. То же можно сказать и о молекулах, сложных циклах и цепочках химических реакций, посредством которых происходит процесс выделения и накопления энергии, запасенной в потребляемой организмом пище. Примеры инвариантных структур на более высоком уровне биологической организации приводит в своей книге Г. Л. Стеббинс: «...мускульная нога у моллюсков; папиллярный рисунок у высших антропоидов; трехсегментное тело с шестью ногами у насекомых и двухсегментное тело с восемью ногами у пауков и их ближайших сородичей; две пары конечностей с костями сравнимого размера у всех наземных позвоночных; семь шейных позвонков у всех млекопитающих, включая

жирафа, обладающего длинной шеей, и кита, практически не имеющего шеи».

Аналогичным образом «наиболее результативные» элементы той или иной теории могут в какой-то степени видоизменяться в ходе ее развития, однако чрезвычайно редко от них приходится отказываться полностью. Использование математического языка для описания физических процессов, по сути дела, во многом сходно с использованием химического языка в биологии. Аристотель и его последователи строили свои представления об окружающем мире на основе ряда общефилософских принципов, тогда как Архимед предлагал использовать для той же цели математические аксиомы. Различие этих двух подходов столь же глубоко, как и различие представлений о том, что такое жизнь: проявление особых специфических «жизненных сил» или некое явление, которое на уровне элементарных процессов обусловлено химическими реакциями. Важно отметить, что вторая точка зрения отнюдь не эквивалентна утверждению, что жизнь есть *не что иное*, как совокупность химических процессов. Так, с точки зрения науки, зрение — гораздо более сложный процесс, чем просто цепочка химических превращений, началом которых служит поглощение фотона молекулой родопсина.

Эта непреходящая особенность науки наглядно проявляется как в самой сути физических законов, так и в языке, который используется для их описания. Геометрия Евклида, воплотившая в себе совокупность устойчивых понятий и методов, до сих пор лежит в основе современных физических теорий, хотя ее содержание неоднократно подвергалось радикальному пересмотру. Как мы увидим в гл. 3, Галилей и Ньютон сделали время четвертым измерением мира, «вложив» евклидово пространство в пространственно-временной континуум Галилея. Эйнштейн и Минковский усовершенствовали геометрию этого континуума, но так, что пространство-время Галилея оказалось предельным случаем континуума Минковского (см. гл. 5). Создание Эйнштейном общей теории относительности в свою очередь превратило геометрию Минковского в частный случай: она оказалась применимой лишь локально в свободно падающей системе отсчета. И наконец, релятивистская космология (см. гл. 7) выявила «глобальные» свойства пространства-времени Эйнштейна.

То же самое можно сказать и о теории гравитации, развитие которой тесно связано с эволюцией представлений о пространстве и времени. Архимедовы законы статики и гидростатики, как и законы движения, открытые Галилеем, стали предельным случаем ньютоновой теории тяготения, которая в свою очередь оказалась предельным случаем теории Эйнштейна. Тем не менее современная программа по механике для инженеров в гораздо большей степени опирается на принципы Архимеда, чем на теорию Эйнштейна.

Теперь посмотрим, как возникают новые свойства в процессе биологической эволюции. Существенные эволюционные «достижения», такие, как температурная регуляция у млекопитающих или развитие органов, способствующих общению у людей, связаны с появлением множества взаимосвязанных функций и структур. Поэтому кажется, что соответствующая перестройка организмов должна быть достаточно длительной. Однако результаты палеонтологических исследований свидетельствуют об обратном. Существенные изменения, обеспечивающие адаптацию, происходят довольно быстро — за столь короткие промежутки времени, что переходные формы среди окаменелостей попадают крайне редко или вообще отсутствуют. И наоборот, сравнительно маловажные эволюционные изменения (например, увеличение размеров тела) часто происходят очень медленно.

Подобное чередование темпов наблюдается и в процессе развития науки. Длительные периоды, на протяжении которых теория разрабатывается в деталях и используется для интерпретации результатов экспериментов и наблюдений, сменяются короткими периодами радикальной переработки основ теории. Эти быстротекущие этапы принято называть «научными революциями», однако различие между революционными и эволюционными изменениями выражено недостаточно четко. Успешно применяемые теории, подобные теориям Архимеда, Галилея или Ньютона, не отвергаются с появлением новой теории. Они продолжают существовать (в более или менее измененном виде) как составная часть новой теории. Но вместе с тем научную революцию XVI—XVII вв. с полным основанием можно назвать революцией, ибо она свергла натурфилософию Аристотеля, заменив ее радикально отличной системой взглядов Галилея и Ньютона. На место философских толкований пришли математические законы. Кеплер и Галилей по праву считали Коперника революционером, а не реформатором.

Рассмотрим, наконец, динамику эволюционного процесса. Новое качество в биологической эволюции возникает как следствие двух процессов: генетического изменения и дифференцированного воспроизводства, названного Дарвином естественным отбором. Случайные процессы, связанные с размножением, постоянно создают новые гены и их комбинации, открывая биологической популяции возможность испробовать потенциальные резервы различных направлений эволюции. Как правило, это не приносит результатов, однако время от времени происходит заметное продвижение вперед. Сочетание ненаправленных генетических изменений и естественного отбора может направить эволюцию по пути, ведущему к появлению нового вида, обладающего способностью к адаптации в изменившихся условиях.

Развитие науки можно описать примерно таким же образом. Посредством экспериментов, наблюдений и теоретических гипотез ученые непрерывно исследуют новые направления развития науки. Эти попытки в некотором смысле предпринимаются вслепую, поскольку заранее невозможно предсказать, какой из путей приведет к новым представлениям, а какой окажется тупиковым. Ученые редко сходятся во мнениях относительно направлений исследования, их выбор зачастую обусловлен философскими и эстетическими взглядами или просто личными соображениями исследователя. В результате возникает многообразие направлений поиска, что столь же существенно для прогресса науки, как и для биологической эволюции.

Результативность той или иной мутации определяется вкладом нового гена или совокупности генов в успех воспроизводства их носителей внутри данной биологической популяции. Иными словами, эта результативность определяется долгосрочными перспективами на выживание. А что служит эквивалентным критерием успеха для научной теории? По-видимому, успех теории определяется в основном тремя тесно связанными факторами: ее количественной точностью, областью применимости и так называемой степенью избыточной определенности. Естественно, что первоначально восприятие теории может в гораздо большей степени зависеть от других факторов: моды, идеологии или общего уровня развития общества, однако это «короткодействующие» факторы. Впрочем, «короткий срок» может быть не столь уж коротким. Созданная Аристархом модель Солнечной системы оставалась незамеченной астрономами на протяжении семнадцати веков, а объяснение природы Млечного Пути, предложенное Кантом, не привлекало внимания ученых почти два столетия.

Областью применимости теории называют совокупность явлений, относительно которых данная теория позволяет делать предсказания. В принципе

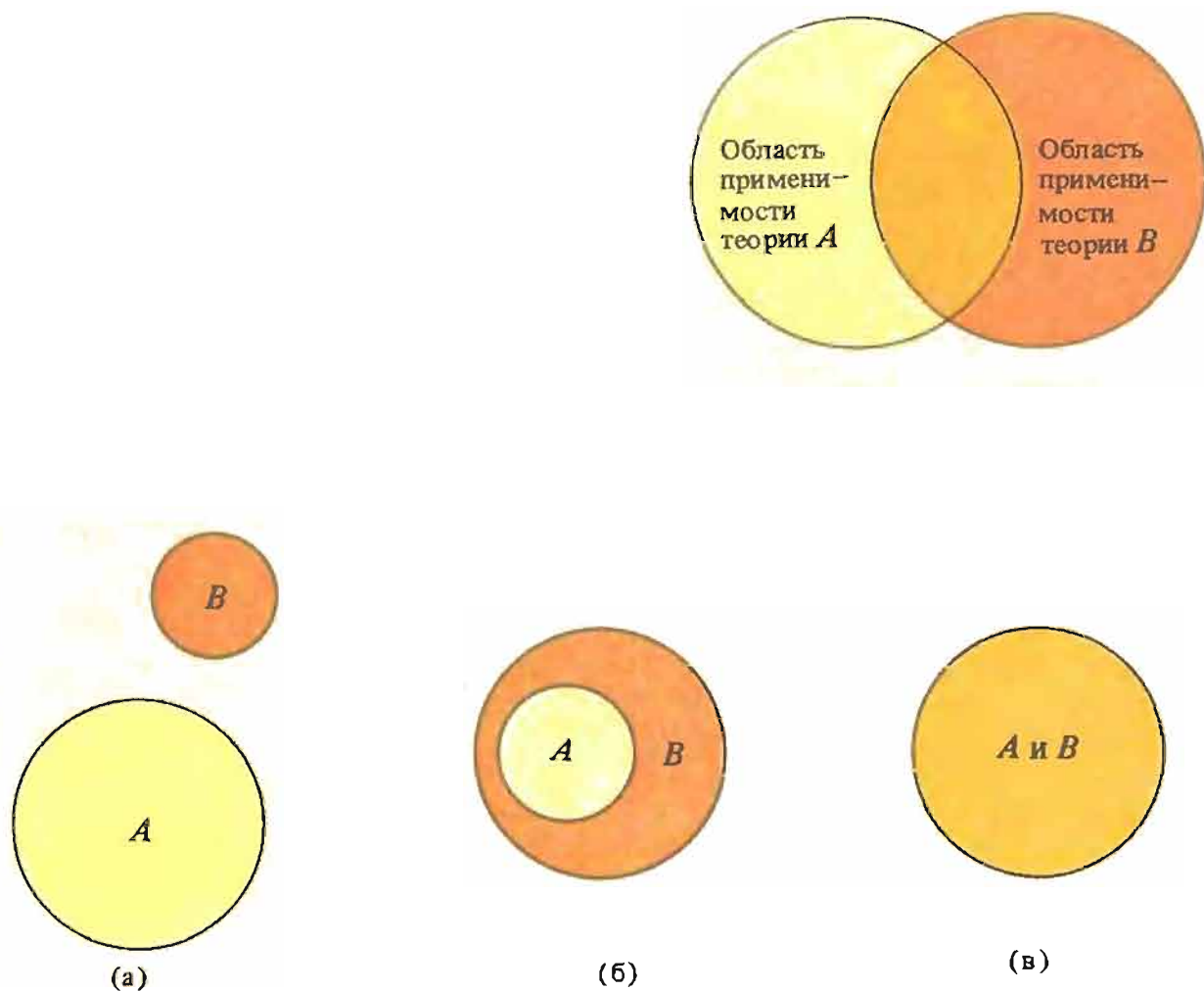


Диаграмма (внизу), иллюстрирующая три возможных варианта связи между близкими теориями. Вариант, отраженный в верхней части диаграммы, вообще исключается.

области применимости двух теорий могут перекрываться. В верхней части приведенной здесь диаграммы схематически изображена ситуация, когда одну и ту же совокупность явлений можно интерпретировать как в рамках теории A , так и в рамках теории B , но в целом области применимости этих теорий не совпадают. Однако в истории науки подобного рода ситуации не встречаются. Реальному положению дел отвечает скорее нижняя часть диаграммы. В случае (а) теории A и B описывают различные, неперекрывающиеся совокупности явлений; в качестве примера подобной ситуации можно привести статику Архимеда и описывающую движение теорию Галилея. Более поздняя теория, скажем теория Ньютона, может в неизменном виде включать теории A и B как предельные случаи.

Далее на той же диаграмме изображена ситуация (б), когда теория B имеет более обширную область применения, чем теория A ; таковой была теория Ньютона, обобщившая теорию Галилея, или теория Эйнштейна, обобщившая теорию Ньютона. И наконец, последний фрагмент диаграммы отражает ситуацию, когда области применимости обеих теорий совпадают. Примером подобного рода могла бы служить теория гравитации с той же областью применимости, что и ньютоновская, но в которой сила изменяется не обратно пропорционально квадрату расстояния, а по иному закону; попытки построить такую теорию предпринимались некоторыми учеными в прошлом веке.

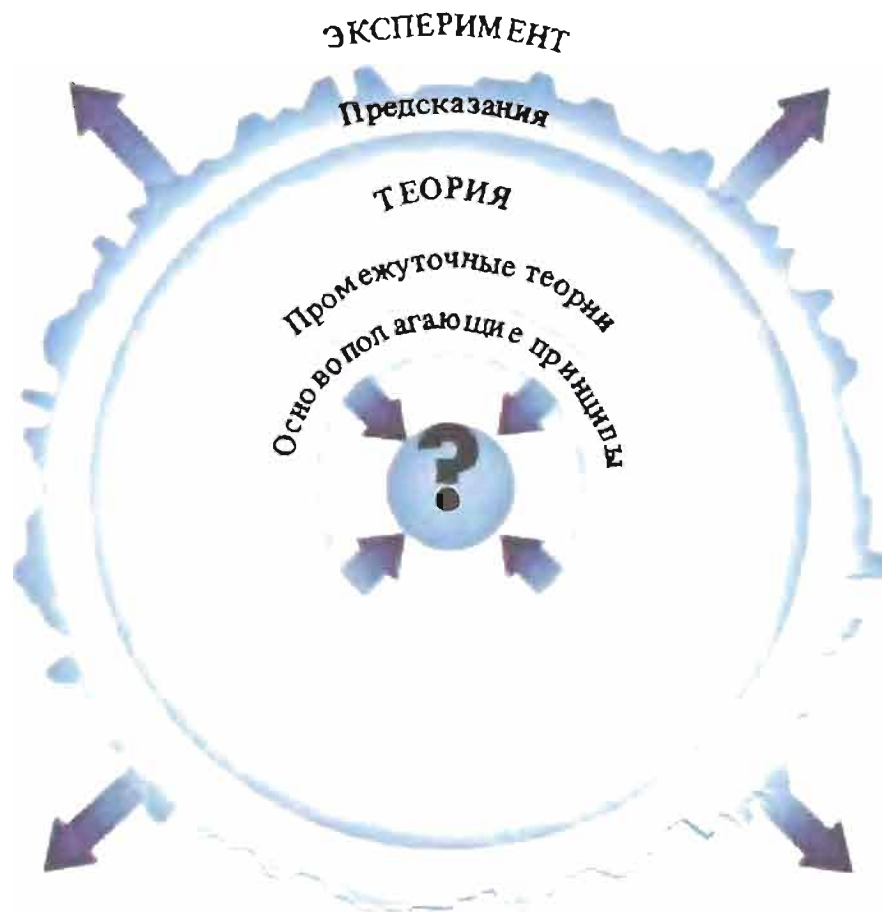
Последний из ранее упомянутых факторов, от которых зависит успех

теории, — *избыточная определенность*. Каждая теория включает в себя какое-то число свободных параметров, часть из которых описывает начальные условия, а остальные — свойства рассматриваемой системы. Например, свободные параметры ньютоновской модели Солнечной системы — это массы Солнца, планет и их спутников, а также координаты и скорости каждого из этих тел в некоторый произвольный момент времени. Значения свободных параметров *определяются* из наблюдений, причем число независимых наблюдений, например измерений координат на небесной сфере, должно быть равно числу определяемых параметров. Если число возможных независимых измерений превышает число свободных параметров в теории, то говорят, что теория обладает избыточной определенностью. Особо следует подчеркнуть качественный аспект этого обстоятельства. Теория Ньютона, в частности, обладает избыточной определенностью не только потому, что позволяет с большой точностью предсказывать движение планет на основе наблюдений, выполненных в данный момент времени. В гл. 3 мы увидим, что эта теория без каких-либо дополнительных предположений дает возможность качественно объяснить совсем другие явления, а именно: приливы в океанах, прецессию равноденствия, кольца Сатурна.

(Хотя компактность и простота теории связаны со степенью ее избыточной определенности, эта связь довольно неоднозначна. Как мы увидим в дальнейшем, теория гравитации Эйнштейна обладает гораздо большей избыточной определенностью, чем теория Ньютона, тем не менее ее нельзя назвать более простой и уж, конечно, нельзя сказать, что она обеспечивает более экономное истолкование астрономических наблюдений.)

Все три фактора, определяющие успех научной теории — точность, область применимости и степень избыточной определенности, — тесно связаны между собой. Успешное развитие физической теории, определенное Галилеем, Ньютоном и Эйнштейном, касалось и каждого из этих факторов. Теория Галилея применима к движению свободно падающих тел и снарядов вблизи поверхности Земли. Точность ее предсказаний ограничивалась тем, что в ней не учитывались сопротивление воздуха, кривизна земной поверхности и зависимость ускорения свободного падения от высоты. Теория Ньютона не только сняла эти ограничения, но и позволила описать гораздо более широкий круг явлений — от падения яблока до движения астрономических систем, в сотни триллионов раз более массивных, чем Солнце. Но теория Ньютона основывается на очень простых математических законах, которые вследствие этого обладают высокой степенью избыточной определенности по отношению к описываемым явлениям. Теория Эйнштейна имеет гораздо большую степень избыточной определенности, чем теория Ньютона, поскольку объединяет в одно целое три независимых понятия последней: инертную массу, гравитационную массу и энергию. Эксперимент и наблюдения показывают, что общая теория относительности также существенно точнее и в количественном отношении. И наконец, область применимости теории Эйнштейна гораздо обширнее, чем ньютоновской. Закон всемирного тяготения Ньютона применим ко всем самогравитирующим системам — от планет и их спутников до скоплений галактик, — однако в отличие от теории Эйнштейна этот закон неприменим к описанию Вселенной в целом (см. далее гл. 4).

До сих пор мы проводили аналогию между развитием науки и биологической эволюцией, подчеркивая общие закономерности. Отметим теперь существенное отличие этих процессов. Биологическая эволюция представляет собой множество разветвляющихся направлений развития, как и наука в период ее развития и становления. Однако последствия этих процессов различны. Начав с простейших форм жизни, возникших при весьма специфиче-



Модель научной теории, представляющая собой многослойную оболочку. Внешняя оболочка соответствует непрерывно расширяющейся сфере предсказаний, тогда как самая внутренняя, сжимающаяся оболочка отражает наиболее фундаментальные принципы. Взаимосвязь этих областей осуществляется через промежуточные теории, основанные на фундаментальных принципах.

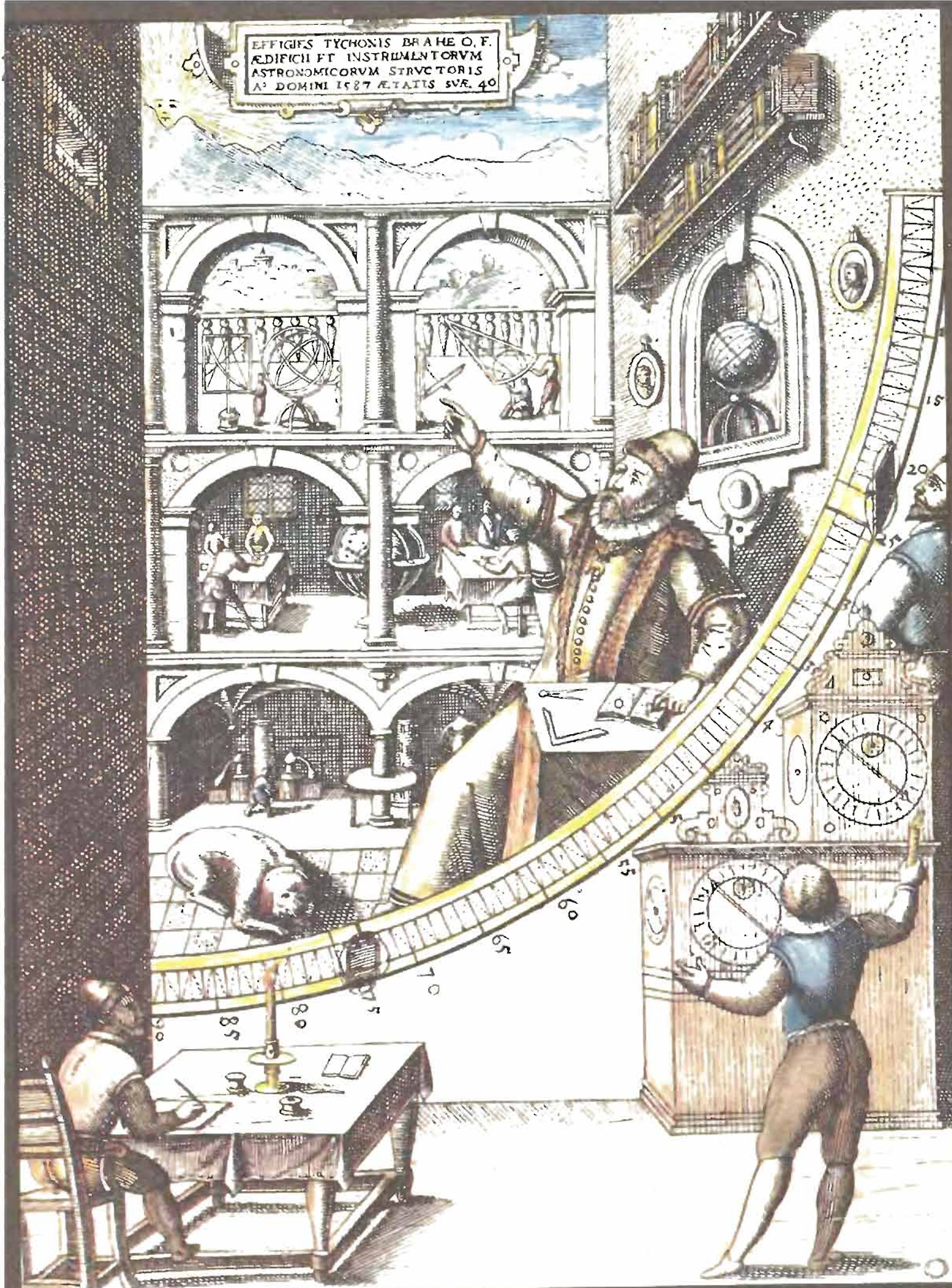
ских условиях, эволюция создала громадное количество экологических ниш, заполнив их мириадами различных видов. Начав со столь же простых вещей — использования Фалесом (VI в. до н. э.) свойств подобных треугольников для определения расстояния до корабля в море и разработки пифагорейцами арифметических законов музыкальной гармонии, — наука сплела сложнейшую паутину объяснения невероятно широкого круга явлений — от элементарных «кирпичиков» материи до Вселенной в целом, включая и феномен жизни. По мере развития непрерывно возрастало и число отраслей знания. Однако различные теории, доказавшие свою жизнеспособность, оказались связанными между собой не только общими истоками, но и структурно и функционально, как различные органы в едином организме. Сейчас уже невозможно провести резкую грань между биологией и химией, химией и физикой или между физикой и космологией. И чем шире становится область применения отдельных теорий, чем выше точность их предсказаний, тем теснее и глубже становятся эти связи. Теория Ньютона выявила истинное место статики Архимеда и теории движения Галилея как фрагментов механической картины мира. В специальной теории относительности Эйнштейн объединил пространство и время в единый четырехмерный пространственно-временной континуум*, а также свел воедино понятия массы и энергии.

* Понятие четырехмерного пространства-времени наиболее четко сформулировал Г. Минковский. — *Прим. ред.*

В общей теории относительности масса-энергия оказалась связанной со свойствами пространства-времени.

Совокупность существующих теорий можно для наглядности изобразить в виде расширяющейся сферической оболочки, окруженной со всех сторон океаном знаний. По мере того как число фундаментальных принципов уменьшается, а сами принципы наполняются все более глубоким содержанием, внутренняя граница сферической оболочки сжимается — возможно, к ядру, содержащему научную «истину в последней инстанции». Существует ли такое ядро — «изначальный принцип» Платона — в действительности? Это неизвестно; однако вера в его существование, несомненно, стимулирует теоретические поиски ученых со времен Пифагора и до наших дней.

EFFIGIES TYCHONIS BRAHE O. F.
ÆDIFICII ET INSTRUMENTORVM
ASTRONOMICORVM STRUCTORIS
A^o DOMINI 1587 ÆTATIS SVÆ 40



Аристарх, Коперник и Кеплер

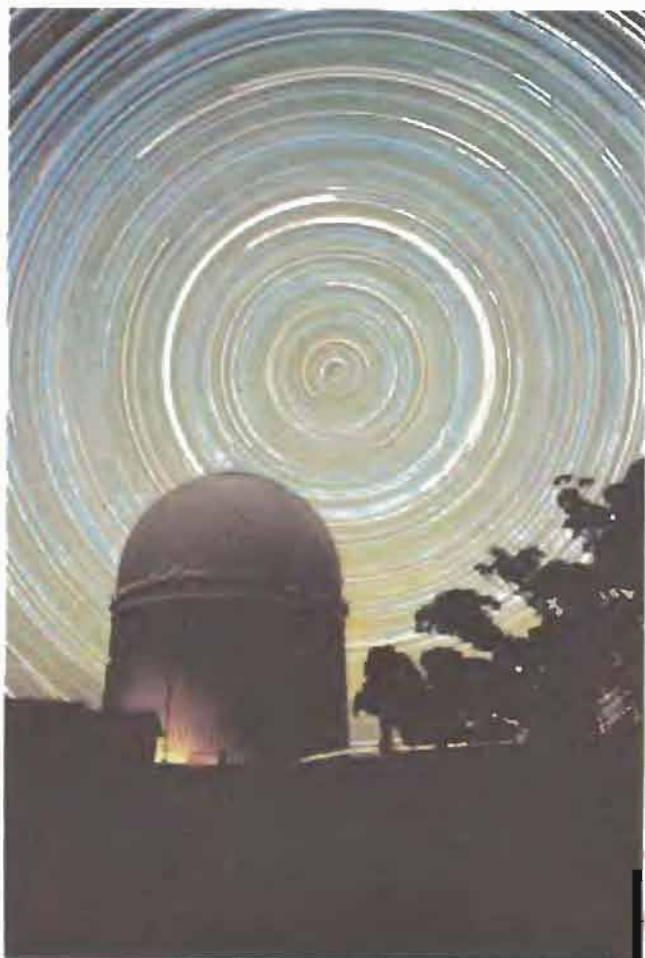
Всю природу и изящные небеса символически отражает искусство геометрии.

Кеплер

Неискушенному наблюдателю, не знакомому с научной картиной мира, небо представляется опрокинутой чашей, опирающейся на плоскость. Вкрапленные во внутреннюю поверхность чаши звезды образуют определенные упорядоченные узоры, которые мало меняются день ото дня, год от года и даже век от века. За ночь звезды поворачиваются относительно некоторой неподвижной точки, будто чаша вращается вокруг оси, проходящей через эту точку и глаз наблюдателя. Если в неподвижную точку направить объектив фотоаппарата и на несколько часов оставить затвор открытым, то каждая звезда оставит на фотографии след в виде дуги правильной окружности. Тщательные наблюдения показывают, что чаша вращается как единое целое, совершая один оборот в сутки, а точнее за 23 ч 56 мин.

Вследствие вращения чаши некоторые звезды уходят за горизонт на западе, тогда как другие восходят на востоке; это наводит на мысль, что чаша представляет собой часть полной сферы, причем звезды располагаются по всей ее поверхности. Это так называемая *небесная сфера*. Две неподвижные точки, в которых она пересекается с осью вращения, называются *полюсами мира*. Воображаемая окружность, точки которой равноудалены от обоих полюсов, называется *небесным экватором*. Таким образом, небесная сфера представляет собой значительно увеличенную модель поверхности Земли. Эта сфера концентрична с земным шаром; ее ось вращения служит продолжением полярной оси Земли, а небесный экватор образует окружность, по которой продолжение плоскости земного экватора пересекается с небесной сферой.

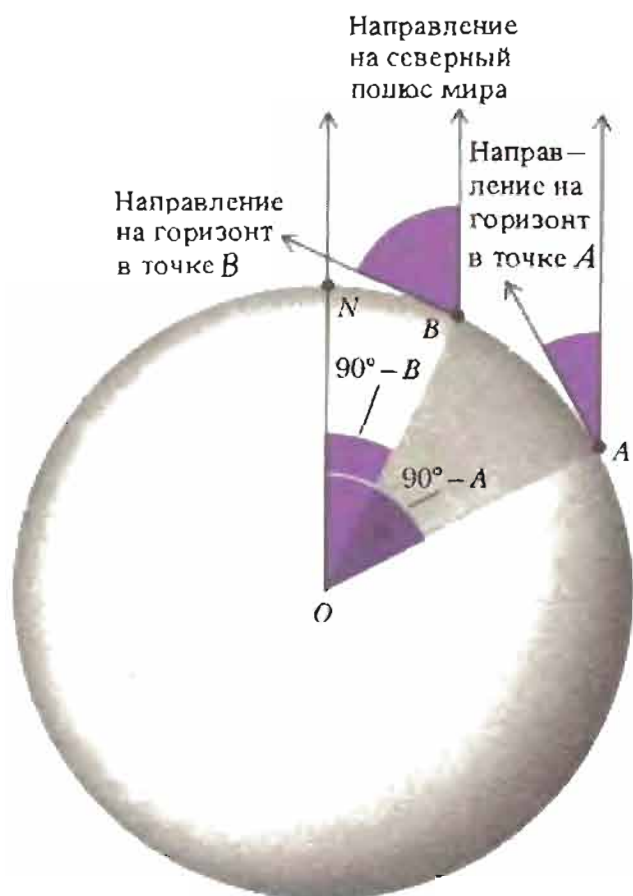
Но прежде всего возникло понятие небесной сферы. Из наблюдений за суточным движением звезд гораздо легче прийти к представлению о небесной сфере, чем сделать вывод о том, что Земля имеет форму шара. Греческие философы высказали мысль о шарообразности Земли в начале V в. до н. э. К этой мысли они пришли на основании рассказов путешественников, которые заметили, что высота северного полюса мира возрастает по мере перемещения к северу и уменьшается при движении в южном направлении. Нижний рису-



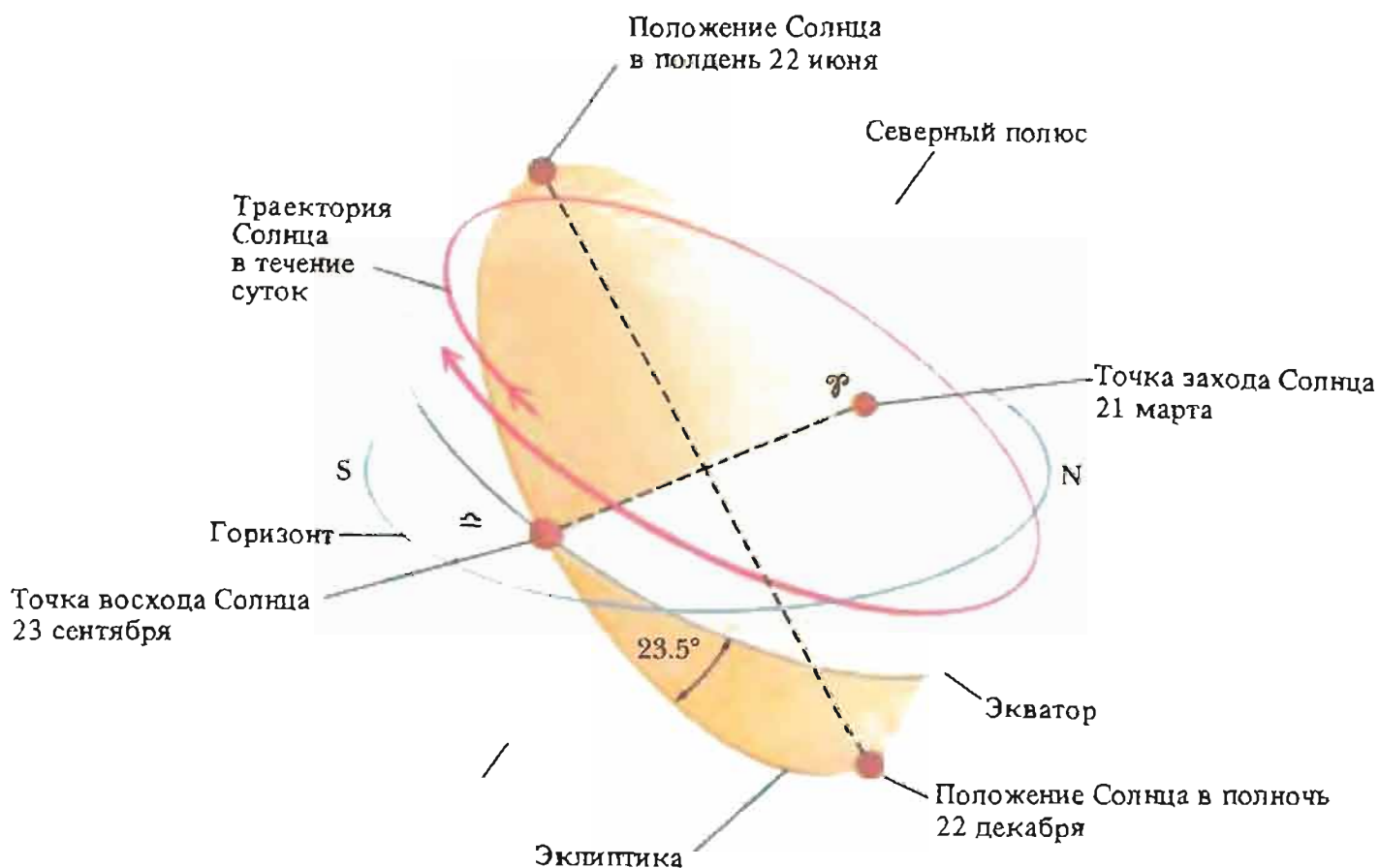
Фотография южного неба, сделанная с большой экспозицией в районе Англо-Австралийской обсерватории (Австралия). Центр дуг, описанных звездами, находится в южном полюсе мира. (Фотография Д. Ф. Мейлина. © 1977, Англо-Австралийская обсерватория.)



Для объяснения суточного движения звезд по окружностям, concentричным северному полюсу мира, древние астрономы предполагали, что звезды прикреплены к поверхности прозрачной сферы, которая вращается вокруг оси, проходящей через центр Земли и точку северного полюса мира на сфере.



Определить длину окружности земного шара можно, измерив разность высот северного полюса мира в двух точках. O — центр Земли, N — северный полюс, A, B две точки, расположенные на одном земном меридиане. Разность высот полюса мира в точках A и B равна $\angle AOB = \theta$, $AB/OA = 2\pi(\theta/360^\circ)$.



Суточное и годовое движение Солнца. Плоскость горизонта проведена для случая, когда наблюдатель находится в Северном полушарии на средних широтах. Показана траектория Солнца в течение суток для одного из дней в период с 22 июня по 23 сентября, причем для наглядности суточное смещение Солнца к востоку при движении его вдоль эклиптики сильно преувеличено.

нок на предыдущей странице позволяет понять, как предположение о шаровидности Земли объясняет эти наблюдения.

Гипотеза о шарообразности Земли достаточно убедительно подтверждается наблюдениями, поскольку в ней используется лишь один неизвестный параметр — радиус Земли, и она позволяет сделать два существенных и независимых предсказания: во-первых, что изменение высоты полюса мира пропорционально расстоянию, пройденному в направлении на север или на юг и, во-вторых, что высота полюса не должна меняться при перемещении в восточном или западном направлениях.

Эта гипотеза также позволила греческим математикам оценить радиус Земли. Пользуясь методом, суть которого ясна из подписи к нижнему рисунку на с. 40, греки смогли оценивать радиус Земли и протяженность земного экватора со все большей точностью. Так, оценки Аристотеля на 60% превышают современные значения этих величин, тогда как результаты измерений Эратосфена, осуществленных в следующем веке, отличаются от современных значений примерно лишь на 1%.

Тот факт, что небесная сфера совершает полный оборот вокруг оси за время чуть меньше суток, означает, что положение Солнца на небесной сфере не остается неизменным, ибо в противном случае промежуток времени между двумя последовательными восходами Солнца был бы равен промежутку времени между двумя последовательными восходами каждой из звезд. Но поскольку первый из названных интервалов в среднем на 4 мин. превышает второй, делаем вывод, что Солнце перемещается по небесной сфере в направлении, противоположном суточному вращению Земли; поэтому восход

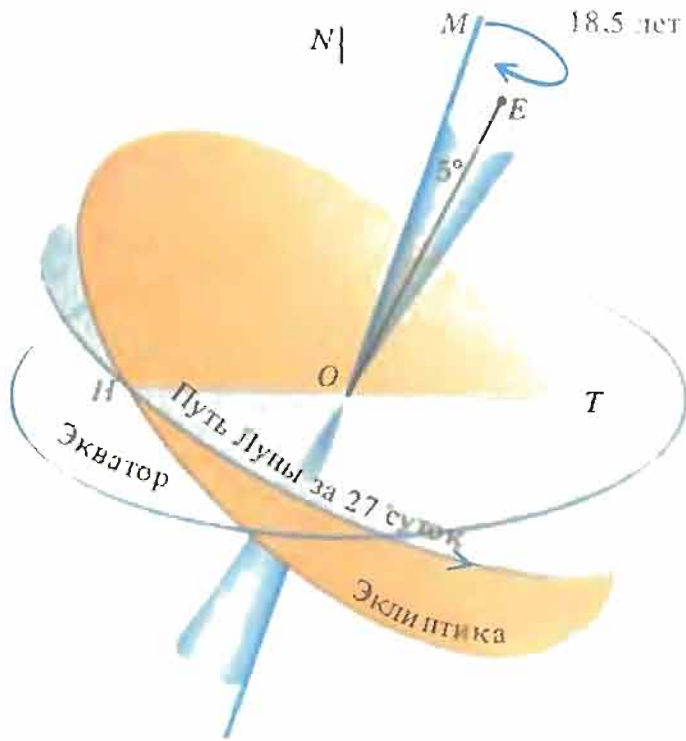
Солнца ежедневно запаздывает по сравнению с восходом звезд. Отмечая ежедневное положение Солнца относительно звезд в момент восхода (или захода), можно проследить его траекторию на небесной сфере. Оказывается, что эта траектория представляет собой еще один круг, центр которого совпадает с центром Земли, а плоскость наклонена под небольшим углом ($23,5^\circ$) к плоскости небесного экватора. По этому кругу, называемому *эклиптикой*, Солнце движется в направлении с запада на восток с почти постоянной скоростью, равной примерно 1° в сутки (что вдвое превышает угловой диаметр солнечного диска), совершая таким образом полный оборот за 365 дней и примерно 6 ч.

Приведенный ранее рисунок позволяет судить о сезонных изменениях полуденной высоты Солнца и относительной продолжительности дня и ночи. Когда Солнце находится в одной из двух точек пересечения эклиптики с экватором (точки \sphericalangle и \sphericalcap на рисунке), продолжительности дня и ночи совпадают. В эти дни, называемые равноденствиями, высота Солнца в полдень равна 90° минус широта точки наблюдения. Например, в Бостоне (широта 42°) высота Солнца в полдень 21 марта составляет 48° . При перемещении Солнца к северу от экватора время между восходом и заходом увеличивается для наблюдателя, находящегося в Северном полушарии Земли, и сокращается для наблюдателя в Южном полушарии. В день летнего солнцестояния (22 июня для Северного полушария) высота Солнца в полдень достигает максимального значения; оно равно 90° минус широта точки наблюдения и плюс $23,5^\circ$ (т. е. угол между плоскостями эклиптики и экватора). Это самый длинный день в году для Северного полушария и самый короткий — для Южного. На земном экваторе длительности дня и ночи всегда равны между собой. В день солнцестояния наше дневное светило как бы замирает: его полуденная высота перестает увеличиваться, но еще не начинает уменьшаться (или прекращает уменьшаться, но еще не начинает увеличиваться 22 декабря).

Рисунок, приведенный на с. 41, позволяет понять, как изменяется положение Солнца в течение года на широтах свыше $66,5^\circ$. Например, на Северном и Южном полюсах Земли Солнце при своем движении ежедневно описывает окружность, параллельную горизонту. В день летнего солнцестояния эта окружность расположена на высоте $23,5^\circ$. В дальнейшем окружность снижается, и в день равноденствия путь центра солнечного диска совпадает с линией горизонта (хотя вследствие искривления световых лучей в земной атмосфере нам кажется, что Солнце целиком находится над горизонтом). В течение последующих шести месяцев окружности, описываемые Солнцем при движении, лежат под горизонтом.

Луна также непрерывно перемещается относительно звезд. Ее траектория представляет собой окружность, в центре которой находится Земля. Плоскость окружности, как видно из приведенного рисунка, наклонена к эклиптике под углом 5° . Луна почти равномерно движется вдоль своей траектории в том же направлении, что и Солнце (т. е. обратно направлению суточного вращения небесной сферы), совершая полный оборот за время немногим более 27 сут. Как и движение Солнца, движение Луны приводит к тому, что ее восход ежедневно запаздывает относительно восхода звезд, но уже не на четыре минуты, как у Солнца, а почти на целый час.

По чистой случайности угловой диаметр Луны (при наблюдении с Земли) почти в точности совпадает с солнечным. Когда Солнце и Луна одновременно находятся в одной из двух точек пересечения окружностей, по которым они движутся (H и T на рисунке), они оказываются на одной прямой с Землей, и Луна в таком случае может закрывать Солнце. Если же Солнце находится



Траектория Луны на небесной сфере представляет собой большой круг, наклоненный под углом 5° к траектории Солнца (эклиптике). Полярная ось OM , перпендикулярная плоскости лунной орбиты, описывает конус вокруг (почти) неподвижной оси OE , перпендикулярной плоскости эклиптики; в результате линия NT , вдоль которой пересекаются плоскости орбит Солнца и Луны, поворачивается с востока на запад, совершая полный оборот за 18,6 лет.

в одной из этих точек, а Луна — в противоположной, то Земля своей тенью может затмить Луну.

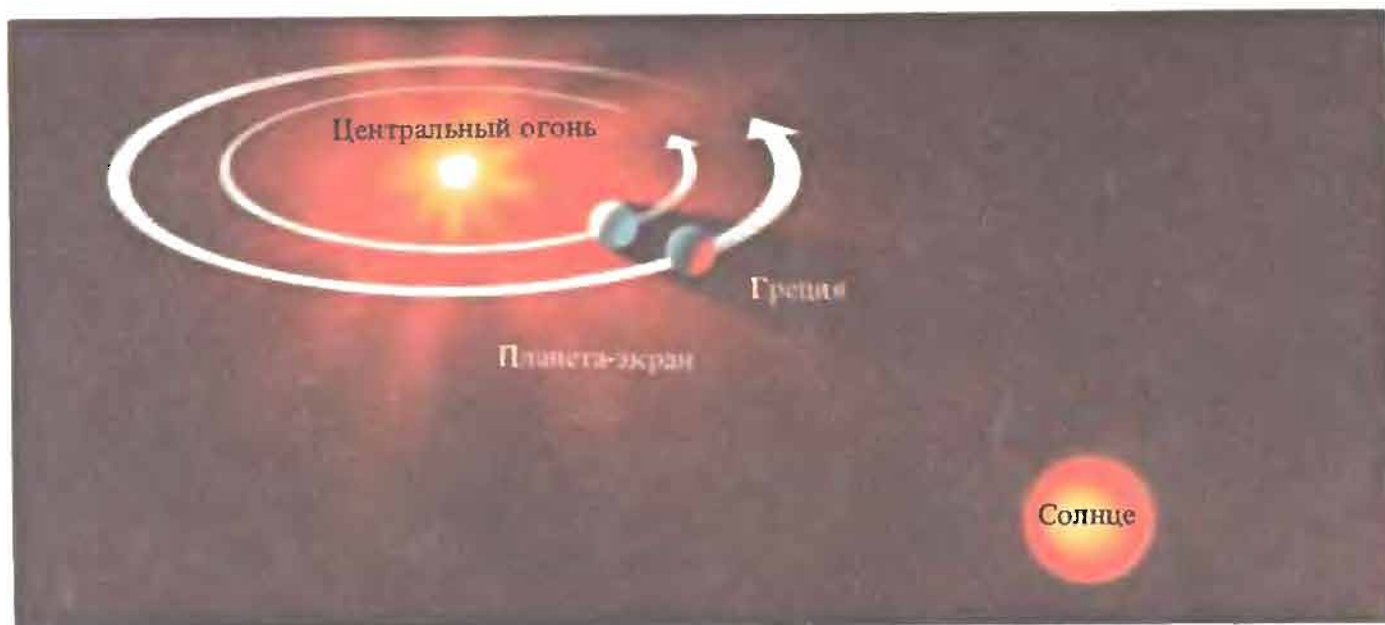
Пять ярких планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн — также движутся относительно звезд, однако их перемещения гораздо сложнее, чем движения Солнца и Луны. Попытки объяснить эти нерегулярные движения планет и оказались в центре внимания древнегреческих астрономов.

Объяснение суточного движения звезд

Греческие мыслители начали строить геометрические модели, призванные объяснить движения небесных светил, в начале IV в. до н. э. Из первой главы мы знаем, что основателей теоретической астрономии можно в основном разделить на две соперничающие школы. Приверженцы обеих школ ратовали за точность и простоту теории, но расходились во взглядах на роль математики и математических моделей.

Представители первой школы, возглавляемой Аристотелем, считали математику служанкой философии и здравого смысла. Они полагали, что математика может быть полезной при описании природных явлений, но не способна отразить их глубинной сути. Наивысшим достижением этой школы стал труд Клавдия Птолемея, опубликованный примерно в 150 г., которому арабские астрономы средневековья дали название «Альмагест» (что значит «величайший»). Астрономические наблюдения Птолемея и их геометрическое толкование по своей точности и полноте оставались непревзойденными на протяжении четырнадцати веков, вплоть до работ Тихо Браге и Иоганна Кеплера.

Представители второй школы, пифагорейцы, считали, что в основе всех явлений лежат математические закономерности. Они полагали, что законы математической гармонии — более подходящее руководство к постижению небесных тайн, чем здравый смысл. Если же эти законы вступали в противоречие с соображениями здравого смысла, пифагорейцы с легкостью пренебрегали им, чем немало смущали своих «твердолобых» сограждан. Наивысшим достижением пифагорейцев стала гелиоцентрическая модель, созданная Аристархом в III в. до н. э. В XVI в. Коперник возродил эту модель, а в первые же

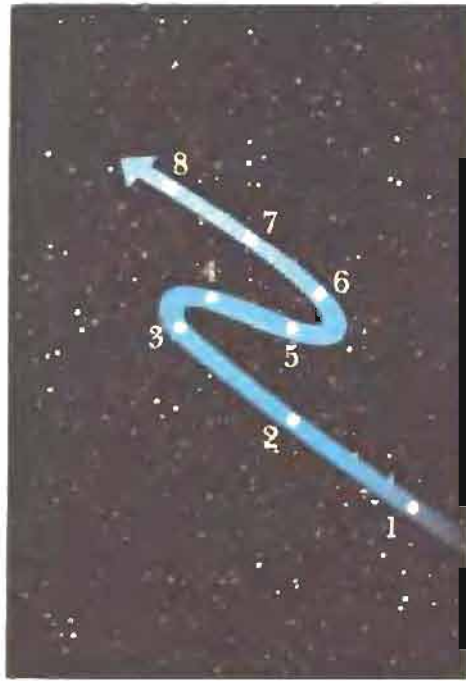


Пифагорейцы считали, что Земля и Антиземля синхронно вращаются вокруг центрального огня с периодом 24 ч. Жители противоположного полушария (относительно того, где находится Греция) не видят центрального огня, поскольку его загораживает Антиземля.

годы следующего столетия Кеплер, используя великолепный каталог наблюдаемых положений планет, составленный Тихо Браге, вдохнул новую жизнь в представления пифагорейцев о гармоничной математической модели Солнечной системы. Далее в этой главе мы расскажем об основных этапах построения Кеплером модели мира.

Пифагорейцы начали с того, что поставили под сомнение общепринятое в те времена представление о вращающейся прозрачной сфере, в которую вкраплены звезды. Они считали более естественным предположить, что наблюдаемое суточное движение звезд есть следствие неощущаемого нами движения самой Земли по окружности, но в противоположном направлении. Они постулировали, что в центре этой окружности находится «центральный огонь», к которому Земля при своем движении всегда повернута одним и тем же полушарием, как Луна к Земле. Предполагалось, что Греция находится на неосвещенной части. Чтобы «защитить» от центрального огня жителей противоположной стороны Земли, пифагорейцы дополнительно постулировали существование еще одной планеты, которая, вращаясь синхронно с Землей, все время загораживает центральный огонь. Эта гипотеза была отвергнута примерно в начале IV в. до н. э. на основании свидетельств путешественников, проникших к тому времени на западе далее Гибралтарского пролива, а на востоке достигших Индии: никто из них не наблюдал ничего похожего ни на центральный огонь, ни на планету-экран.

Вслед за тем Экфант и Гераклит выдвинули еще более простую по сути, но более сложную для интуитивного восприятия гипотезу, согласно которой Земля вращается вокруг оси, проходящей через ее геометрический центр, «подобно тому как колесо повозки поворачивается на своей оси». Это была качественно новая идея, трудная для понимания. Еще труднее было в нее поверить, и, по-видимому, ее отвергли все, кроме небольшой группы философов, следовавших пифагорейской математической традиции. Тем не менее эта гипотеза значительно упрощала описание движений небесных тел: предполагалось, что звезды покоятся, а наблюдаемые перемещения Солнца, Луны и планет обусловлены в основном движением самой Земли. И хотя предположение о вращении Земли, казалось, не соответствовало повседневному ощу-



Схематическое изображение попятного движения Марса на фоне звезд.

щениям и здравому смыслу, ни одно из его *математических* следствий не противоречило *наблюдаемым* явлениям.

Отстаивая гипотезу о вращении Земли, пифагорейцы со своим стремлением к математической гармонии оказались в стороне от основного русла развития греческой астрономии. Но со временем главное течение истощилось, а малый приток, непрерывно расширяясь, привел к тому, что Ньютон, будучи в преклонном возрасте, назвал «великим океаном Истины».

Объяснение движения планет

Итак, древнегреческие астрономы видели, что пять ярких планет перемещаются на фоне звезд по сложным траекториям. В отличие от Солнца и Луны планеты движутся не по большим кругам небесной сферы, в центре которой находится Земля, а по более сложным кривым. Ситуация еще более запутывается тем, что, совершив полный оборот по небесной сфере, планета не возвращается в исходную точку. Более того, с каждым новым оборотом изменяется путь планеты на фоне звезд. И наконец, движение планет происходит весьма неравномерно.

Меркурий и Венера не уходят далеко от Солнца; они то пробегают перед ним, то заходят за него, словно щенки, гуляющие со своим хозяином. Марс, Юпитер и Сатурн постепенно смещаются к западу от Солнца, причем с сильно меняющейся скоростью: скорость перемещения относительно Солнца максимальна, когда Солнце и планета находятся в противоположных сторонах небесной сферы, и минимальна, когда планета и Солнце расположены ближе всего друг от друга. Незадолго до противостояния скорость движения Марса в западном направлении относительно Солнца становится больше, чем скорость смещения Солнца относительно звезд в восточном направлении. Плавное смещение Марса к востоку относительно звезд замедляется; в конце концов планета останавливается, после чего начинает двигаться в обратную сторону. Спустя несколько дней это «попятное» движение также замедляется, планета останавливается, а затем, вновь изменив направление, начинает перемещаться относительно звезд на восток. Как видно из рисунка, этот участок траектории Марса по форме напоминает сильно вытянутую латинскую букву S. Юпитер и Сатурн вблизи точек противостояния перемещаются по небу подобным же образом. Объяснение столь сложного, казалось бы, не-

упорядоченного движения планет представляло значительную трудность.

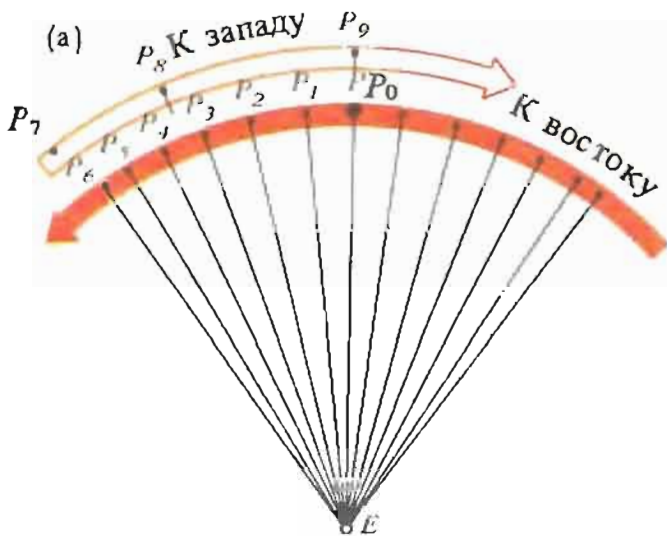
Один из основных принципов стратегии научных исследований гласит: при изучении сложного явления задачу следует разбить на две части, одна из которых должна быть пусть громоздкой, но простой, а вторая — небольшой по объему, но сложной, причем на первом этапе исследования второй частью нужно пренебречь. Подобный подход блестяще оправдал себя применительно к изучению движения планет. Сложные кривые, которые планеты описывают на небесной сфере, целиком расположены внутри узкой полосы зодиакальных созвездий, посередине которой проходит эклиптика, т. е. траектория движения Солнца. Можно предположить, что планеты одновременно участвуют в двух независимых движениях: во-первых, они движутся параллельно эклиптике и, во-вторых, перемещаются в перпендикулярном направлении. Перемещаясь относительно звезд, все планеты удаляются от эклиптики на небольшое расстояние. Следовательно, движение в направлении, перпендикулярном эклиптике, незначительно по сравнению с движением вдоль нее. Эта малая составляющая движения имеет, однако, достаточно сложный характер, и именно этим обстоятельством определяется сложная картина движения планет в целом.

Идея разложить движение планет на две составляющие положила начало успешному штурму проблемы. Эта идея весьма нетривиальна, и впервые она возникла у Евдокса Книдского (около 406—355 гг. до н. э.), величайшего математика своего времени и основоположника математического подхода к астрономии в Древней Греции.

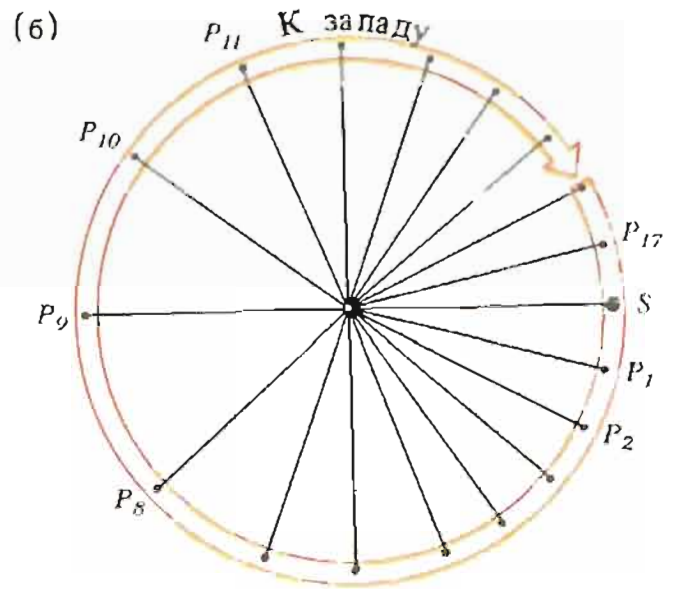
Пренебрегая перпендикулярной составляющей движения планет, мы упрощаем решение задачи в двух отношениях. Во-первых, в этом случае траектории планет совпадают с траекторией Солнца — эклипстикой. Во-вторых, движение планет приобретает *периодический характер*: каждая планета через определенный период времени возвращается в начальную (произвольно выбранную) точку эклиптики.

Остается решить две взаимосвязанные проблемы: понять причину неравномерного движения планет вдоль эклиптики и разработать математическую модель, которая позволяла бы точно воспроизвести наблюдаемую неравномерность. Для пифагорейцев основной проблемой была первая. Они полагали, что если понять, *почему* движение неравномерно, то придумать, *как* его описать, будет гораздо проще. Для последователей Аристотеля, наоборот, первой проблемы вообще не существовало. С их точки зрения, роль математики в астрономии заключалась не в том, чтобы объяснять, а в том, чтобы описывать.

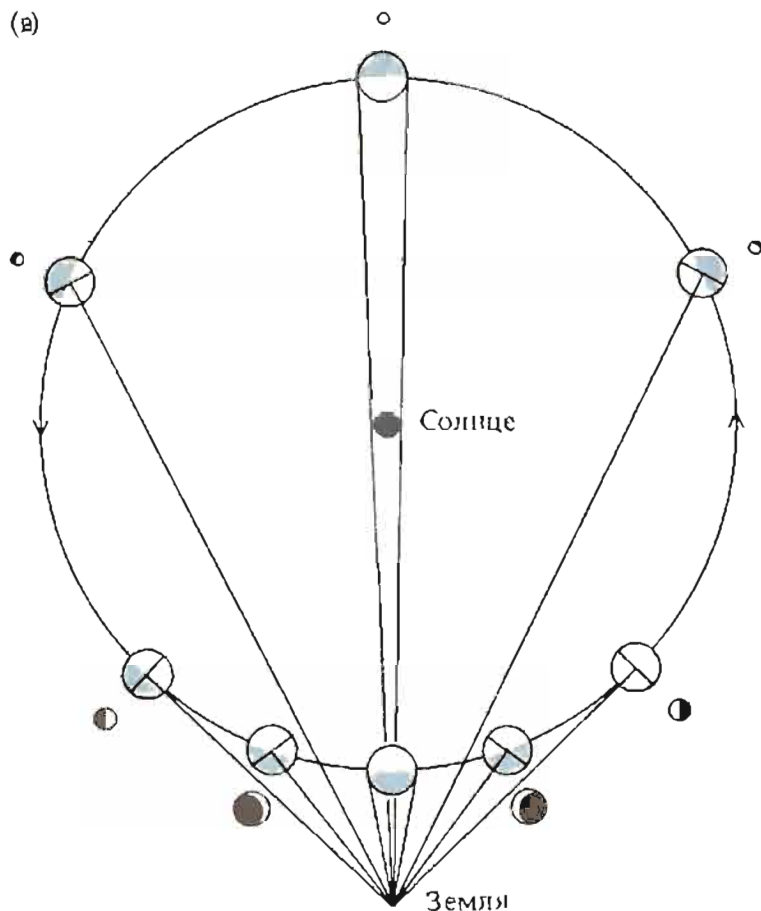
Почему же планеты движутся вдоль эклиптики столь неравномерно? Очевидно (сейчас, но не тогда!), что это как-то связано с движением самого Солнца. Для наглядности представим плоскость эклиптики в виде пола карусели, в центре которой находится Земля, и предположим, что наша карусель вращается со скоростью движения Солнца относительно звезд. В этой вращающейся системе отсчета направление на Солнце будет всегда одним и тем же, а линия, соединяющая центр карусели (Землю) и Солнце, будет служить нам началом отсчета при описании движения планет. Наблюдения показывают, что движения Меркурия и Венеры по эклиптике представляют собой колебания, симметричные относительно этой линии. Петлеобразные движения Марса, Юпитера и Сатурна также симметричны относительно нее. Из тех же наблюдений следует, что в точках, равноудаленных от линии Солнце—Земля, скорость движения планеты одинакова. Из приведенной здесь серии диаграмм видно, что каждой паре симметричных точек соответствуют два равных угла между направлением на планету и осью симметрии. Иными



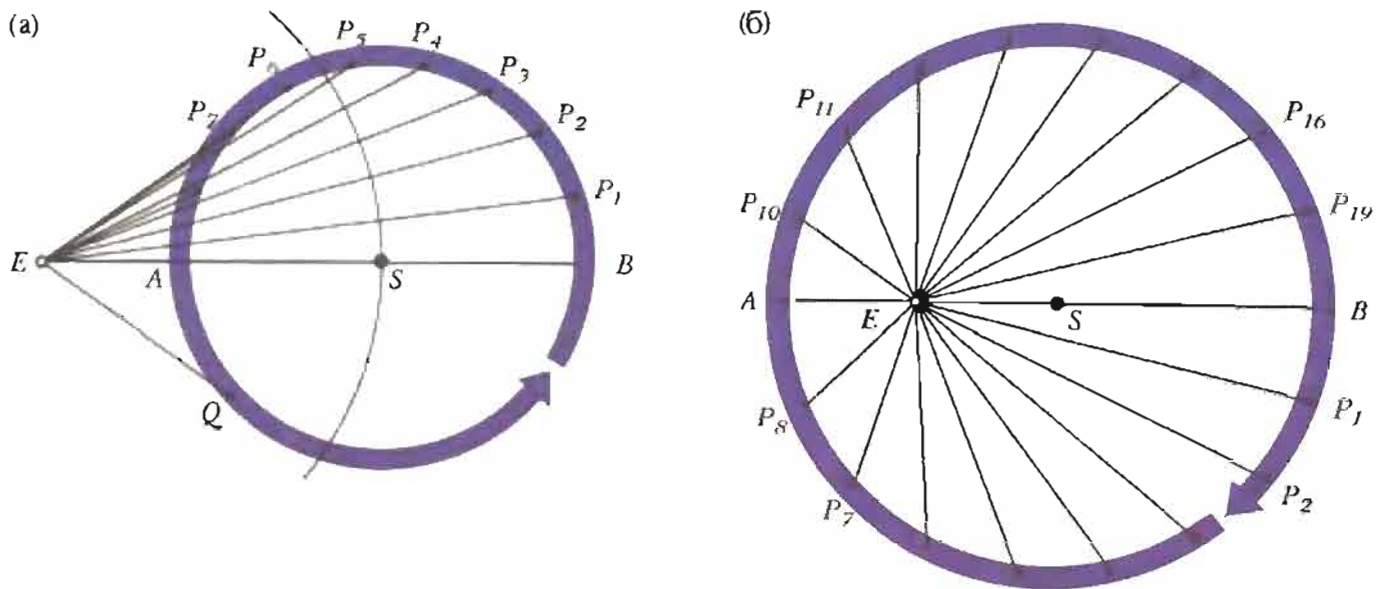
Движение Венеры относительно Солнца. Наблюдаемые положения планеты $P_0 - P_9$ даны через равные промежутки времени. Как видно из рисунка, движение на восток от точки P_0 (соответствующей положению Солнца) к точке P_6 занимает в три раза больше времени, чем движение между теми же точками в западном направлении.



Движение Марса относительно Солнца. Точки $P_1, P_2...$ показывают видимые положения Марса на небесной сфере через равные промежутки времени.



«Венера меняет свою форму точно так же, как Луна. И если Апельль посмотрит в телескоп сейчас, то он увидит, что Венера имеет форму [почти] идеальной окружности очень малого размера (хотя совсем недавно, появившись на небе как вечерняя звезда, она была еще меньше). Продолжив наблюдения, он обнаружил бы, что, удалившись от Солнца на максимальное расстояние, Венера приобретет вид полуокружности. Затем она начнет превращаться в серп, который будет становиться все тоньше по мере приближения планеты к Солнцу. Вблизи соединения она будет выглядеть, как Луна спустя два-три дня после новолуния, но размер видимого диска [Венеры] должен быть гораздо больше, чем раньше. В действительности, когда Венера [выйдя из-за Солнца] появляется на небе как вечерняя звезда, ее видимый диаметр составляет всего лишь шестую часть диаметра планеты, когда она исчезает как вечерняя звезда [проходя перед Солнцем] или впервые появляется как утренняя звезда [несколько дней спустя], так что величина диска изменяется в сорок раз». (Г. Галилей, «Письма о солнечных пятнах»)

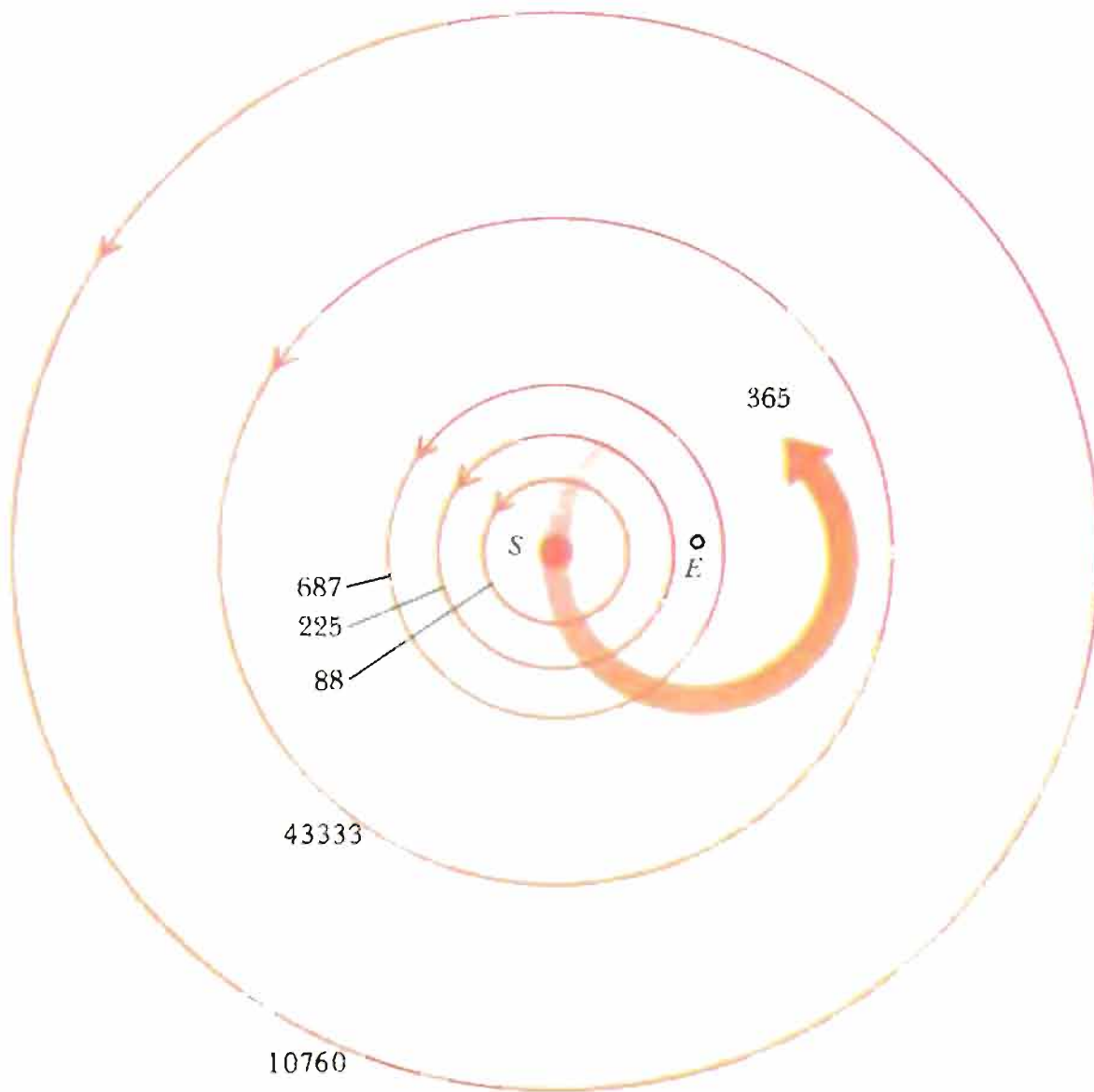


Точка P (изображающая Меркурий или Венеру) равномерно движется по окружности, в центре которой находится Солнце (S). При наблюдении с Земли, т. е. из точки E , движение точки P кажется неравномерным. Видимое движение планеты относительно Солнца происходит в восточном направлении на участке $Q - P_7$ (в направлении стрелки), и в западном — на участке $P_7 - Q$ (а). Точка P (изображающая Марс, Юпитер или Сатурн) движется равномерно по окружности, в центре которой находится Солнце (S). При наблюдении с Земли, т. е. из точки E , движение планеты кажется неравномерным: наиболее быстрым в точке A и наиболее медленным в точке B . Эти модели позволяют объяснить наблюдаемое движение планет, изображенное на трех предыдущих диаграммах (б).

словами, если Юпитер смещается, например, на x градусов в сутки, находясь восточнее Солнца на y градусов, то когда он удалится от Солнца на y градусов к западу, скорость его суточного смещения будет также x градусов. Таким образом, наша задача сводится теперь к тому, чтобы понять, почему линия, соединяющая Землю (E) с планетой, вращается с переменной скоростью. Причем величина скорости изменяется симметричным образом относительно направления на Солнце.

Господствовавшая в древнегреческой астрономии школа считала необходимым ввести дополнительное ограничение на эту модель: по мнению представителей этой школы, каждая из планет должна располагаться на поверхности сферы, в центре которой находилась бы Земля. Нам это условие кажется странным, однако греческим философам в IV в. до н. э. оно казалось вполне естественным. Вместе с тем Гераклит Понтийский (388—310 гг. до н. э.), современник Аристотеля и отчасти Евдокса, полагал, что планеты необязательно находятся все время на одинаковом расстоянии от Земли. Он выдвинул гипотезу, согласно которой Меркурий и Венера движутся по окружности вокруг Солнца, причем с постоянной угловой скоростью. Эта простая модель позволяет достаточно точно воспроизвести наблюдаемое движение Меркурия и Венеры. Она также дает возможность правильно предсказать характер изменений блеска этих планет, а также смену фаз Венеры (см. третью из диаграмм на с. 47). Короче говоря, модель Гераклита убедительно подтверждалась результатами наблюдений.

Подобное рассуждение применимо также к Марсу, Юпитеру и Сатурну, если предположить, что радиусы их гелиоцентрических орбит превышают расстояние от Земли до Солнца. Такая модель непосредственно объясняет основные качественные особенности изменения скоростей планет и их блеска: симметрическое изменение скорости относительно линии Солнце—Земля, а также тот факт, что яркость каждой из внешних планет и скорость их перемещения



Модель Солнечной системы Тихо Браге (возможно, и Гераклита). Пять планет движутся по круговым орбитам вокруг Солнца (S), которое в свою очередь движется по окружности вокруг Земли (E). (Приведенные на диаграмме значения орбитальных периодов выражены в днях.)

на фоне звезд максимальны, когда планеты находятся в противоположной от Солнца области неба, и минимальны, когда Солнце и планета расположены в одной и той же области неба.

Каждую круговую орбиту можно охарактеризовать двумя параметрами: орбитальным периодом и отношением ее радиуса к расстоянию от Земли до Солнца. Период легко определить из наблюдений. Для внутренних планет (Меркурия и Венеры) отношение радиуса орбиты к расстоянию Земля—Солнце равно синусу угла, соответствующего максимальному удалению планеты от Солнца к западу или к востоку; на четвертой из приведенных выше диаграмм это соответственно углы P_6ES и SEQ . Для внешних планет аналогичную величину можно найти, определив из наблюдений угловую скорость в моменты противостояний и верхних соединений (точки A и B на пятой диаграмме).

Если указанным образом оценить периоды и радиусы орбит каждой из планет, модель становится полностью определенной. Теперь нужно проверить, согласуется ли она с наблюдениями: модель должна воспроизводить наблюдаемые изменения положений планет относительно звезд с течением времени. И она позволяла делать это с точностью, удивительной для эпохи Аристотеля и вполне сносной даже по современным меркам.

Полностью модель с пятью гелиоцентрическими орбитами изображена на приведенном здесь рисунке, выполненном без соблюдения масштаба. Радиусы планетных орбит (выраженные в единицах расстояния Земля—Солнце) показаны далее на графике (с. 52). В заключение отметим, что орбитальным периодом мы называем интервал времени, за которое планета совершает полный оборот вокруг Солнца.

Аристарх и масштабы мира

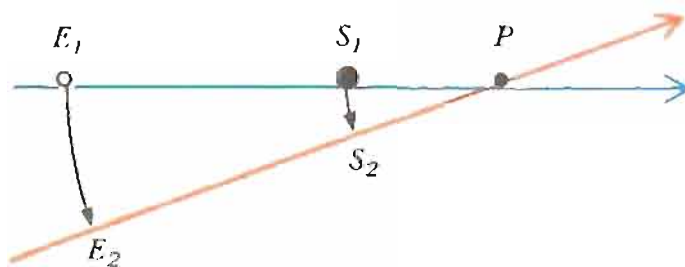
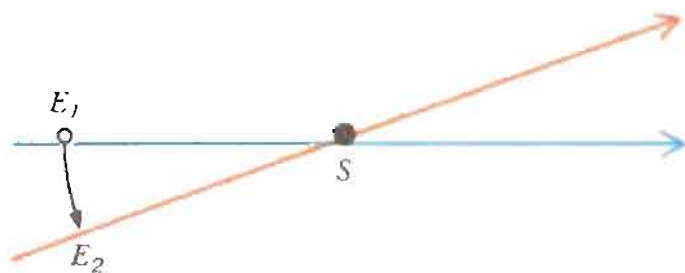
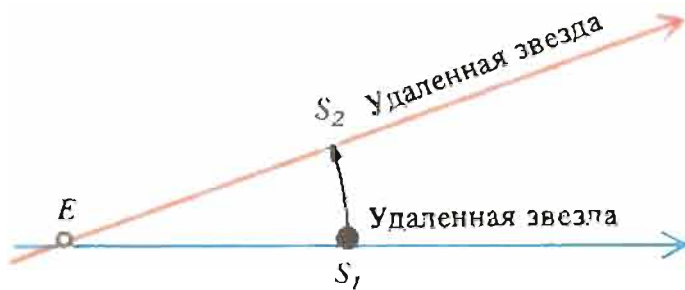
Наблюдения свидетельствуют, что линия Земля—Солнце вращается относительно звезд, но не ясно, вокруг какой точки происходит вращение. Как видно из рисунка, нам кажется, будто Солнце вращается вокруг Земли независимо от того, что является центром вращения: Солнце, Земля или любая другая точка на линии Солнце—Земля. Как же здесь все-таки сделать выбор?

Если вытянуть перед собой палец, закрыть один глаз и медленно поворачивать голову из стороны в сторону, то можно увидеть, что палец перемещается в противоположном (движению головы) направлении относительно фона удаленных предметов. Это движение называется *параллактическим смещением*. Если Земля вращается вокруг Солнца, то у звезд должно наблюдаться ежегодное параллактическое смещение, если, конечно, они достаточно близко к нам расположены. Поскольку такого рода смещения не наблюдались (вплоть до XIX в.), естественно напрашивался вывод, что либо Земля неподвижна относительно звезд, либо звезды находятся столь далеко от нас, что мы не в состоянии заметить их смещения. Таким образом, сами по себе наблюдения не давали возможности решить эту проблему.

Однако, согласно взглядам пифагорейцев, соответствие теории наблюдениям — это не единственный критерий ее справедливости. Не менее важно было и то, какое из предположений — о неподвижности Земли или неподвижности Солнца — обеспечивало соответствие теории их представлениям о гармонии. Из физических соображений более разумным выглядит предположение, что Земля, подобно планетам, вращается вокруг Солнца, нежели гипотеза о том, что Солнце с вращающимися вокруг него планетами движется вокруг Земли. Кроме того, Солнце является источником света для Земли, Луны и планет.

Существует и более убедительный довод в пользу того, чтобы считать Землю просто третьей от Солнца планетой. Рассмотрим последовательность периодов планет, приведенную на рисунке на с. 49. Величина орбитального периода монотонно возрастает с увеличением радиуса орбиты, и если считать Землю планетой, то ее период, равный одному году, укладывается в указанную закономерность.

Чтобы более детально разобраться в этом вопросе, построим график зависимости периода вращения планет от радиуса их орбиты. Связь между этими величинами будет более наглядной, если график построить в логарифмическом масштабе. Точки, соответствующие пяти планетам, укладываются на прямую линию, и если Землю считать планетой, то ее точка также попадет на ту же прямую. Естественно, что если рассматривать Солнце как спутник Земли, то на то же самое место попала бы точка, соответствующая Солнцу. Но это было бы по меньшей мере странно: ведь изображенная здесь прямая линия выражает зависимость периода от радиуса орбиты для тел, обращающихся вокруг Солнца, и нет оснований предполагать, что точно такая же зависимость характерна для тел, обращающихся вокруг Земли. И действительно, точка, соответствующая Луне и полученная из величины ее орбиталь-



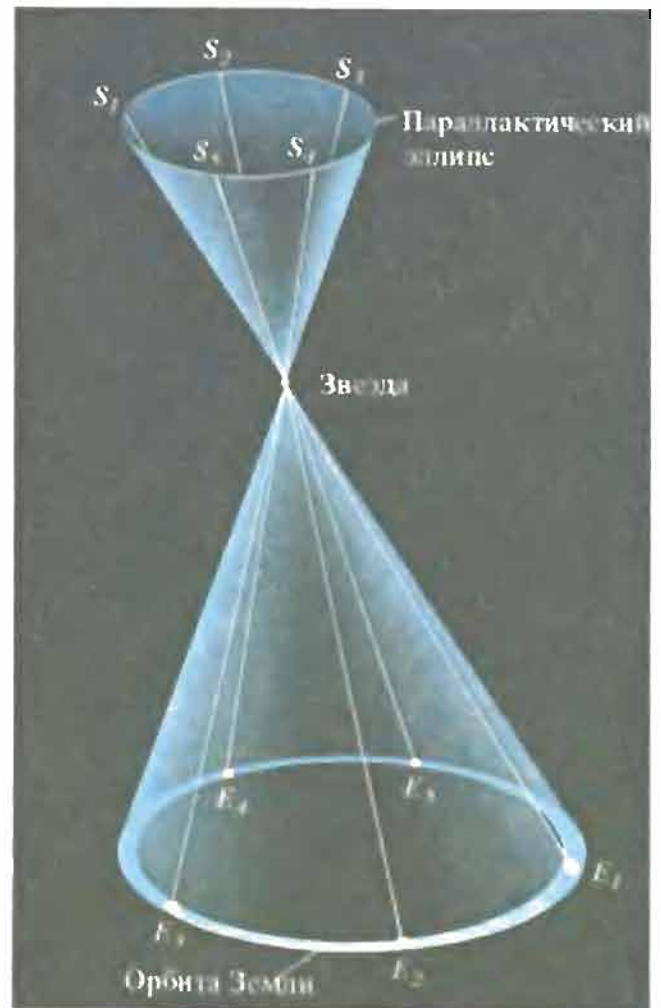
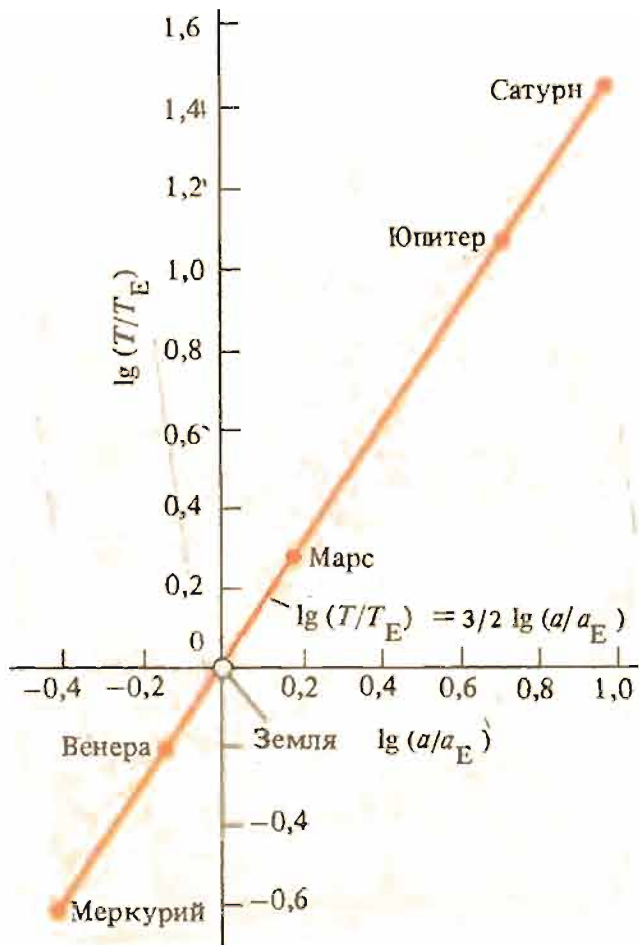
Линия, соединяющая Землю с Солнцем, вращается относительно звезд, однако видимое смещение Солнца на фоне звезд не зависит от того, какая из точек этой линии является центром вращения: Земли (вверху), Солнце (в середине) или какая-то произвольная точка (внизу).

ного периода и радиуса орбиты, оказывается лежащей далеко в стороне от рассматриваемой прямой.

Не известно, выдвигал ли Аристарх подобного рода аргумент в поддержку своей гелиоцентрической модели планетной системы. Его книга, где обсуждалась эта модель, до нас не дошла. Мы знаем о ее существовании лишь из трудов Архимеда, который писал:

...Но Аристарх опубликовал книгу, содержащую обоснованные гипотезы, из которых, как следствие сделанных допущений, вытекает, что Вселенная во много раз больше той, о которой упомянуто [имеющей радиус, равный радиусу орбиты Земли]. Суть его гипотез заключается в том, что звезды и Солнце неподвижны, Земля обращается вокруг Солнца по окружности, Солнце находится в центре земной орбиты и в центре сферы неподвижных звезд, причем последняя настолько велика, что Земля и Солнце удалены от ее границ практически одинаково.

К заключению о громадных размерах сферы звезд Аристарх, по-видимому, пришел после безуспешных попыток его современников обнаружить годичный параллакс звезд. Из приведенного далее рисунка видно, что вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца нам кажется, что каждая звезда описывает на небесной сфере крошечный эллипс. Точно так же выглядела бы орбита нашей Земли при наблюдении со звезды: если бы звезда находилась точно над серединой земной орбиты, то орбита Земли казалась бы окружностью, а если бы звезда лежала в плоскости земной орбиты, то годовой путь Земли выглядел бы как отрезок прямой линии. Таким образом, отсутствие

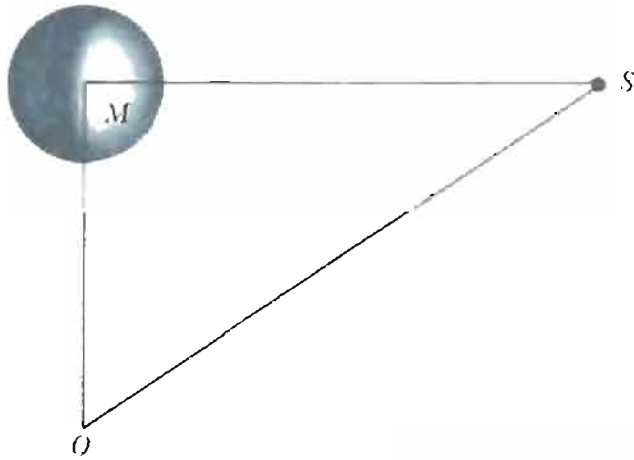


Логарифмическая зависимость сидерического орбитального периода T от большой полуоси орбиты a для пяти планет и Земли. Прямая линия соответствует зависимости $T \sim a^{3/2}$ (слева). Параллактический эллипс, описываемый звездой, выглядит с Земли так же, как земная орбита, если бы мы могли наблюдать ее со звезды (справа).

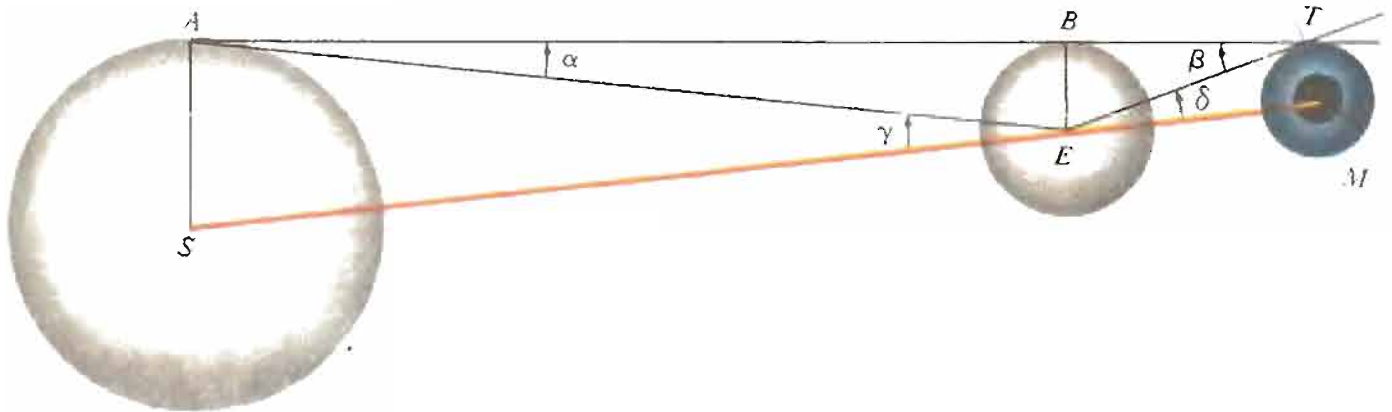
заметного годичного параллакса у звезд означает, что при наблюдении со звезд земная орбита неотличима от точки.

До нас дошла единственная книга Аристарха: «О размерах и расстоянии до Солнца и Луны». Насколько можно судить по ней, модель планетной системы Аристарха представляла собой часть грандиозного намерения автора понять геометрию Вселенной. Мы уже видели, что построенная Аристархом модель планетной системы позволяла ему из астрономических наблюдений определить радиусы орбит пяти планет, выраженные в радиусах земной орбиты, а также периоды их обращения, измеренные в годах. В не дошедшей до нас книге, о которой упоминает Архимед, эта возможность, по-видимому, была реализована. Чтобы продвинуться дальше, Аристарху требовался метод, который позволил бы найти отношение радиусов орбиты Луны и Земли и в конечном счете отношение радиуса орбиты Луны (или орбиты Земли) к радиусу самой Земли, который, как мы уже отмечали, был определен Эратосфеном достаточно точно.

Суть метода, предложенного Аристархом для вычисления расстояния до Луны в единицах расстояния до Солнца, поясняет верхний рисунок на с. 53. В основе метода лежит точное измерение угла между направлениями на центр Луны и на центр Солнца в тот момент, когда земной наблюдатель видит освещенным ровно половину лунного диска. В принципе метод верен, однако



Когда с Земли мы видим Луну освещенной ровно наполовину, косинус $\angle MOS$ (между направлениями на центры Луны и Солнца) равен OM/OS , т. е. отношению расстояний до этих тел. (На самом же деле $OM/OS = 1/400$ и отличие $\angle MOS$ от 90° слишком мало, чтобы его можно было обнаружить.)



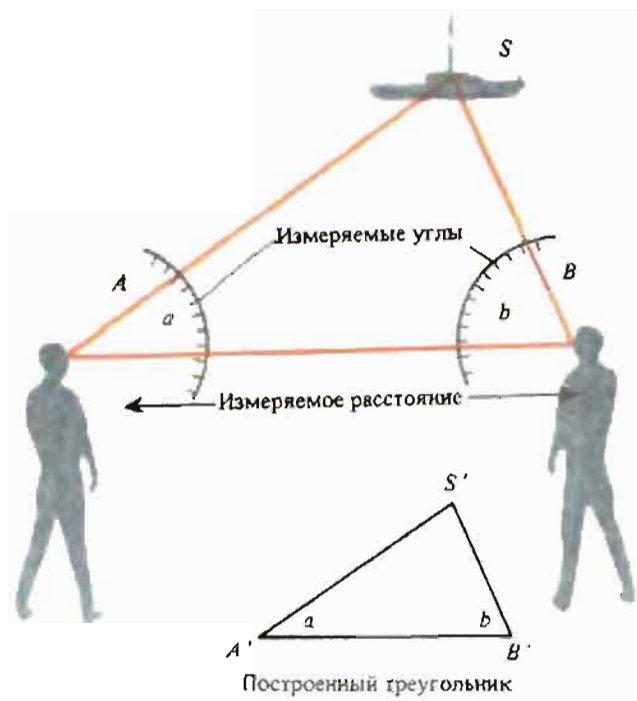
Из отношения средней продолжительности лунных затмений к длительности лунного месяца Аристарх определил угол $\delta = \angle MET$ (S — центр Солнца, E — центр Земли, M — центр Луны, а MT — половина пути, который проходит Луна за время затмения). $\alpha + \beta + \angle AET = 180^\circ = \gamma + \delta + \angle AET$, следовательно, $\alpha + \beta = \gamma + \delta$. Поскольку угловой радиус Солнца γ определяется из наблюдений, можно найти величину $\alpha + \beta$. Но так как $\alpha \approx \sin \alpha = EB/ES$, а $\beta \approx \sin \beta = EB/ET$, $1/R_S + 1/R_M \approx \gamma + \delta$, где R_M — расстояние до Луны, выраженное в единицах радиуса Земли, а R_S — расстояние до Солнца в тех же единицах. Поскольку $R_S \gg R_M$, в первом приближении можно пренебречь величиной $1/R_S$ по сравнению с $1/R_M$; тогда R_M с достаточной точностью равен примерно 60 радиусам Земли.

отличие искомого угла от 90° слишком мало, чтобы его можно было точно измерить. По измерениям Аристарха эта разность составляла 3° , откуда следовало, что расстояние от Земли до Луны в 19 раз меньше, чем до Солнца. На самом деле эта разность равна примерно $1/7^\circ$, откуда следует, что отношение указанных расстояний составляет около 400.

Аристарх придумал остроумный способ определения расстояния до Луны (выраженного в радиусах Земли) по средней продолжительности лунных затмений и периоду орбитального движения Луны; суть этого метода поясняет рисунок. Таким путем Аристарху удалось получить достаточно точную величину (≈ 60) отношения расстояния до Луны к земному радиусу.

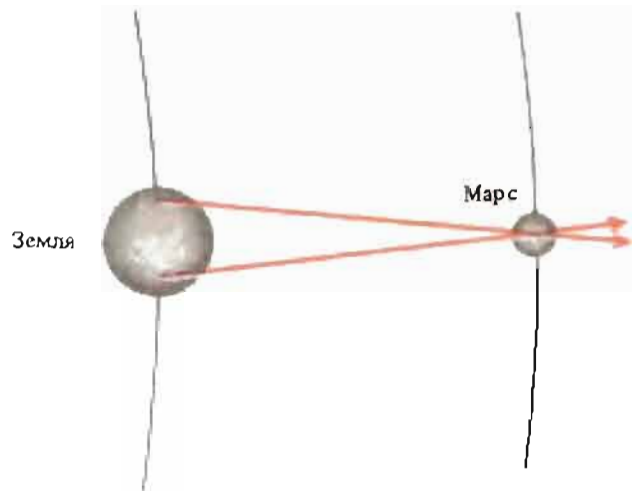
Наконец, Аристарх определил диаметры Солнца и Луны, используя найденные из наблюдений угловые размеры этих светил и полученные из расчетов расстояния до них.

Итак, замысел Аристарха был выполнен: ему удалось построить согласованную геометрическую модель Вселенной, обобщающую все, что было известно о видимых размерах, движении и яркости Солнца, Луны и планет; эта достаточно точная модель убедительно подтверждалась результатами наблюдений. Первое качественное усовершенствование модели Аристарха, воп-



Метод триангуляции, предложенный Фалесом для определения расстояний до кораблей, находящихся в море: 1) измерить углы a и b и расстояние AB ; 2) построить треугольник $A'B'S'$ с углами a и b при вершинах A' и B' соответственно; 3) учитывая, что $AS/AB = A'S'/A'B'$, по известным величинам $A'S'$ и $A'B'$ нетрудно найти AS .

лощенное в трех законах Кеплера, было осуществлено лишь более чем через восемнадцать столетий.



Определение расстояния до Марса (в единицах радиуса Земли) методом триангуляции.

Единственным серьезным недостатком модели Аристарха в количественном отношении оказалась оценка расстояния до Солнца. Эта ошибка была исправлена лишь в 1672 г., когда французские астрономы определили расстояние до Марса в период его противостояния (максимального сближения с Землей). Расстояние определили методом триангуляции, с помощью которого еще Фалес в VI в. до н.э. измерял расстояние до кораблей в море. Тимс в Париже и Кейнн в Южной Америке (на территории современной Гвианы) одновременно измерили положение Марса на небе. Разность двух измерений дала угол при вершине треугольника, образованного центром диска Марса и точками, из которых производились наблюдения. Это единственное измерение позволило установить линейный масштаб Солнечной системы в целом.

Работа Аристарха как бы подвела итог грандиозным исследованиям Вселенной, начатым тремя веками ранее Пифагором и его последователями. Нельзя не отметить, что при некоторых оценках размеров и расстояний, сделанных Аристархом, были допущены систематические ошибки, о которых он не подозревал, однако подобного рода ошибки неизбежны в пионерских работах. Так, Харлоу Шепли уже в 20-х годах нашего века завысил расстояние от Солнца до центра Галактики в 10 раз, а Эдвин Хаббл, наоборот, в пять раз занижил расстояния до далеких галактик. Первопроходец не знает заранее правильного ответа даже приблизительно, поскольку первым осуществляет измерения и единственный доступный ему способ проверки — это проверка согласованности полученных результатов между собой. Неважно, что получен-



Средневековый астроном определяет расстояние до корабля в море, используя предложенный Фалесом метод триангуляции. (Архив Беттмана.)

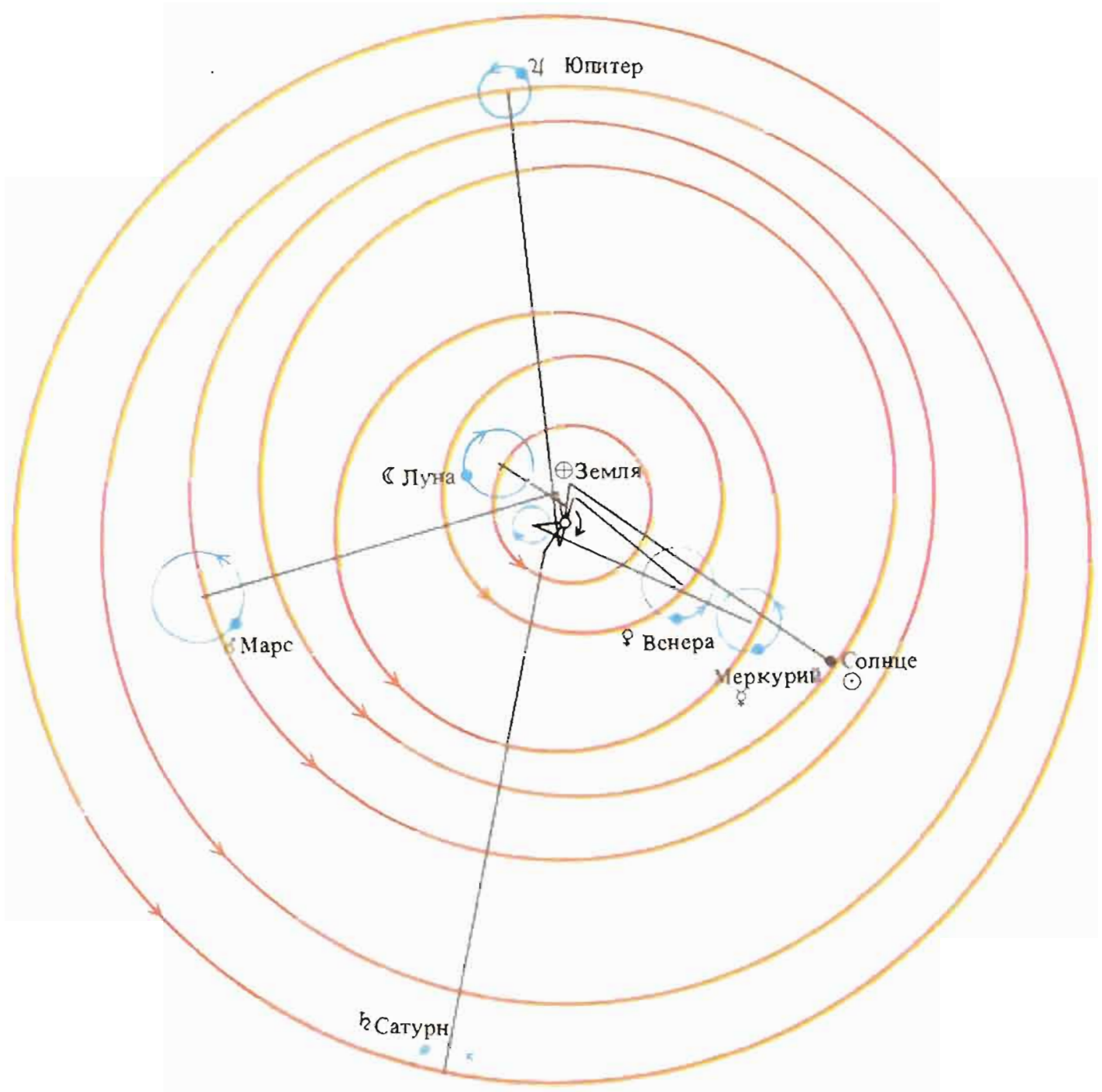


Николай Коперник (1473—1543). Этот прижизненный (хотя и несколько идеализированный) портрет позволяет представить, как выглядел великий астроном в юности. (Архив Беттмана.)

ная Аристархом шкала расстояний оказалась неточной, ибо это пустяки по сравнению с тем, что он и его предшественники не только создали превосходную, убедительно подтверждаемую результатами наблюдений модель Солнечной системы, но и заложили основы современной научной космологии.

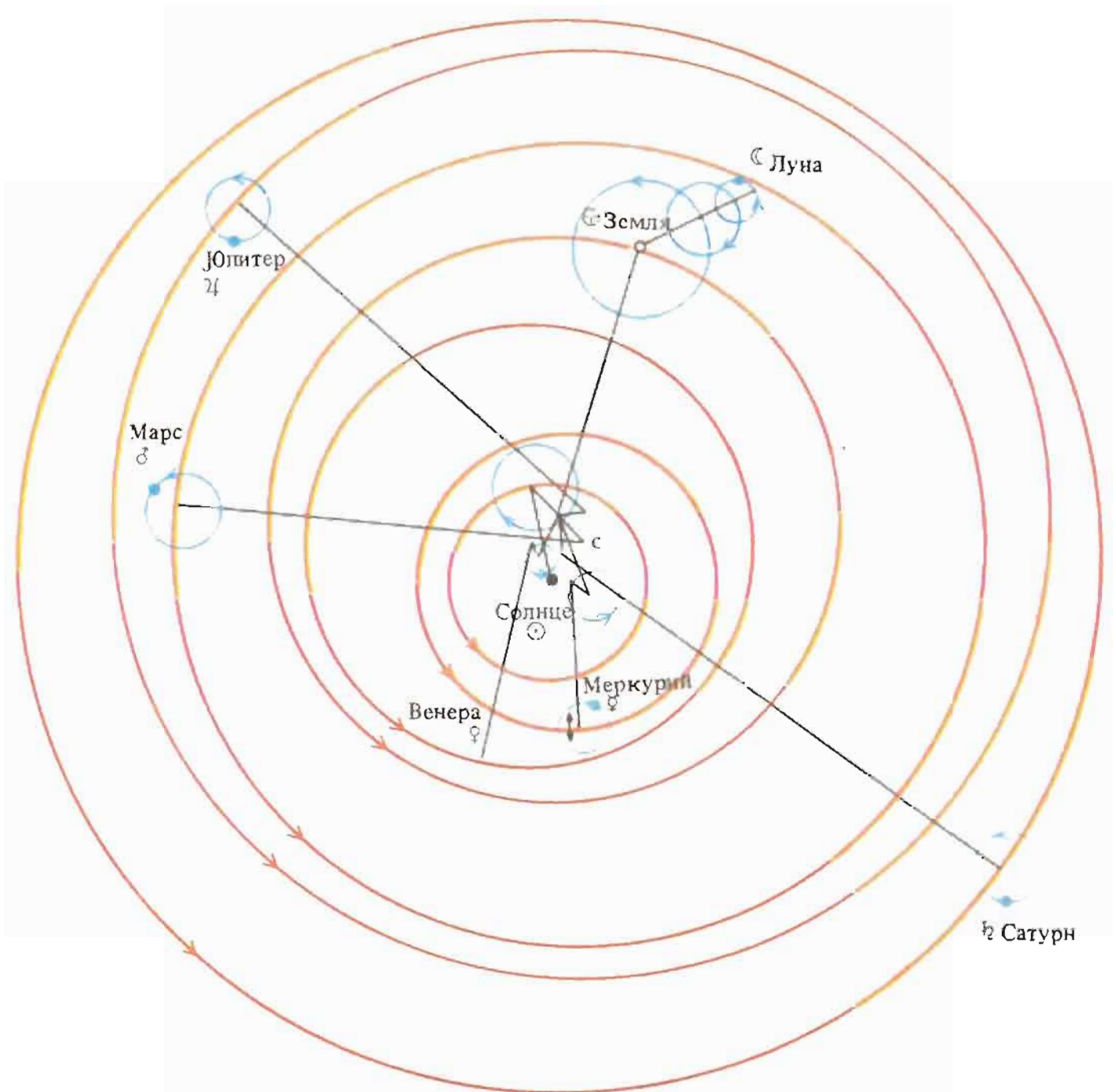
Коперник

Выдающийся успех Аристарха, по-видимому, не произвел большого впечатления на его собратьев-астрономов, которые сосредоточили все свои усилия на разработке возможно более точного геометрического описания наблюдаемого движения Солнца, Луны и планет. Их модели были призваны воспроизвести с максимальной точностью то, что они непосредственно *наблюдали* на небе, а не истинную картину мира. Поэтому астрономы стойко придерживались интуитивных представлений о том, что Земля покоится в центре небес, и создавали все более сложные, нереалистические, содержащие множество свободных параметров модели. Этот подход достиг своего апогея в трудах Клавдия Птолемея, но в дальнейшем не получил развития.



Система мира Птолемея.

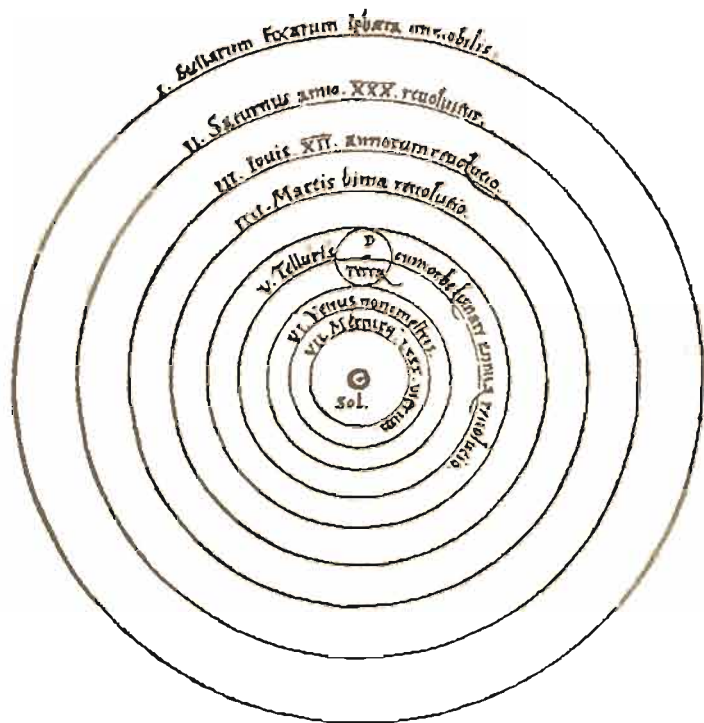
Коперник возродил пифагорейскую традицию. Начав с реконструкции модели Аристарха, он принялся затем усложнять ее, вводя эпициклы и смещая центры окружностей-деферентов относительно центра Солнца. Приведенные здесь рисунки позволяют сравнить окончательный вариант модели Коперника с моделью Птолемея. Несомненно, модель Коперника выглядит не менее сложно; более того, она содержит 48 окружностей вместо 40 у Птолемея. Нельзя также сказать, что теория Коперника позволяла с большей точностью толковать астрономические наблюдения: в одних отношениях она была более точной, в других — менее. А в одном важном отношении она явно противоречила тому, что считалось неоспоримым: она предсказывала наличие параллактического смещения звезд на протяжении года. Ни сам Коперник, ни кто-либо из его предшественников не могли обнаружить такого рода смещений. Коперник объяснял это удаленностью звезд, вследствие чего их параллакс слишком мал, чтобы его можно было заметить. Но тогда возникала дру-



Система мира Коперника. (Оба рисунка сделаны У. Д. Сталманом, из книги Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира: Птолемеевой и Коперниковой»; исправления, редактирование и аннотация Дж. де Саптиано, изд-во «Чикаго юниверсити пресс», 1953.)

гая проблема: если при столь большой удаленности звезд мы тем не менее видим их достаточно крупными, то по своим размерам звезды должны превосходить диаметр земной орбиты! Этот вывод противоречил здравому смыслу и ставил под сомнение утверждение Коперника о том, что Солнце, которое «справедливо называют Светочем, Высшим Разумом, Властителем Мира... восседает... на троне» в центре Вселенной.

Короче говоря, гелиоцентрическая модель Коперника была столь же громоздкой и сложной, как и конкурирующая с ней геоцентрическая модель; не отличалась она и большей точностью, а вытекающий из нее вывод о размерах звезд казался абсурдным и противоречащим представлениям об исключительности Солнца. Теория эта даже не была особенно оригинальной, на что неоднократно указывал сам Коперник (оригинальность, по церковным кано-



Чертеж из книги Коперника «Об обращении небесных сфер», иллюстрирующий гелиоцентрическую модель Коперника. (Коллекция Грейнджера.)

нам, — весьма сомнительная добродетель): греки, как обычно, додумались до нее первыми. Все, сделанное Коперником, сводилось лишь к замене геоцентрической модели Птолемея моделью гелиоцентрической — работа, не представлявшая серьезных трудностей для любого квалифицированного математика того времени.

Почему же тогда Кеплер и Галилей, люди, не склонные к преувеличениям, провозгласили Коперника основоположником Новой астрономии? Почему Мартин Лютер и Джон Донн (в своей сатирической поэме «Святой Игнатий, его тайный совет и...») всячески поносили его?

Разработку своей сложной модели (см. рисунок) Коперник начал с простейшей схемы, включавшей в себя три основных положения астрономии Аристарха: вращение Земли вокруг оси, центральное положение Солнца внутри планетной системы и, наконец, представление о Земле как о планете, вокруг которой обращается Луна. Назовем эту модель, схема которой приведена на с. 57, моделью А (в честь Аристарха). Она представляет собой первооснову теории Коперника. Но именно ее Галилей и Кеплер считали теорией Коперника. В книге «Об обращении небесных сфер» Коперник сделал попытку построить гелиоцентрическую модель мира, которая соответствовала бы астрономическим наблюдениям лучше, чем геоцентрическая модель Птолемея, однако его усилия завели лишь в такие математические дебри, в которых модель А, простая и изящная идея, вдохновлявшая Коперника на труд всей его жизни, затерялась почти на век.

Для Коперника, Кеплера и Галилея модель А была более чем схемой, позволявшей описать движение небесных тел в первом, грубом приближении. Они видели в ней то, что отсутствовало в геоцентрической модели, — зерно истины, хотя последняя описывала астрономические наблюдения с большей точностью.

Аристотель говорил, что высказывание истинно, если то, что оно утверждает, действительно имеет место. Утверждение «Сегодня утром в Бостоне шел дождь» будет истинным в том и только том случае, если дождь на самом деле был в Бостоне сегодня утром; мы можем проверить это, опросив очевидцев. Применимо ли определение Аристотеля к научным теориям? Можем ли мы

сказать, что теория верна тогда и только тогда, когда ее положения соответствуют действительности?

На первый взгляд это может показаться заманчивым. Высказывание «Модель *A* истинна» при таком подходе означает, что вооруженный телескопом гипотетический наблюдатель, находящийся в соответствующем месте, мог бы, посмотрев на нашу планетную систему, сказать: «Да, действительно, планеты движутся вокруг Солнца по траекториям, близким к окружностям, плоскости которых почти совпадают». Космический аппарат, запущенный для исследования Солнечной системы, передает на Землю фотографии, убеждающие нас, что планеты и в самом деле такие, как утверждает значительно усовершенствованная версия модели *A*; следовательно (по логике Аристотеля), модель *A* верна и по сей день.

Но для Коперника, Кеплера и Галилея модель *A* уже была истинной — пусть не в столь абсолютном, но в не менее важном смысле. Каков же этот смысл? Что следует считать признаком научной истины?

Прежде всего, конечно, согласие теории с экспериментом. Правильная теория должна «воспроизводить явления». Однако этого еще недостаточно. Планетная модель Птолемея очень хорошо согласовалась с результатами наблюдений, но никто не рассматривал ее иначе как общепринятый метод для предсказаний видимых положений небесных тел. С другой стороны, модель *A*, описывающая астрономические наблюдения с гораздо меньшей точностью, заключала в себе (с точки зрения Коперника, Кеплера и Галилея) несомненное зерно истины. Почему? Да потому, что, по словам Коперника, модель *A* выявила «поразительную соразмерность и... узы гармонии между движением и размерами орбитальных кругов, которые невозможно выявить никаким другим способом».

Кеплер

Тема небесной гармонии, развитая Платоном в его диалоге «Тимей», всю жизнь вдохновляла и направляла работу Иоганна Кеплера, которому выпала честь завершить астрономическую революцию, начатую Коперником. Герой книги Платона, Тимей, принадлежит к пифагорейской школе и отождествляет четыре из пяти платоновых тел с четырьмя основными элементами: куб — земля, тетраэдр — огонь, октаэдр — воздух, икосаэдр — вода, а пятое тело, додекаэдр, — Вселенная; далее он связывает строение Вселенной со строением диатонической гаммы. В книге «Космографическая тайна» (*Mysterium Cosmographicum*), опубликованной в 1596 г., Кеплер разработал иную космологическую интерпретацию платоновых тел:

Земля [сфера Земли] — мера всех других сфер. Опишем додекаэдр вокруг нее — тогда окружающая его сфера будет сферой Марса. Опишем тетраэдр вокруг сферы Марса — и окружающая его сфера будет сферой Юпитера; опишем куб вокруг сферы Юпитера — и описанная вокруг него сфера будет сферой Сатурна. Поместим теперь икосаэдр внутрь сферы Земли — тогда вписанная в него сфера будет сферой Венеры. Наконец, поместим октаэдр внутри сферы Венеры, и вписанная в него сфера окажется сферой Меркурия.

Объяснив, почему существуют именно шесть планет (включая Землю), Кеплер приступил к построению геометрической модели, призванной объяснить результаты необычайно обширных и точных наблюдений планеты Марс, проведенных великим датским астрономом Тихо Браге, помощником которого Кеплер стал в 1601 г. В книге «Новая астрономия» (*Astronomia*

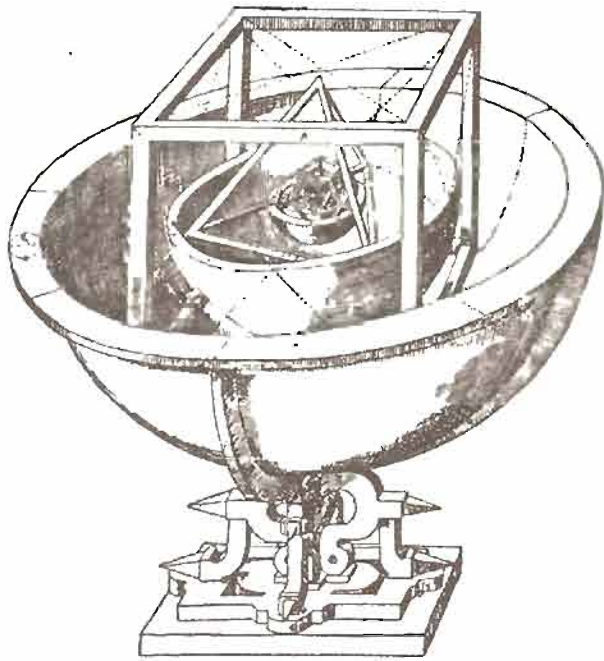
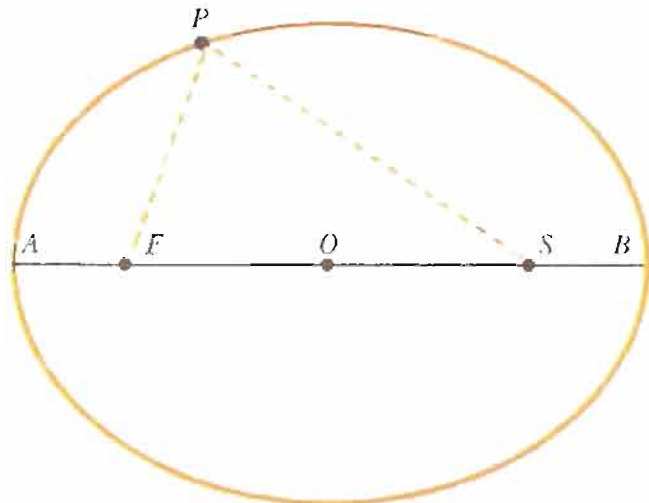
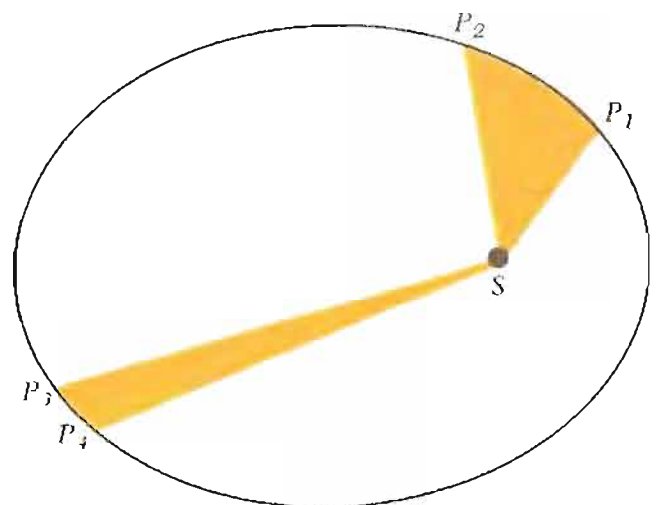


Рисунок из первой книги Кеплера «Космографическая тайна» (1596), показывающий, что пять правильных многогранников можно разместить внутри совокупности концентрических сфер, радиусы которых соотносятся так же, как радиусы планетных орбит в модели Коперника. (Коллекция Грейнджера)



Первый закон Кеплера: орбита каждой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Сумма $(PF + PS)$ расстояний от любой точки P эллипса до его фокусов F и S равна величине большой оси AB . Эксцентриситетом эллипса называется отношение OS/OB



Кеплеровский закон площадей: линия SP , соединяющая планету с Солнцем, описывает секторы равных площадей за равные промежутки времени. P_1, P_2 и P_3, P_4 — пары точек, выбранных таким образом, что отрезки дуги P_1P_2 и P_3P_4 планета проходит за одинаковое время.

Nova), завершенной в 1607 г. и опубликованной двумя годами позже, Кеплер привел два из своих знаменитых трех законов движения планет; один из них гласил, что каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце, а согласно второму, каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем линия, соединяющая Солнце с планетой (радиус-вектор планеты), за равные промежутки времени описывает равные площади.

Кеплер первым среди астрономов продолжил работу Аристарха по созданию геометрической модели мира, надежно подтверждаемой наблюдениями. Как объяснить, что эта попытка была предпринята лишь спустя 1800 лет? Рассмотрим в ретроспективе те усовершенствования, в которых нуждалась модель Аристарха.

1. Шесть планетных орбит, которые в модели Аристарха целиком лежали в одной плоскости, следовало поместить в различные плоскости, проходящие через Солнце.

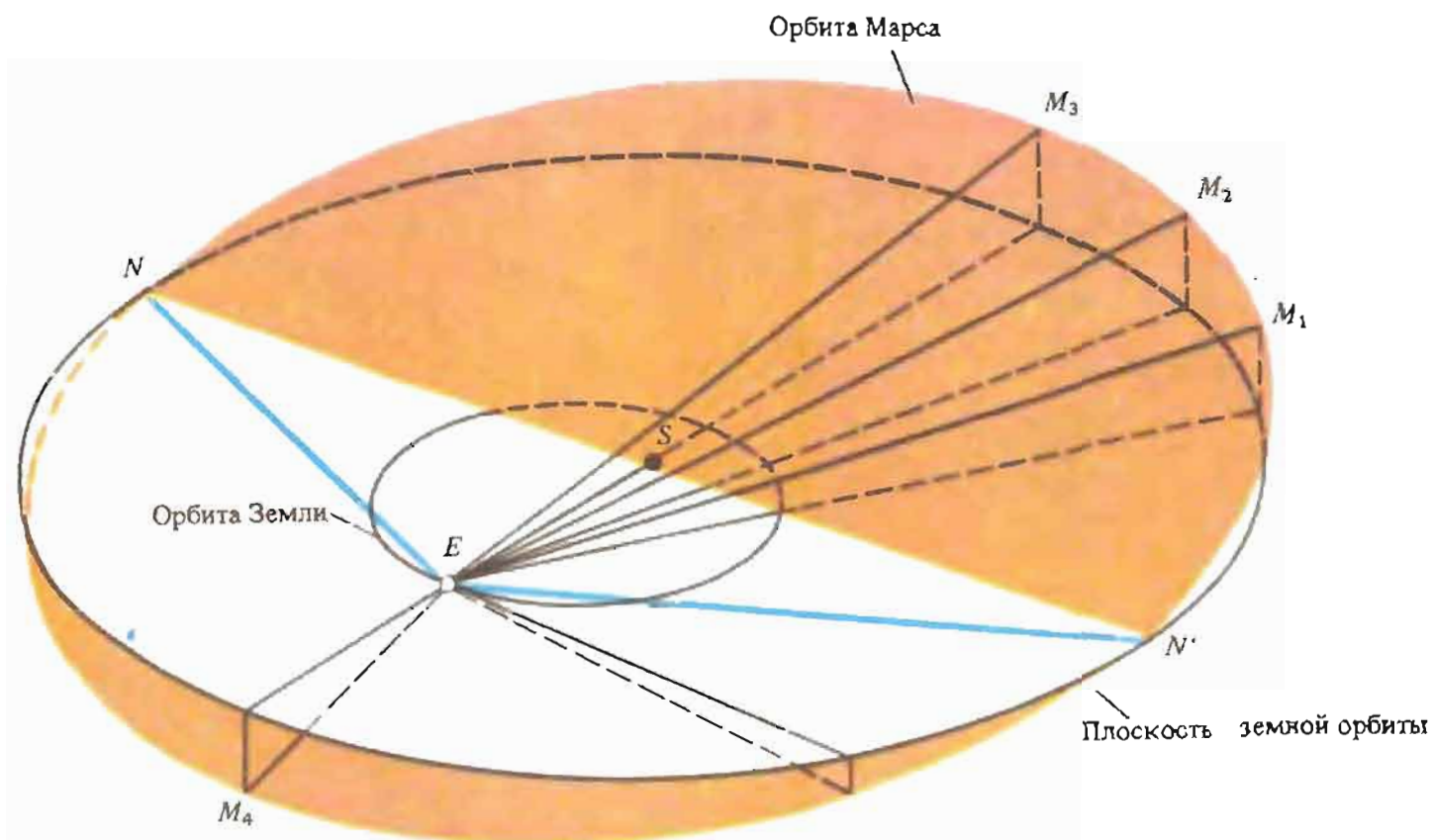
2. Принцип равномерного кругового движения (неизменно лежащий в основе математического подхода к астрономии с момента его зарождения и вплоть до конца XVI в.) следовало заменить новым принципом: отрезок прямой, соединяющий планету с Солнцем, описывает равные площади за равные промежутки времени.

3. Круговые (или комбинации круговых) орбиты планет требовалось заменить эллиптическими, поместив в один из фокусов эллипса Солнце.

Все эти нововведения были сделаны Кеплером. Никаких промежуточных моделей за всю предшествующую историю астрономии не предлагалось, и даже сейчас трудно представить такую модель. Чтобы достигнуть того, что сделал Кеплер, требовались физическая проницательность и математический гений, опирающиеся на неисчерпаемую энергию и самоотверженность. Столь же необходимы были беспрецедентные по точности и широте наблюдения. Короче говоря, нужен был Кеплер, вооруженный богатейшим материалом наблюдений Тихо Браге.

Объяснение движений планет в направлении, перпендикулярном эклиптике. В модели Аристарха все планеты движутся в одной плоскости, и поэтому их путь на небе должен совпадать с траекторией Солнца — эклиптикой. Насколько нам известно, Аристарх даже не пытался понять причину незначительных и, казалось бы, неупорядоченных перемещений планет перпендикулярно плоскости эклиптики. На протяжении столетий эти малые смещения тревожили астрономов. От Евдокса до Коперника — все они, хотя и безуспешно, пытались как-то отразить их в своих моделях. Птолемей высказал правильную мысль, предположив, что орбита каждой планеты лежит в плоскости, но у всех планет эти плоскости различны. Однако он полагал, что плоскости орбит планет должны проходить через центр Земли. Коперник, модифицировавший модель Птолемея, сместил общую точку орбитальных плоскостей, но не в Солнце, как мог бы ожидать современный читатель, а в точку, лежащую неподалеку от Солнца, которая в его модели служила центром земной орбиты. (Далее мы узнаем, почему Коперник не поместил Солнце в центр земной орбиты.) В результате предсказания движений планет в направлении, перпендикулярном эклиптике, стали лучше соответствовать наблюдениям, чем в модели Птолемея, однако точного соответствия по-прежнему не было.

Кеплер сделал шаг, казавшийся ему очевидным: совместил точку пересечения плоскостей орбит с Солнцем. Из этой гипотезы вытекает простое следствие, доступное проверке. Рассмотрим (см. рисунок) отрезок прямой, соединяющий Землю с планетой. Эта прямая наклонена к плоскости земной орбиты; следовательно, планета находится на небе выше или ниже эклиптики, за исключением двух точек, в которых орбита планеты пересекается с плоскостью орбиты Земли. Когда планета оказывается в одной из этих точек, на небе она располагается точно на эклиптике. Из чертежа видно, что линия, соединяющая точки пересечения траектории планет с эклиптикой, *проходит через Солнце*. Воспользовавшись результатами наблюдений Марса, выполненных Тихо Браге, Кеплер подтвердил это предположение. Оценив далее величину угла между плоскостью планетной орбиты и плоскостью эклиптики, он смог с удовлетворительной точностью вычислить угловое расстояние планеты от эклиптики в любой момент времени. Как видно из рисунка, угловое расстояние от планеты до эклиптики зависит не только от положения планеты на орбите, но и от расстояния между планетой и Землей. Взаимосвязью этих двух факторов обусловлен сложный характер наблюдаемого движения пла-



Если Солнце одновременно находится в орбитальных плоскостях как Земли, так и Марса, то эти плоскости должны пересекаться по линии NSN' , проходящей через Солнце. Точки узлов N и N' представляют собой точки пересечения траектории Марса на небесной сфере с эклиптической. Предположив, что плоскость орбиты Марса проходит через Солнце (а не через центр земной орбиты), Кеплер объяснил наличие в движении Марса по небесной сфере составляющей, перпендикулярной плоскости эклиптики (движение по широте).

нет в направлении, перпендикулярном плоскости эклиптики.

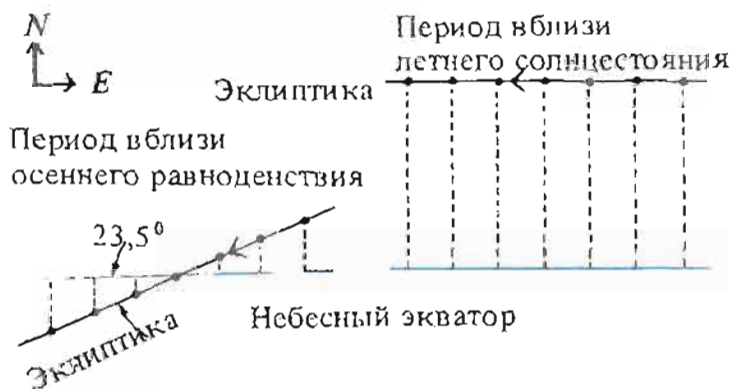
Основываясь на модели Коперника и используя превосходные результаты наблюдений Тихо Браге, Кеплер сделал первый существенный шаг в развитии теоретической астрономии со времен Аристарха. Комментируя свои выводы, он отмечал, что Коперник даже не представлял истинной ценности своего открытия.

Закон постоянства секторной скорости. Хотя модель Аристарха и объясняла все качественные особенности движений планет вдоль эклиптики, точность, с которой она описывала эти движения, не удовлетворяла даже современников ученого. По мере расширения наблюдений и увеличения их точности становилось ясно, что расхождение между предсказанием теории и результатами наблюдений отчасти имеет простой, систематический характер.

Рассмотрим, например, видимое движение Солнца. Еще во времена Аристарха астрономам было известно, что Солнце в течение года движется по эклиптике с переменной скоростью. Однако отклонения величины его скорости от среднего значения, определяемые на основании тщательных измерений продолжительности суток (см. врезку), сами имели простой и регулярный характер. Птолемей обнаружил, что наблюдаемую неравномерность движения Солнца можно описать с большой точностью, предположив, что Солнце движется с постоянной скоростью по *эксцентрической* окружности, т. е. окружности, центр которой не совпадает с Землей (правый рисунок на с. 48). По этой же причине в системе Коперника, представляющей собой гелиоцентрический вариант модели Птолемея, центр земной орбиты смещен в точку, расположенную неподалеку от Солнца. Эта точка, хотя и не имеет физического смысла, играет центральную роль (в буквальном смысле этого

слова) в построениях Коперника: она служит геометрическим центром деферентов всех планетных орбит (см. рисунок на с. 57).

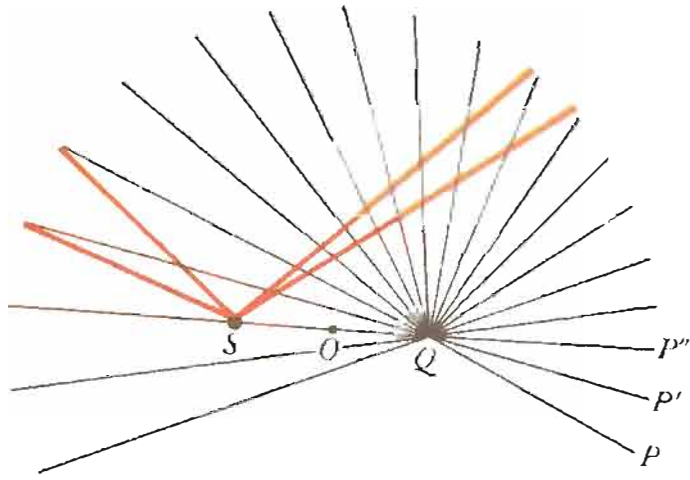
Суточное перемещение Солнца вдоль эклиптики можно представить в виде суммы двух независимых движений во взаимно перпендикулярных направлениях: перемещения к востоку параллельно небесному экватору (т. е. вдоль параллели небесной широты) и перемещения к северу или югу (вдоль круга небесной долготы). Однако лишь перемещение в восточном направлении влияет на величину интервала времени между последующими восходами или заходами Солнца. Отношение смещения в восточном направлении к полной величине перемещения изменяется на протяжении года. Оно равно единице в дни солнцестояний, когда Солнце движется параллельно небесному экватору, и достигает наименьшего значения в дни равноденствий, когда траектория Солнца пересекает небесный экватор под углом $23,5^\circ$. Этим обусловлено сезонное изменение продолжительности суток, которое легко рассчитать. Если, приняв во внимание этот эффект, вычислить суточное перемещение Солнца по эклиптике, то окажется, что скорость перемещения не остается постоянной на протяжении года, а систематическим образом изменяется, о чем и идет речь.



Различие в продолжительности солнечных и звездных суток пропорционально направленной к востоку составляющей суточного перемещения Солнца вдоль эклиптики. Максимального значения эта составляющая достигает в период солнцестояния, а минимального — в период равноденствия.

Астрономические наблюдения показывают, что и остальные пять планет также обращаются вокруг Солнца с изменяющейся скоростью. Смещение центров круговых орбит планет от Солнца уменьшает, но не исключает полностью расхождения между теоретическими предсказаниями и результатами наблюдений. В свое время Птолемей, столкнувшись с этой трудностью, придумал выход. Суть идеи Птолемея (но применительно к гелиоцентрической модели) поясним с помощью рисунка. Планета движется по круговой орбите, центр которой (точка O) расположен вне Солнца S . Движение планеты происходит таким образом, что линия, соединяющая планету с некоторой точкой Q , за равные интервалы времени описывает равные углы. Точка Q , называемая *эквантом*, также не совпадает с центром окружности. В результате скорость планеты возрастает с увеличением расстояния до экванта и уменьшается при приближении к нему.

Методом проб и ошибок Птолемей установил, что точнее всего описать движение Марса, Юпитера и Сатурна удастся, поместив эквант в точку, удаленную от центра планетной орбиты на то же расстояние, что и Солнце (в модели Птолемея — Земля), но расположенную по другую сторону от этого центра. Другими словами, центр круговой орбиты делит пополам отрезок, соединяющий эквант с Солнцем. Коперник отверг это остроумное ухищрение на том основании, что оно противоречило принципу равномерного кругового движения. Он заменил птолемеевы экванты внешними эпициклами — это одна из причин, по которой в его модели используется больше кругов, чем у Птолемея. Кеплер увидел систему эквантов совсем в другом свете. Он считал, что она должна отражать истинную закономерность движений планет и, следовательно, ее следует применить к орбитам всех планет, включая Землю. Пто-



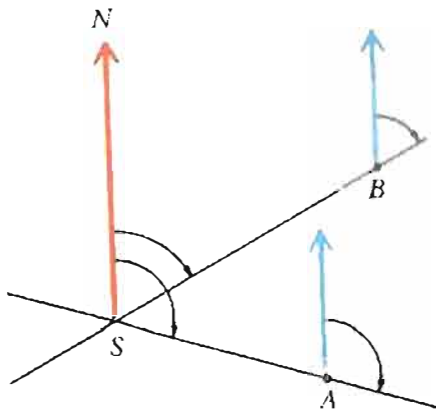
Птолемея схема эквантов применительно к гелиоцентрической системе. Планета P движется по кругу, центр которого O смещен относительно Солнца S . Если смотреть из экванта Q , расположенного так, что $OQ = OS$, то планета смещается на равные углы за равные интервалы времени. Если же смотреть из точки S (или O), то угловое перемещение планеты кажется неравномерным.

лемей использовал простую эксцентрическую окружность для описания движения Солнца вокруг Земли, а Коперник ту же окружность применил для описания движения Земли вокруг Солнца. В системе Птолемея способ описания движения Солнца не влиял непосредственно на модели орбит пяти планет — каждая из моделей в скрытой форме учитывала движение Земли. Но в любой гелиоцентрической системе описание движения Земли имеет решающее значение, поскольку от этого непосредственно зависит результат теоретического предсказания наблюдаемого перемещения планет по небу. Кеплер осознал, что для построения точной теории движения планет ему придется проверить применимость гипотезы экванта к земной орбите.

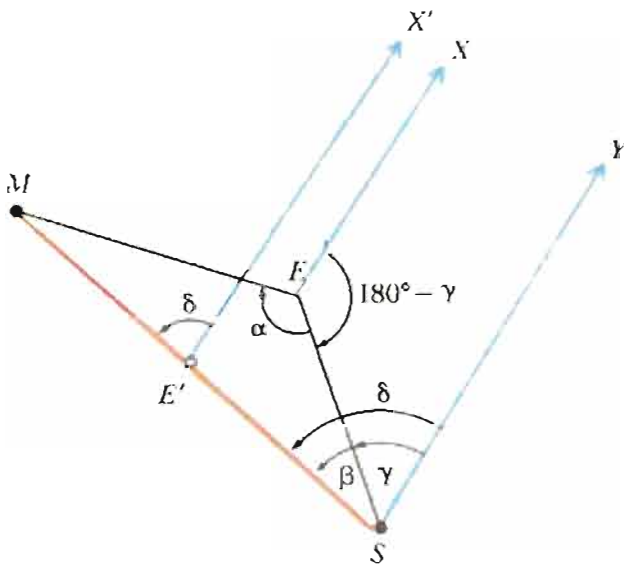
Модель орбиты с эквантом, равно как и более простая модель эксцентрической окружности, имеет всего один свободный параметр: отношение расстояния Солнца от центра орбиты к радиусу орбиты. Эта величина называется *эксцентриситетом*. Ее можно найти из наблюдений, определив отношение наибольшей и наименьшей величин суточного перемещения Солнца вдоль эклиптики. Однако значение эксцентриситета, необходимое для объяснения наблюдаемой величины указанного отношения, меньше (ровно в два раза) для модели с эквантом, чем в случае простой эксцентрической окружности. Чтобы решить, какая из моделей верна, Кеплеру нужно было придумать, как определить расстояние от Солнца до центра земной орбиты.

Он нашел простой и изящный метод решения этой проблемы. Пусть Земля будет кораблем, а Солнце — неподвижным маяком. Чтобы нанести на карту положение корабля, штурману нужны фиксированное направление отсчета (его дает, например, магнитный компас) и два неподвижных маяка. Дальнейшую схему действий штурмана нетрудно понять, обратившись к левому из приведенных рисунков. Вернемся, однако, к астрономии. Звезды обеспечивают фиксированное направление отсчета, а роль одного из неподвижных маяков выполняет Солнце. Задача сводится к тому, чтобы найти аналог второму маяку: им должен быть неподвижный объект, направление на который заметным образом меняется при движении Земли по орбите. Однако в Солнечной системе имеется всего один неподвижный объект — Солнце. Кеплер нашел простой способ создать второй «маяк», сообразив, что его роль может играть Марс, который спустя ровно один марсианский год возвращается в исходную точку. Продолжительность марсианского года была известна с большой точностью. Измеряя направление на Марс и Солнце через интервалы времени, равные марсианскому году, Кеплер смог определить положение точек, отражавших положение Земли на различных участках орбиты. Более подробно уяснить соответствующую процедуру поможет нижний рисунок на с. 66.

Таким путем Кеплер обнаружил, что эксцентриситет земной орбиты в точности совпадает с тем, что предсказывала модель с эквантом, как он и пред-

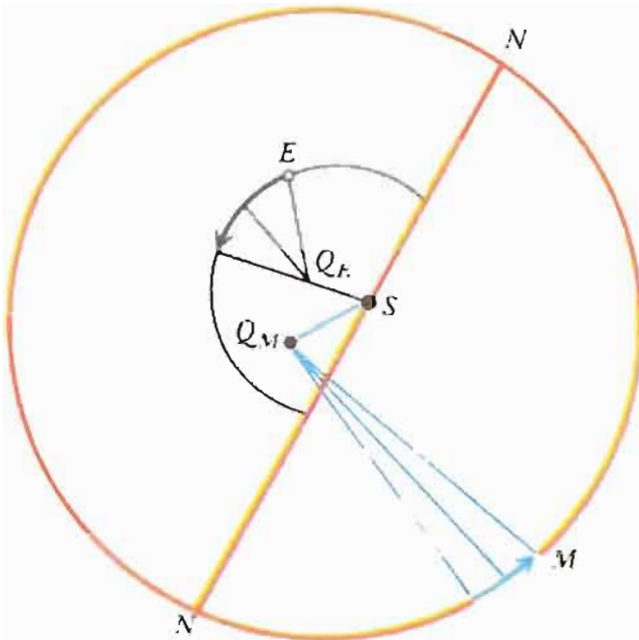


Определение местонахождения корабля S путем измерения углов $\angle NSA$ и $\angle NSB$ между направлениями на маяки (A и B) и направлением на некоторую точку N . Если местоположение маяков на карте известно, то положение корабля находится как точка пересечения линий, проведенных на карте через маяки под соответствующими углами ($\angle NSA$ — в точке A , $\angle NSB$ — в точке B) к фиксированному направлению.

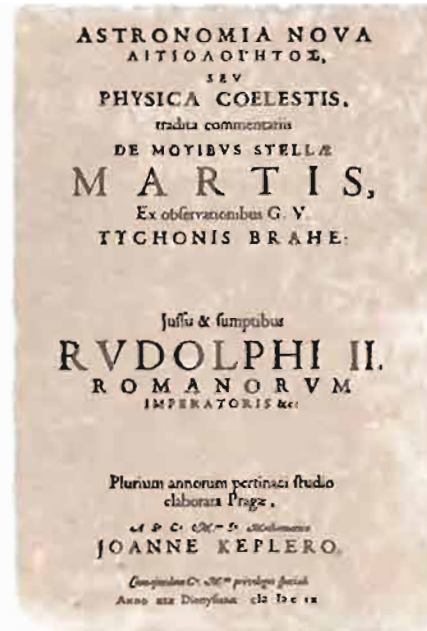


Точками S , E и M отмечены соответственно Солнце, Земля и Марс; SX и EX — параллельные линии, направленные на произвольно выбранную опорную звезду. Если пренебречь (малым) наклоном орбитальной плоскости Марса к плоскости земной орбиты, то из наблюдений можно определить углы α и $180^\circ - \gamma$. Угол δ также определяется из наблюдений в момент противостояния Марса (т. е. в момент, когда Земля находится в точке E'). Изобразим на плоскости отрезок SM , который будет служить единицей измерения расстояний. Затем проведем две линии: одну через точку S под углом $\beta = \delta - \gamma$ к отрезку SM , а вторую — через точку M под углом $180^\circ - \alpha - \beta$ к отрезку MS . Точка пересечения этих линий соответствует положению Земли в тот момент, когда выполнялись измерения углов α и $180^\circ - \gamma$. Спустя ровно один марсианский год Марс вернется в точку M , однако Земля теперь окажется уже в другой точке своей орбиты. Определив заново углы α и γ , мы, как и в предыдущем случае, найдем положение этой точки относительно отрезка SM . Таким образом, наблюдая положения Марса и Солнца через интервалы времени, равные орбитальному периоду Марса, Кеплер определил форму и размеры земной орбиты в единицах длины отрезка SM .

полагал. После этого Кеплер разработал свою модель, которую мы назовем моделью B . В ней, как и в модели A , орбитами планет еще служили окружности, но лежали они в различных плоскостях, проходящих через Солнце. Солнце было смещено относительно центра каждой орбиты, а движение планет описывалось с использованием птолемеевых эквантов. Эта модель представляла собой шаг вперед по сравнению с моделью A , однако Кеплер на этом не остановился. Модель не объясняла результаты наблюдений Тихо Браге с подобающей точностью; более того, в глазах Кеплера она обладала серьезным качественным недостатком.



Фрагмент кеплеровской модели В. Каждая планета движется по эксцентрической окружности со скоростью, изменяющейся в соответствии с птолемеевой моделью эквантов. Орбиты планет лежат в различных плоскостях, проходящих через Солнце S.



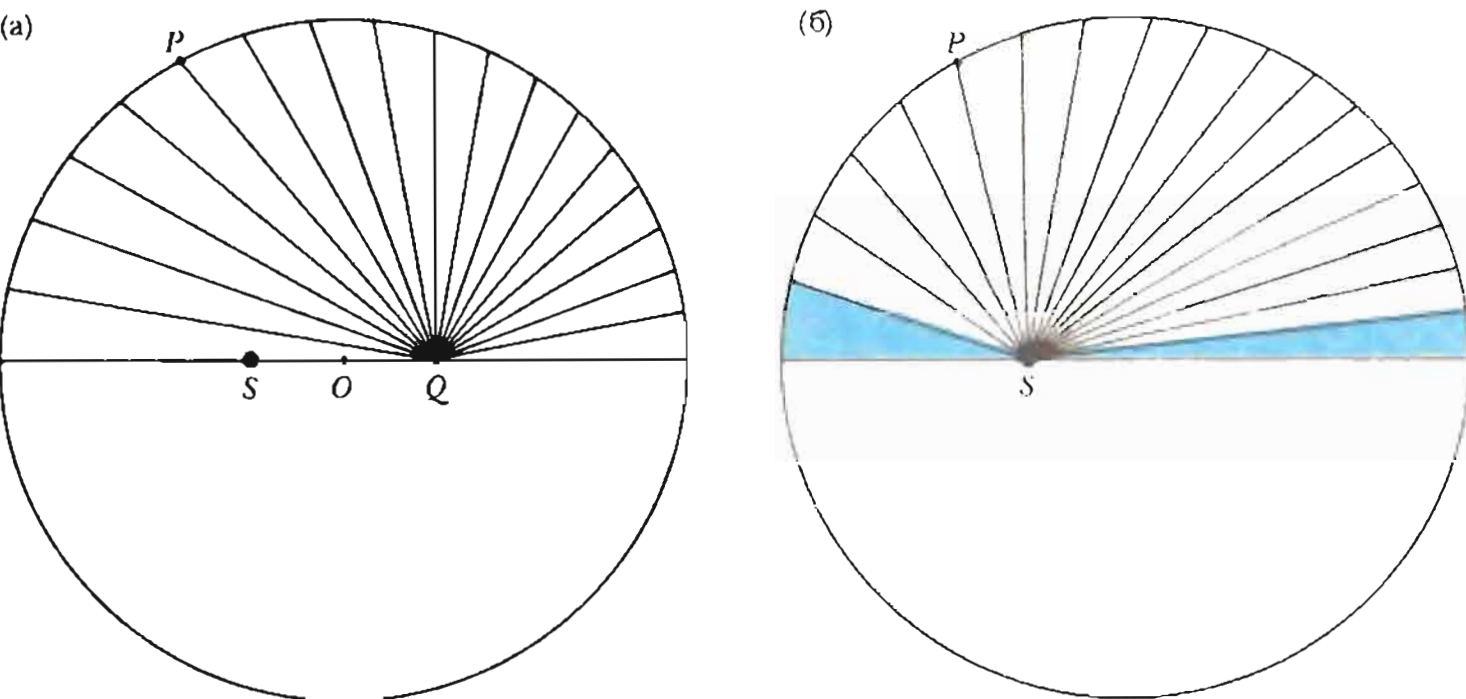
Титульный лист книги Кеплера «Новая астрономия». (Коллекция Грейнджера.)

Две основные идеи служили Кеплеру ориентиром в его астрономических исследованиях: пифагорейские представления о математической гармонии как первооснове мира и убеждение, что небесные тела — это физические объекты, движение которых обусловлено естественными причинами. Заголовок наиболее важной книги Кеплера представляет собой также и краткое резюме его философии науки:

НОВАЯ АСТРОНОМИЯ, основанная
на причинных связях,
или **ФИЗИКА НЕБА**,
выведенная из изучения
ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗДЫ МАРС,
основанных на наблюдениях
БЛАГОРОДНОГО ТИХО БРАГЕ

Кеплер не только был убежден, что планеты движутся вокруг Солнца, он также полагал, что Солнце является причиной этого движения: его астрономия была не только гелиоцентрической, но и *гелиоиерархической*. Позднее, в конце того же столетия, Ньютон показал, что эта точка зрения не вполне корректна. Солнце не является *причиной* движения планет — оно лишь изменяет их скорость и направление движения. Ошибочная идея о том, что Солнце заставляет планеты двигаться, тем не менее навела Кеплера на правильную мысль о необходимости проводить орбитальные плоскости планет через Солнце и заставила усомниться в птолемеевой системе эквантов.

Хотя теория эквантов математически выглядела вполне корректно, ее физическое содержание было весьма скудным. Движение планет в ней определялось не Солнцем, а некой абстрактной точкой (Q на рисунке). Кеплер чувствовал, что устранение этой физической несообразности связано с математикой. Если идея экванта позволяет правильно описывать явления, мог рас-



Гелиоцентрический вариант птолемеевой модели эквантов (а). Планета P проходит разные угловые расстояния за равные интервалы времени, если наблюдать из точки Q , расположенной таким образом, что $QO = OS$, где O — центр окружности, а S — Солнце. Та же диаграмма, но точки Q и O не показаны, а лучи проведены из точки S (б). Вследствие равенства $QO = OS$ площади закрашенных секторов равны.

суждать Кеплер, то должен быть ее математический эквивалент, имеющий более глубокий физический смысл. Нарисуем левый чертеж, но уберем с него эквант и центр круговой орбиты как точки, не имеющие физического смысла; в результате получим правый чертеж, который с математической точки зрения эквивалентен исходному. Но как теперь отразить его специфику, не вводя заново эквант? Кеплер заметил, что *площадь*, заметаемая отрезком прямой Солнце — планета за один и тот же короткий интервал времени, одинакова в перигелии (когда планета находится ближе всего к Солнцу и движется с максимальной скоростью) и в афелии (когда планета максимально удалена от Солнца и движется наиболее медленно). Это наводит на мысль о закономерности, называемой ныне вторым законом Кеплера, или законом площадей: *линия, соединяющая Солнце с планетой, за равные времена описывает равные площади*.

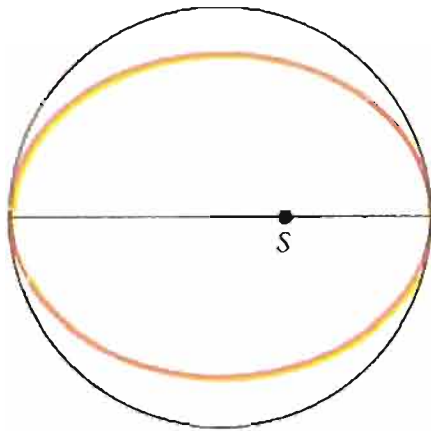
На самом деле этот закон не эквивалентен птолемеевскому условию о постоянстве угловой скорости планеты относительно экванта. Они совпадают лишь в непосредственной близости к афелию и перигелию. Хотя закон площадей первоначально согласовался с наблюдениями не лучше, чем модель с эквантом, Кеплер принял этот закон сразу и использовал в обширной серии сложных расчетов, которые завершились выводом правила, получившего название первого закона планетных движений. В конечном итоге два закона Кеплера позволили объяснить результаты Тихо Браге и Кеплера гораздо точнее, чем любая из предшествующих моделей, однако не лишне отметить, что использовать закон площадей в своих расчетах Кеплер начал *раньше*, чем этот закон получил надежное подтверждение наблюдениями. Кеплер был готов принести в жертву тысячи часов, затраченных на вычисления, для обоснования этого закона не потому, что считал его более совершенным, нежели модели Птолемея и Коперника, а потому, что этот закон в большей степени соответствовал его представлениям о математической гармонии и физической причинности.

Кеплеровский закон площадей — это первое математическое описание планетарных движений, исключившее принцип равномерного движения по окружности как первооснову. Более того, в отличие от всех предшествующих теорий он выражал связь между *мгновенными* значениями *непрерывно изменяющихся* величин (угловой скорости планеты относительно Солнца и ее расстояния до него). Этот «мгновенный» метод описания, который Кеплер вполне осознанно использовал впоследствии при анализе движения Марса, стал одним из выдающихся принципиальных достижений науки XVII в. Полностью его смысл впервые осознал Ньютон, который разработал дифференциальное исчисление отчасти именно для его математического выражения и дальнейшего развития.

Замена окружности на эллипс. Теперь Кеплер мог построить третью модель планетной системы — модель *C*, где как и в модели *B*, орбиты планет представляли собой окружности, лежащие в различных плоскостях, проходящих через Солнце, но в отличие от модели *B* угловая скорость движения планет относительно Солнца изменялась в соответствии с законом площадей. Завершающее открытие Кеплера оказалось в известной степени следствием удачного стечения обстоятельств. Когда Кеплер прибыл в Бенатекский замок неподалеку от Праги, чтобы приступить к обязанностям одного из ассистентов Тихо Браге, старший ассистент Лонгомонтанус занимался изучением орбиты Марса. Кеплер продолжил эту работу: «[Лонгомонтанус] занялся другой планетой, — писал Кеплер в седьмой главе «Новой астрономии», — а я начал заниматься Марсом. В этом чувствуется рука провидения, поскольку для того, чтобы добиться успеха в познании астрономических тайн, было совершенно необходимо изучить движение Марса, иначе эти тайны так и остались бы скрытыми от нас навечно». Причина такой важности наблюдений Марса заключалась в том, что орбита этой планеты имеет относительно большой эксцентриситет (равный примерно 0,1, тогда как эксцентриситет орбиты Земли, например, составляет всего лишь 0,02, а орбит Юпитера и Сатурна — примерно 0,05). Вследствие этого расстояние Марса от Солнца в афелии и перигелии отличается на 20%, т. е. заметным образом. Кеплеровская модель *C* согласовалась с результатами наблюдений Тихо Браге Венеры, Юпитера и Сатурна вполне удовлетворительно, но описать с достаточной степенью точности результаты Тихо Браге, касающиеся Марса, она оказалась не в состоянии, и Кеплер чувствовал необходимость усовершенствования модели.

Многочисленные безуспешные попытки привели Кеплера к заключению, что недостаток модели связан не с ошибочностью закона площадей, а с предположением о круговой форме орбит. «Загипнотизированный общепринятым представлением, — писал Кеплер, — я заставлял их (планеты) двигаться по кругам, подобно ослам на мельнице». Освободившись от этого предубеждения, он вскоре обнаружил, что орбита Марса должна иметь форму овала, большой диаметр которого проходит через Солнце (см. рисунок на с. 70).

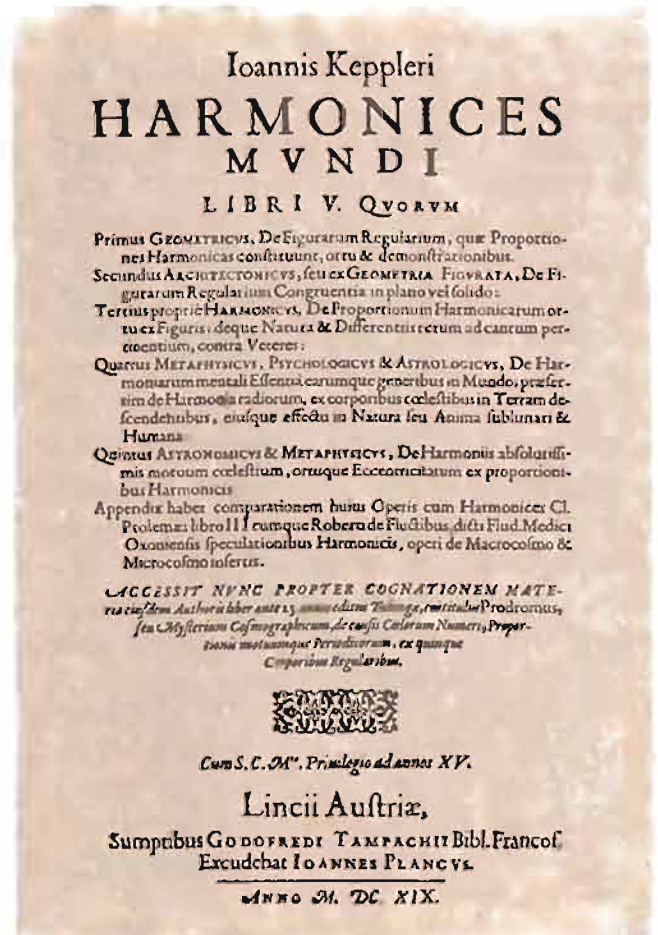
С чисто теоретической точки зрения задача определения формы марсианской орбиты решалась теперь просто. Форма орбиты Земли и ее орбитальное движение были известны. Поэтому, используя закон площадей, можно в принципе определить расстояние от Земли до Марса в ряде соседних точек его орбиты по наблюдаемому положению планеты относительно звезд. Но на практике осуществить это было чрезвычайно трудно: ведь у Кеплера не было ни современных ЭВМ, ни аспирантов. Но он обладал выдающимися математическими способностями, бесконечным терпением и уверенностью в том, что задача имеет решение, если только верен закон площадей. Методом проб и ошибок он пришел к выводу, что добиться согласия с результатами наблюдения можно, придав марсианской орбите форму эллипса, в одном из фокусов



Кеплеровская модель орбиты Марса в форме эллипса сравнивается с круговой орбитой того же диаметра.



Обсерватория Тихо Браге в Ураниборге. С гравюры 1598 г. (Коллекция Грейнджера.)



Титульный лист книги Кеплера «Гармония мира» (полное ее название: «Гармония мира, геометрическая, архитектурная, гармоническая, психологическая, астрономическая с приложением, содержащим космографическую тайну, в пяти книгах»). (Коллекция Грейнджера.)

которого находится Солнце (левый рис., с. 61). Позже Кеплер обнаружил, что тот же закон — известный ныне как первый закон Кеплера — точно описывает орбиты и остальных планет.

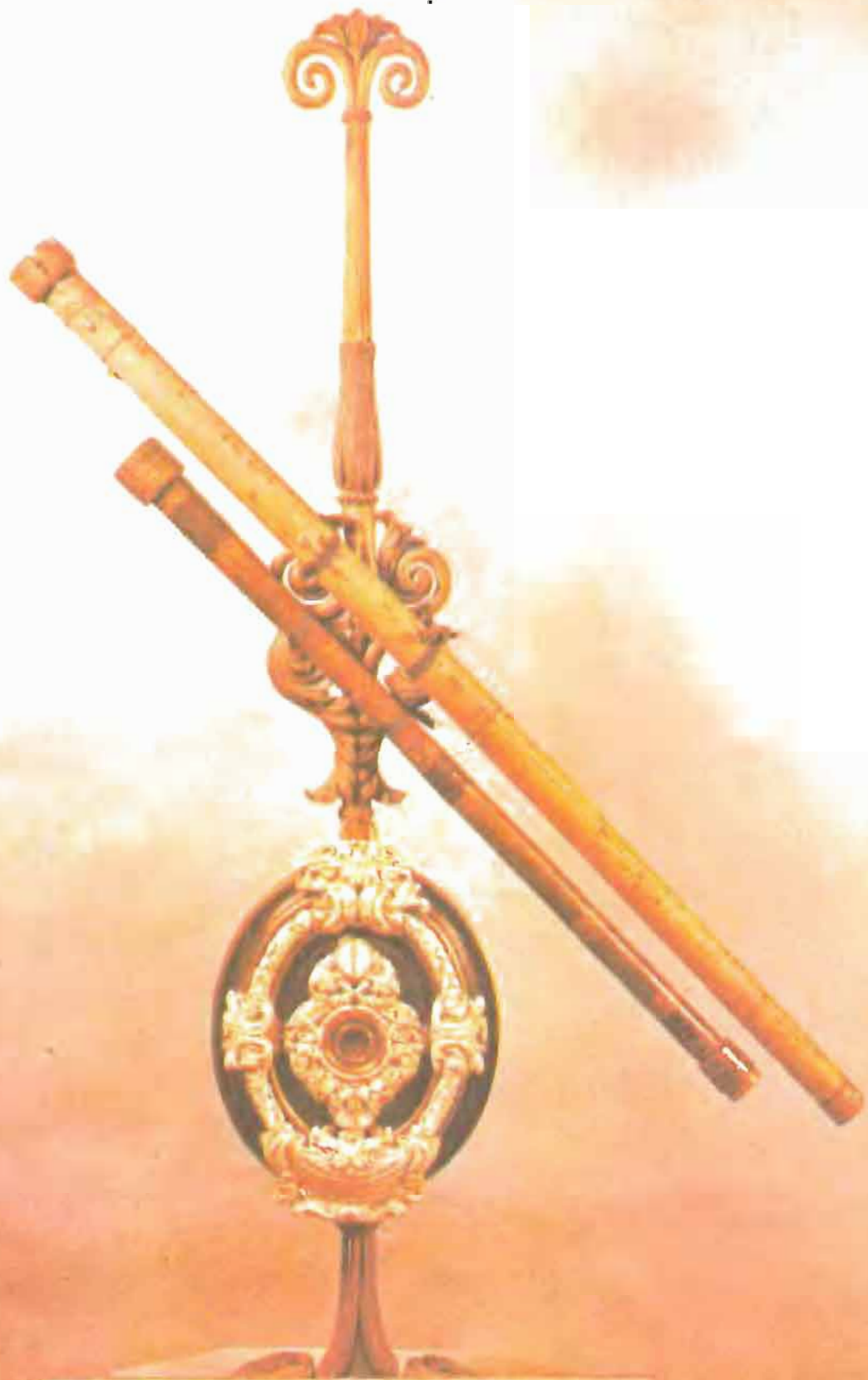
Положение Солнца в фокусе эллипса породило новые «узы гармонии» в кеплеровской модели. Форма эллипса определяется его эксцентриситетом: эллипсы с одинаковым эксцентриситетом отличаются друг от друга лишь размерами. Закон площадей гласит, что изменение угловой скорости планеты при наблюдении с Солнца определяется формой орбиты. Следовательно, как

расстояние планеты от Солнца, так и ее угловая скорость, измеряемая от Солнца, определяются эксцентриситетом планетной орбиты, т. е. отношением величины смещения Солнца относительно центра орбиты к величине большой полуоси орбиты.

Наконец, в 1618 г. Кеплер обнародовал свой третий закон планетных движений, выразивший связь между периодом планеты и величиной большой полуоси (график на с. 52): *квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.*

Юпитер и его четыре спутника, открытые Галилеем с помощью телескопа как раз в то время, когда Кеплер изучал орбиту Марса, представляют собой Солнечную систему в миниатюре. Кеплер обнаружил, что спутники Юпитера подчиняются трем его законам планетных движений — прекрасное и неожиданное подтверждение их справедливости!

В конце концов Кеплеру удалось построить модель Солнечной системы, которая, за малым исключением, описывала движения планет и их спутников в пределах точности наблюдений Тихо. Так Кеплер завершил научную программу, начатую последователями Пифагора, и заложил первый камень (вторым стала механика Галилея) в фундамент, на котором покоится теория Ньютона, ставшая почти на три столетия основой физики и космологии.



INVENITUR VALVDS GALILEI INVENITUR JUPITERIS QUATUOR SATVLLAE
ET SATVLLAE JUPITERIS ET JOVIS SATVLLAE ET SATVLLAE QUATUOR
RETVM ANTE RESEATE PRIMVS DISCEIT A. MDCL.

Архимед, Галилей и Ньютон

Не знаю, каким видит меня мир, но себе я кажусь мальчиком, который играет на морском берегу, развлекаясь тем, что время от времени подбирает камешек поглаже, раковину покрасивее, в то время как великий океан Истины неизведанный лежит передо мной.

Исаак Ньютон

Решение одних важных научных проблем обычно порождает новые, более глубокие проблемы. Кеплеровские законы движения планет позволили объяснить не только наблюдаемые перемещения планет и их спутников, но и закономерности изменения их яркости и видимых размеров. Но почему орбиты планет имеют форму эллипса, а не какой-либо другой кривой? Почему Солнце находится в общем фокусе всех эллипсов, а, скажем, не в общем центре? Почему радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, описывает за равные отрезки времени равные площади, а не равные углы, например? Прежде чем всерьез заняться подобными рода вопросами, следует выбрать *метод объяснения*, ибо тогда станет ясно, какого рода вопросы можно задавать и на какие ответы можно рассчитывать.

Метод Архимеда

Естествоиспытатели XVII в. унаследовали от древнегреческих ученых два различных, хотя и взаимосвязанных, подхода к объяснению окружающего мира: представления Аристотеля и его последователей, с одной стороны, и пифагорейцев и Архимеда — с другой.

Рассуждения Аристотеля о времени и движении (в его книге «Физика») дополнены изящными и сложными математическими выкладками, но тем не менее математика оставалась для Аристотеля не более чем инструментом познания. Основные же категории, которыми он пользовался для объяснения (причина и следствие, форма и содержание, возможность и реальность, покой и движение, непрерывность и дискретность и т. п.), основывались на здравом смысле и интуиции. Подход Архимеда, напротив, по сути своей является математическим. Справедливость аксиом, лежащих в основе его описания,



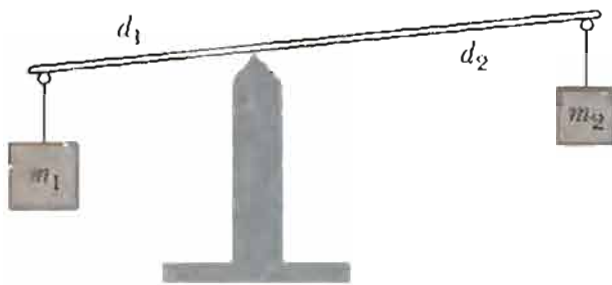
Архимед (ок. 287—212 гг. до н. э.).
 Портрет работы Доминико Фетти, нача-
 ло XVII в. (Коллекция Грейнджера.)

обосновывается не тем, насколько они правдоподобны (критерий Аристотеля), а областью их применимости и точностью предсказаний, доступных проверке.

Преимущества подхода Архимеда нам теперь очевидны. Однако в начале XVII в. представления Архимеда находили применение лишь в сравнительно узких и мало связанных между собой областях знания. Кроме геометрии сюда относилась пифагорейская теория музыкальной гармонии; оптика, которая имела дело с видимыми размерами и формой геометрических объектов, а также с законами отражения света от плоских и сферических зеркал; архимедова теория простых машин (типа рычага); архимедова статика, рассматривающая равновесие геометрических тел с учетом их веса, и наконец, гидростатика, разработав которую Архимед смог выполнить приказ правителя Сиракуз: определить относительное содержание золота и серебра в короне. Подход Аристотеля, наоборот, применим, казалось бы, ко всем природным явлениям, и, кроме того, более доступен для восприятия, так как словесные аргументы легче понять, чем математические формулы. По этим причинам метод Аристотеля господствовал в европейской науке на протяжении 2000 лет.

Но математический метод Архимеда имел одно важное преимущество: там, где он был применим, сколь бы ни ограничена была область применения, теоретические предсказания убедительно подтверждались соответствующими экспериментальными данными. Иллюстрацией в этом отношении может служить простейший из законов Архимеда — закон равновесия рычажных весов с неравными плечами.

Рассмотрим два груза, подвешенные к невесомому стержню, который в свою очередь лежит на острие опоры. Согласно теории, грузы находятся в равновесии тогда и только тогда, когда они расположены по разные стороны от точки опоры и удалены от нее на расстояния, обратно пропорциональные их массам. Математически это условие записывается следующим образом: $d_2/d_1 = m_1/m_2$, или $m_1 d_1 = m_2 d_2$. Предположим, имея идеальные весы и набор грузов, мы хотим убедиться в справедливости теории. Мы можем начать с того, что выберем два груза и подберем расстояния d_1 и d_2 , при которых они уравниваются друг друга. Это позволит определить отношение масс грузов: $m_1/m_2 = d_2/d_1$. Разумеется, такой эксперимент нельзя считать *проверкой* теории — он только показывает, как определить отношение масс. Но далее меняя расстояния d_1 и d_2 , мы можем следить за тем, всегда ли их отношение остается постоянным при наличии равновесия. Из *логических рассуждений* это не вытекает. (Если проводить этот эксперимент с реальными весами, отношение d_2/d_1 будет меняться, поскольку стержень имеет вес.)



Неравноплечные весы.

Итак, первый эксперимент позволяет определить отношение масс m_1/m_2 , а последующие дают уже избыточную информацию: отношение масс должно удовлетворять более общим условиям, чем те, которые необходимы для его определения. Только общая согласованность всех этих независимых условий может служить подтверждением теории.

Избыточная определенность теории проявляется и в другом отношении. Предположим, мы выбрали третий груз и измерили указанным выше способом отношения m_3/m_1 и m_2/m_1 . Из чисто логических рассуждений отнюдь не следует, что три измеренных отношения должны удовлетворять равенству $m_3/m_2 = (m_3/m_1)/(m_2/m_1)$, даже если известно, что каждое из этих отношений зависит лишь от соответствующего отношения расстояний. Чтобы пояснить сказанное, предположим, что истинное условие равновесия описывается не соотношением $m_2/m_1 = d_1/d_2$, а более сложным выражением: $d_1/d_2 = m_2/m_1 (1 + 0,001 m_2/m_1)$. В этом случае при всех возможных положениях равновесия отношение d_1/d_2 будет, как и раньше, оставаться постоянным, однако равенство $m_3/m_2 = (m_3/m_1)/(m_2/m_1)$ уже выполняться не будет. Таким образом, закон равновесия рычажных весов является избыточно определенным в двух качественно различных отношениях.

Теория весов с неравными плечами иллюстрирует особенности, присущие всем современным физическим теориям и отличающие эти теории не только от теорий Аристотеля, но и от математических теорий, используемых в общественных науках. Теория Архимеда включает: 1) совокупность математических аксиом или законов, которые прямо или косвенно определяют понятия теории (такие, как масса и равновесие в теории весов); 2) совокупность хорошо определенных процедур, позволяющих проверять предсказания теории; 3) возможность стать избыточно определенной в пределах указанной области применимости.

Теория, которая может стать избыточно определенной в пределах указанной области применимости, очевидно, может быть *опровергнута* в той же области. Возможность опровержения — хорошо известный критерий, позволяющий отделить научные теории от ненаучных.

Метод Галилея

В Европе работы Архимеда, переведенные на латынь итальянским математиком Тарталья, получили широкую известность во второй половине XVI в. Как отмечает в своей книге «Этюды о Галилее» французский историк Александр Койр, Галилей стал последователем Архимеда: «Научным дебютом Галилея был трактат «Маленькие весы» (*La Bilancetta*), посвященный исследованию гидростатического равновесия. Свою первую должность профессора математики в университете города Пизы Галилей получил благодаря работе по определению центра тяжести тел. Эта работа как по замыслу, так и по исполнению полностью соответствует подходу Архимеда. И если Галилей смог выйти за рамки существовавшего в то время учения о «побудительных при-



Галилео Галилей (1564—1642). Портрет кисти Сустермана. (Архив Беттмана.)



Титульный лист первого издания книги Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки», вышедшей в 1638 г. (Коллекция Грейнджера.)

чинах» движения, то лишь благодаря тому, что осознанно и решительно стал последователем Архимеда, противопоставляя образ мышления Архимеда, как представителя древнегреческих атомистов системе взглядов Аристотеля».

Галилей первым отчетливо выделил два аспекта физики Архимеда: поиск простых и общих математических законов, эксперимент как основа для подтверждения этих законов. В трактате «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки» Галилей объясняет, как он пришел к постулату, гласящему, что свободно падающее тело должно двигаться с постоянным ускорением:

Наконец, к исследованию естественного ускоренного движения нас непосредственно привело внимательное наблюдение того, что обычно имеет место и совершается в природе, которая стремится применять во всяких своих приспособлениях самые простые и легкие средства: так, я полагаю, например, что никто не станет сомневаться в невозможности осуществить плавание или полет легче и проще, нежели теми способами и средствами, которыми пользуются благодаря своему природному инстинкту рыбы и птицы.

Поэтому, когда я замечаю, что камень, выведенный из состояния покоя и падающий со значительной высоты, приобретает все новое приращение скорости, не должен ли я думать, что подобное приращение происходит в самой простой и ясной для всякого форме. ([1], с. 239.)

Но простота в математическом отношении — это всего лишь руководящий принцип, судьей в последней инстанции является эксперимент:

Итак, примем пока изложенное как постулат, абсолютная правильность которого обнаружится впоследствии, когда мы ознакомимся с выводами из этой гипотезы, точно согласующимися с данными опыта. [Там же.]

Галилей прекрасно понимал, что цели философии Аристотеля и физики Архимеда по существу различны. Последователи Аристотеля стремились выяснить причины явлений, тогда как задачей Архимеда был поиск простых математических аксиом, следствия которых подтверждались бы экспериментом:



В своей книге «Ареопагитика, или речь в защиту свободной печати» (1644) Мильтон писал, что «разыскал и посетил знаменитого Галилея, престарелого пленника инквизиции». Марджори Николсон в книге «Мильтон и телескоп» утверждал, что наблюдения неба в телескоп «произвели на него (Мильтона) незабываемое впечатление; они нашли многократные отражения в его зрелых произведениях, побуждая к чтению и размышлениям. Эти впечатления легли в основу его поэмы «Потерянный рай» — первой космологической поэмы нашего времени, действие которой разворачивается на фоне межзвездного пространства». (Коллекция Грейнджера.)

Сальвиати. Мне думается, что сейчас неподходящее время для занятий вопросом о причинах ускорения в естественном движении, по поводу которого различными философами было высказано столько различных мнений... Все эти предположения и еще многие другие следовало бы рассмотреть, что, однако, принесло бы мало пользы. Сейчас для нашего автора будет достаточно, если мы рассмотрим, как он исследует и излагает свойства ускоренного движения (какова бы ни была причина ускорения)... Если окажется, что свойства, которые будут доказаны, справедливы и для движения естественно и ускоренно падающих тел, то мы можем сказать, что ... наше положение (т. е. закон свободного падения) ... справедливо. ([1], с. 239.)

Галилей подчеркивал еще одно важное различие между физикой и философией. Во вступительных параграфах второй части «Бесед» он противопоставляет суждениям о движении в «книгах, написанных философами», собственные математические результаты. И далее продолжает:

Справедливость этих положений, а равно и многих других, не менее достойных изучения, будет мною в дальнейшем доказана. Тем самым открывается путь к весьма обширной и важной науке, элементами которой будут эти наши труды. В ее глубокие тайны проникнут более проникательные умы тех, кто пойдет дальше. ([1], с. 233)

Галилей не проявляет здесь ложной скромности — он не страдал этим недостатком. Почти каждая страница его произведений доносит до читателя дух научного поиска — непрерывной, нескончаемой работы, в результате которой найденные ответы всегда порождают новые вопросы.

Механика Галилея

Механика Галилея дает идеализированное описание движения тел вблизи поверхности Земли, пренебрегая сопротивлением воздуха, кривизной земной поверхности и зависимостью ускорения свободного падения от высоты. Его теория покоится на четырех простых аксиомах, которые Галилей не сформулировал в явном виде, но которые скрыто присутствуют во всех обсуждениях. Первая аксиома, касающаяся специального случая движения, в наше время называется законом инерции, или первым законом Ньютона. Вторая аксиома — это закон свободного падения, установленный Галилеем. Третья аксиома характеризует движение тел, скользящих без трения по наклонной плоскости, а четвертая — движение снарядов. Рассмотрим эти аксиомы более подробно.

1. *Свободное движение по горизонтальной плоскости происходит с постоянной по величине и направлению скоростью.*

Согласно этому закону, тело, скользящее без трения по горизонтальной поверхности, никогда не будет ни замедляться, ни ускоряться, ни отклоняться в сторону. Это утверждение не является прямым обобщением экспериментальных наблюдений. Если бы это было так, то формулировка закона гласила бы: «Тело, свободно движущееся по горизонтальной поверхности, постепенно замедляется и в конце концов останавливается». Вместо этого в законе Галилея говорится о движении, которое никогда не наблюдалось и, вероятно, не может наблюдаться в действительности.

Как последователь Архимеда, Галилей полагал, что физические законы больше похожи на геометрические аксиомы (хотя идеальные треугольники и окружности тоже не существуют в природе), чем на эмпирические обобщения. Но он не просто пренебрегал осложнениями, вносимыми трением и сопротивлением воздуха, так как в противном случае ему не удалось бы сравнить свои теоретические выводы с экспериментальными данными, — он придумывал эксперименты, которые позволяли убедиться в *незначительности* этих эффектов. Например, он сбрасывал два ядра одинакового размера, но сделанные из разного материала «с высоты 150 или 200 локтей* ... Эксперимент показывает, что они достигают Земли с малой разницей в скорости, убеждая нас в том, что в обоих случаях замедление, обусловленное воздухом, мало».

Свой закон свободного движения Галилей получил не из реальных экспериментов, а из мысленного опыта. Представьте себе тело, скользящее без трения вниз по наклонной плоскости. Кажется очевидным, что скорость тела должна увеличиваться независимо от того, каков угол наклона плоскости. Аналогичным образом тело, движущееся по наклонной плоскости вверх, должно замедляться независимо от угла наклона плоскости. Но тогда из соображений симметрии следует, что скорость тела, скользящего по идеальной горизонтальной поверхности, не должна ни уменьшаться, ни увеличиваться.

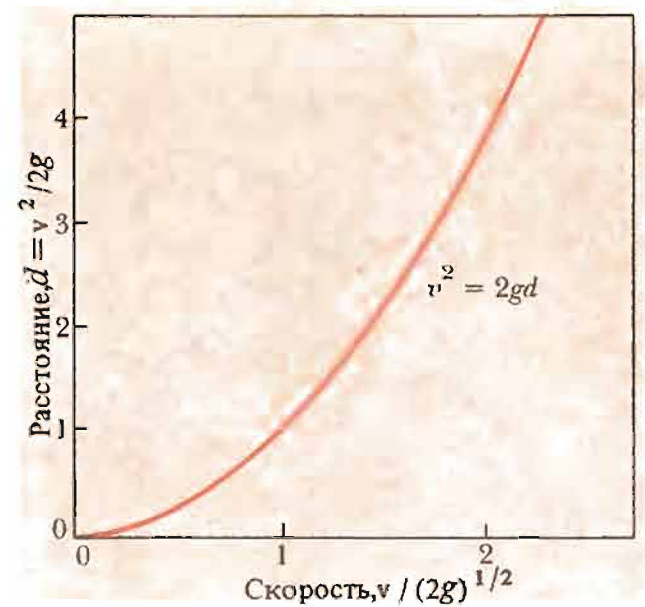
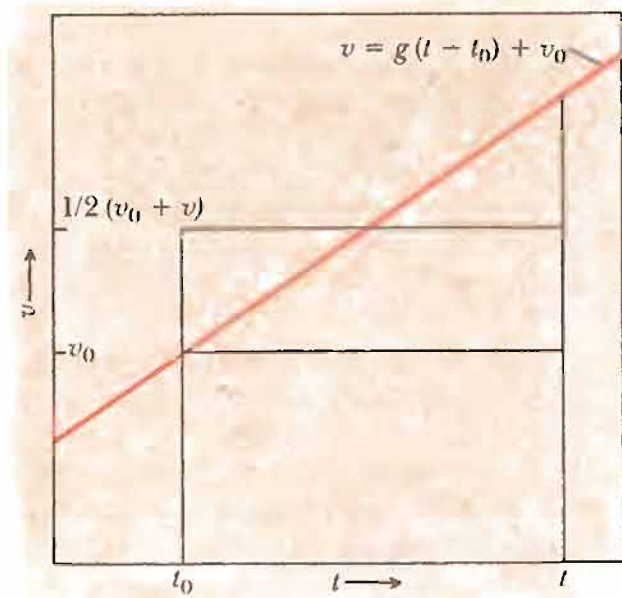
2. *Свободно падающее тело движется с постоянным ускорением.*

По определению равноускоренным называется движение, при котором скорость тела за равные промежутки времени увеличивается на одну и ту же величину. Алгебраическая запись этого условия выглядит следующим обра-

* Локоть — старинная мера длины, равная примерно 45 см. — Прим. перев.



Скольжение фигуристки иллюстрирует закон инерции Галилея (в горизонтальной плоскости). (Фотография предоставлена Г. Ашендорфом.)



Зависимость вертикальной скорости от времени при свободном падении (слева). Кривая зависимости (установленной Галилеем) между конечной скоростью v и пройденным расстоянием d при свободном падении тела из состояния покоя; g — ускорение свободного падения. (справа).

зом: $\Delta v = g\Delta t$, где Δv — приращение скорости, происходящее за интервал времени Δt , а g — постоянное ускорение. Тогда скорость v свободно падающего тела в момент t будет равна

$$v = g(t - t_0) + v_0, \tag{3.1}$$

где v_0 — скорость тела в произвольно выбранный момент t_0 .

На левом из приведенных здесь графиков изображена зависимость вертикальной скорости свободно падающего тела от времени. Чтобы определить, путь, который тело прошло за период времени от момента t_0 до момента t , Галилей рассуждал следующим образом. Рассмотрим тело, движущееся с постоянной скоростью $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$, равной среднему значению между начальной скоростью v_0 и конечной скоростью v . За время $t - t_0$ тело, движущееся со скоростью \bar{v} , пройдет тот же путь, что и свободно падающее тело (правый график). Этот путь равен

$$d = \frac{1}{2} (v_0 + v)(t - t_0),$$

или, подставляя вместо v ее выражение из (3.1), находим:

$$d = v_0(t - t_0) + \frac{1}{2} g(t - t_0)^2. \tag{3.2}$$

Если в начальный момент тело покоилось, т. е. $v_0 = 0$, то формула Галилея примет вид:

$$d = \frac{1}{2} g(t-t_0)^2. \quad (3.3)$$

Используя соотношение $v = g(t-t_0)$, из формулы (3.3) получим связь между конечной скоростью тела, падающего из состояния покоя, и расстоянием, которое оно пройдет к этому моменту:

$$v^2 = 2gd. \quad (3.4)$$

Эта зависимость представлена на правом графике.

Как пришел Галилей к закону свободного падения? Изучение его трудов позволяет предположить, что в процессе работы над законом он прошел три следующих этапа.

а. Галилей предположил, что первоначально покоящееся тело постепенно увеличивает свою скорость от начального значения $v = 0$. Сейчас это кажется очевидным, однако во времена Галилея полагали, что как только на тело начинает действовать сила тяжести, оно мгновенно приобретает некоторую скорость, причем тем большую, чем тяжелее тело, и эта скорость остается неизменной до самого конца падения. Галилей придумал мысленный эксперимент, который показывал, что тело, падающее из состояния покоя, сначала должно двигаться очень медленно, а затем постепенно по мере падения будет увеличивать свою скорость.

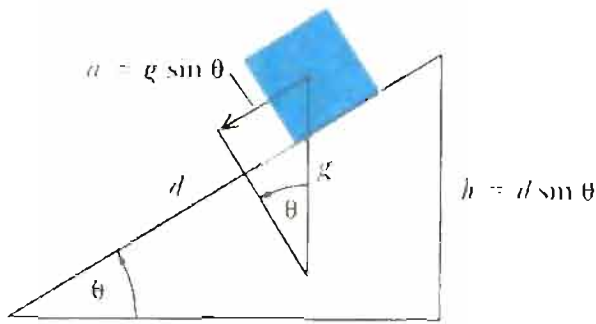
б. Выбор конкретного закона. Галилей полагал, что движение падающих тел должно описываться простым законом, поскольку простота — неотъемлемое свойство природы. На какое-то время он остановился на законе $\Delta v = C\Delta x$: равные приращения скорости за равные интервалы расстояния (вместо времени). Но Галилей отверг этот закон, когда понял, что если бы он был справедлив, то тело, первоначально покоящееся, осталось бы в покое навсегда.

в. Проверка закона $v = gt$. Как мы уже видели, согласно этому закону, расстояние, пройденное телом при свободном падении из состояния покоя, пропорционально квадрату времени, в течение которого происходило движение. Во времена Галилея проверить этот вывод было трудно. Точные часы еще не были изобретены, и временные интервалы Галилей обычно отсчитывал по собственному пульсу. Поэтому кратчайший промежуток времени, который он мог надеяться измерить с точностью, скажем, 10%, составлял не менее 10 с. Но за 10 с свободно падающее тело пролетает почти половину километра. Галилей обошел практические трудности, связанные с измерением больших расстояний и коротких временных интервалов, используя наклонную плоскость. Для интерпретации результатов измерений ему понадобился следующий постулат.

3. Тело, скользящее без трения по наклонной плоскости, движется с постоянным ускорением $g \sin \theta$, где g — ускорение свободного падения, а θ — угол наклона плоскости к горизонту.

Это утверждение иллюстрирует рисунок. Свободное падение можно рассматривать как частный случай движения по наклонной плоскости при $\theta = \pi/2$ (вертикальная плоскость), а закон инерции соответствует горизонтальной плоскости ($\theta = 0$). Используя в своих экспериментах наклонную плоскость с малыми углами наклона, Галилей смог проверить гипотезу постоянства ускорения при вертикальном падении.

Из закона Галилея вытекает, что конечная скорость тела, скользящего без трения по наклонной плоскости из состояния покоя, зависит лишь от высоты, с которой тело начало двигаться, но не зависит от угла наклона плоскости.



Чертеж, иллюстрирующий постулат Галилея об ускорении тела, скользящего по наклонной плоскости. В механике Ньютона этот постулат выводится из представления ускорения как вектора, который можно разложить на две составляющие: параллельную и перпендикулярную наклонной плоскости.

В самом деле, конечная скорость связана с пройденным расстоянием соотношением

$$v^2 = 2(g \sin \theta)d,$$

но $d = h/\sin \theta$, где h — высота, с которой тело начало двигаться (см. рисунок), так что $v^2 = 2gh$.

Галилей чрезвычайно гордился этой формулой, поскольку она позволяла определять скорость с помощью геометрии. Измерение скорости — малонадежная процедура до изобретения точных часов — свелось теперь к измерению расстояний: чтобы измерить скорость движущегося тела, нужно заставить его подниматься по наклонной плоскости и засечь высоту, на которую оно поднимется. Если же мы хотим сообщить телу скорость v , то нужно столкнуть тело с наклонной плоскости на высоте $v^2/2g$. Естественно, и в том и в другом случае предполагается, что трение отсутствует.

4. Принцип относительности Галилея и движение снарядов.

Рассмотрим вместе с Галилеем следующий мысленный эксперимент. Груз падает с верхушки корабельной мачты. В какую точку палубы он упадет? Некоторые из современников Галилея отвечали так: «Все зависит от того, движется корабль или покоится. Если корабль покоится, то груз упадет у основания мачты, а если корабль движется, то точка падения сместится назад, т. е. в сторону, противоположную движению корабля». Такой ответ полностью согласуется с опытом. Однако Галилей доказал, что траектория падающего тела отклоняется от вертикали лишь вследствие сопротивления воздуха. В вакууме тело упало бы точно под точкой, из которой начало падать, если только корабль движется с постоянной скоростью в неизменном направлении.

Эта гипотеза привела Галилея к выводу о том, что с точки зрения стоящего на берегу наблюдателя траекторией тела, падающего с мачты равномерно движущегося корабля, будет парабола. Доказать это не сложно. Движение тела в вертикальном направлении не зависит от движения по горизонтали. Следовательно, за t секунд тело пролетит по вертикали расстояние $d = \frac{1}{2}gt^2$, и его высота над палубой y будет равна

$$y = y_0 - \frac{1}{2}gt^2, \tag{3.5}$$

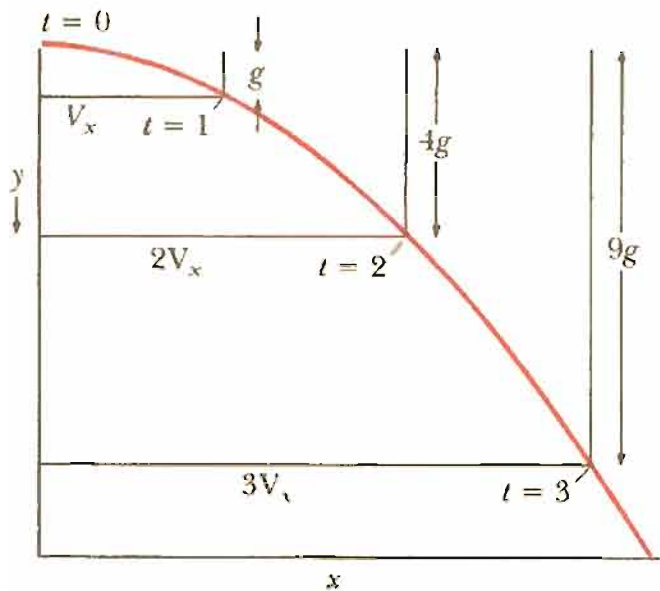
где y_0 — высота, на которой тело находилось в момент $t = 0$. Смещение тела в горизонтальном направлении будет таким же, как и у корабля, движение которого предполагается равномерным. Следовательно, горизонтальная координата тела x в тот же момент времени t будет

$$x = V_x \cdot t, \tag{3.6}$$

где V_x — скорость корабля, а расстояние x измеряется от точки, в которой тело находилось в начальный момент, т. е. при $t = 0$. Выражая t из (3.6) и подставляя в (3.5), получим

$$y = y_0 - \frac{1}{2}(g/V_x^2)x^2 \tag{3.7}$$

(эта зависимость представлена на приведенном далее графике).



Траектория свободно падающего тела, которое одновременно движется с постоянной скоростью вдоль земной поверхности.

В данной задаче роль корабля сводится к тому, что он сообщает падающему телу начальную скорость V_x . Снаряд, вылетающий из пушки, приобретает скорость в горизонтальном направлении другим путем, но если ее величина останется такой же, то и форма траектории снаряда не будет отличаться от рассмотренной ранее. Если в начальный момент вертикальная скорость тела равна V_y , то, согласно уравнению (3.2), высота тела в момент t равна

$$y = V_y t - \frac{1}{2} g t^2. \quad (3.8)$$

Горизонтальная координата, как и раньше, равна $x = V_x t$, и для неподвижного наблюдателя форма траектории снаряда описывается уравнением

$$y = y_0 + (V_y/V_x)x - \frac{1}{2}(g/V_x^2)x^2; \quad (3.9)$$

это и есть уравнение параболы. Уравнение описывает траекторию снаряда, вылетевшего из пушки на высоте y_0 с горизонтальной скоростью V_x и вертикальной скоростью V_y .

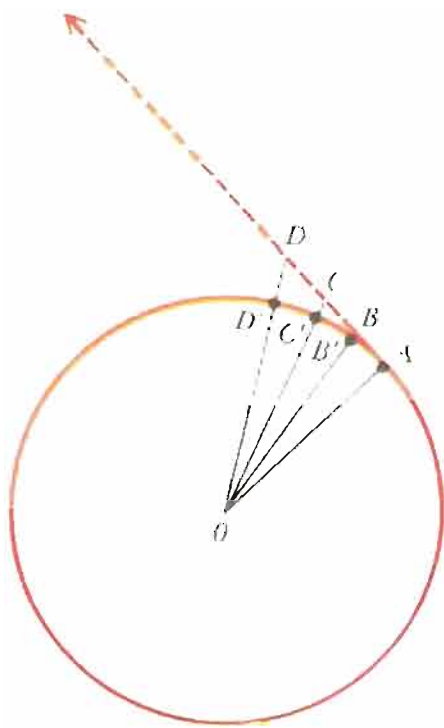
Вращение Земли и природа центробежных сил

В «Диалоге о двух главнейших системах мира: Птолемеевой и Коперниковой» Симпличио, выступающий с позиций физики Аристотеля, заявляет:

А я, постыне, как простак, дал убедить себя, будто камни не могут быть отброшены вращением Земли! Отрекаюсь от этого и заявляю, что если бы Земля двигалась, то камни, слоны, башни и города неизбежно полетели бы к небу, а раз это не так, я утверждаю, что Земля не движется. ([1] к гл. 2, с. 296.)

Ответ Галилея на это возражение четко выявляет пределы его понимания природы центробежных сил и их связи с гравитацией. Галилей знал, что если к одному концу веревки привязать тяжелый предмет и раскрутить веревку, держа ее за другой конец, то веревка будет испытывать натяжение. Он также знал, что когда веревка разорвется, тело начнет двигаться с постоянной скоростью по прямой, касательной к его первоначальной (круговой) траектории. Начиная с этих утверждений, Галилей далее рассуждает таким образом.

Пусть окружность $AB'C'D'$ (см. рисунок) изображает земной экватор, а точки A, B, C и D лежат на касательной к экватору. Вращение Земли проис-



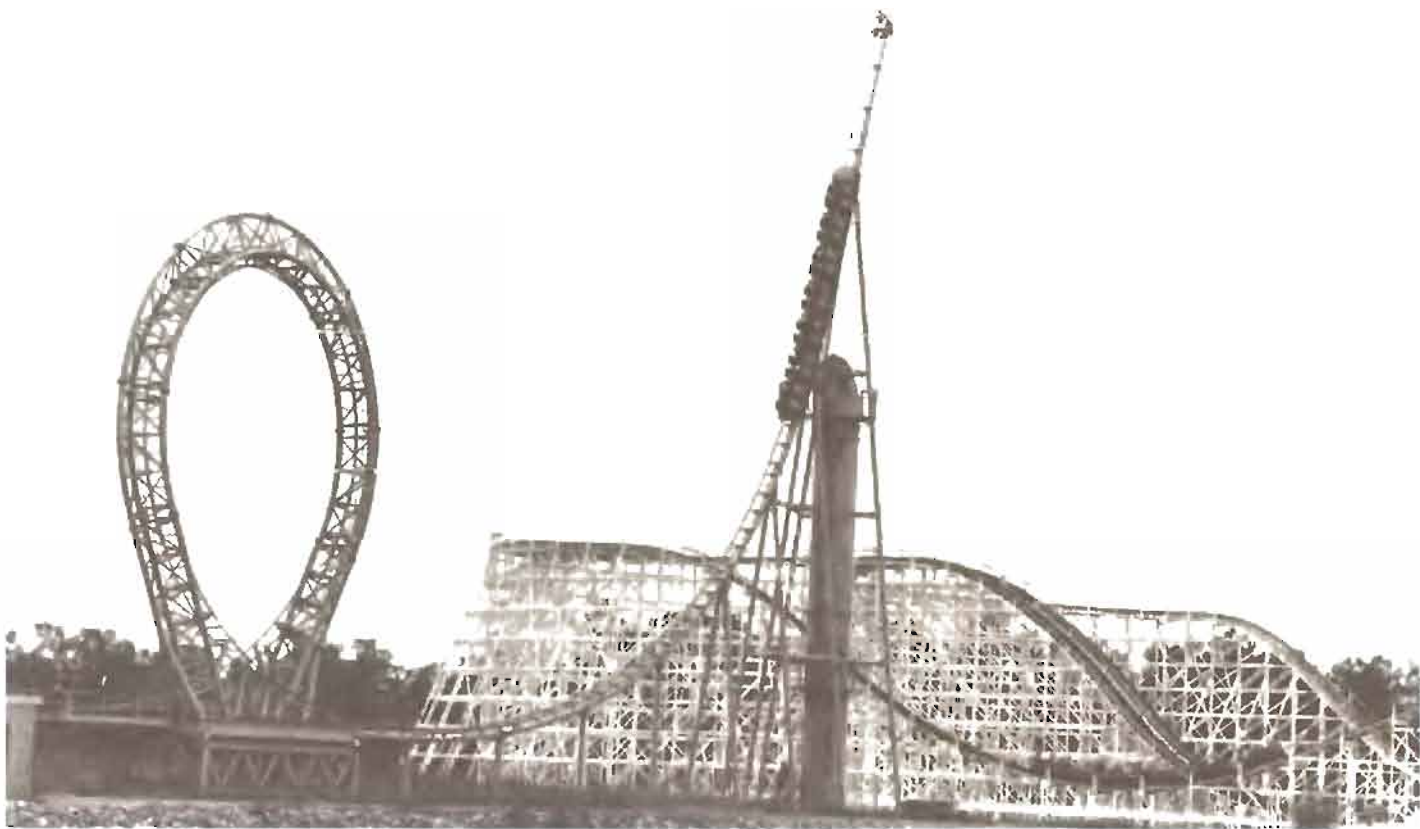
Траектория тела, вращающегося на веревке вокруг точки O . Точки A, B', C' и D' отмечают положения тела через равные интервалы времени. $ABCD$ — траектория, по которой двигалось бы тело, если бы веревка оборвалась в момент, когда оно находилось в точке A . Если $\angle AOD$ очень мал, то $AB' = AB = BC = CD$.



Голландский математик и физик Христиан Гюйгенс (1629—1695) вывел законы сохранения импульса и энергии, основываясь на принципах симметрии. Воспользовавшись другим принципом, который Эйнштейн впоследствии назвал принципом эквивалентности, он получил выражение для центробежной силы. Гюйгенсу также принадлежит изобретение маятниковых часов (Коллекция Грейнджера.)

ходит на этом рисунке против часовой стрелки вокруг оси, проходящей через точку O и перпендикулярной плоскости чертежа. Рассмотрим частицу, находящуюся на земном экваторе и вращающуюся вместе с Землей. Предположим, что в тот момент, когда частица находилась в точке A , сила тяжести внезапно исчезла. Тогда частица станет двигаться с постоянной скоростью вдоль касательной ABC . Если угол $\angle AOB$ достаточно мал, то расстояния AB и AB' примерно одинаковы, а отрезок BB' будет представлять собой расстояние, на которое частица, первоначально двигавшаяся по окружности, удалится от точки B' , перемещаясь теперь вдоль линии AB . При уменьшении отрезка AB будет уменьшаться не только отрезок BB' , но и отношение BB'/AB (можно показать, что величина отрезка BB' пропорциональна квадрату расстояния AB , так что $BB'/AB \sim AB$). До сих пор рассуждения Галилея верны, но далее он допускает ошибку, утверждая, что, поскольку отношение BB'/AB стремится к нулю при неограниченном уменьшении отрезка AB , это означает, что сколь угодно малая сила притяжения, направленная в точку O , не позволит частице улететь с поверхности Земли. Это не так, поскольку отношение BB'/AB не есть мера, которая позволяет должным образом сравнить относительный вклад в равновесие центробежных и гравитационных сил.

Впервые величину центробежных сил правильно определил Христиан Гюйгенс (1629—1695), сделав это через двадцать лет после смерти Галилея. Свои рассуждения Гюйгенс основывал на физическом принципе, который три века



Аттракцион «Американские горки» основан на двух понятиях, сущность которых прояснил Гюйгенс: центробежной силе, которая «прижимает» вагончик к рельсам при движении его внутри петли, и взаимном превращении кинетической и потенциальной энергий (Предоставлено Дж Джерстером)

спустя Эйнштейн назвал «принципом эквивалентности»: в достаточно малой области пространства ускорение силы тяжести можно представить (или исключить), соответствующим образом подбирая движение системы отсчета. Подвесим сравнительно тяжелое тело к концу веревки, а затем вообразим, что то же самое тело вращают (за другой конец веревки) в горизонтальной плоскости. При определенной скорости вращения натяжение веревки будет таким же, как и в случае, когда тело подвешено. Гюйгенс постулировал, что две эти ситуации *в динамическом отношении эквивалентны*, и привел в качестве обоснования следующий довод. В первом случае (груз неподвижно висит на веревке) веревка натягивается потому, что груз стремится падать с постоянным ускорением. Следовательно, во втором случае (груз вращается на веревке) натяжение веревки должно быть обусловлено аналогичной причиной. Иными словами, *вращающийся груз стремится улететь с постоянным ускорением от центра окружности, по которой движется*.

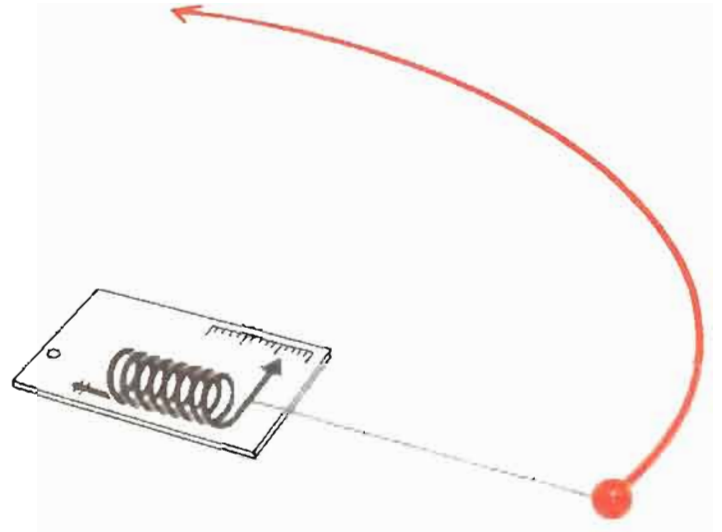
Закон свободного падения Галилея, выраженный уравнением (3.3), гласит, что расстояние, пройденное телом при свободном падении из первоначального состояния покоя, пропорционально квадрату времени, в течение которого оно двигалось. Из приведенных выше рассуждений следует, что расстояния $B'B$, $C'C$ и $D'D$ (см. рисунок на с. 83) соответственно равны расстояниям AB , AC и AD на приведенном здесь рисунке. Эти расстояния пропорциональны квадратам времени, затраченного на их преодоление. Но интервалы времени в свою очередь пропорциональны соответствующим длинам дуг AB' , AC' и AD' (рисунок на с. 83), так что

$$CC'/BB' = AC^2/AB^2.$$

Это равенство выполняется приближенно, если $\angle AOC$ мал.



Равноускоренное движение падающего тела; это траектория $ABCD$ (с рисунка на с 83) с точки зрения наблюдателя, находящегося во вращающейся системе отсчета



Эффективный вес вращающегося тела, измеренный с помощью пружинных весов

Основываясь на законе свободного падения Галилея и собственном принципе эквивалентности, Гюйгенс получил правильное (хотя и неполное) выражение для величины центробежной силы. Он использовал формулу Галилея $d = \frac{1}{2}gt^2$ для вычисления ускорения g тела, перемещающегося из точки A в точку D , выразив g через расстояние $d = BB'$ и затраченное время $t = AB'/v$:

$$g = 2d/t^2 = 2BB'/(AB'/v)^2, \tag{3.10}$$

где v — скорость тела, движущегося по круговой орбите. Учтем теперь, что как BB' , так и AB' пропорциональны радиусу окружности r , следовательно BB'/AB'^2 , обратно пропорционально r , а $r \cdot BB'/AB'$ от r не зависит. Поэтому соотношение (3.10) можно записать в виде

$$g = Cv^2/r, \quad C = 2r BB'/AB'^2, \tag{3.11}$$

где C — безразмерное число, величина которого не зависит от радиуса орбиты и в очень малой степени зависит от величины (малого) угла $\angle AOB$. Позднее мы увидим, что C стремится к единице, если $\angle AOB$ приближается к нулю.

Наконец, Гюйгенс указал, что, поскольку натяжение отвеса пропорционально массе подвешенного тела, натяжение веревки при вращении груза также должно быть пропорционально массе тела. Таким образом, центробежная сила, действующая на тело при его движении по окружности радиуса r со скоростью v , равна

$$F = mv^2/r, \tag{3.12}$$

где m — масса тела. Силу F можно назвать эффективным весом тела и измерять с помощью пружинных весов, как показано на рисунке вверху.

В приведенных выше рассуждениях Гюйгенс фактически использовал, специально не выделяя, некоторые основные положения, которые Ньютон сформулировал много лет спустя в своей механике, а именно: 1) пропорциональность веса тела F его массе m ; 2) соотношение между приложенной силой, массой и ускорением ($F = mg$); 3) равенство действия (веса тела) и противодействия (натяжения вращающейся веревки). История науки показывает, что использование того или иного принципа часто предшествует его формулировке в явном виде, поскольку новые концепции обычно проявляются в частных случаях намного раньше, чем происходит их обобщение.

Гюйгенс уже мог бы ответить на возражение Симпличио относительно

гипотезы о вращении Земли. На экваторе центробежная сила, связанная с вращением Земли, действует точно так же, как сила тяготения, но направлена в противоположную сторону. Она уменьшает вес тела на величину, вычислить которую можно по формуле (3.12), подставив вместо r радиус Земли, а вместо v — обусловленную вращением скорость точек земной поверхности на экваторе. Поскольку уменьшение веса пропорционально массе тела (измеряемой с помощью весов Архимеда), *относительное* уменьшение веса одинаково для всех тел. Оно равно отношению центробежного ускорения, вычисляемого по формуле (3.11) при $C = 1$, к ускорению свободного падения $g \simeq 980 \text{ см/с}^2$. Скорость вращения Земли на экваторе равна

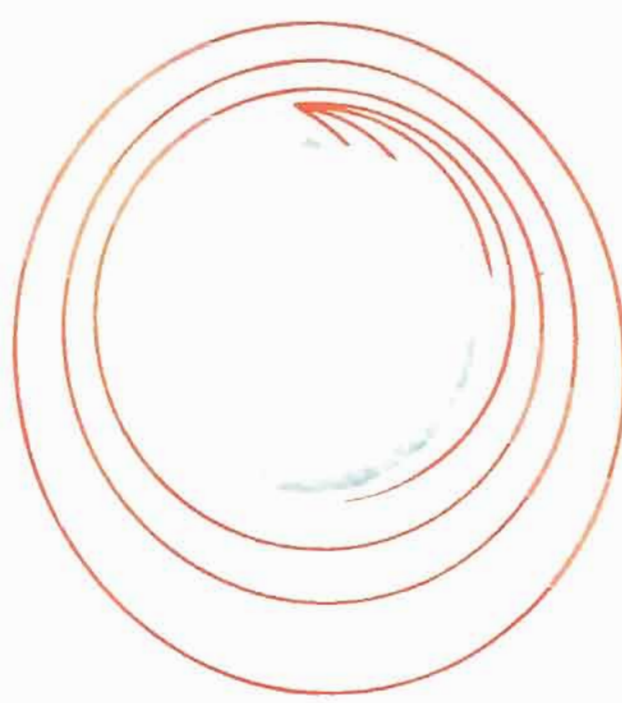
$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \cdot 6,38 \cdot 10^8 \text{ см}}{8,64 \cdot 10^4 \text{ с}} \simeq 4,64 \cdot 10^4 \text{ см/с.}$$

где r — радиус Земли, а T — продолжительность суток. Теперь можно вычислить центробежное ускорение $v^2/r = 3,37 \text{ см/с}^2$, так что $g/(v^2/r) = 290 \simeq \simeq 17^2$. Это значит, что Земля должна вращаться примерно в 17 раз быстрее, чем сейчас (с периодом $24/17$ ч), чтобы центробежное ускорение на экваторе сравнялось с ускорением свободного падения. Если же Земля будет вращаться еще быстрее, то «камни, слоны, башни и города», на самом деле «улетят к небесам».

Закон обратных квадратов

В 1663 г. Исаак Ньютон понял, что, подобно тому как вращающийся камень удерживается на круговой орбите силой, направленной к центру окружности, Луна удерживается на своей почти круговой орбите силой, направленной к центру Земли, а планеты остаются на своих почти круговых орбитах в результате действия силы, направленной к Солнцу. Тем самым Ньютон сделал шаг на пути к созданию своей теории тяготения. Сам по себе этот шаг нельзя назвать ни самым оригинальным, ни самым сложным из тех, что Ньютону пришлось предпринять в процессе работы над своей теорией — впрочем, это суждение было не столь очевидно, как может показаться ныне. Кеплер, которому не был известен закон инерции, считал, что планеты «предоставленные самим себе», начнут тормозиться и остановятся. Он выдвинул гипотезу, согласно которой планеты «подгоняются» в своем движении по орбитам некой поперечной силой, передаваемой от вращающегося Солнца к каждой планете невидимым «бичом». Галилей впадал в другую крайность, полагая, что для движения планет по круговым орбитам вообще не нужно никакой силы. Гюйгенс понимал, что если бы на планеты и их спутники не действовала никакая сила, то они улетели бы по прямой линии; однако он отказался признать наличие силы без материального переносчика, т. е. *дальнодействие*. Самого Ньютона идея действия на расстоянии также не очень привлекала, но он благоразумно решил найти ее математическое выражение, а не сетовать по поводу ее метафизических недостатков.

Ньютон предположил, что сила, с которой Земля действует на Луну, по природе та же самая, которая вызывает ускорение падающих тел и снарядов. Еще Галилей экспериментальным путем доказал, что все тела — независимо от их массы, состава, формы и размера — приобретают вблизи поверхности Земли одинаковое ускорение. Ньютон предположил, что это справедливо и для Луны. В этом случае гравитационное ускорение g_m на расстоянии, равном расстоянию от Земли до Луны r_m , зависит лишь от величины r_m и может быть



Исаак Ньютон (1642—1727) в возрасте 46 лет; портрет работы Кнеллера. (Коллекция Грейнджера.)

«То, что посредством центростремительных сил планеты могут удерживаться на определенных орбитах, легко понять, если рассмотреть движение бросаемых тел . ибо лишь собственный вес заставляет брошенный камень отклоняться от прямолинейного пути, по которому он двигался бы под действием первоначального толчка, предоставленный самому себе, и вынуждает описывать в воздухе кривую линию. Двигаясь вдоль этого искривленного пути, камень в конечном итоге достигает земной поверхности, и чем больше скорость, с которой его толкнули, тем дальше он улетит, прежде чем упасть на Землю. Следовательно, мы можем вообразить, что скорость станет настолько большой, что камень, описав дугу, пролетит 1, 2, 5, 10, 100, 1000 миль, не успев достигнуть Земли, и, наконец, превысив предельные размеры Земли, окажется вынужденным улететь в пространство, так и не коснувшись ее» (И Ньютон, «Математические начала натуральной философии».)

вычислено по формуле Гюйгенса (при $C = 1$):

$$g_M = v_M^2 / r_M = 4\pi^2 r_M / T_M^2, \tag{3.13}$$

где T_M — орбитальный период Луны.

Сравним это ускорение с гравитационным ускорением g_E вблизи поверхности Земли. Из предыдущего раздела мы знаем, что искусственный спутник, орбита которого касается земной поверхности, будет иметь период обращения, равный 24/17 ч. По аналогии с уравнением (3.13) можно написать

$$g_E = 4\pi^2 r_E / T_E^2, \tag{3.14}$$

где r_E — радиус Земли, а $T_E = 1/17$ сут. Почленно разделив (3.14) на (3.13), получим

$$g_E / g_M = (r_E / r_M) (T_M / T_E)^2. \tag{3.15}$$

Расстояние до Луны примерно в 60 раз больше земного радиуса, а орбитальный период Луны равен 27,3 сут. Подставляя эти числа, получим

$$g_E / g_M = (1/60) \cdot (17 \cdot 27,3)^2 \approx 3590 \approx (r_M / r_E)^2. \tag{3.16}$$

Эти расчеты показывают, что ускорение силы тяжести на расстоянии 60 зем-

ных радиусов примерно в 60^2 раз меньше, чем на поверхности Земли. Это дает основание предположить, что $g \sim 1/r^2$.

Точно таким же образом можно сравнить гравитационные ускорения планет в направлении Солнца. В формуле (3.15) под индексами E и M с равным успехом можно подразумевать обозначения двух планет — Земли и Марса, например. Третий закон Кеплера гласит, что $(T_M/T_E)^2 = (r_M/r_E)^3$. Используя это соотношение наряду с формулой (3.15), получим

$$g_E/g_M = (r_M/r_E)^2. \quad (3.17)$$

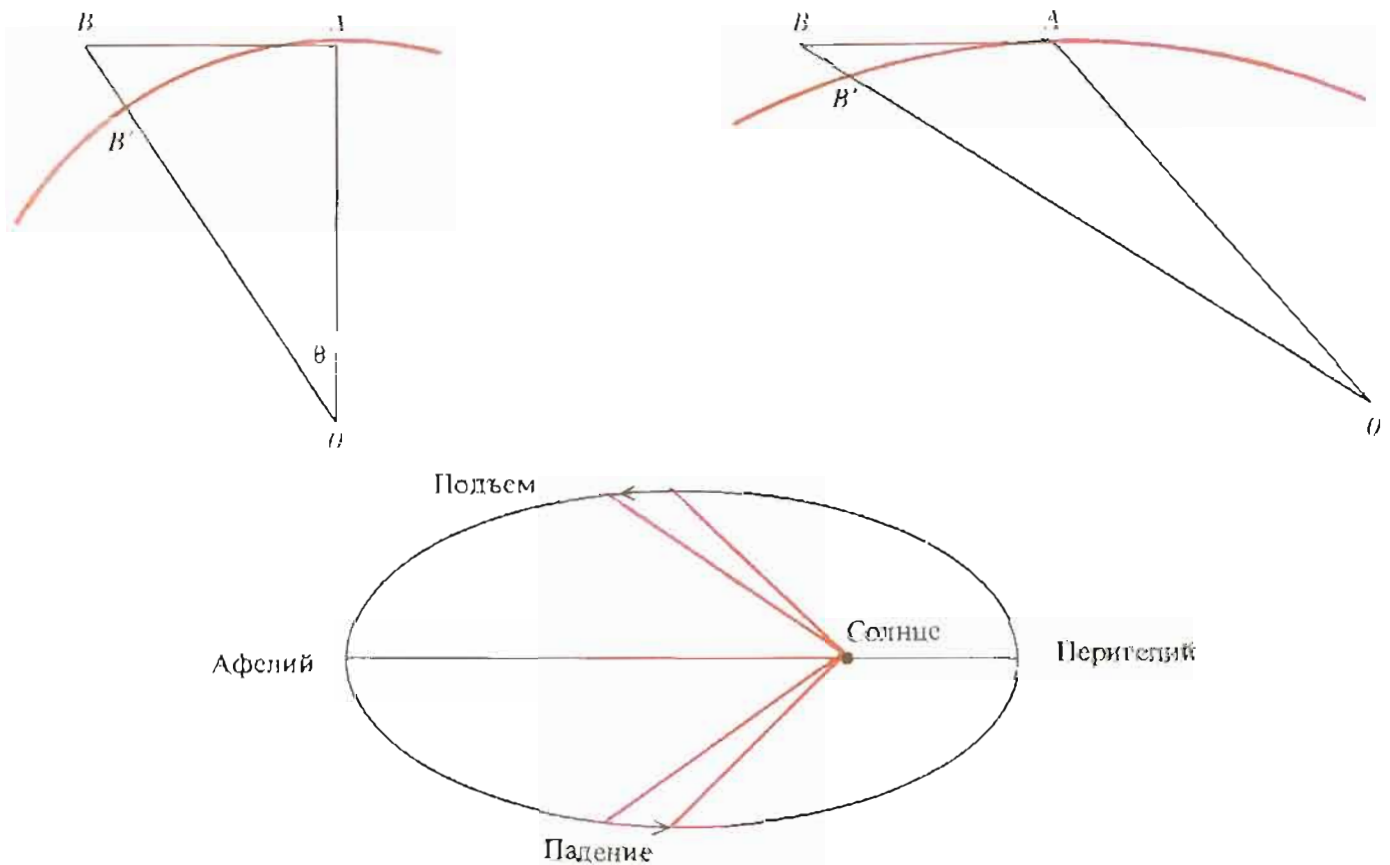
Поскольку индексы E и M можно приписать любой паре планет, из (3.17) вытекает, что гравитационное ускорение планет в направлении Солнца обратно пропорционально квадратам их расстояния от Солнца.

Луна как падающее тело

Постулировав, что каждая планета, притягивается к Солнцу силой, величина которой изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, Ньютон должен был теперь убедиться, что планеты под действием этой силы будут двигаться по эллиптическим орбитам, т. е. в соответствии с законами Кеплера. Для решения этой задачи Ньютон придумал новый подход к описанию ускоренного движения и новый математический язык для его выражения.

На левом верхнем рисунке в увеличенном виде изображен элемент рисунка (см. с. 83), иллюстрирующего теорию центробежных сил Гюйгенса. Как мы уже говорили, Гюйгенс утверждал, что если веревка, удерживающая вращающийся груз, порвется в момент, когда груз находится в точке A , то далее груз полетит по касательной AB . Гюйгенс *предполагал*, что движение этого тела по касательной будет казаться наблюдателю, находящемуся во вращающейся системе отсчета, равномерно ускоренным. Ньютон сформулировал это допущение иначе: он утверждал, что вращающийся на веревке груз (или планета, движущаяся с постоянной скоростью по круговой орбите) непрерывно отклоняется от прямолинейной траектории, по которой бы он двигался в отсутствие силы, тянущей его к центру окружности. Хотя груз непрерывно падает в направлении точки O , он никогда к ней не приближается, поскольку направление падения все время изменяется. Итак, груз должен непрерывно падать, чтобы оставаться на том же расстоянии от центра своей орбиты.

Этот подход может показаться излишне сложным для описания равномерного движения по окружности, однако он обладает важным преимуществом перед чисто интуитивным подходом Гюйгенса, поскольку пригоден также для описания неравномерного, некругового движения. На правом верхнем рисунке изображен малый участок некруговой орбиты AB . В точке A к орбите проведена касательная AB , причем точки B и B' выбраны так, что отрезок BB' направлен к удаленному центру притяжения O . Поскольку в общем случае касательная AB не перпендикулярна радиусу OA , движение не является чисто «горизонтальным» (т. е. направленным под прямым углом к линии действия силы). Малый отрезок BB' теперь уже не соответствует полному смещению «по вертикали» — он лишь отчасти отражает смещение в вертикальном направлении под действием силы, направленной к точке O . Криволинейный отрезок AB' полностью аналогичен малому участку параболической траектории снаряда, движущегося вблизи земной поверхности. Из нижнего рисунка видно, что при своем движении вокруг Солнца по некруговой орбите планета то «улетает» от Солнца (т. е. удаляется от него), двигаясь от перигелия к афелию, то «падает» на него, смещаясь от афелия к перигелию. Вертикальная составляющая движения планеты испытывает ускорение в на-

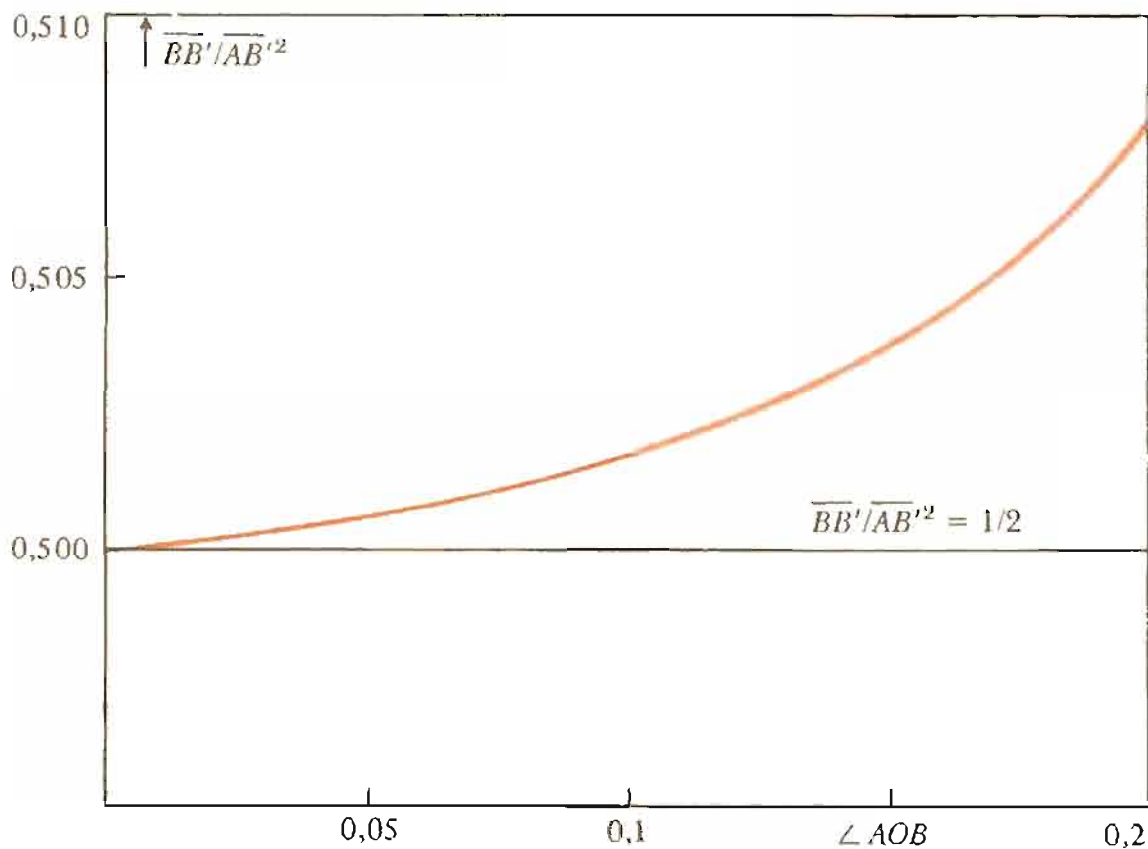


правлении к Солнцу, причем величина ускорения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

Чтобы выразить эту идею количественно, Ньютон создал новый раздел математики, который назвал «методом начальных и конечных отношений» (сейчас он называется не столь наглядно и поэтично — дифференциальным исчислением). Для иллюстрации этого метода вычислим ускорение тела при равномерном движении по окружности. Гюйгенс *предположил*, что вертикальное смещение BB' (левый верхний рисунок) пропорционально квадрату времени движения и, следовательно, квадрату расстояния AB . Тем самым Гюйгенс допускал, что отношение $BB'/(AB')^2$ не зависит от $\angle AOB$, если угол очень мал. Ньютон же *доказал*, что отношение $BB'/(AB')^2$ близко к $1/2$, если угол мал, и все более приближается к этой величине, когда угол стремится к нулю. Ньютон выразил эту связь между рассматриваемым отношением и его «предельным» значением, сказав, что отношение *сходится* к $1/2$. Эта сходимость указанного отношения к своему предельному значению показана на графике.

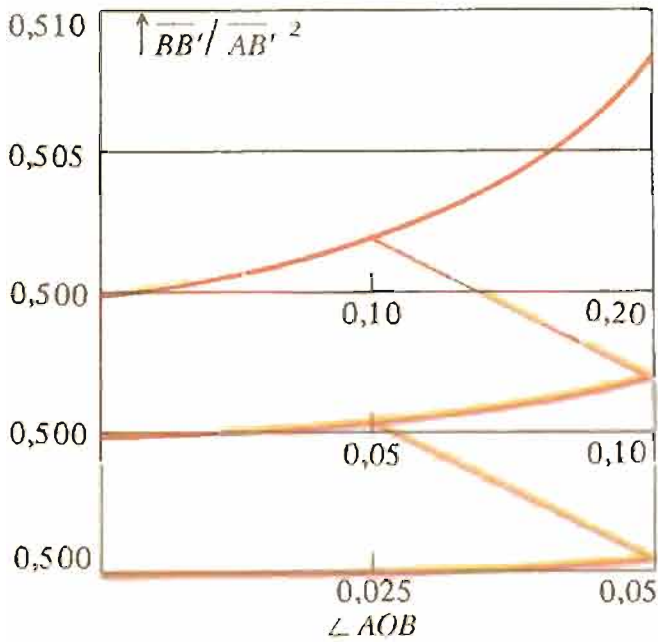
Ньютон с успехом использовал метод начальных и конечных отношений для доказательства многих фундаментальных и изящных теорем. Тем не менее некоторые из современников Ньютона в принципе отвергали этот метод. Они утверждали, что «конечное отношение» двух «исчезающих» величин (т. е. величин, стремящихся к нулю) или «начальное отношение» двух «рождающихся» величин (т. е. величин, возрастающих от нуля) представляет собой отношение типа $0/0$ и, следовательно, лишено всякого смысла. Возражая им, Ньютон в своем знаменитом труде «Математические начала натуральной философии» отмечал, что эти возражения основаны на ложных предпосылках:

Предельные отношения исчезающих количеств не суть отношения пределов этих количеств, а суть те пределы, к которым при бесконечном убывании количеств приближаются отношения их и к которым эти отношения могут подойти ближе, нежели на любую наперед заданную разность, но которых превзойти или достигнуть на самом деле не могут, ранее чем эти количества уменьшатся бесконечно. ([2], с 70.)



Эти разъяснения не удовлетворяли критиков Ньютона. Епископ Джордж Беркли, который родился как раз в тот год, когда была опубликована работа Ньютона, утверждал впоследствии, что метод Ньютона невозможно постигнуть: «Лишь тот, кто способен представить себе начало начал или конец конца... в состоянии постигнуть эти рассуждения. Однако я уверен, что большинство людей сочтет невозможным когда-нибудь понять их смысл». Далее Беркли замечал, что всякого, кто столь доверчив, что готов признать математику Ньютона, не должно «смущать любое утверждение в священном писании».

Введенное Ньютоном понятие о «предельном отношении» основано на интуитивном представлении о движении, так же как евклидовы понятия «точки» (объект, не имеющий размера) и «линии» (длина без ширины) основаны на интуитивном восприятии пространства. Определения, основанные на интуиции, достигают своей цели, если они вызывают соответствующий мысленный образ. Определения Евклида и Ньютона удовлетворяют этому умеренному требованию, а требовать от них большего — неразумно. Если мы хотим выяснить, что же «в действительности» представляет собой точка, линия или предельное значение, нам следует узнать, как эти понятия *используются*. Введенные Ньютоном представления о начальном отношении двух зарождающихся величин и об окончательном отношении двух исчезающих величин плохо поддаются анализу. Однако на практике построение таких отношений вполне понятно и однозначно — по крайней мере, в определенных случаях. График зависимости отношения $\overline{BB'}/(\overline{AB'})^2$ от угла представляет собой плавную кривую. Если вдвое уменьшить угол, одновременно вдвое увеличив масштаб вдоль горизонтальной оси, то ход кривой по-прежнему останется плавным. Если угол уменьшать и далее, соответственно увеличивая масштаб, то кривая практически сольется с прямой линией, определяемой условием $\overline{BB'}/(\overline{AB'})^2 = 1/2$. Именно это свойство, проявляющееся при малых значениях $\angle AOB$, и позволяет нам приписать определенную величину предельному отношению.



Отношение $BB'/(AB')^2$ сходится к величине $1/2$ при стремлении $\angle AOB$ к нулю. Иными словами, кривая зависимости этого отношения от $\angle AOB$ неотличима от горизонтальной линии $BB'/(AB')^2 = 1/2$ в достаточно малой окрестности точки $\angle AOB = 0$. Это свойство и служит определением «предельного отношения» двух «исчезающих величин».

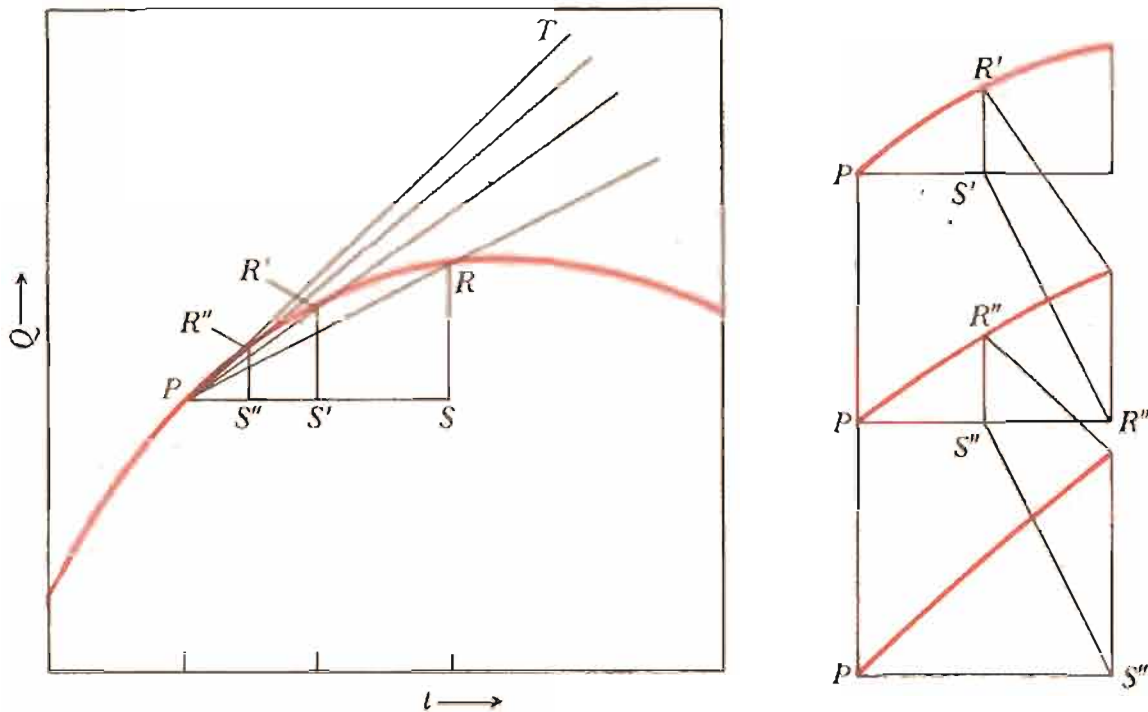
Флюксии

Среди предельных отношений, фигурирующих в теории Ньютона, особо важную роль играют те, которые характеризуют скорость изменения каких-либо величин (т. е. изменения в зависимости от времени). Ньютон назвал их *флюксиями*. В наши дни предельные отношения называются *производными*, а ньютоновские флюксии есть не что иное, как производные по времени.

Пусть Q — некоторая величина, плавно меняющаяся со временем. Обозначим через ΔQ изменение величины Q за интервал времени Δt в окрестности некоторого t . Отношение $\Delta Q/\Delta t$ характеризует среднюю скорость изменения величины Q за этот промежуток времени. Поскольку мы предположили, что величина Q плавно меняется со временем, это отношение будет стремиться к определенному пределу при приближении Δt к нулю. Ньютон обозначил этот предел, т. е. скорость изменения величины Q в момент времени t , символом \dot{Q} , который используется до сих пор. (Другое обозначение для этого предела предложил Лейбниц: dQ/dt . Мы можем интерпретировать dQ и dt как ΔQ и Δt , но настолько малые, что их отношение не отличается сколько-нибудь заметным образом от предельного значения.)

Если через Q обозначить расстояние, пройденное частицей от исходной точки, то величина $\Delta Q/\Delta t$ — это средняя скорость, которую имела частица в интервале времени Δt , а \dot{Q} — ее мгновенная скорость. Если движение частицы происходит достаточно плавно, то ее мгновенная скорость \dot{Q} также плавно изменяется со временем. В таком случае величина $\Delta \dot{Q}$ показывает изменение скорости \dot{Q} за время Δt , а отношение $\Delta \dot{Q}/\Delta t$ характеризует среднюю скорость изменения мгновенной скорости за тот же период. Наконец, \ddot{Q} (или $d\dot{Q}/dt$, или d^2Q/dt^2 — все приведенные обозначения эквивалентны) — это мгновенная скорость изменения мгновенной скорости изменения величины Q , Ньютон называл такого рода величины флюксиями от флюксий, а ныне они называются вторыми производными.

Дж. Беркли считал флюксии от флюксий особенно нелепым изобретением, подобным призраку призрака. Тем не менее вторые (и более высокие) производные достаточно просто получить. Начнем с того, что построим график зависимости Q от t . В произвольной точке этой кривой мы можем выполнить построения, изображенные на рисунке, из которых видно, что величина \dot{Q} в



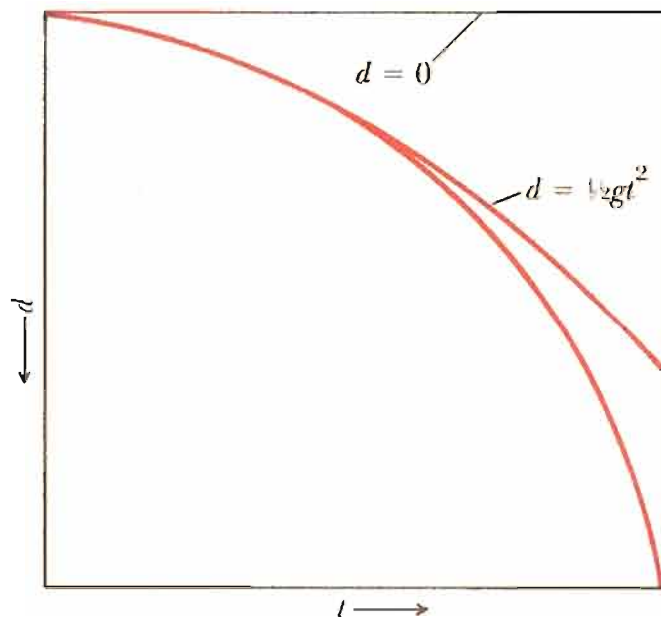
Построение производной \dot{Q} в точке P кривой $Q(t)$. Выберем поблизости другую точку кривой. В первом приближении \dot{Q} представляет собой наклон хорды PR , т. е. отношение PR/PS . Уменьшим вдвое временной интервал PS , чтобы найти точку S' и провести хорду PR' . Ее наклон $P'S'/P'S'$ выражает второе приближение к \dot{Q} . Продолжим этот процесс. (Для наглядности мы удваивали масштаб соответствующей части диаграммы с каждым новым шагом, что отражено в правой части рисунка.) В пределе хорда PR превращается в касательную PT , наклон которой ST/PS равен величине \dot{Q} в точке P .

данный момент времени определяет наклон кривой, описывающей изменение Q в точке, соответствующей моменту времени t .

Поскольку в принципе мы можем определить значение Q в каждый момент времени, далее можно построить новую кривую, отражающую изменение \dot{Q} со временем t . Повторяя описанную выше процедуру, мы вычислим скорость изменения величины Q в любой момент времени t . Аналогично величина \dot{Q} будет характеризовать наклон кривой, описывающей изменение Q со временем в рассматриваемой точке.

Точно также третью производную по времени \ddot{Q} можно определить как наклон кривой, отражающей изменение \dot{Q} . И этой процедуре нет конца. Любой сколь угодно малый сегмент кривой $Q(t)$, т. е. зависимости Q от t , содержит всю информацию, необходимую для определения всех производных величин Q в любой точке этого сегмента. Каждая производная дает нам соответствующую информацию о поведении кривой. Первая производная (наклон кривой) характеризует скорость изменения рассматриваемой величины в данный момент. Вторая производная указывает, с какой скоростью происходит изменение скорости. Третья производная в свою очередь говорит нам, как быстро изменяется сама скорость изменения скорости и т. д. Чем больше производных известно нам в данный момент, тем точнее можно предсказать значение Q в будущем и определить, какими они были в прошлом. Если мы знаем в данный момент все производные, то можем воспроизвести кривую полностью.

Рассмотрим следующий пример. Пусть первоначально покоящаяся частица падает по прямой к центру Земли, которую для простоты будем считать точкой с массой, равной массе Земли. На рисунке мы будем откладывать расстояние d , которое пролетит частица к моменту времени t . Вначале, т. е. при



Падение частицы из состояния покоя в направлении неподвижной точечной массы. Линия $d=0$ и кривая $d=\frac{1}{2}gt^2$ отражают последовательные приближения к кривой $d(t)$.

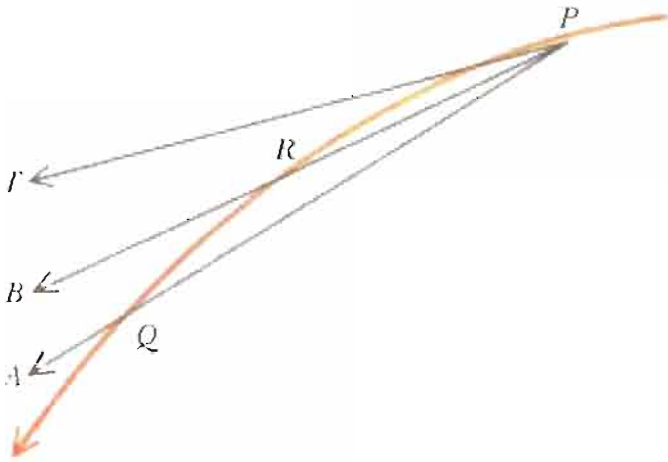
$t=0$, частица покоится и наклон кривой $d(t)$ равен нулю: $\dot{d}=0$. Если попытаться экстраполировать движение частицы на основании только этих данных, то зависимость $d(t)$ изобразится горизонтальной прямой линией $d=0$, касательной к кривой в точке $t=0$ и отражающей непрерывное состояние покоя. Но поскольку частица испытывает направленное к центру Земли ускорение, ее скорость непрерывно возрастает с некоей конечной скоростью, соответствующей ускорению силы тяжести в точке, где частица находилась в начальный момент. Используя начальную скорость изменения скорости, мы получим зависимость пройденного пути от времени в виде формулы Галилея $d=\frac{1}{2}gt^2$.

Это позволяет более точно описать движение частицы, однако мы не учли, что само ускорение не остается неизменным: оно возрастает по мере приближения частицы к центру Земли. Информацию об изменении ускорения содержит в себе производная от ускорения \ddot{d} при $t=0$.

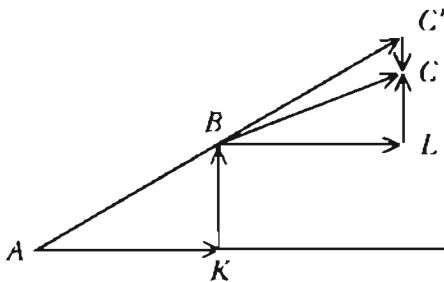
Учтя и эту информацию, мы сможем повысить точность нашей экстраполяции. Влияние четвертой, пятой и т. д. производных заметным образом начинает сказываться во все более поздние моменты времени. И чем глубже мы хотим исследовать поведение кривой $d(t)$, тем больше производных нам следует взять в момент $t=0$.

Скорость, ускорение и сила

Теория движения Ньютона и математический язык, который он создал для ее выражения, основана на законе инерции. Галилей, как мы уже говорили, сформулировал закон инерции для горизонтального движения по поверхности Земли: если бы Земля была идеально гладкой сферой, то тело, скользящее без трения по ее поверхности, перемещалось бы с постоянной скоростью вдоль дуги большого круга и в конечном итоге вернулось бы в исходную точку, причем для поддержания этого движения к телу не нужно прикладывать никакой силы. Ньютон осознал, что этот «закон горизонтальной инерции» не столь прост, как казалось Галилею. Тело, скользящее без трения по гладкой поверхности сферической Земли, на самом деле не движется свободно. На него действуют две противоположно направленные силы: сила земного притяжения, направленная к центру Земли, и реакция опоры, обусловленная давлением тела на земную поверхность. Скорость тела в горизонтальном направлении не меняется, поскольку на тело не действует никакая горизонталь-



Вектор \vec{PA} выражает среднюю скорость частицы в интервале времени, за который частица проходит путь PQ ; \vec{PB} — средняя скорость за более короткий промежуток времени, соответствующий смещению \vec{PT} . Вектор \vec{PT} , касательный к траектории в точке P , — мгновенная скорость

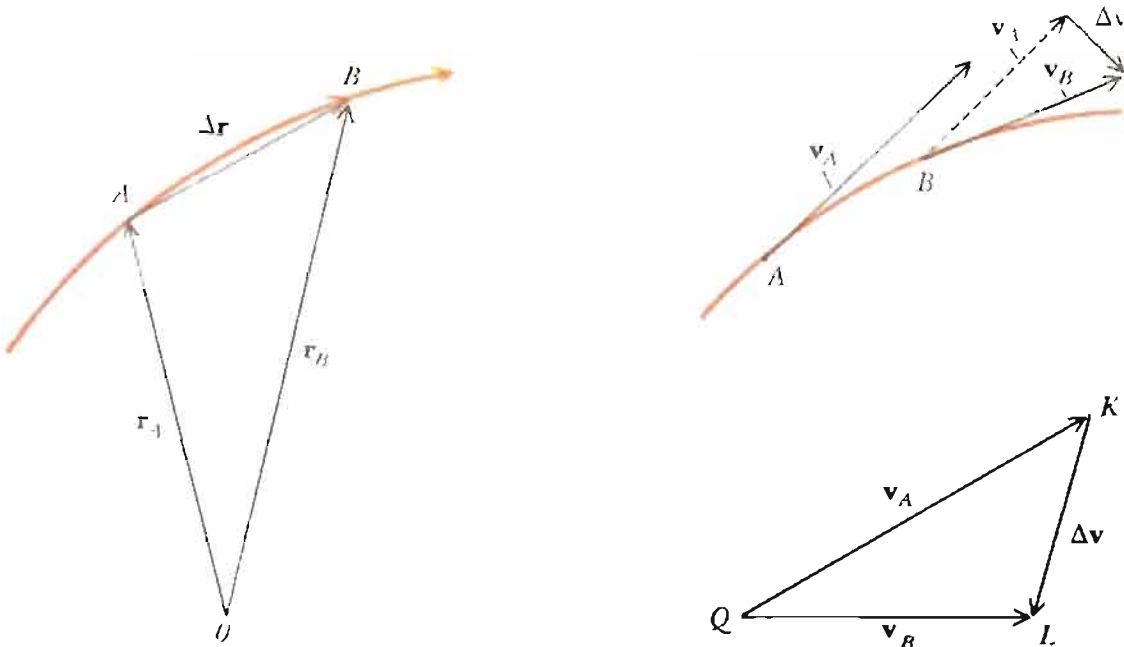


Смещения снаряда за два последовательных коротких интервала времени.

но направленная сила. Однако если бы на тело не действовало никаких сил вообще, то оно после того, как ему сообщили начальную скорость, продолжало бы двигаться в соответствующем направлении равномерно и прямолинейно.

Данная фраза представляет собой формулировку *первого закона Ньютона*. Его можно выразить и более кратко: *скорость свободной частицы не меняется со временем*. Скорость частицы — это вектор, который характеризуется как величиной, так и направлением. Вектор можно изобразить в виде стрелки, длина которой соответствует мгновенной скорости частицы, а направление параллельно направлению мгновенной скорости частицы в интересующий нас момент времени. (Более подробно о векторах рассказано в приложении). Как видно из рисунка, вектор мгновенной скорости частицы всегда направлен по касательной к ее траектории, и если траектория криволинейна, то направление движения непрерывно изменяется. Из первого закона Ньютона следует, что свободная частица не может двигаться по криволинейной траектории — криволинейное движение возможно лишь под действием силы.

Каким образом сила изменяет скорость частицы? Теория движения снарядов, разработанная Галилеем, дает ответ на этот вопрос. Галилей утверждал, что движение тела в вертикальном направлении не зависит от движения в горизонтальном направлении. Вертикальное движение снаряда — равноускоренное, а перемещение вдоль поверхности Земли происходит равномерно. На приведенном здесь рисунке изображено смещение снаряда за два коротких, равных интервала времени. За первый временной интервал снаряд перемещается из точки A в точку B : его смещение по горизонтали характеризуется вектором \vec{AK} , а по вертикали — вектором \vec{KB} . За оставшееся время снаряд переместится из точки B в точку C . При этом в горизонтальном направлении он сместится на величину отрезка \vec{BL} , равного отрезку \vec{AK} , тогда как смещение в вертикальном направлении \vec{LC} будет меньше, чем смещение \vec{KB} , вследствие равнозамедленного характера движения. В отсутствие гравитации смещение снаряда за второй интервал времени выражалось бы отрезком \vec{BC} , равным по величине и по направлению смещению \vec{AB} . Смещение $\vec{CC'}$ обусловлено наличием вертикального ускорения.



Ньютон понял, что не только смещение, но и скорость, ускорение и сила представляют собой векторные величины, а законы движения должны описываться как соотношения между векторами. Первый из трех представленных здесь рисунков позволяет увидеть, что смещение \vec{AB} частицы за время Δt равно изменению радиуса-вектора, соединяющего частицу с произвольной точкой отсчета O : $\vec{OA} + \vec{AB} = \vec{OB}$ или $\vec{OB} - \vec{OA} = \vec{AB} = \Delta \vec{r}$, где $\Delta \vec{r}$ — это изменение радиуса-вектора \vec{r} за время Δt . Средняя скорость частицы за этот интервал времени равна $\vec{AB}/\Delta t = \Delta \vec{r}/\Delta t$. Величина вектора $\Delta \vec{r}$ равна $|\vec{AB}|/\Delta t$. Когда Δt приближается к нулю, средняя скорость стремится к мгновенной скорости, а ее направление (совпадающее с направлением отрезка \vec{AB}) приближается к касательной к траектории частицы в рассматриваемой точке. Таким образом, скорость \vec{v} — это скорость изменения радиуса-вектора \vec{r} :

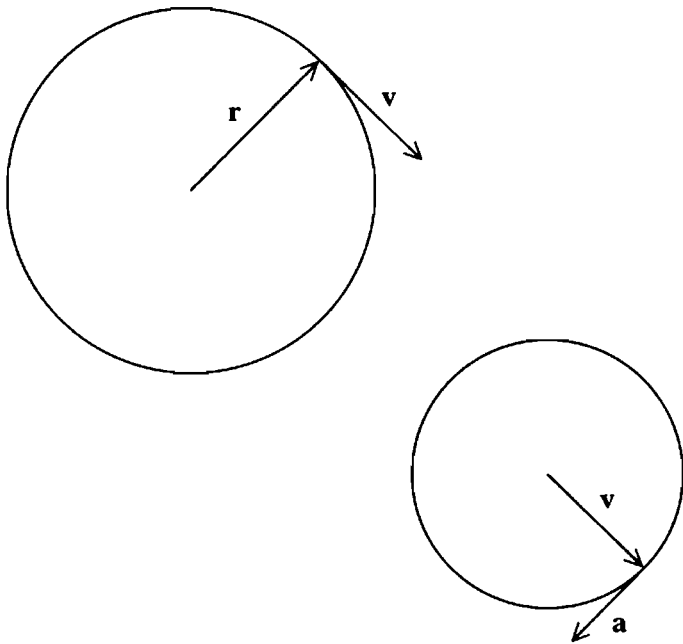
$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} \equiv d\vec{r}/dt. \tag{3.18}$$

Аналогично среднее ускорение за время Δt представляет собой отношение $\Delta \vec{v}/\Delta t$, где $\Delta \vec{v}$ — разность между векторами мгновенной скорости в точках A и B , отстоящих друг от друга по времени на величину Δt (см. второй из рисунков). Аналогия станет более понятной, если совместить начала обоих векторов скорости, как на третьем рисунке. Векторы скорости \vec{v}_A и \vec{v}_B на этом рисунке аналогичны радиусам-векторам \vec{r}_A и \vec{r}_B на первом рисунке, а приращение $\Delta \vec{v}$ аналогично приращению $\Delta \vec{r}$. При неограниченном уменьшении величины Δt отношение $\Delta \vec{v}/\Delta t$ стремится к мгновенному ускорению, которое мы обозначим буквой \vec{a} :

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} \equiv d\vec{v}/dt. \tag{3.19}$$

Величина a вектора ускорения \vec{a} равна скорости конца вектора \vec{v} на последнем рисунке, а направление \vec{a} совпадает с направлением касательной к кривой, описываемой концом вектора скорости.

Соотношения между радиусом-вектором, скоростью и ускорением особенно просто выглядят в случае равномерного движения по окружности. В то время как конец радиуса-вектора описывает окружность радиусом r , конец вектора скорости описывает окружность радиусом $2\pi r/T$, где T — период движения. Так как ускорение связано со скоростью точно таким же образом, как и скорость с радиусом-вектором, должно выполняться $a/v = v/r$, следовательно,



Если радиус-вектор r описывает окружность, вращаясь с постоянной угловой скоростью, то вектор линейной скорости v , который всегда перпендикулярен вектору r , также описывает окружность. Вектор ускорения a связан с вектором v так же, как вектор v с вектором r .

$a = v^2/r$. Поскольку скорость перпендикулярна радиусу-вектору, а ускорение перпендикулярно скорости, то ускорение и радиус-вектор должны быть *параллельны и противоположно направлены*. Иными словами, ускорение направлено к центру круговой орбиты. Таким образом, *частица, движущаяся с постоянной скоростью v по круговой орбите радиусом r , испытывает ускорение, направленное к центру окружности и равное по величине v^2/r .*

Камень, вращающийся на веревке, удерживается на круговой орбите силой натяжения веревки. Точно, так же Луна удерживается на своей почти круговой орбите силой притяжения Земли, а планеты удерживаются на своих почти круговых орбитах силой притяжения Солнца. Каждая из этих сил действует в определенном направлении и имеет определенную величину. То же самое справедливо и в отношении других сил. В частности, сила реакции опоры, на которой покоится тело, направлена перпендикулярно поверхности опоры. Сказанное означает, что, подобно смещению, скорости и ускорению, сила — это направленная, т. е. векторная, величина.

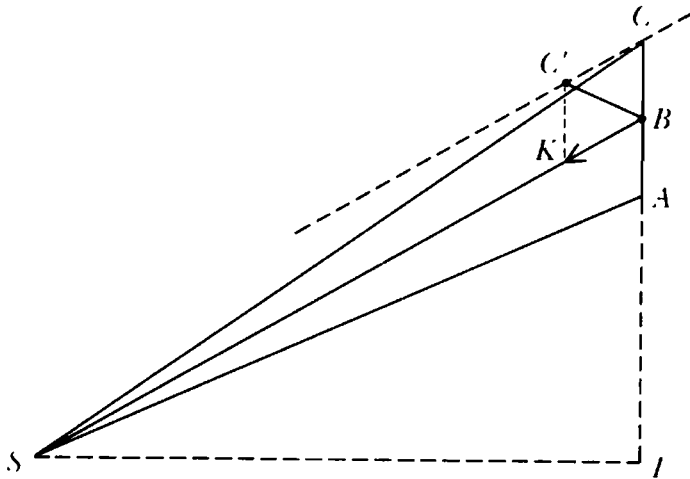
При равномерном движении по окружности ускорение и сила, удерживающая частицу на круговой орбите, направлены к центру окружности. Это дает основание для следующего правила: ускорение частицы прямо пропорционально приложенной силе $a \sim F$.

Опыт показывает, что чем массивнее тело, тем меньшее ускорение сообщает ему данная приложенная сила, например сила со стороны пружины, сжатой до определенного размера. Простейший закон, который согласуется с этими наблюдениями, — *второй закон Ньютона: ускорение a , сообщаемое телу массы m , прямо пропорционально приложенной силе F и обратно пропорционально массе m , т. е. $F = ma$.*

Истолкование законов Кеплера

Направлено ли ускорение планет, движение которых подчиняется законам Кеплера, к Солнцу? Теоремы I и II ньютоновых «Начал» дают ответ на этот вопрос: *ускорение частицы направлено к неподвижному центру тогда и только тогда, когда радиус-вектор, соединяющий неподвижный центр с частицей, описывает за равные интервалы времени равные площади*. Иными словами, кеплеровский закон площадей равносителен утверждению: ускорение планеты всегда направлено к Солнцу.

Если ускорение планеты всегда направлено к Солнцу, то оно должно ле-



Ньютон доказал, что движение планеты согласуется со вторым законом Кеплера в том и только том случае, когда ее ускорение направлено к Солнцу. Если бы ускорение планеты равнялось нулю, то она двигалась бы по прямой линии ABC , проходя равные расстояния AB и BC за равные интервалы времени Δt . Площади треугольников SAB и SBC равны, поскольку они имеют одинаковые основания ($AB = BC$) и общую высоту ST . Предположим теперь, что ускорение планеты отлично от нуля и направлено к точке S . Тогда за время Δt скорость планеты изменится на величину $\Delta v = \vec{BK} = \vec{CC'}$. Поскольку BK и CC' параллельны друг другу, треугольники SBC и SBC' наряду с общей стороной SB имеют одинаковую высоту (расстояние между прямыми SB и CC'), а следовательно, и одинаковую площадь. И наоборот, если треугольники SBC и SBC' имеют одинаковую площадь, то CC' и SB параллельны и вектор Δv должен быть направлен в точку S (т. е. точка K должна лежать на прямой SB).

жать в плоскости планетной орбиты. Это видно из построения отрезка BC' на данном здесь рисунке.

Величина силы притяжения Солнца зависит только от расстояния r до планеты. *Направление* радиуса-вектора не может влиять на величину силы, поскольку все направления, если смотреть с Солнца, равнозначны. Независимо от величины силы F при данном значении радиуса можно заставить частицу двигаться по круговой орбите этого радиуса: при этом скорость частицы должна удовлетворять соотношению $F/m = a = v^2/r$.

Если орбита отличается по форме от круговой, то сила, действующая на планету со стороны Солнца, изменяется от точки к точке. Характер этого изменения и определяет форму орбиты. Для большинства видов зависимости $F(r)$ движение по некруговой орбите оказывается непериодическим, т. е. движущееся тело не возвращается в исходную точку с исходной скоростью. Один из немногих видов зависимости $F(r)$, при котором орбитальное движение оказывается периодическим, — это закон обратных квадратов, гласящий, что сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния: $F \sim 1/r^2$. Ньютон доказал, что в этом и только этом случае орбита планеты будет представлять собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Доказательство Ньютона, основанное на геометрических построениях, хотя и изящно, но довольно громоздко. Более простое алгебраическое доказательство, использующее несложные выкладки, приведено ниже.

Первый закон Кеплера и закон обратных квадратов

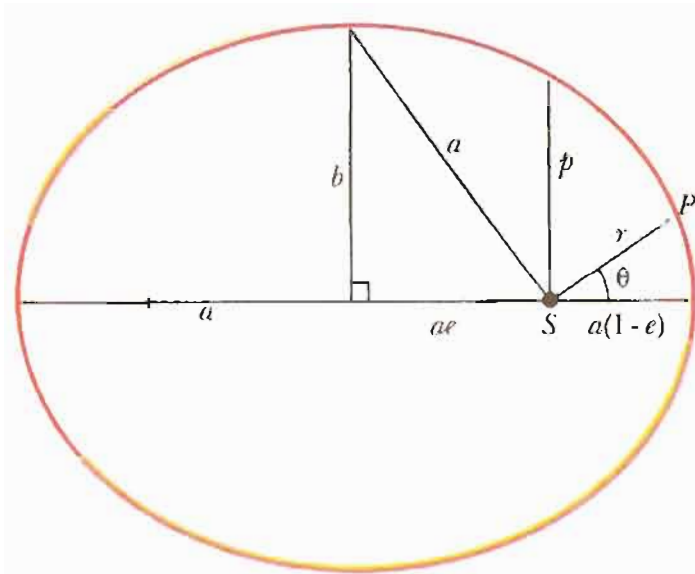
Дано: Планета движется по эллипсу, в фокусе которого находится Солнце, подчиняясь кеплеровскому закону площадей.

Доказать: Сила притяжения Солнца изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

Доказательство. Радиальная и тангенциальная составляющие скорости в полярных координатах записываются в виде

$$v_r = \dot{r}, \quad v_\theta = r\dot{\theta} \tag{1}$$

Кеплеровский закон площадей в полярных координатах сводится к утверждению, что



$$rv_{\theta} = r^2\dot{\theta} = \text{const} = h, \quad (2)$$

причем ускорение имеет только радиальную составляющую, которая [с учетом уравнения (1)] определяется как

$$a_r = \dot{v}_r - v_{\theta}^2/r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2, \quad (3)$$

Член v_{θ}^2/r обусловлен изменением направления тангенциальной составляющей скорости аналогично тому, как это было при движении по окружности. Подставляя далее в (3) вместо v_{θ} и $\dot{\theta}$ их выражения из уравнений (1) и (2), получим:

$$a_r = \ddot{r} - h^2/r^3. \quad (4)$$

Запишем в полярных координатах уравнение эллипса, изображенного на рисунке:

$$1/r = (1 + e\cos\theta)/p. \quad (5)$$

Дифференцируя (5), получим

$$\frac{d(1/r)}{dt} = -\frac{\dot{r}}{r^2} = -\frac{e\dot{\theta}\sin\theta}{p} = -\frac{eh\sin\theta}{pr^2},$$

откуда

$$\dot{r} = eh\sin\theta/p.$$

Продифференцируем теперь это выражение

$$\ddot{r} = \frac{eh\dot{\theta}\cos\theta}{p} = \frac{eh^2\cos\theta}{pr^2},$$

и подставим полученный результат в уравнение (4):

$$a_r = \ddot{r} - \frac{h^2}{r^3} = \left(\frac{h}{r}\right)^2 \frac{e\cos\theta}{p} - \frac{1}{r} \left(\frac{h}{r}\right)^2 = -\frac{h^2}{pr^2}.$$

Теперь заменим величину $1/r$ ее выражением из уравнения (5):

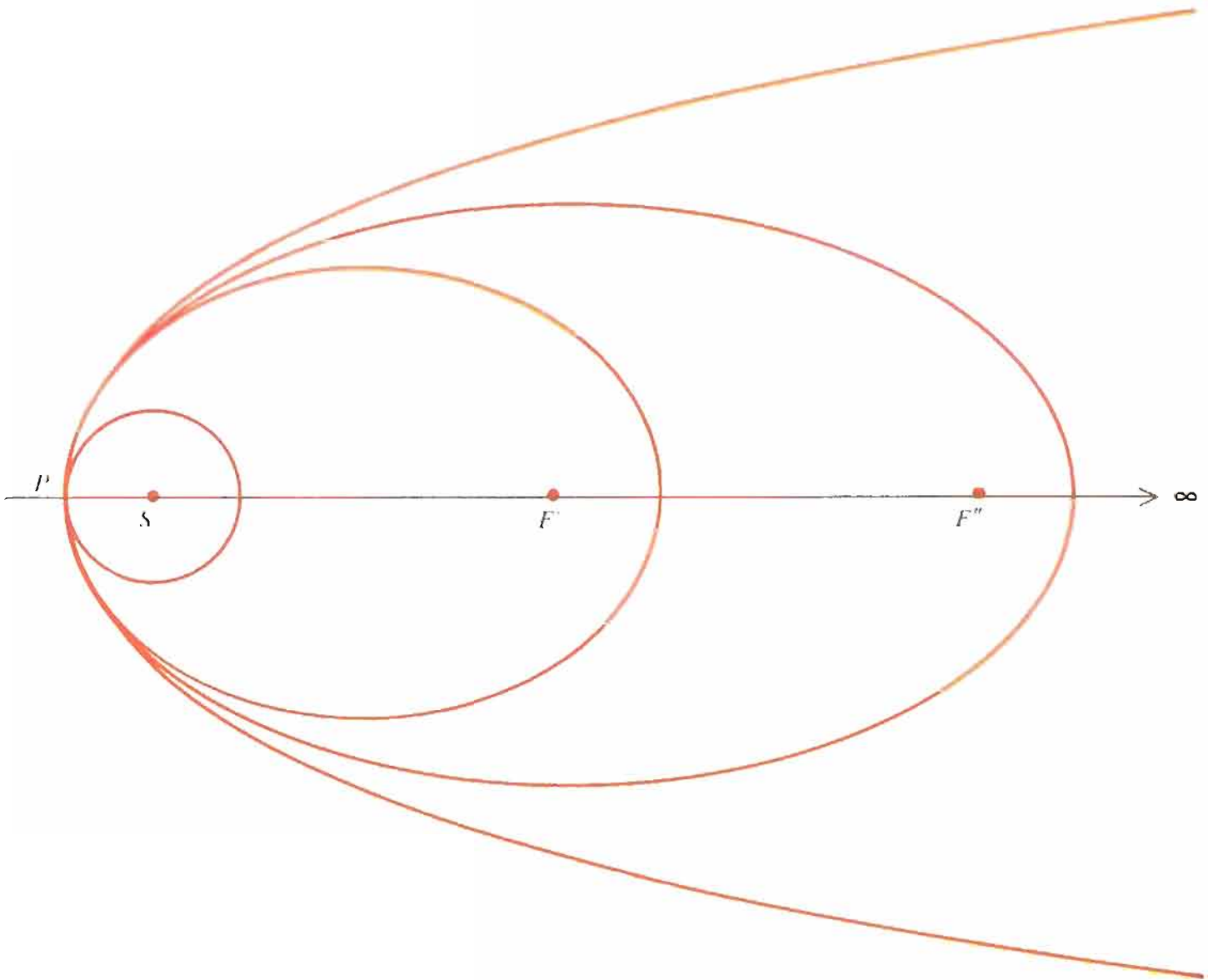
$$a_r = -h^2/pr^2, \quad (6)$$

где h и p — постоянные величины для данной орбиты. Поэтому, обозначив через M новую константу h^2/p , получим окончательно

$$a_r = -M/r^2, \quad (7)$$

что и требовалось доказать.

Приведенные выкладки можно обратить: если начать с уравнения (7), то можно доказать, что орбита планеты — эллипс, форма которого описывается уравнением (5).



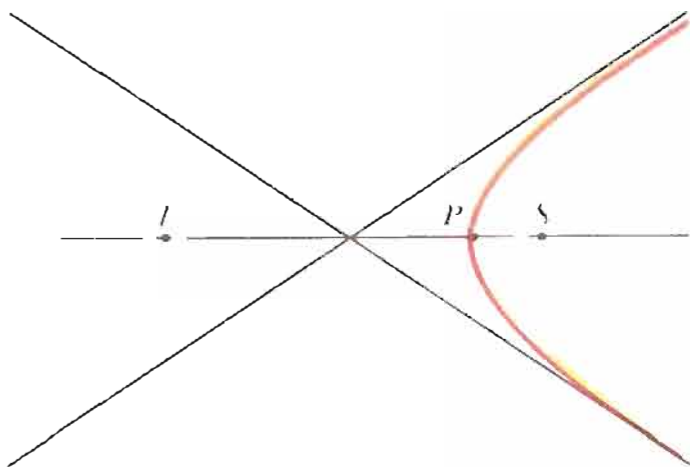
Эллипсы, по которым, согласно законам Кеплера, движутся планеты; у нарисованных эллипсов расстояния SP от Солнца до перигелия одинаковы, тогда как второй фокус удаляется от первого, перемещаясь в точки F' , F'' и т. д. Когда второй фокус смещается в бесконечность, эллипс превращается в параболу.

Возникает вопрос, являются ли эллиптические орбиты единственно возможными для тел, притяжение которых к неподвижному центру обратно пропорционально квадрату расстояния? Уравнение эллипса в полярных координатах имеет вид:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}, \quad (3.20)$$

где θ — угол, который радиус-вектор образует с большой осью эллипса, а p — постоянная величина (равная длине радиуса-вектора при $\theta = 90^\circ$). Эксцентриситет эллипса e — это отношение расстояния от Солнца до центра эллипса к величине его большой полуоси, поэтому величина e лежит в интервале от 0 до 1. При $e = 0$ эллипс превращается в окружность радиусом $r = p$. При увеличении величины e эллипс становится все более вытянутым: его второй фокус, как показано на рисунке, удаляется от Солнца все дальше. Наконец, при $e = 1$ эллипс превращается в параболу. Однако формула (3.20) не теряет смысла даже при $e > 1$; в этом случае она описывает гиперболу, внешний вид которой изображен на следующем рисунке.

Закон обратных квадратов связывает первые два закона Кеплера с третьим законом. Мы можем выразить (постоянную) скорость, с которой



Тело, пришедшее из бесконечности, будет двигаться по гиперболе, в одном из фокусов которой находится Солнце. Точно так же движется протон при взаимодействии с другим, неподвижным протоном, находящимся в точке F .

радиус-вектор планеты описывает площадь, через полную площадь A эллипса, по которому движется планета, и орбитальный период T :

$$\frac{1}{2}h = A/T = \pi ab/T. \quad (3.21)$$

Через h здесь обозначена константа, входящая в уравнение (2) во врезке. По определению $h^2 = \rho M$, где M — коэффициент пропорциональности в законе обратных квадратов, т. е. в равенстве (7) там же. Из рисунка, помещенного во врезке, и уравнения (3.20) можно получить, что $\rho = a(1 - e^2)$, $b = a\sqrt{1 - e^2}$. С учетом этого уравнение (3.21) можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{1}{2}h = \frac{1}{2}(\rho M)^{1/2} = \frac{1}{2}[Ma(1 - e^2)]^{1/2} = \frac{\pi a(1 - e^2)^{1/2}}{T},$$

или

$$(2\pi/T)^2 a^3 = M. \quad (3.22)$$

Последнее равенство представляет собой ньютоновскую форму записи третьего закона Кеплера. Любопытно, что эксцентриситет орбиты e не входит в соотношение (3.22), но особенно поражает то, что Кеплер как бы предвидел эту особенность своего закона.

Тяготение как универсальная сила

Рассматривая движения планет, мы считали Солнце неподвижным центром тяготения, а рассуждая о движении Луны, неподвижной считали Землю. Но если Земля притягивает Луну, то почему она не должна притягивать Солнце? Следовательно, Солнце ускоряется притяжением Земли, и, рассматривая движение планет, мы не вправе считать его неподвижным центром тяготения. Такого рода рассуждения привели Ньютона к выводу, что в самосогласованной теории тяготения каждая частица во Вселенной должна притягивать все остальные частицы и сама притягиваться ими.

Гравитационная и инертная массы. В качестве первого шага на пути к реализации этой идеи рассмотрим простейший случай: Вселенную, в которой имеется всего лишь два тела, например Солнце и Земля. Ускорение Земли a_E , обусловленное притяжением Солнца, обратно пропорционально квадрату расстояния r между ними:

$$a_E = M_S/r^2. \quad (3.23)$$

Коэффициент пропорциональности M_S называется *гравитационной массой* Солнца. Ее величину можно вычислить из (3.23), используя для определе-

ния a_E формулу Гюйгенса: $a_E = v^2/r = (2\pi/T)^2 \cdot r$, где T — орбитальный период Земли.

Аналогичным образом гравитационное ускорение Солнца, обусловленное притяжением Земли, равно

$$a_S = M_E/r^2, \quad (3.24)$$

где M_E — гравитационная масса Земли.

Гравитационная масса является мерой способности тела притягивать другие тела. Как она связана с инертной массой, которая характеризует свойство тела приобретать то или иное ускорение под действием приложенной силы? Ответ на этот вопрос вытекает из *третьего закона Ньютона*, гласящего: *каждое действие вызывает противодействие, равное по величине и противоположно направленное, или, иными словами, взаимное действие двух тел друг на друга равно по величине и противоположно по направлению.*

Таким образом, сила с которой Земля притягивает Солнце, должна быть равна силе, с которой Солнце притягивает Землю. Согласно второму закону Ньютона, величина этих сил равна соответственно $F_S = m_S M_S / r^2$ и $F_E = m_E M_E / r^2$. Следовательно, силы будут равны, если $m_E M_S = m_S M_E$, или $m_E / M_E = m_S / M_S$. Поскольку аналогичное равенство справедливо для любой пары тел во Вселенной, отсюда следует, что инертная и гравитационная массы прямо пропорциональны друг другу.

Формула $a = M/r^2$ позволяет нам вычислить гравитационную массу тела по величине ускорения, с которым оно заставляет двигаться пробную частицу, находящуюся на заданном расстоянии. Рассмотрим, например, пробную частицу, движущуюся по круговой орбите радиусом r с периодом T . Ее центростремительное ускорение вычисляется по формуле $a = v^2/r = 4\pi^2 r / T^2$. Гравитационная масса M , способная вызвать такое ускорение, равна $r^2 a = 4\pi^2 r^2 / T^2$. Таким образом, гравитационная масса Солнца равна $4\pi^2 \times$ (астрономическая единица*)³ / (год)². Какова же инертная масса Солнца? Мы можем приписать произвольное, удобное для нас значение универсальному отношению M/m . Проще всего было бы положить его равным 1, но по традиции принято измерять инертную массу в специальных, хотя и произвольно выбранных, единицах — граммах (г). Поэтому отношение M/m , обозначаемое буквой G , — величина размерная. Она равна

$$M/m = G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}^2 \cdot \text{г}. \quad (3.25)$$

«Неподвижная точка вращающегося мира». Основным понятием в законах статического равновесия Архимеда является центр масс. Чтобы уравновесить две массы, соединенные невесомым стержнем, параллельным земной поверхности (оси x), нужно точку опоры поместить в точку с координатой X , которая определяется из соотношения

$$(m_1 + m_2)X = m_1 x_1 + m_2 x_2. \quad (3.26)$$

Это условие есть не что иное, как еще одна формулировка закона равновесия, согласно которому массы должны располагаться по разные стороны от точки опоры и находиться от нее на расстояниях $d_1 = |x_1 - X|$ и $d_2 = |x_2 - X|$, которые, как легко показать, обратно пропорциональны массам: $d_1/d_2 = m_2/m_1$. Если стержень, на котором подвешены массы, не параллелен оси x , то y — координата точки опоры Y — находится из аналогичного условия. Если же стержень расположен не параллельно земной поверхности, то ана-

* Астрономическая единица (а. е.) — единица расстояний в астрономии, равная среднему расстоянию от Земли до Солнца (1 а. е. = 149,6 млн. км). — *Прим. перев.*

логичным образом находится координата Z . Все три условия можно записать в более компактном виде, используя векторное равенство

$$(m_1 + m_2)\mathbf{R} = m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2, \quad (3.27)$$

где \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 и \mathbf{R} — соответственно радиусы-векторы первой и второй массы, а также центра масс, проведенные из произвольной точки отсчета.

Вернемся к нашей простейшей модели Вселенной, содержащей две точечные массы, изображающие Солнце и Землю, и вычислим скорость \mathbf{V} и ускорение \mathbf{A} центра масс:

$$(m_1 + m_2)\mathbf{V} = (m_1 + m_2)\frac{d\mathbf{R}}{dt} = m_1\frac{d\mathbf{r}_1}{dt} + m_2\frac{d\mathbf{r}_2}{dt} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2. \quad (3.28)$$

$$(m_1 + m_2)\mathbf{A} = (m_1 + m_2)\frac{d\mathbf{V}}{dt} = m_1\mathbf{a}_1 + m_2\mathbf{a}_2 = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = 0. \quad (3.29)$$

Последнее равенство написано на основе третьего закона Ньютона. Оно означает, что движение центра масс происходит равномерно, т. е. с постоянной скоростью \mathbf{V} . Поэтому для радиуса-вектора \mathbf{R} можно записать в виде

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}t + \mathbf{R}_0, \quad (3.30)$$

где \mathbf{R}_0 — величина радиуса-вектора в момент $t = 0$.

Наше описание движения двух точечных масс можно упростить, используя систему отсчета, которая движется со скоростью \mathbf{V} центра масс. Все три закона Ньютона справедливы в этой системе отсчета точно так же, как и в прежней. Первый закон выполняется, поскольку частица, двигавшаяся относительно старой системы отсчета с постоянной скоростью \mathbf{v} , в новой системе будет двигаться также с постоянной скоростью $\mathbf{v} - \mathbf{V}$. Вторым и третьим законами Ньютона по-прежнему будут справедливы, поскольку вычитание из скорости каждой частицы постоянной величины \mathbf{V} не вызывает изменения ни ускорения, ни силы. В новой системе отсчета центр масс покоится, и мы для удобства примем его за начало координат. Таким образом, в новой системе отсчета $\mathbf{V} = \mathbf{R} = 0$.

Радиус-вектор \mathbf{R} системы из n точечных масс находится из соотношения, аналогичного (3.27):

$$(m_1 + \dots + m_n)\mathbf{R} = m_1\mathbf{r}_1 + \dots + m_n\mathbf{r}_n. \quad (3.31)$$

Сила, действующая на частицу с номером 1, равна сумме сил, действующих на эту частицу со стороны всех остальных частиц:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \dots + \mathbf{F}_{1n}. \quad (3.32)$$

Аналогично

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{23} + \dots + \mathbf{F}_{2n}, \quad (3.33)$$

и так далее. Сумма n сил \mathbf{F}_i складывается из слагаемых типа $(\mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21})$, соответствующих каждой паре рассматриваемой совокупности частиц. Согласно третьему закону Ньютона, каждое такое слагаемое равно нулю, и, следовательно, равна нулю сумма всех сил. Если обобщить уравнение (3.29) на случай n частиц, то, как и ранее, мы приходим к выводу, что ускорение центра масс системы равно нулю.

Таким образом, *движение центра масс изолированной системы взаимодействующих частиц происходит без ускорения*. Как и в случае двух частиц, мы можем выбрать систему отсчета, в которой центр масс рассматриваемой идеализированной системы все время покоится в начале координат.

Импульс и закон сохранения импульса. Величина $m\mathbf{v}$, называемая *импульс-*

сом, обозначается буквой \bar{p} . Вторым закон Ньютона $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ можно записать в более компактном виде:

$$d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}. \quad (3.34)$$

Тот факт, что скорость центра масс изолированной системы взаимодействующих частиц не меняется, означает, что полный импульс системы постоянен во времени

$$\mathbf{p}_1 + \dots + \mathbf{p}_n = (m_1 + \dots + m_n)\mathbf{V} = \text{const}. \quad (3.35)$$

Третий закон Ньютона (действие равно противодействию) означает, что взаимодействующие частицы *обмениваются* импульсом: взаимодействие между двумя частицами не изменяет суммы их импульсов.

Произведение массы на ускорение равно скорости изменения импульса тогда и только тогда, когда масса остается неизменной:

$$d\mathbf{p}/dt = d(m\mathbf{v})/dt = m d\mathbf{v}/dt + \mathbf{v}(dm/dt). \quad (3.36)$$

Для систем, масса которых изменяется с течением времени (ракеты, выбрасывающей отработанные газы; кометы, пролетающей мимо Солнца; звезды, проходящей через плотное облако межзвездной пыли), $d\mathbf{p}/dt \neq m\mathbf{a}$. Какая же из двух форм второго закона Ньютона ($d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F}$ или $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$) применима, когда масса изменяется со временем? Уравнение (3.34) означает, что полный импульс изолированной системы, например импульс ракеты и импульс выхлопных газов, сохраняется. Если же использовать уравнение $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, то мы приходим к выводу, что полный импульс системы не сохраняется. В следующей главе будет показано, что полный импульс изолированной системы все-таки сохраняется, причем это следует из принципов куда более фундаментальных, чем второй и третий законы Ньютона. Это означает, что силу надо приравнять к скорости изменения импульса. Этот факт осознал еще Ньютон, и эксперимент полностью подтверждает его правоту.

Компактная система взаимодействующих частиц во внешнем гравитационном поле. Обсуждая движение Земли вокруг Солнца, мы считали Землю точечной массой, а не протяженной системой, состоящей из множества взаимодействующих частиц. Теперь можно обосновать справедливость такого подхода. Представим силу, действующую на каждую из частиц Земли, в виде суммы двух сил: «внутренней», т. е. обусловленной действием всех остальных частиц Земли, и «внешней», т. е. действующей со стороны Солнца. Тогда второй закон Ньютона для частицы с номером i можно записать в виде

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_{i_{\text{внутр}}} + \mathbf{F}_{i_{\text{внешн}}}. \quad (3.37)$$

Написав аналогичное выражение для каждой частицы Земли, затем почленно просуммируем все полученные уравнения. В левой части результирующего уравнения получится величина $m\mathbf{A}$, где $m = (m_1 + m_2 + \dots + m_n)$ — масса Земли, \mathbf{A} — ускорение центра масс Земли. В правой части сумма внутренних сил, как мы уже знаем, равна нулю, так что результат будет выглядеть следующим образом:

$$m\mathbf{A} = \sum_i \mathbf{F}_{i_{\text{внешн}}}. \quad (3.38)$$

Поскольку диаметр Земли много меньше, чем расстояние от Земли до Солнца, гравитационное ускорение, обусловленное Солнцем, практически одинаково в каждой точке внутри Земли. Обозначим это ускорение g : Тогда, учитывая, что $\mathbf{F}_{i_{\text{внешн}}} = m_i g$, получим

$$\sum \mathbf{F}_{i_{\text{внешн}}} = m\mathbf{g}. \quad (3.39)$$

Из сравнения уравнений (3.38) и (3.39) вытекает, что $\mathbf{A} = \mathbf{g}$, т. е. центр масс Земли движется так, будто вся масса Земли сосредоточена в этой точке. Более детальный анализ показывает, что разность между ускорением центра масс \mathbf{A} и «внешним» ускорением силы тяжести \mathbf{g} в этой точке пропорциональна квадрату отношения земного диаметра к расстоянию Солнце — Земля и степени отклонения формы Земли от сферической. Таким образом, центр масс Земли движется почти в точности так, как если бы масса Земли была сосредоточена в этой точке*.

Ускорение i -й частицы относительно центра масс системы, к которой она принадлежит, равно $\mathbf{a}_i - \mathbf{A}$. Из уравнений (3.37) и (3.39) видно, что

$$m_i(\mathbf{a}_i - \mathbf{A}) = \mathbf{F}_{i\text{внутр}} \quad (3.40)$$

Иными словами, ускорения частиц внутри или вне Земли, если их измерять в системе отсчета, движущейся вместе с земным центром масс, целиком обусловлено взаимодействием с остальными частицами рассматриваемой системы. Движение центра масс Земли приводит как бы к уничтожению гравитационного притяжения Солнца. Лишь разность между гравитационными ускорениями в различных точках системы может быть обнаружена из наблюдений. Некоторые следствия этого вывода мы рассмотрим в гл. 4.

Гравитационное поле

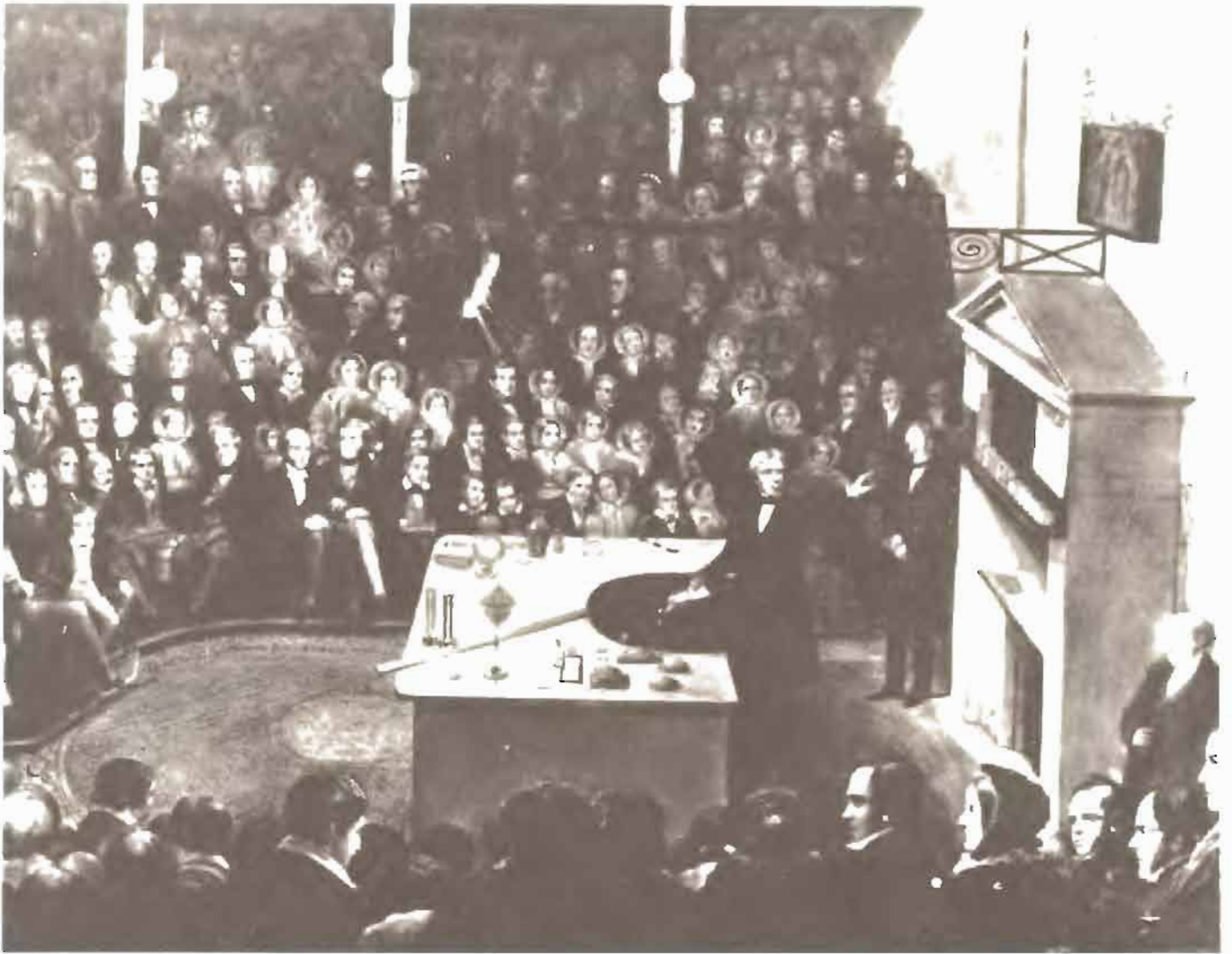
В XIX в. физики разработали новый подход к ньютоновской теории тяготения. Они перенесли свое внимание с тел, обуславливающих гравитационное ускорение, на пространство между телами. По мнению Рудольфа Арнхейма, специалиста в области психологии искусства, этот шаг ознаменовал переход к новому восприятию, аналогичный переходу в живописи от «резкого разграничения переднего и заднего планов», характерного для эпохи, предшествующей Ренессансу, к «непрерывному распределению форм и цветовых оттенков» в живописи, возникшей после эпохи Ренессанса. (Например, в композиции картин современного нидерландского художника М. К. Эшера изображение и фон одинаково важны.)

Переключение внимания с тел на пространство между ними впервые произошло, когда физики занялись изучением электромагнетизма. Начало этому положил выдающийся физик-экспериментатор Майкл Фарадей (1791—1867), а Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) сформулировал идеи Фарадея на языке математики. Вот как Максвелл описывал способ мышления Фарадея:

Мысленно Фарадей видел силовые линии, пересекающие все пространство, там, где другие видели лишь силовые центры, притягивающие на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния; Фарадей искал суть явлений в реальном взаимодействии со средой, тогда как их вполне удовлетворяло действие силы на расстоянии и представление об электрической жидкости.

Теория Ньютона в том виде, в каком мы ее рассматривали, представляет собой *теорию частиц* и их взаимодействий. При новом подходе она становится теорией, в которой частицы и создаваемые ими *гравитационные поля* играют одинаково важную и взаимодополняющую роль. Частицы служат источником гравитационных полей, которые в свою очередь действуют на частицы. Части-

* Для сферически-симметричных тел это утверждение справедливо (без «почти») вне зависимости от соотношения размеров тел и расстояния между ними. — *Прим. ред.*

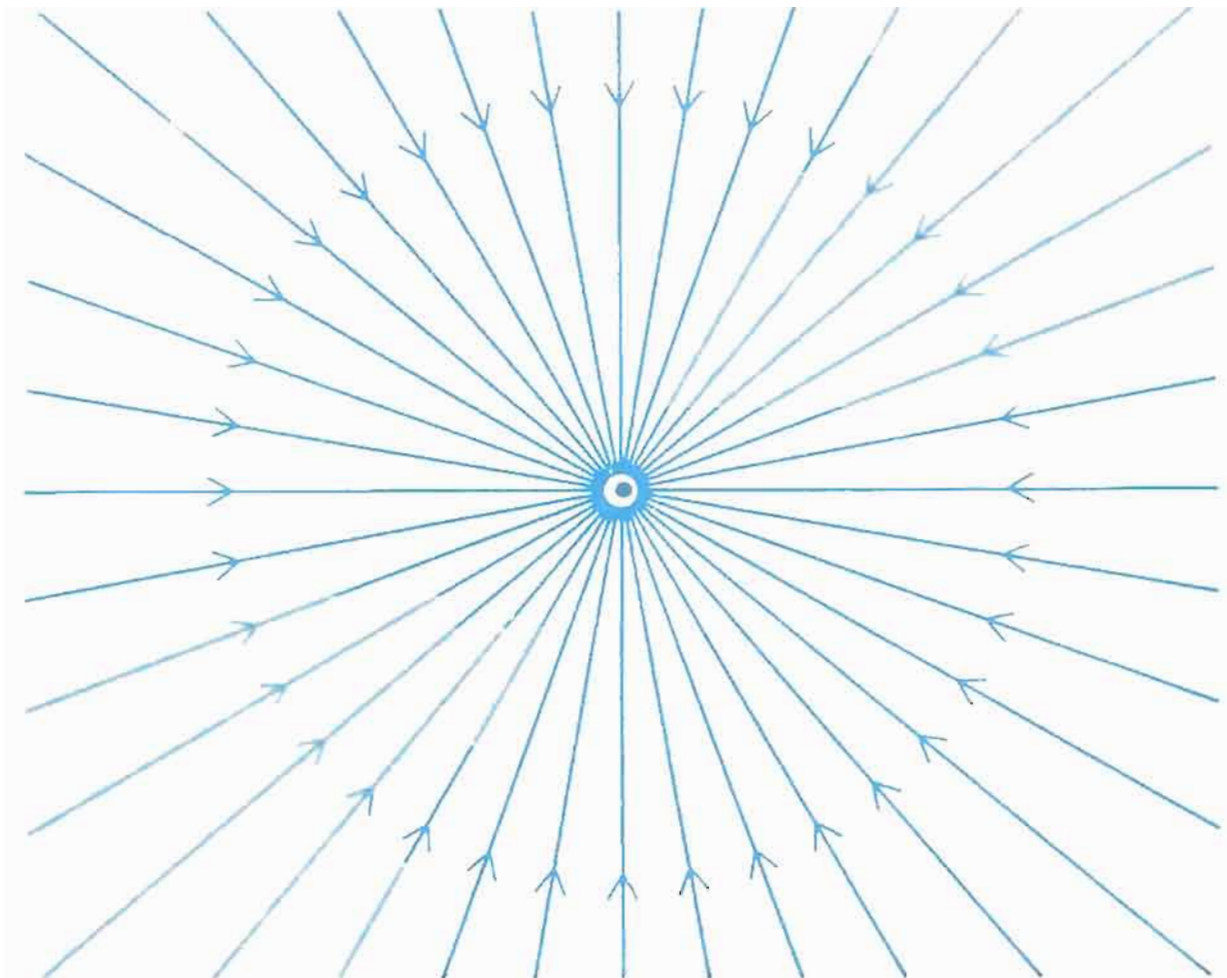


Майкл Фарадей (1791—1867) выступает с публичной лекцией в Королевском институте в Лондоне. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции, на котором основано действие электромоторов и генераторов (Архив Бетмана)

цы не взаимодействуют друг с другом непосредственно и на расстоянии, как предполагал Ньютон: каждая частица испытывает ускорение в результате действия на нее гравитационного поля в той точке, где она находится. Теория поля отвергает действие на расстоянии и Пустоту заменяет Средой.

Хотя с математической точки зрения оба подхода эквивалентны, в дальнейшем мы убедимся, что концепция поля не только предпочтительнее в эстетическом отношении, но и дает ряд практических преимуществ. Более того, она послужила необходимой основой для эйнштейновской теории гравитации (см. гл. 6). В этой теории поле играет основную роль, а частицы — вспомогательную.

На рисунке на с. 106 изображено гравитационное поле точечной массы. Силовые линии в этом случае представляют собой изотропную совокупность радиальных линий: если вокруг точечной массы как вокруг центра описать сферу, то точки пересечения силовых линий с этой сферой будут равномерно покрывать ее поверхность. Конечно, наш рисунок — чистая условность, ибо в действительности через каждую точку пространства, в которой гравитационное ускорение не равно нулю, должна проходить своя силовая линия. В физике принято, что число силовых линий, проводимых в точечной массе, должно быть пропорционально величине этой массы. На рисунке на с. 107 изображена картина силовых линий в случае взаимодействия двух точечных тел разной



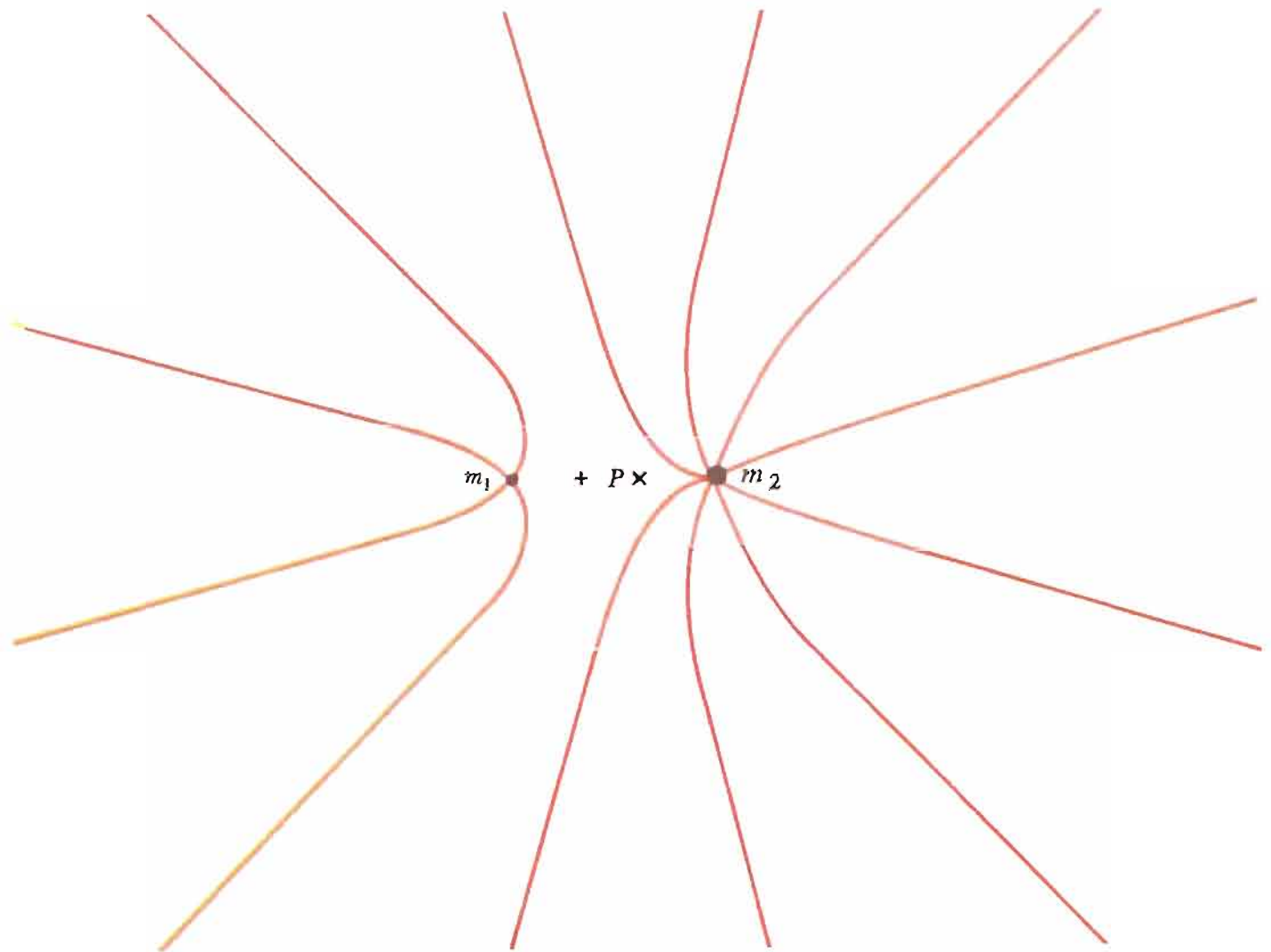
Гравитационное поле точечной массы

массы; используя указанное правило, можно найти отношение этих масс; оно равно отношению числа силовых линий, проведенных к каждой из точек.

Гравитационное ускорение в любой точке пространства направлено вдоль силовой линии, проходящей через эту точку. Поэтому на первом рисунке гравитационное ускорение направлено к точечной массе, которая является источником гравитационного поля. При взаимодействии двух точечных масс в ближайшей окрестности каждой из точек расположение силовых линий почти равномерно и радиально.

Величина гравитационного ускорения в данной точке пространства пропорциональна плотности силовых линий в окрестности этой точки. Чем теснее на чертеже изображены силовые линии, тем сильнее гравитационное поле (и, следовательно, ускорение силы тяжести) в этой области, а там, где силовые линии отстоят далеко друг от друга, поле (и ускорение) слабое. Вернемся вновь к картине силовых линий уединенной точечной массы. Предположим, что число силовых линий, заканчивающихся на точечной массе, равно $4\pi N$. В каждой точке поверхности сферы радиусом r , описанной вокруг точечной массы, плотность силовых линий равна $4\pi N / 4\pi r^2$, или N/r^2 . Поскольку предполагалось, что число силовых линий N пропорционально массе M , являющейся источником поля, первый рисунок можно рассматривать как графическое доказательство ньютоновского закона тяготения для точечной массы: гравитационное ускорение направлено к точечной массе, а его величина обратно пропорциональна квадрату расстояния до силового центра.

Второй из рисунков, на котором изображено гравитационное поле двух точечных тел с разной массой, иллюстрирует три уже известных нам правила, используемые при интерпретации подобного рода диаграмм.



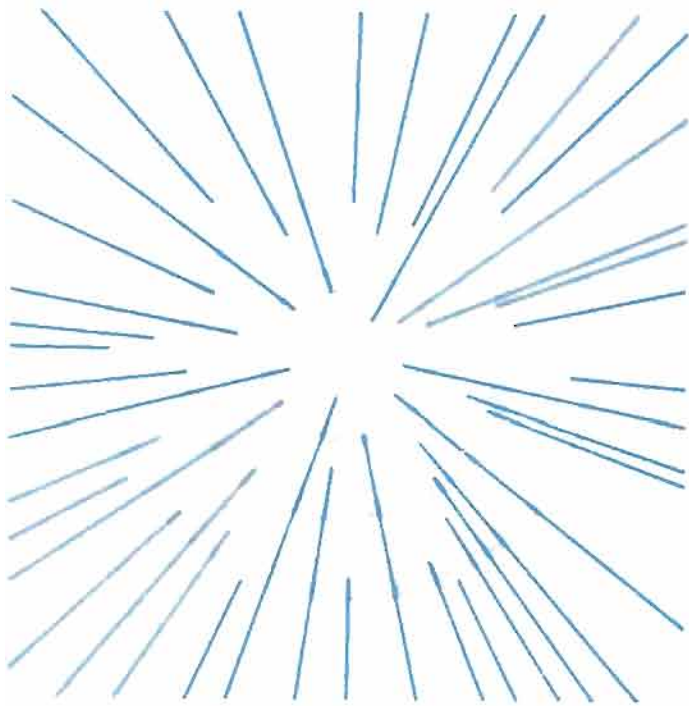
Гравитационное поле двух неравных точечных масс. Силовые линии изображены в плоскости, проходящей через линию, соединяющую массы. Обратите внимание, что на массе m_2 заканчивается в два раза больше силовых линий, чем на массе m_1 ; вблизи каждой из масс силовые линии ведут себя так же, как в случае изолированной точечной массы; на расстояниях, значительно превышающих расстояние между массами, картина силовых линий почти совпадает с той, которую создавала бы точечная масса $m_1 + m_2$, расположенная в центре масс X рассматриваемой системы; существует некоторая точка $+$, в которой сила гравитационного взаимодействия равна нулю и через которую не проходит ни одной силовой линии.

1. Гравитационное поле в каждой точке направлено вдоль силовой линии, проходящей через эту точку.

2. Величина гравитационного ускорения в данной точке пропорциональна плотности силовых линий в этой точке. (Коэффициент пропорциональности равен числу силовых линий на единицу массы.)

3. Силовые линии заканчиваются только на массах; число силовых линий, которые заканчиваются в данном объеме пространства, пропорционально массе, заключенной в этом объеме.

Используя концепцию гравитационного поля, мы можем легко доказать теорему, которая в свое время доставила Ньютону много хлопот. Рассматривая вопрос о притяжении яблока и Луны к Земле, Ньютон предполагал, что Земля притягивает оба тела так, как если бы вся земная масса была сосредоточена в центре Земли. Справедливо ли это предположение? Рассмотрим *внешнее* гравитационное поле идеализированной, абсолютно сферической Земли. Поскольку распределение массы в этом случае сферически-симметрич-



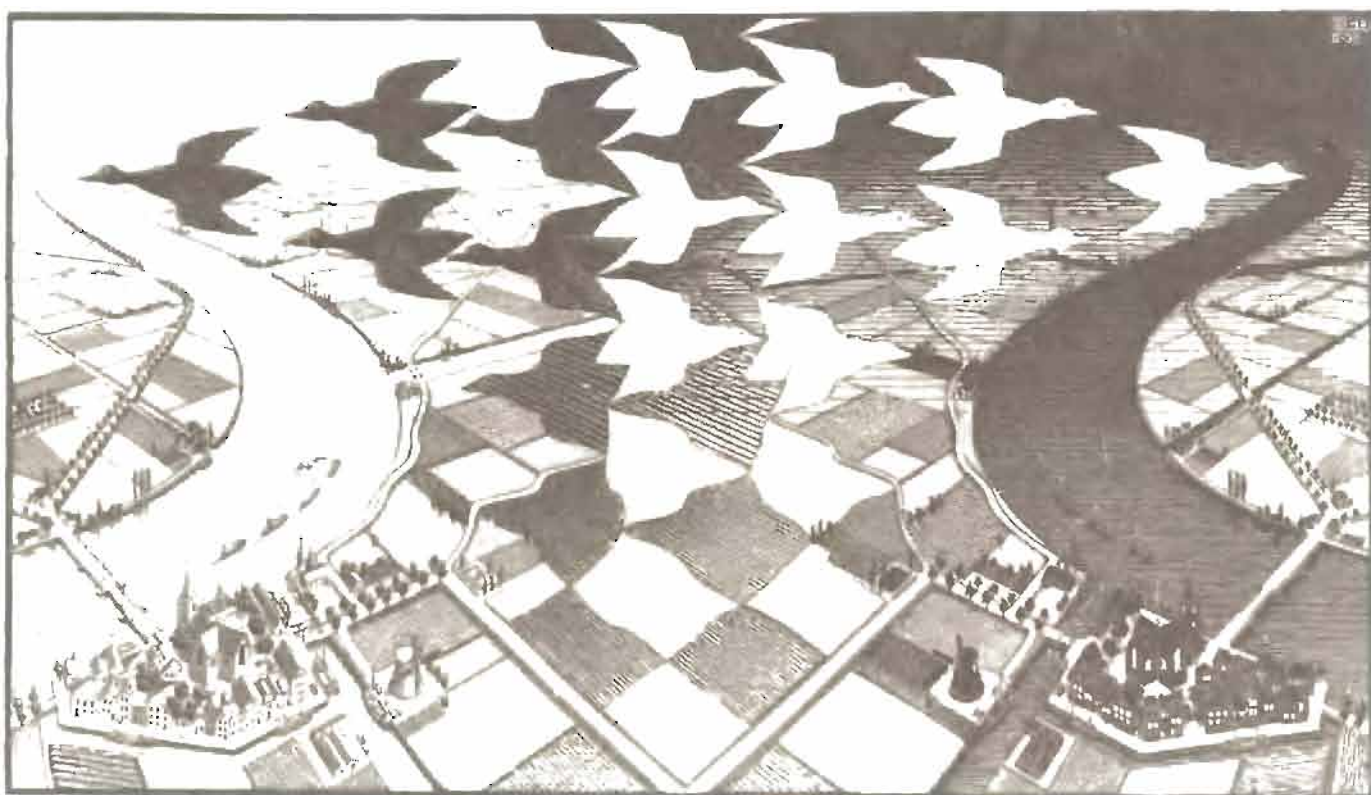
Гравитационное поле сферически-симметричного распределения масс (Художественный архив, Сотби Парк-Бернет)

но (это значит, что все точки, удаленные от центра симметрии на равное расстояние, равноправны), силовые линии вне Земли должны быть направлены строго по радиусу, а точки, в которых они «протыкают» поверхность Земли, должны быть распределены по ее поверхности равномерно. Более того, согласно третьему из вышеуказанных правил, число силовых линий, пронизывающих поверхность Земли, должно соответствовать массе, заключенной внутри ее поверхности. Таким образом, невозможно отличить гравитационное поле точечной массы от внешнего поля сферически-симметричного шара той же массы. Это и есть теорема, которую Ньютон хотел доказать.

Столь же просто доказать и еще одну теорему, относящуюся к сферически-симметричному распределению масс: гравитационная сила, действующая на частицу, находящуюся в любой точке внутри однородной сферической оболочки, равна нулю. Используя те же самые аргументы, мы приходим к выводу, что, поскольку распределение массы сферически-симметрично, то силовые линии оболочки должны быть направлены вдоль радиуса. Если гравитационное ускорение и сила не были бы равны нулю, то эти линии должны были пересечься в центре, что невозможно, поскольку в центре нет массы. Следовательно, внутри оболочки поле равно нулю.

Эта теорема имеет важные космологические последствия. Астрономы обнаруживают массу во Вселенной двумя основными способами: непосредственно регистрируя излучение от массивных объектов, прежде всего от звезд, а также по эффектам, обусловленным гравитационным полем. Первый способ применим не всегда, поскольку во Вселенной даже достаточно большие массы могут быть невидимы. Например, это могут быть звезды, исчерпавшие запасы ядерной энергии и настолько слабые, что обнаружить их не удастся даже с помощью самых чувствительных приемников излучения. Второй метод, вообще говоря, более достоверен, однако и его возможности ограничены: на движение звезд, например в звездных системах, не влияет невидимое вещество, распределенное в виде сферической оболочки (гало) вокруг системы.

В восьмой главе мы увидим, что полученные в последнее время данные позволяют предположить, что значительная, если не основная, часть массы Вселенной сосредоточена в невидимых гало галактик. Если учесть вклад невидимой массы, то прежние оценки масс галактик и средней плотности Вселенной придется повысить, быть может, раз в десять.



Картина К Эшера «День и ночь» (1938)

Французский философ Анри Бергсон как-то сказал: «Ньютоновская физика спустилась с Небес на Землю по наклонной плоскости Галилея». Во второй и третьей главах мы узнали, как это произошло. В четвертой главе нам предстоит увидеть, как Ньютон и его преемники использовали созданную им теорию для того, чтобы придать небесам новый вид, т. е. для разработки теоретических моделей, на которых в течение почти двух последующих веков основывался анализ результатов астрономических наблюдений.



Теория Ньютона и астрономическая Вселенная

Мироздание с его неизмеримым величием, с его сияющим отовсюду бесконечным разнообразием и красотой приводит нас в безмолвное изумление. Но если представление обо всем этом совершенстве поражает наше воображение, то, с другой стороны, разум восторгается по-иному, видя, сколько великолепия, сколько величия вытекает из одного всеобщего закона согласно вечному и строгому порядку.

Иммануил Кант

Доведись Исааку Ньютону читать современные теоретические статьи, посвященные динамике звездных скоплений и галактик, он не испытал бы трудностей с пониманием, ибо воспринял бы их как приложение своей собственной теории гравитации. Однако ему показалась бы чуждой та астрономическая Вселенная, к которой его теория применяется. Ньютонская «Система Мира» (третья книга «Математических начал натуральной философии») почти полностью посвящена явлениям, известным со времен Гиппарха: движению Луны и планет, приливам, прецессии равноденствия, орбитам комет. Но за время, прошедшее со смерти Ньютона до наших дней, телескопы настолько усовершенствовались, что радиус доступной наблюдению области Вселенной увеличился в 100 млн. раз, что позволило обнаружить системы и структуры, о которых понятия не имели в XVIII в. В этой главе мы увидим, как теория Ньютона и различные ее ответвления достигли значительных успехов в объяснении наиболее заметных особенностей астрономических систем, размеры которых лежат в диапазоне от нескольких световых секунд до десятков миллионов световых лет. Но мы узнаем также, что теория Ньютона не дает адекватной теоретической основы для понимания структуры и динамики Вселенной в целом.

Двойные звезды

Постулировав вращение Земли, пифагорейцы устранили необходимость в «хрустальной сфере» для объяснения суточного вращения звезд. Отныне не было оснований полагать, что все звезды находятся на одинаковом рас-



Вариант картины мира Коперника, предложенный Томасом Диггсом. Солнечная система здесь погружена в беспредельное море звезд (Коллекция Грейнджера)

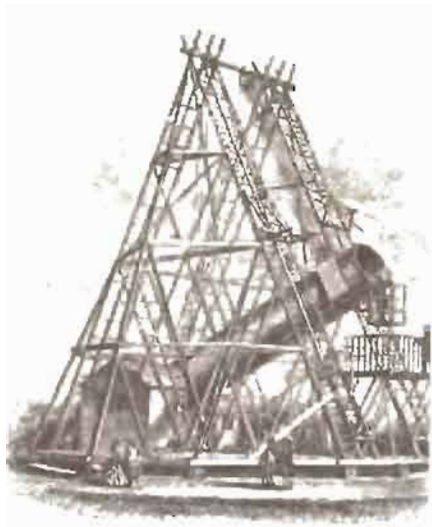


Шотландский математик Джеймс Грегори (1638—1675) (Коллекция Грейнджера)

стоянии от Земли. Вместе с тем не было достаточных оснований и отвергать мысль о том, что звезды заполняют тонкую оболочку, в центре которой находится Земля. Коперник считал, что Солнце — это «Светоч Вселенной, восседающий на троне» в центре мира. Кеплер придерживался сходной точки зрения, ссылаясь на следующий эксперимент: «Если ... проткнуть в стене булавочное отверстие так, чтобы через него проникал солнечный свет, то яркость луча все равно будет превосходить яркость свечения всех звезд на безоблачном небе».

Противоположная точка зрения, согласно которой звезды — это далекие солнца, более или менее равномерно заполняющие бесконечную Вселенную, высказывалась древнегреческими философами еще в V в. до н. э., а затем была возрождена к жизни Томасом Диггсом и Джордано Бруно в XVI в. В следующем веке Гюйгенс, видоизменив «эксперимент» Кеплера, оценил расстояние до Сириуса, предположив, что его яркость такая же, как у Солнца. Как и Кеплер, Гюйгенс не смог сделать столь малого отверстия, чтобы яркость солнечного луча в темной комнате оказалась сравнимой с блеском звезды. Вместо этого он придумал простое оптическое приспособление, которое позволило получить изображение Солнца, по размерам в 30 тыс. раз превосходящее булавочное отверстие. Освещенное таким образом отверстие «создавало такую же яркость, как и Сириус». На этом основании Гюйгенс пришел к выводу, что если светимость Сириуса равна солнечной, то он должен находиться в 30 тыс. раз дальше Солнца. (На самом же деле Сириус гораздо ярче Солнца и расстояние до него много больше.)

В своих «Началах» Ньютон описывает не менее остроумный метод для определения расстояния до Сириуса, придуманный Джеймсом Грегори. Метод основан на предположении, что яркость Сириуса примерно такая же, как у планеты Сатурн. Но Сатурн светит отраженным солнечным светом, поэтому его светимость L_c равна произведению трех сомножителей: светимости Солнца L_\odot , доли солнечного света f , падающего на Сатурн, и его альбедо A (относительной доли света, отражаемого планетой). Зная расстояние от Земли до Сатурна, можно по угловому размеру планеты вычислить ее диаметр. Зная же этот диаметр и расстояние от Сатурна до Солнца, можно определить



Уильям Гершель и построенный им телескоп-рефлектор, длина трубы которого достигает 40 фут (свыше 12 м). (Фотография телескопа — из архива Бетмана, фото Гершеля предоставлено Тихоокеанским астрономическим обществом.)



Эдмонд Галлей (1656—1742) обнаружил, что «неподвижные звезды» в действительности движутся. (Коллекция Грейнджера.)

величину f . Труднее оценить величину альбедо. Предположив, что Сатурн состоит из скальных пород, Ньютон принял его альбедо равным $1/4$ (по современным данным 0,43). Третий закон Кеплера дает возможность определить относительные размеры планетных орбит, а наблюдения, проведенные французской экспедицией 1672 г. (см. гл. 2), позволили получить достаточно надежную абсолютную шкалу расстояний. Следовательно, Ньютон смог определить множитель f и таким образом оценить отношение L_c/L_\odot . Далее он следует ходу мыслей Гюйгенса. Поскольку видимые яркости Сириуса и Сатурна одинаковы, произведение Af должно быть равно квадрату отношения расстояний от них до Земли. На основании этих рассуждений Ньютон пришел к выводу, что если светимости этих небесных тел равны, то Сириус должен находиться в 100 тыс. раз дальше Солнца.

Учитывая трудности, с которыми пришлось столкнуться при расчетах как Ньютону, так и Гюйгенсу, можно считать, что их результаты согласуются удивительно хорошо. Гюйгенс сравнивал яркость освещенного отверстия в темной комнате с *воспоминанием* о яркости Сириуса ночью. И ни Ньютон, ни Гюйгенс не имели ни малейшего представления о том, какой же должна быть «разумная» оценка расстояния до Сириуса.

Чтобы выяснить, кто прав — Кеплер, считавший, что Сириус и другие звезды гораздо слабее, чем Солнце, или Гюйгенс и Ньютон, полагавшие, что Сириус имеет ту же светимость, что и Солнце, — астрономам нужно было непосредственно определить расстояние до Сириуса, не основываясь на его яркости. Единственный метод определения расстояния до объектов, свой-

ства которых абсолютно неизвестны, — измерение их параллактического смещения (см. гл. 2). Если Сириус находится на таком расстоянии, как определил Ньютон, то в течение года он должен описывать на небесной сфере эллипс с большой полуосью, равной $2''$ (см. рис. на с. 52). Во времена Ньютона астрономы, как ни пытались, не могли измерять столь малые параллаксы. (Параллаксом звезды называется большая полуось ее параллактического эллипса.) Звездный параллакс стал для астрономов XVIII в. своего рода Чашей Грааля*, и поиски ее привели к открытию трех неожиданных явлений: абберации света (Джеймс Брайлей, 1727 г. — см. гл. 5), движения «неподвижных» звезд (Эдмонд Галлей, 1718 г.) и двойных звезд (Уильям Гершель, 1803 г.). Истинное параллактическое смещение впервые было точно измерено в 1836 г. В. Я. Струве на Пулковской обсерватории близ Санкт-Петербурга.

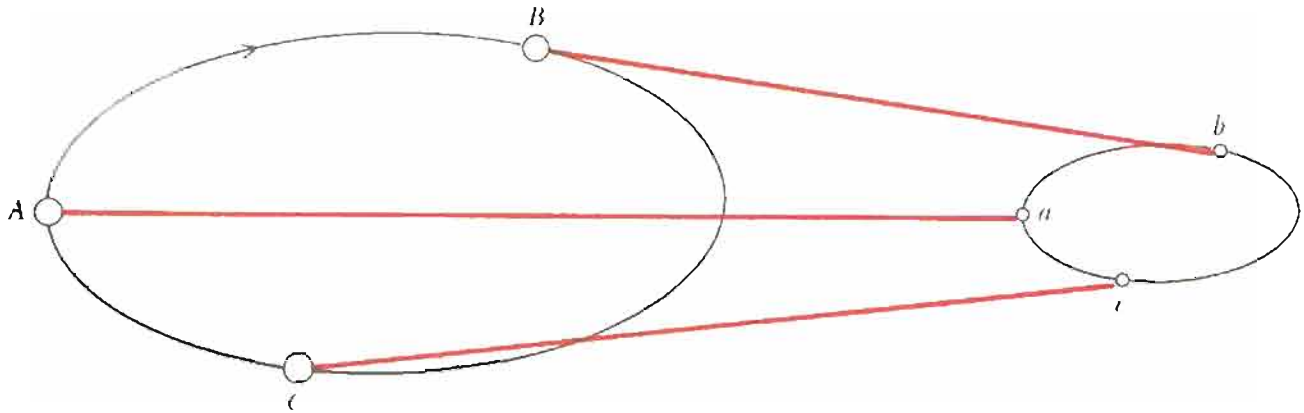
Уильям Гершель (1738—1822) был талантливым композитором и музыкантом (играл на гобое), но в 35 лет, прочтя случайно попавший ему в руки учебник астрономии, целиком посвятил себя этой науке. Несколькими годами позже у него возникла идея, как измерить звездный параллакс. Гершель заметил, что часто вблизи ярких звезд видны слабые звезды. Подобно Гюйгенсу и Ньютону, Гершель полагал, что все звезды имеют одинаковую светимость. В таком случае яркая звезда в тесной паре должна находиться гораздо ближе к нам, чем слабая, и, следовательно, иметь гораздо больший параллакс. Исходя из этих соображений, Гершель ожидал, что угловое расстояние между компонентами такой пары будет изменяться с периодом, в точности равным одному году (см. рис. на с. 115), и если ему удастся обнаружить подобное изменение, то он сможет измерить параллакс яркой звезды.

За 1782—1784 гг. Гершель измерил угловое расстояние между компонентами примерно 700 двойных звезд. Затем он заново измерил те же расстояния и в нескольких случаях обнаружил изменения, однако ни одно из них нельзя было интерпретировать как параллактическое смещение. И только в 1803 г. Гершель понял, что обнаружил нечто более интересное, а именно орбитальное движение. Оказалось, что в большинстве исследованных двойных звезд их компоненты не удалены друг от друга на громадные расстояния и лишь случайно видны на небе неподалеку друг от друга; на самом деле они представляют собой связанные гравитационным взаимодействием пары звезд (так называемые физические пары), компоненты которых движутся вокруг общего центра масс в соответствии с законами Ньютона.

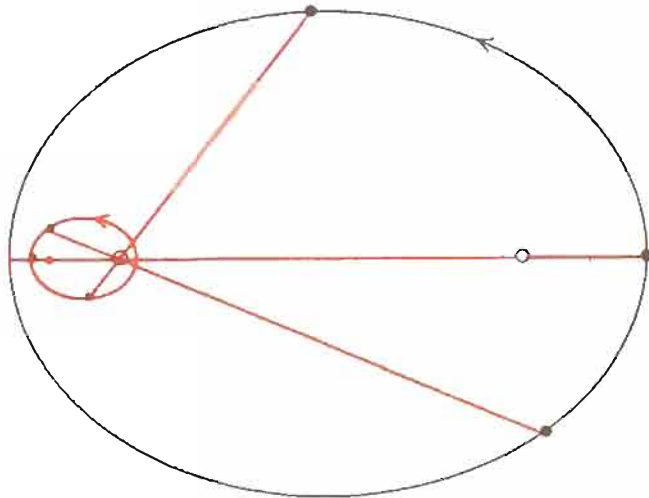
Открытие Гершеля имело несколько важных следствий. Прежде всего, оно впервые продемонстрировало, что ньютоновский закон тяготения справедлив и за пределами Солнечной системы. Стало также ясно, что Ньютон и Гюйгенс ошибались, полагая, что все звезды имеют ту же светимость, что и Солнце: оказалось, что яркий компонент пары может быть более чем в сто раз ярче своего компаньона. Наблюдения дали основание предположить (и впоследствии это предположение подтвердилось), что двойные звезды — широко распространенное явление. И наконец, самое главное: наблюдения двойных звезд позволили непосредственным образом определять массы звезд, опираясь на теорию Ньютона.

Используемый при этом метод на удивление прост и изящен. Рассмотрим две взаимодействующие массы M_1 и M_2 в системе отсчета, связанной с центром масс системы. Радиусы-векторы масс в этом случае удовлетворяют соот-

* Чаша Грааля (или просто Грааль) — чаша с кровью Христа, которую, согласно одному из вариантов библейской мифологии, собрал Иосиф Аримафейский, снявший с креста тело распятого Христа. Настойчивые и безрезультатные поиски этого талисмана, обладавшего чудодейственными свойствами, составляют сюжет ряда средневековых легенд. — *Прим. перев.*



Если две звезды, видимые на небе недалеко друг от друга, удалены от Земли на различные расстояния, то их параллактические эллипсы отличаются по размерам. Следовательно, угловое расстояние между компонентами звездной пары периодически изменяется; период изменения равен одному году.



Каждый компонент двойной звезды при своем движении описывает кеплеровский эллипс; в общем фокусе эллипсов находится центр масс системы. Относительная орбита (орбита одной звезды относительно другой) также представляет собой кеплеровский эллипс.

ношению $M_1 r_1 + M_2 r_2 = 0$, откуда следует, что векторы r_1 , $-r_2$ и $r_{12} = r_1 - r_2$ (т. е. радиус-вектор, проведенный от второй звезды к первой) параллельны друг другу и, кроме того,

$$r_1/r_2 = M_2/M_1, \quad r_1/r_{12} = \frac{M_2}{M_1 + M_2},$$

$$r_2/r_{12} = \frac{M_1}{M_1 + M_2}.$$

На этом основании уравнение

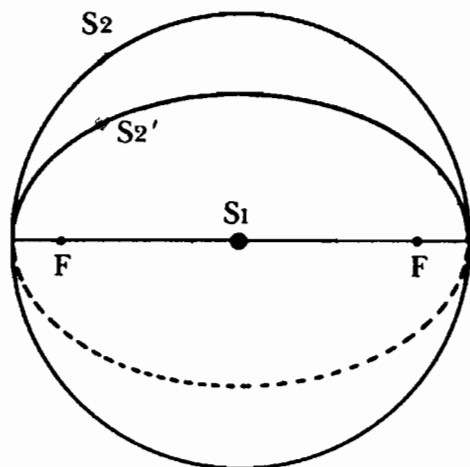
$$a_1 = -M_2 r_{12} / r_{12}^3, \tag{4.1}$$

гласящее, что ускорение звезды 1, обусловленное полем тяготения звезды 2, можно преобразовать тремя следующими способами:

$$a_1 = -\frac{M_2' r_1}{r_1^3}, \quad a_2 = -\frac{M_1' r_2}{r_2^3}, \tag{4.2}$$

$$a_{12} = -\frac{(M_1 + M_2) r_{12}}{r_{12}^3},$$

где $a_{12} = a_1 - a_2$ — ускорение звезды 1 относительно звезды 2, $M_2' = M_2^3 / (M_1 + M_2)^2$ и $M_1' = M_1^3 / (M_1 + M_2)^2$. Каждое из трех уравнений (4.2) имеет вид, полностью аналогичный виду уравнения, которое описывает дви-



Звезда S_2 движется по круговой орбите относительно звезды S_1 . Если смотреть в направлении, не перпендикулярном плоскости орбиты, то орбита звезды выглядит как эллипс, но S_1 остается в центре видимой орбиты, а не в фокусе эллипса. Это обстоятельство позволяет отличить искаженную проекцией круговую орбиту от эллиптической.

жение частицы в поле тяготения *неподвижной* точечной массы. Это означает, что и движение звезд подчиняется законам Кеплера. Из первых двух соотношений следует, что обе звезды движутся по эллипсам, в общем фокусе которых находится центр масс, а радиусы-векторы, проведенные из центра масс к каждой из звезд, описывают равные площади за равные интервалы времени. Третье из соотношений (4.2) свидетельствует, что и *относительная орбита* (т. е. орбита первой звезды относительно второй или второй относительно первой) также представляет собой эллипс, а радиус-вектор, соединяющий звезды, описывает равные площади за равные интервалы времени. Орбитальный период во всех трех случаях, естественно, одинаков, и его величину нетрудно найти из третьего закона Кеплера в его более общей форме, полученной Ньютоном [см. (3.22)]:

$$(2\pi/T)^2 = M_2'/a_1^3 = M_1'/a_2^3 = (M_1 + M_2)/a^3, \quad (4.3)$$

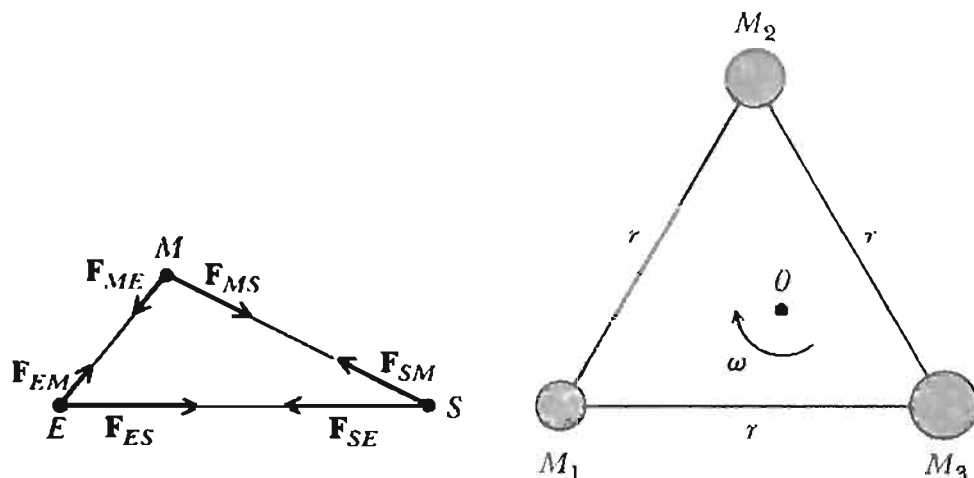
где a_1 , a_2 и a_3 — большие полуоси соответствующих эллипсов (не путать с обозначением ускорения!). Полуоси эллипсов относятся так же, как радиусы-векторы:

$$a_1/a_2 = M_2/M_1, \quad a_1/a = M_2/(M_2 + M_1).$$

С помощью уравнения (4.3) можно оценить суммы масс звезд $M_1 + M_2$, если только определить период T (что легко сделать) и большую полуось a (что сделать значительно труднее). Чтобы перейти от непосредственно измеряемого углового расстояния между компонентами двойной звезды к линейному расстоянию, необходимо знать расстояние до двойной звезды. При этом нужно иметь в виду, что если плоскость орбиты звезд не перпендикулярна лучу зрения, то мы наблюдаем не истинную ее форму, а проекцию. Проекция эллипса на плоскость также является эллипсом, но его большая полуось, вообще говоря, меньше, чем у исходного эллипса. К счастью, наклон плоскости звездной орбиты приводит и к искажению другого рода: происходит смещение опорной звезды из фокуса эллипса. Например, если относительная орбита имеет форму окружности, то ее проекция представляет собой эллипс, в центре которого расположена опорная звезда. Измерив смещение звезды относительно фокуса, можно определить величину наклона плоскости звездной орбиты к лучу зрения и восстановить истинную форму относительной орбиты.

Тройные системы

Уравнения, описывающие движение трех тел, связанных гравитационным взаимодействием, внешне столь же просты, как и для двух тел. Ускорение



каждого тела обусловлено гравитационным полем остальных двух тел, как показано на левом рисунке. Однако — за исключением одного специального случая — само движение этих тел очень сложно. На протяжении двух столетий после выхода в свет ньютоновских «Начал» математики пытались найти точное решение уравнений, описывающих данную задачу. В процессе этого были разработаны мощные математические методы, которые впоследствии нашли широкое применение в небесной механике и квантовой теории, но решить задачу трех тел так и не удалось. И только в конце XIX в. Х. Брунс и А. Пуанкаре доказали, что решение — в том виде, в каком его искали ранее, — вообще не существует.

Точное и устойчивое решение задачи трех тел возможно лишь в случае, изображенном на правом рисунке, когда три тела произвольной массы лежат в вершинах равностороннего треугольника, вращающегося вокруг центра масс данной системы тел с постоянной угловой скоростью $\omega (= 2\pi/T)$. Величина ω определяется по формуле, сходной с ньютоновской формой третьего закона Кеплера: $\omega^2 = M/r^3$, где M — суммарная масса трех тел. Указанное решение задачи трех тел было найдено французским математиком Жозефом Луи Лагранжем (1736—1813). Пример рассмотренного Лагранжем вращающегося равностороннего треугольника реально существует в Солнечной системе: Солнце, Юпитер и группа малых планет (астероидов), называемых Троянцами, лежат в вершинах вращающегося равностороннего треугольника, как это изображено на рисунке.

Невозможность точного решения задачи трех тел (за исключением одного частного случая) поставила астрономов перед альтернативой: использовать точные численные методы для решения уравнений движения или довольствоваться приближенными методами. Как правило, эти подходы взаимно дополняют друг друга. В наши дни, пользуясь мощным компьютером, мы можем предсказать движение трех взаимодействующих тел на достаточно долгий срок. Подобного рода расчеты, однако, не дают возможности исследовать характер движения: они *описывают* его, что является необходимым первым шагом, но еще не позволяют *понять*.

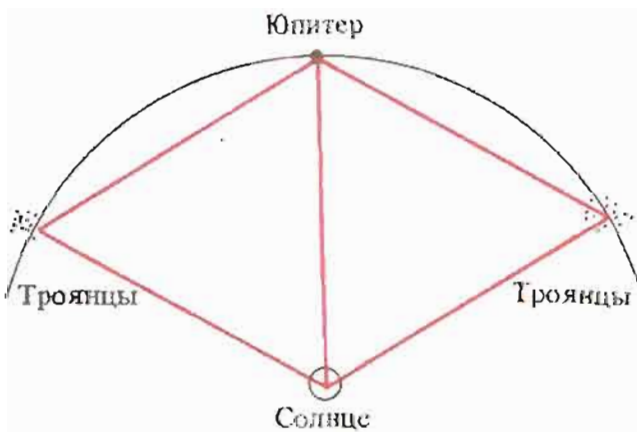
Английский физик-теоретик Поль Дирак как-то заметил, что приближенные методы лучше всего работают, когда исследуемое движение можно разложить на две части, одна из которых «простая», а другая — «малая». Рассмотрим тройную систему, состоящую из Солнца, Земли и Луны. *Простая* часть движения включает несколько различных компонентов: движение Земли вокруг Солнца, движение Луны вокруг Земли (описанные еще Кеплером) и вращение Земли вокруг своей оси, направление которой остается неизменным. Малая часть движения учитывает следующие явления.



Анри Пуанкаре (1854—1912) — возможно, самый выдающийся и разносторонний математик своего времени (Коллекция Грейнджера)



Жозеф Луи Лагранж (1736—1813) придал теории Ньютона более общую форму, сделав тем самым очевидной параллель между поступательным движением, импульсом и силой, с одной стороны, и вращательным движением, угловым моментом и моментом силы — с другой. (Коллекция Грейнджера.)



Солнце, Юпитер и группа астероидов, именуемых Троянцами, образуют вершины вращающегося лагранжева равностороннего треугольника.

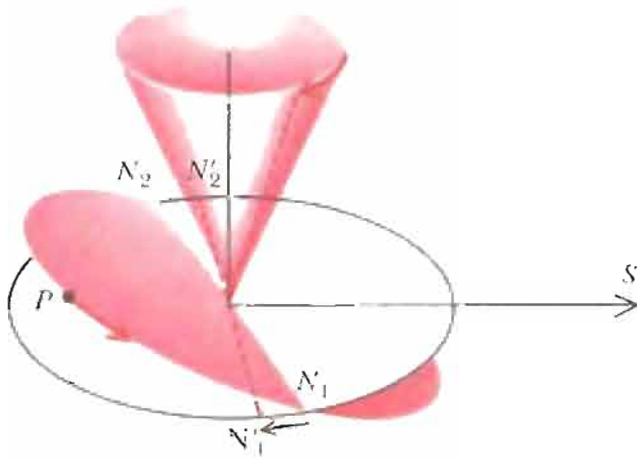
1. Уровень земных морей и океанов, а также атмосфера поднимаются и опускаются с периодом, равным половине лунных суток.

2. Лунный месяц примерно на час длиннее, чем это предсказывает формула $(2\pi/T)^2 = M/a^3$, где M — масса Земли, a — большая полуось лунной орбиты.

3. Точки, в которых орбита Луны пересекает плоскость земной орбиты (узлы лунной орбиты), движутся назад вдоль орбиты с периодом 18,6 лет (см. левый из приведенных далее рисунков).

4. Большая ось лунной орбиты вращается в прямом направлении (т. е. в направлении орбитального движения Луны) с периодом, немного меньшим 9 лет.

5. Направление оси вращения Земли не является абсолютно неизменным: ось прецессирует относительно перпендикуляра к плоскости земной орбиты



Прецессия лунных узлов под действием вертикальной составляющей приливного ускорения (*вверху*). Приливное ускорение, действующее со стороны Луны и Солнца на экваториальный выступ и «недостающую массу» на земных полюсах, приводит к прецессии земной оси относительно перпендикулярного плоскости земной орбиты, с периодом около 26 тыс. лет

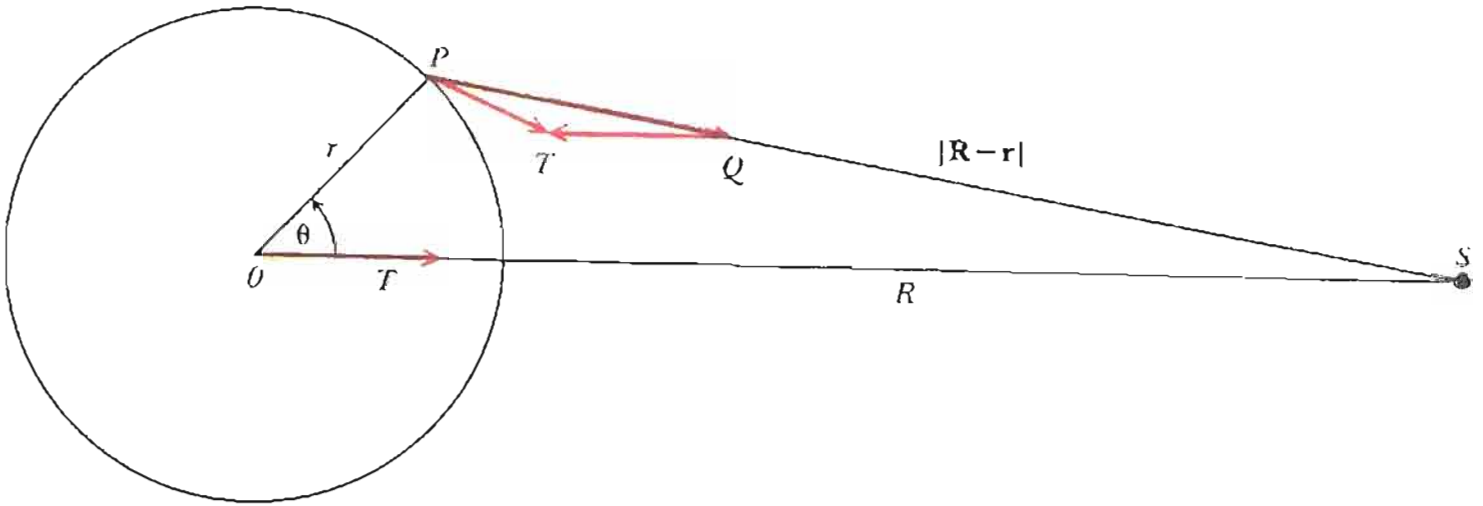


в направлении, обратном вращению Земли, с периодом 26 тыс. лет (см. правый рисунок).

Все эти эффекты малы. Каждый из них обусловлен так называемым *дифференциальным*, или *приливым*, гравитационным притяжением. В третьей главе мы видели, что с точки зрения наблюдателя, движущегося вместе с центром масс, это притяжение компенсируется ускорением центра масс Земли, обусловленным совместным действием притяжения Солнца и Луны. Свободно падающий наблюдатель или космонавт, находящийся в кабине невращающегося вокруг своей оси космического корабля с выключенным двигателем, не ощущает гравитационного ускорения. Однако компенсация бывает полной лишь в точке центра масс. Во всех остальных точках имеется остаточное ускорение, которое и обуславливает приливы в океане и атмосфере Земли, добавляет час к лунному месяцу, приводит к вращению большой оси лунной орбиты в прямом направлении, а линии узлов N_1N_2 — в обратном, заставляет земную ось описывать каждые 26 тыс. лет слегка колеблющийся конус. Это остаточное ускорение мешает слиться воедино бесчисленным крохотным частицам, образующим кольца Сатурна, Юпитера и Урана. Именно объяснение этих разнообразных явлений наиболее впечатляюще демонстрирует широту применимости и мощь теории тяготения Ньютона. Законы Кеплера дают избыточно определенное, но не слишком точное описание движения Луны и планет. Теория Ньютона не только позволяет вывести эти законы в несколько более общей форме из простого математического соотношения, определяющего гравитационное ускорение, но и показывает, что на основе того же простого соотношения можно объяснить как с качественной, так и с количественной точки зрения множество других явлений, казалось бы, не связанных между собой.

Приливное ускорение

Приливное ускорение, испытываемое каплей воды, находящейся в точке P (см. рисунок), — это векторная разность между солнечным гравитационным ускорением в точке P и в центре Земли O . Приливное ускорение симметрично относительно



Точечная масса S создает гравитационное ускорение \vec{OT} в точке O и \vec{PQ} в точке P . Ускорения в этих точках отличаются по величине и (за исключением случая, когда точка P лежит на прямой OS) по направлению. Вектор \vec{QT} равен по величине и параллелен вектору \vec{OT} , но направлен в противоположную сторону, т. е. $\vec{QT} = -\vec{OT}$. Следовательно, дифференциальное, или приливное, ускорение, которое испытывает частица в точке P относительно точки O (т. е. относительно центра масс системы, к которой принадлежит частица), изображается вектором $\vec{PQ} - \vec{OT} = \vec{PQ} + \vec{QT} = \vec{PT}$. Приливное ускорение симметрично относительно линии OS , даже если отношение PO/PS значительно. Если это отношение много меньше единицы, приливное ускорение также симметрично относительно плоскости, проходящей через точку O под прямым углом к линии OS . Применительно к теме нашей книги точки O , P и S могут означать следующее: а) O — центр Земли, P — частица на поверхности Земли, S — Луна или Солнце; б) O — центр масс системы Земля — Луна, P — частица, обращающаяся вокруг точки O по орбите Луны, S — Солнце; в) O — центр гипотетического спутника Сатурна, P — частица на поверхности этого спутника, S — центр Сатурна.

линии OS ; это означает, что картина приливного ускорения, изображенная далее на рисунке (с. 122), будет точно такой же в любой плоскости, проходящей через прямую OS . Характер приливного ускорения также симметричен относительно плоскости, перпендикулярной OS и проходящей через точку O : ускорение по одну сторону от этой плоскости представляет собой зеркальное отражение ускорения по другую сторону плоскости. Радиальная и тангенциальная составляющие приливного ускорения обладают различной симметрией и показаны на рисунке по отдельности (вместе с результирующим вектором). Красная линия, радиальное расстояние которой от окружности пропорционально направленной вдоль радиуса составляющей приливного ускорения, очерчивает фигуру *равновесного прилива*, который бы имел место в глубоком море постоянной глубины в отсутствие трения. Из рисунка видно, что приливное ускорение в точке P , радиус-вектор которой относительно точки O обозначен r , представляет собой разность между значениями гравитационного ускорения в точках P и O , обусловленного тяготением массы M , расположенной в точке S (ее радиус-вектор обозначен через R):

$$\mathbf{a} = M \left(\frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{R}}{R^3} \right) = MR \left(\frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3} - \frac{1}{R^3} \right) - \frac{Mr}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3}.$$

Предположим, что $r \ll R$. Тогда

$$|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^2 = R^2 - 2rR \cos \theta + r^2 \approx R^2 - 2rR \cos \theta,$$

и

$$|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^{-3} \approx R^{-3} \left(1 + \frac{3r}{R} \cos\theta \right).$$

Подставляя это соотношение в выражение для приливного ускорения и сохраняя лишь члены, пропорциональные r/R , получим

$$\mathbf{a} = (Mr/R^3) (3\hat{\mathbf{R}}\cos\theta - \hat{\mathbf{r}}),$$

где $\hat{\mathbf{R}}$ и $\hat{\mathbf{r}}$ — векторы единичной длины, направленные вдоль \mathbf{R} и \mathbf{r} соответственно. Пусть θ обозначает вектор единичной длины, перпендикулярный $\hat{\mathbf{r}}$, т. е. направленный тангенциально. Вектор $\hat{\mathbf{R}}$ можно разложить по радиальному и тангенциальному направлениям:

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{r}}\cos\theta - \hat{\boldsymbol{\theta}}\sin\theta,$$

откуда

$$\mathbf{a} = (Mr/R^3) [(3\cos^2\theta - 1)\hat{\mathbf{r}} - 3\sin\theta\cos\theta \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}].$$

Рассмотрим свойства приливного ускорения. На рисунке, помещенном во врезке, точки S , P и O изображают центры масс Солнца, Луны и системы Земля — Луна соответственно. Наша система отсчета, начало которой зафиксировано в точке O , свободно падает в поле тяготения Солнца. В этой системе отсчета гравитационное ускорение в точке P лунной орбиты равно (векторной) разности между значениями гравитационного ускорения (обусловленного притяжением Солнца) в точках P и O . Это остаточное, или *приливное*, ускорение мы вычислили ранее (см. врезку). Рисунок, приведенный ниже, иллюстрирует два следующих свойства приливного ускорения.

Свойство 1. Приливное ускорение симметрично относительно линии OS и почти симметрично относительно плоскости, проходящей через точку O перпендикулярно OS .

Из этого следует, что приливное ускорение направлено от центра масс, если точка P лежит на линии OS (между центром масс и Солнцем либо за центром масс на противоположном конце). Величина ускорения в обоих случаях примерно одинакова.

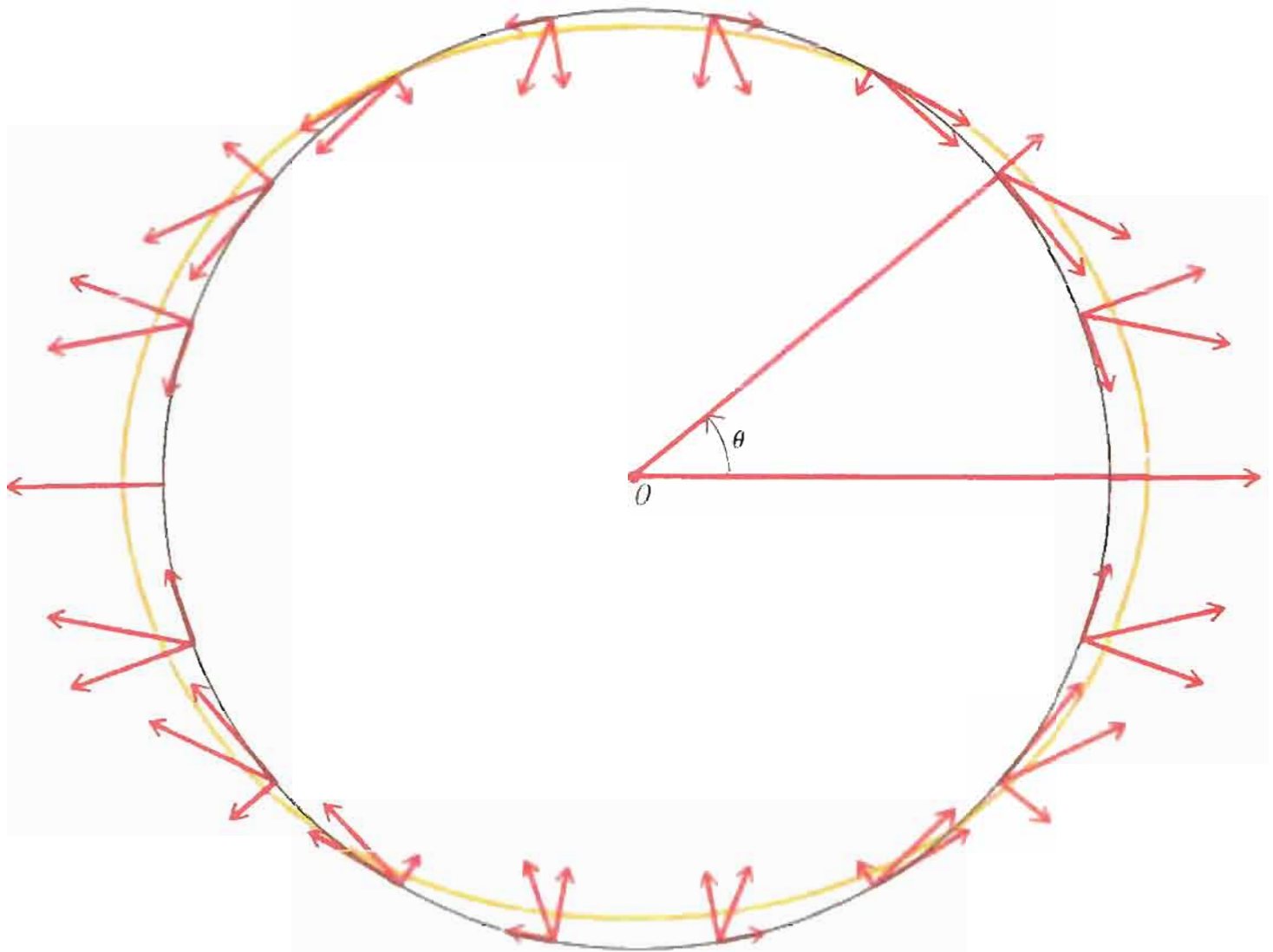
Свойство 2. Если усреднить приливное ускорение по поверхности сферы, описанной вокруг центра масс, то получится нуль; в точках, лежащих по окружности, плоскость которой проходит через линию OS , приливное ускорение преимущественно направлено наружу вдоль радиуса; если же плоскость окружности перпендикулярна линии OS , то в точках этой окружности приливное ускорение направлено внутрь, к точке O .

Два дополнительных свойства приливного ускорения, не очевидных из рисунка, вытекают из его определения (см. врезку).

Свойство 3. Величина приливного ускорения в точке P пропорциональна расстоянию OP .

Свойство 4. Величина приливного ускорения прямо пропорциональна массе Солнца и обратно пропорциональна кубу расстояния до него.

Ньютон особенно гордился тем, что его теория тяготения успешно объясняет «приливы и отливы в морях» — эта проблема занимала и ставила в тупик Кеплера и Галилея. В «Диалогах о двух главнейших системах мира: Птолемеевой и Коперниковой» Галилей излагает абсолютно неверную гипотезу океанских приливов, которые он объяснял как следствие совместного движения Земли вокруг оси и вокруг Солнца. Кеплер правильно связывал приливы с воздействием Луны, но не мог понять, как Луне удастся одинаковым образом вспучивать море независимо от того, находится ли она «под ногами» или «над головой». Теория Ньютона позволила объяснить три основные закономерности, связанные с приливами:



Приливная сила и ее радиальные и тангенциальные составляющие в характерных точках поверхности идеального сферического тела. Линия OS соединяет центр сферы с удаленной точечной массой, создающей приливное ускорение. Любая плоскость, проходящая через эту линию, пересекает сферу по окружности, одна из них (лежащая в плоскости чертежа) изображена здесь черной линией. Приливное ускорение в каждой точке окружности можно представить таким же образом, как показано на предыдущем рисунке (см. врезку) и подписи к нему. Поле приливных ускорений, изображенное здесь, описывает последнее уравнение, приведенное во врезке. Радиальная составляющая приливного ускорения (изображенная стрелкой, направленной к центру или от центра черной окружности), пропорциональна $3\cos^2\theta - 1$. Тангенциальная составляющая (изображенная стрелкой, касательной к окружности), пропорциональна величине $-3\sin\theta \cdot \cos\theta$.

Таким образом, тангенциальная составляющая равна нулю в точках $\theta = 0$ и $\theta = \pi$, где радиальная составляющая достигает максимального значения, а также в точках $\theta = \pm \pi/2$, где радиальная составляющая имеет наибольшее отрицательное (соответствующее направлению к центру) значение. Красная линия — это сечение поверхности, которую приобретает идеальная жидкая сфера под воздействием приливного ускорения, равно как и океан, глубина которого первоначально везде одинакова. Расстояние вдоль радиуса между красной и черной кривой пропорционально радиальной составляющей приливного ускорения. Таким образом, поверхность, искаженная приливным воздействием, представляет собой эллипсоид, который образуется при вращении красной кривой вокруг горизонтальной оси.

1. Ритм приливов регулируется в основном Луной, а не Солнцем. В любой заданной точке высокие и низкие приливы происходят в один и тот же момент по лунному времени.

2. На протяжении лунных суток происходит один низкий и один высокий прилив. Высота двух следующих друг за другом (через лунные сутки) высоких приливов может отличаться очень сильно.

3. Разность высот у низких и высоких приливов достигает максимума в периоды новолуния или полнолуния. Эта разность минимальна, когда Луна находится в первой или третьей четверти.

Чтобы понять, как эти закономерности связаны с указанными выше четырьмя свойствами приливного ускорения, вернемся к рисунку, помещенному во врезке, но теперь будем считать, что точка O — это центр Земли, P — капля воды (в идеализированном океане одинаковой глубины), а точка S — Луна (или Солнце).

Почему Луна, а не Солнце определяет ритм приливов? Солнце в 27 млн раз массивнее Луны, но при этом оно в 390 раз дальше от Земли. Поэтому, согласно свойству 4 (см. выше), приливное ускорение, обусловленное Луной, в $(390)^3/27\,000\,000 \approx 2^{1/4}$ раза больше.

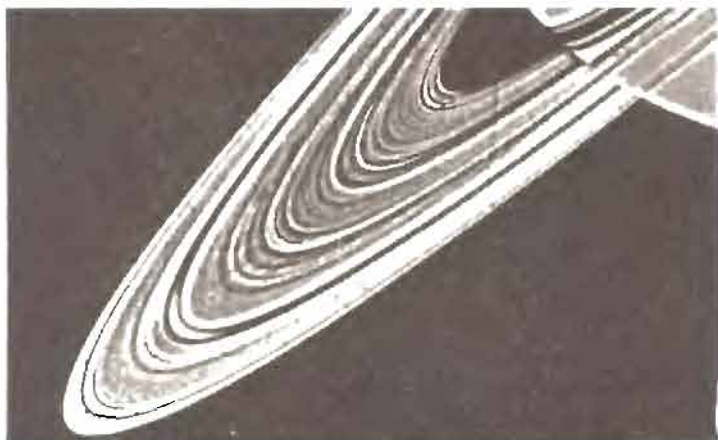
Почему продолжительность приливного цикла составляет *половину* лунных суток? И почему следующие друг за другом высокие приливы отличаются по высоте? Приливное ускорение максимально в точках, лежащих на прямой OS , и минимально — в точках, лежащих на окружности, описанной вокруг точки O в плоскости, перпендикулярной OS . Если бы ось вращения Земли была перпендикулярна плоскости чертежа, то в каждой вращающейся точке P земной поверхности на протяжении лунного дня приливное ускорение дважды имело бы два равных минимальных и два равных максимальных значения. Поскольку ось вращения Земли не перпендикулярна линии OS (и тем самым плоскости чертежа), следующие друг за другом максимумы или минимумы, как правило, различны, но временной интервал между ними все равно составляет половину лунных суток.

И наконец, почему высота «высоких» приливов меняется в зависимости от фаз Луны? Хотя в основном приливы и определяются Луной, вклад Солнца в приливное ускорение всего в два раза меньше, чем Луны. Поэтому высота прилива заметным образом зависит от относительного положения Солнца и Луны. Когда центры Солнца, Земли и Луны лежат на одной прямой (т. е. когда Луна находится в полнолунии или в новолунии), солнечные и лунные приливные ускорения усиливают друг друга, в результате чего приливы в эти периоды максимальны (так называемые сизигийные приливы). Если же Луна находится в первой или третьей четверти, то солнечное и лунное приливные ускорения направлены перпендикулярно друг к другу и результирующий прилив (так называемый квадратурный прилив) имеет минимальную амплитуду.

Точно так же, как в морях и океанах, Солнце и Луна возбуждают приливные колебания в земной атмосфере. В атмосфере солнечные приливы (с периодом, равным половине солнечных суток) имеют гораздо большую амплитуду, чем лунные (у которых период равен половине лунных суток), поскольку — совершенно случайно — резонансная частота колебаний самой атмосферы близка к 12 солнечным часам. Атмосфера ведет себя как гигантский резонатор, значительно усиливая периодические колебания, обусловленные приливным воздействием Солнца.

Луна и Солнце вызывают также приливы в земной коре. Амплитуда прилива зависит от упругости коры в рассматриваемой точке; таким образом, по величине локальной приливной деформации удастся определять упругость земной коры.

Приливное ускорение, вызванное Солнцем, влияет на продолжительность лунного месяца. В точках, расположенных на лунной орбите, радиальная составляющая приливного ускорения направлена преимущественно наружу. Это приводит к уменьшению гравитационного ускорения, обусловленного Землей. Поскольку орбита Луны по форме близка к окружности, уменьшение



Фрагмент системы колец Сатурна; составлен из двух фотографий, полученных 6 ноября 1980 г. межпланетной станцией «Вояджер-1» с расстояния 8 млн. км. Согласно теории Роша, частицы, входящие в состав колец, не могут собраться в единое большое тело под действием взаимного тяготения. (НАСА.)

гравитационного притяжения на величину f равносильно уменьшению эффективной массы Земли. Согласно уравнению (4.3), орбитальный период Луны обратно пропорционален квадратному корню из суммы масс Земли и Луны. Если массу Земли умножить на величину $(1 - f)$, где $f \ll 1$, то орбитальный период Луны возрастает в $(1 + f/2)$ раз. Величина f равна отношению между солнечным приливным ускорением, усредненным вдоль орбиты Луны, и гравитационным ускорением, обусловленным действием Земли:

$$f = \frac{1}{2} \frac{M_S r / R^3}{M_E / r^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{M_S}{M_E} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^3 = \frac{1}{2} \frac{3 \cdot 10^5}{(390)^3} = 2,5 \cdot 10^{-3}. \quad (4.4)$$

Относительное увеличение продолжительности лунного месяца, согласно нашей грубой оценке, равно $f/2 \approx 1/800$. Наблюдаемое увеличение этого параметра составляет один час, или (в относительных единицах) $1/650$. Более точные расчеты дают значение, очень близкое к наблюдаемому.

Приливные силы могут привести к разрушению естественных спутников планет. Вернемся к рисунку во врезке, но теперь точка S будет обозначать центр Сатурна, O — центр спутника Сатурна с пренебрежимо малой массой, а точка P — частицу на поверхности спутника. Сатурн создает приливное напряжение в коре своего спутника так же, как Луна создает приливное напряжение в земной коре. Поскольку с уменьшением расстояния между спутником и центром масс Сатурна приливное ускорение быстро возрастает, внутренние силы тяготения, удерживающие частицы спутника вместе, не смогут воспрепятствовать разрыву, если расстояние R станет меньше некоторого предельного значения. Попробуем оценить критическую величину R .

Приливная сила изменяет форму спутника, растягивая его вдоль радиуса, связывающего спутник с Сатурном и сжимая в перпендикулярном направлении. В равновесной ситуации спутник все время повернут одной и той же стороной к планете, в противном случае на него будет действовать меняющаяся приливная сила. Это значит, что спутник будет вращаться вокруг оси с угловой скоростью, равной угловой скорости орбитального движения $\omega = 2\pi/T = (M/R^3)^{1/2}$, где T — орбитальный период, M — масса Сатурна, а R — расстояние от спутника до центра Сатурна. Таким образом, на частицу P , находящуюся на поверхности спутника, действуют три силы: приливная сила со стороны Сатурна, гравитационное ускорение со стороны спутника и центробежная сила, обусловленная вращением спутника. Чтобы спутник удерживался как единое целое, необходимо, чтобы радиальная составляющая равнодействующей силы была направлена внутрь (т. е. к центру спутника) в каждой точке его поверхности. Наиболее просто это условие записать для двух точек пересечения линии OS с поверхностью спутника:

$$M'/r^2 - 2Mr/R^3 - \omega^2 r > 0, \quad (4.5)$$

где M' — масса спутника. Три члена в левой части этого неравенства представляют соответственно ускорение, обусловленное гравитационным притяжением спутника, приливное ускорение и центробежное ускорение (в системе отсчета, вращающейся вместе со спутником). Полагая, $\omega^2 = M/R^3$ и упрощая, получим:

$$M' / r^3 > 3M/R^3. \quad (4.6)$$

Данное неравенство говорит, что средняя плотность спутника должна в три раза превышать среднюю плотность внутри сферы радиусом R , описанной вокруг Сатурна. Если расстояние R станет меньше, чем это определяется неравенством (4.6), то равновесная конфигурация спутника нарушится.

Нельзя, однако, считать, что равновесная конфигурация определяется лишь выполнением неравенства (4.6). В равновесии результирующая гравитационных и центробежных сил должна иметь не только направленную внутрь радиальную составляющую, но и равную нулю касательную составляющую во всех точках поверхности, поскольку сила, действующая на частицы поверхности в тангенциальном направлении, ничем не компенсируется. (Действующая на частицы радиальная составляющая силы компенсируется давлением нижележащих слоев вещества спутника). Это условие гораздо более жесткое, чем то, которое отражено в неравенстве (4.6). Соответствующая теория была разработана в 1850 г. французским математиком Эдуардом Рошем. Рош доказал, что «жидкий спутник» мог бы иметь одну и только одну равновесную конфигурацию, если бы спутник находился от планеты дальше некоторой определенной величины (так называемого критического радиуса Роша). Равновесная конфигурация представляет собой эллипсоид с тремя неравными осями, наибольшая из которых расположена вдоль линии, соединяющей центры спутника и планеты. Критическое расстояние, ближе которого невозможно существование равновесной конфигурации, определяется неравенством того же вида, что и (4.6), но вместо коэффициента 3 в правой части стоит 15. Это приводит к увеличению критического расстояния в $(15/3)^{1/3} \approx 1,7$ раз, т. е. весьма заметно. Диаметр Сатурна составляет около 65 тыс. км. Для спутника с плотностью, равной средней плотности Сатурна, критический радиус Роша в 2,455 раза больше радиуса планеты, что составляет менее 150 тыс. км. Диаметр колец Сатурна (расстояние от центра планеты до внешней границы колец) равен примерно 136 тыс. км. Таким образом, кольца расположены внутри зоны, в которой вещество с плотностью, равной плотности Сатурна, не может слиться (даже за весьма длительный промежуток времени) в одно тело под действием самогравитации. Теория Роша правильно предсказывает, что кольца состоят из частиц, достаточно малых, чтобы противостоять разрушению химическими силами сцепления, т. е. силами, которые позволяют твердым телам сохранять свою форму. Менее жесткое неравенство (4.6) предсказывает, что критический радиус должен быть равен всего 88 тыс. км, т. е. величине, как раз соответствующей удаленности от планеты внутренней границы колец Сатурна. Таким образом, чтобы объяснить, почему частицы, образующие кольца Сатурна, не слились в крупные объекты, необходимо использовать более детальную теорию Роша.

Иерархия самогравитирующих систем: модель звездной Вселенной по Канту

Ньютон и Гюйгенс полагали, что звезды более или менее равномерно разбросаны в бесконечной Вселенной. Но яркие и слабые звезды, а также сливаю-



Томас Райт (1711—1786). Английский астроном-любитель и теолог; его рассуждения о природе и структуре Млечного Пути побудили Иммануила Канта заняться проблемами космогонии (Коллекция Грейнджера.)

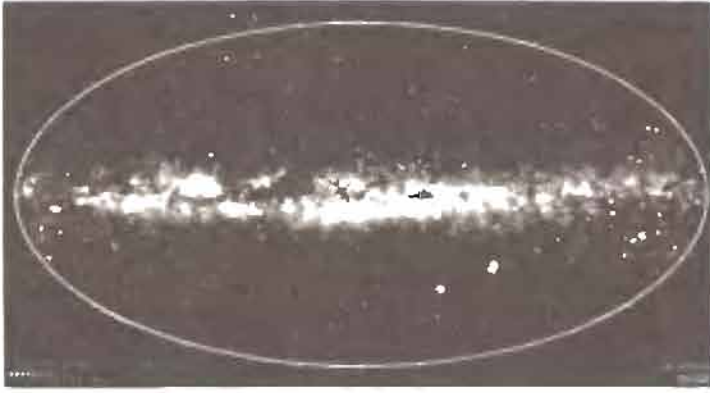


Иммануил Кант (1724—1804) — выдающийся немецкий философ. В 1755 г. он опубликовал свой известный трактат «Всеобщая естественная история и теория неба», после чего вновь вернулся к философии. Гравюра сделана с портрета работы Деблера (1791). (Коллекция Грейнджера.)

щийся воедино свет далеких звезд концентрируются на небе вдоль яркой полосы неправильной формы, которую древние римляне называли *Via Lactea* — Млечный Путь. В 1750 г. Томас Райт опубликовал книгу «Оригинальная теория, или новая гипотеза о Вселенной, основанная на законах природы и объясняющая с помощью математических принципов наиболее важные явления видимого мироздания, в частности Млечного Пути». Райт утверждал, что наблюдаемый вид Млечного Пути можно объяснить, предположив, что все звезды «движутся одинаковым образом [по круговым орбитам вокруг удаленного центра] и не отклоняются слишком далеко от некоторой плоскости, подобно планетам в их движении вокруг Солнца». Когда Иммануил Кант, в то время простой преподаватель естественных наук и математики, узнал из газеты о книге Райта, это вдохновило его разработать собственную космологическую теорию. Она была опубликована в 1755 г. под названием «Всеобщая естественная история и теория неба». (Заголовок, который Кант предложил первоначально, был более описательным: «Космогония, или Попытка вывести происхождение Вселенной, образование небесных тел и причин их движения из универсальных законов движения материи в соответствии с теорией Ньютона»).

Свой труд Кант начинает с рассуждений Райта, уточняя и комментируя их. Он отмечает упущенное Райтом обстоятельство: полоса Млечного Пути образует на небесной сфере большой круг. Поскольку звезды находятся на разном расстоянии от Солнца, это означает, что их распределение в пространстве сильно сконцентрировано к плоскости, проходящей вблизи Солнца. Тот факт, что Млечный Путь проходит вдоль большого круга на небе, позволяет исключить предложенную Райтом альтернативную модель, согласно которой звездная система представляет собой не диск, а полую сферическую оболочку.

Далее Кант пытается «выявить причину, по которой положение неподвижных звезд оказалось связанным с одной общей плоскостью». Здесь он делает шаг вперед по сравнению с Райтом. Райт провел аналогию между планетами, вращающимися вокруг Солнца, и видимыми звездами, обращаю-



Круговая панорама ночного неба, изображающая Млечный Путь. Горизонтальная линия, которая делит рисунок пополам, — это большой круг на небесной сфере. (Обсерватория Лундского университета.)

щимися вокруг удаленного центра. Кант выдвинул гипотезу о том, что Солнечная система и звездная система не только аналогичны, но и *гомологичны*, т. е. строение их подобно, потому что, во-первых, движение тел, из которых они состоят, подчиняется одним и тем же физическим законам (законам механики Ньютона и его же закону всемирного тяготения) и, во-вторых, обе системы возникли в результате однотипных процессов. Кант предположил, что все звезды, образующие Млечный Путь, вращаются вокруг удаленного центра (подобно планетам вокруг Солнца) в одном направлении по почти круговым орбитам, плоскости которых параллельны друг другу, тогда как звезды, расположенные вдали от Млечного Пути, движутся вокруг того же центра по вытянутым и сильно наклонным орбитам, как кометы вокруг Солнца. Короче говоря, Млечный Путь играет в звездной системе ту же роль, что Зодиак в Солнечной, а звезды, лежащие вне Млечного Пути, — это своего рода «кометы» звездной системы.

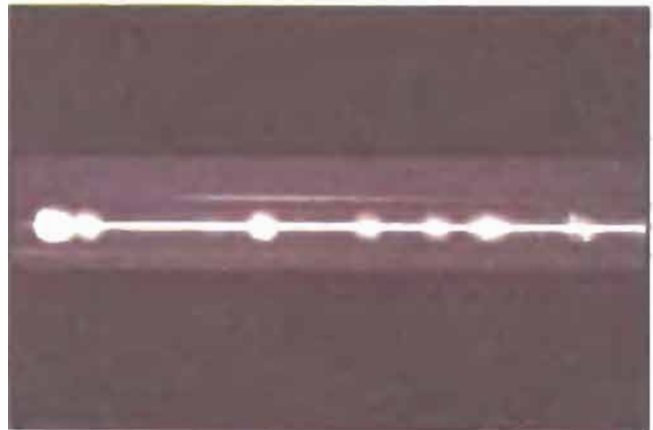
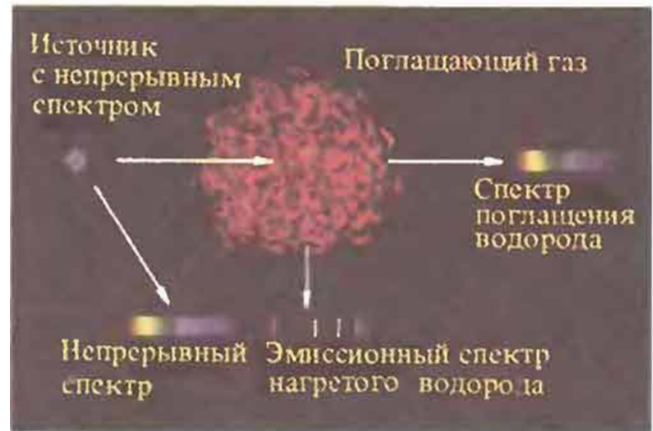
Вплоть до этого момента гипотезу Канта можно рассматривать как логичное развитие плодотворной идеи Райта на основе физики Ньютона. Но затем Кант делает новый шаг, безусловно свидетельствующий о его богатом воображении. Трудно сказать об этом лучше самого Канта:

Я подхожу теперь к той части излагаемой теории, которая, давая возвышенное представление о плане мироздания, больше всего делает эту теорию привлекательной. К этому пункту привели меня некоторые простые мысли. Их можно изложить следующим образом. Если система неподвижных звезд, расположенных около одной общей плоскости, как мы видим это в Млечном Пути, настолько удалена от нас, что даже в телескоп нельзя различить отдельные звезды, из которых она состоит, если расстояние ее от звезд Млечного Пути относительно такое же, как расстояние Солнца от нас, — словом, если такой мир неподвижных звезд рассматривается наблюдателем, находящимся вне его, с подобного неизмеримо далекого расстояния, то под малым углом зрения этот звездный мир представится глазу в виде слабо светящегося пятнышка — совершенно круглой формы, когда его плоскость обращена прямо к глазу, и эллиптической, когда его рассматривают сбоку. Слабость света, форма и заметная величина диаметра будут резко отличать такое явление, если оно имеет место, от всех звезд, наблюдаемых порознь.

Искать это явление среди наблюдений астрономов нам придется не очень долго. Оно было отчетливо замечено различными наблюдателями. Необыкновенность его вызвала удивление, о нем строили догадки, отдавая дань то диковинным фантазиям, то мнимо научным понятиям, в действительности, однако, столь же необоснованным, как и первые. Я полагаю, что это звездные туманности, или, вернее, один из видов их, о котором господин Мопертюи [«Discours sur la Figure des Astres», («Речь о форме звезд»), Paris, 1742] пишет следующее: «На темном небесном своде встречаются небольшие слабосветящиеся пятна, несколько более освещенные, чем темные пространства пустого неба, и общее у них всех то, что они представляют собой более или менее открытые эллипсы, свет которых, однако, гораздо слабее всякого иного света, наблюдаемого на небе. ([1], с. 147—148.)



Спектры звезд и газовых облаков. Свет большинства естественных источников представляет собой смесь многих монохроматических компонентов. Ньютон обнаружил, что призма позволяет разделить эти компоненты. Раскаленное твердое тело имеет непрерывный спектр, основная часть его энергии сконцентрирована в широкой полосе вблизи длины волны, величина которой обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающей поверхности. Нагретый газ излучает свет в нескольких очень узких спектральных интервалах, называемых спектральными линиями. Длины волн этих линий характеризуют излучающее вещество. Свет от нагретого твердого тела, проходя сквозь разреженный газ, лежащий между источником и наблюдателем, усиливается или ослабляется на определенных спектральных линиях, характерных для данного газа. Если газ горячее, чем излучающее тело, то излучение последнего усиливается на соответствующих (газу) длинах волн и непрерывный спектр оказывается пересеченным серией ярких спектральных линий. Если же лежащий на пути света газ холоднее излучающего тела, то в спек-



ре появляются резкие темные линии с той же длиной волны. Излучение Солнца и большинства звезд имеет непрерывный спектр, пересеченный темными линиями, которые возникают вследствие поглощения излучения во внешних слоях звезд (слева). Светящиеся газовые облака в межзвездной среде имеют дискретный спектр (справа внизу). [Обсерватория Гарвардского колледжа (левый и нижний рисунки); корпорация ММІ (в центре).]

Кант утверждал, что, если бы «светящиеся пятна» представляли собой звезды гигантских размеров, их поверхностная яркость была бы гораздо больше наблюдаемой. Но звездная система, подобная Млечному Пути, с большого расстояния выглядела бы точно так же, как одно из светящихся пятен: в виде эллипса с малой и однородной поверхностной яркостью. И вновь аргументы Канта выглядят весьма обоснованно и приводят к правильным выводам. Менее чем через сто лет английский любитель астрономии Уильям Хаггинс сконструировал первый спектроскоп, пригодный для астрономических наблюдений, и использовал его для систематического изучения звезд и туманностей. Он обнаружил, что спиральные туманности, которые Кант отождествлял с далекими звездными системами, имеют, как и предсказывал Кант, непрерывный спектр, подобный спектру обычных звезд. Спектры туманностей, которые внешне выглядели как однородные и бесструктурные пятна даже при наблюдении в наиболее мощные телескопы, наоборот, состояли из отдельных узких и ярких линий. Это были истинные туманности — протяженные облака горячего газа в нашей звездной системе Галактике.

Кант первым понял основную особенность структуры астрономической Вселенной, о которой Ньютон не имел ни малейшего представления, и которое ускользало от внимания профессиональных астрономов вплоть до XX в.: астрономическая Вселенная представляет собой иерархию самогравитирующих (связанных тяготением) систем. Спутники Солнца, планеты, сами образуют солнечные системы в миниатюре; большинство звезд имеет спутники; двойные и одиночные звезды собираются в малые группировки или более крупные скопления, которые в свою очередь объединяются в галактики; сами галактики являются членами крупномасштабной иерархии самогравитирующих систем. Сведения о массах и размерах различных типов самогравитирующих систем, входящих в иерархическую схему, представлены в таблице. Ниже приводятся фотографии отдельных членов разных систем.

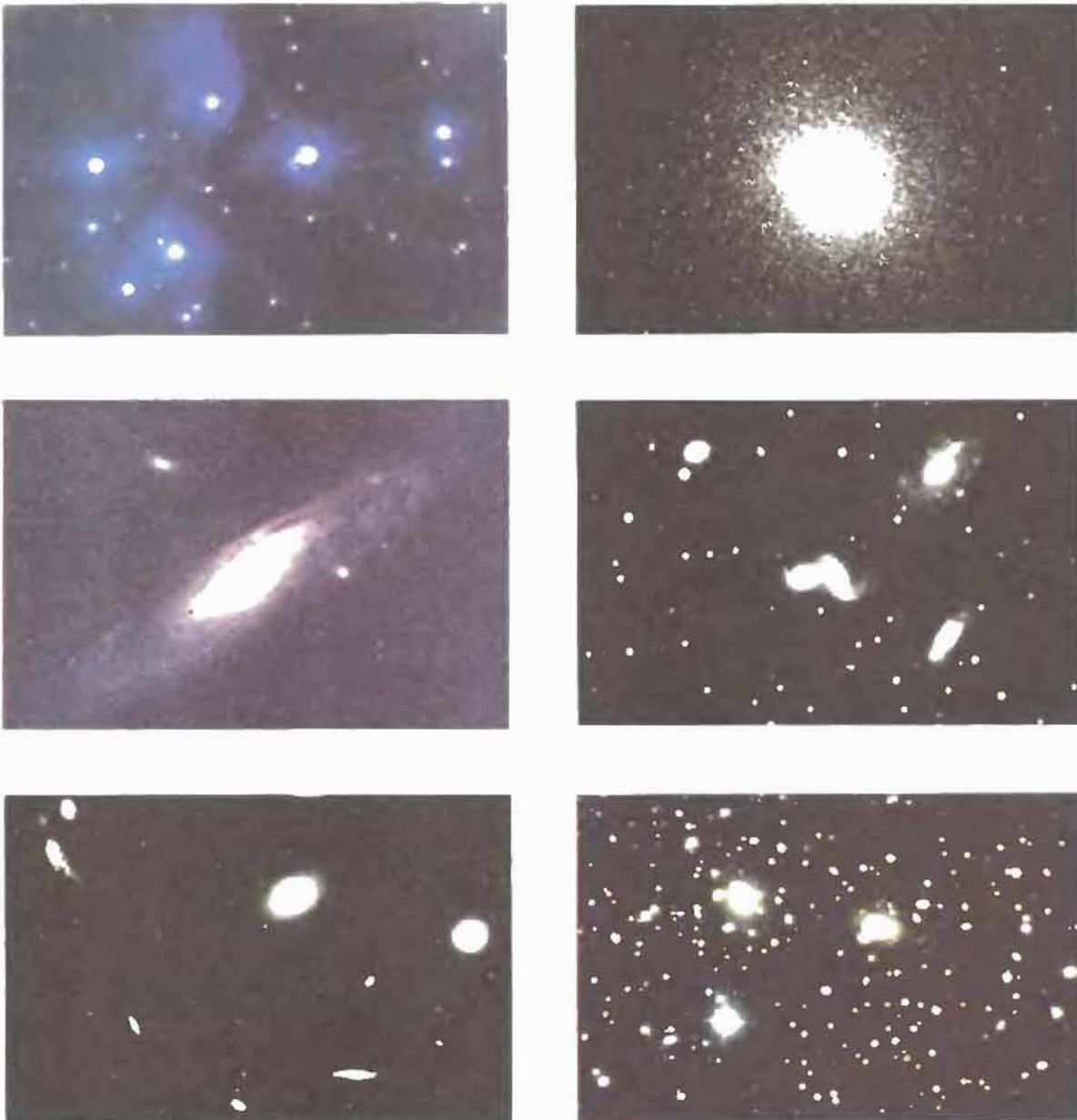
Кант, естественно, не располагал подобными сведениями. Первая оценка массы звезд (не считая Солнца) была сделана лишь через 50 лет, а первая оценка расстояния до звезд — 80 лет спустя. Тем не менее Кант пришел к выводу, что тесные скопления звезд, подобные Плеядам, представляют собой группировки звезд, связанные воедино общим гравитационным полем, что и подтвердилось впоследствии. Он заключил, что самогравитирующие системы в широком диапазоне масс и размеров должны иметь сходную структуру. Луна и Земля, Юпитер и Солнце, двойные звезды Кастор и Поллукс, Галактика* и ее соседка, туманность Андромеды, — все они могут быть описаны в первом приближении как пары взаимодействующих посредством тяготения точечных масс. Приведенная здесь таблица составлена так, что подчеркивает структурное и динамическое подобие между системами звезд и галактик.

Иерархия самогравитирующих систем

Система	Масса, M_{\odot}	Диаметр, св. годы	Система	Масса, M_{\odot}	Диаметр, св. годы
Юпитер	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-6}$			
Солнечная система Двойные звезды	1	10^{-3}	Галактика + спутники Двойные галактики	10^{12}	$3 \cdot 10^5$
Кратные звездные системы	10	$5 \cdot 10^{-3}$	Кратные галактические системы	10^{13}	$1,5 \cdot 10^6$
Богатые звездные скопления	10^6	30	Богатые скопления галактик	10^{15}	$3 \cdot 10^7$

Как и большинство крупных ученых, Кант глубоко задумывался о связи между теорией и наблюдениями. Он не только пришел к выводу, что научная космология должна быть построена на основе наблюдений, но и осознал менее очевидную и не столь общепринятую истину, а именно что только наблюдения, направляемые интуицией теоретиков, по-видимому, могут вскрыть глубокие закономерности, лежащие в основе явлений:

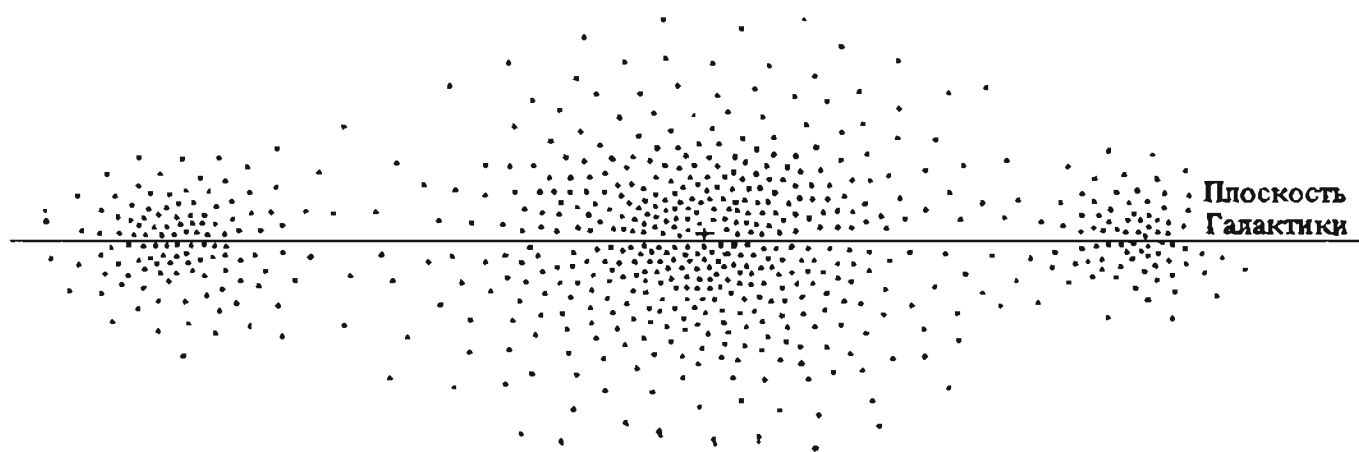
* В отличие от других галактик нашу звездную систему Млечный Путь принято писать с прописной буквы: Галактика.



Гравитационно связанные системы. Слева направо и сверху вниз: галактическое звездное скопление (Плеяды), шаровое звездное скопление (M5 в созвездии Змея), галактика (туманность) Андромеды и два ее спутника NGC 205 и NGC 22, небольшая группа галактик под названием Квинтет Стефана, скопление галактик в созвездии Дева, богатое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники (скопление Кома).

Звездные туманности в собственном смысле этого слова, а также те звезды, относительно которых идет еще спор, можно ли их так называть, надлежало бы исследовать, руководствуясь нашей теорией. Тот, кто рассматривает различные области природы целенаправленно и планомерно, открывает такие свойства, которые остаются незамеченными и скрытыми, когда наблюдения ведутся беспорядочно и бессистемно. ([1], с. 149—150).

Последнее высказывание оказалось пророческим. Нарисованная Кантом картина Вселенной могла бы стать руководством для последующих поколений астрономов-наблюдателей. Но этого не произошло. На протяжении XIX — начала XX вв. астрономы использовали результаты измерения положений звезд, их параллаксы, цвет, яркость, собственное движение и лучевую скорость, чтобы разработать модели Галактики, которые Кант отбросил бы как наивные и нефизические. В 1914 г. А. С. Эддингтон, выдающийся астроном-теоретик своего времени, суммировал в своей книге современные ему пред-



Гипотетический вид звездной системы в разрезе.



Артур Стенли Эддингтон (1882—1944); он первым среди астрономов занялся исследованием внутреннего строения звезд и динамики звездных систем. Рисунок мелом работы Уильяма Розенштейна (1928—1929). (Коллекция Грейджера.)

ставления о структуре звездной системы в виде рисунка, который мы и воспроизводим здесь. На этом чертеже Солнце (обозначено крестиком) расположено неподалеку от центра линзообразной системы, окруженной «множеством бесформенных звездных скоплений, удивительных по обилию, разнообразных по форме и численности, но лежащих неподалеку от главной плоскости». Почти до самого конца книги Эддингтон не упоминает о возможности вращения звездной системы. Еще в 1920 г. многие астрономы считали, что Галактика гораздо больше, чем любая другая звездная система, а спиральные туманности являются ее спутниками. Астрономы, придерживающиеся подобных взглядов, имели в своем распоряжении гораздо больше фактов, нежели Кант. Однако Кант хорошо понимал, что факты сами по себе ни о чем не говорят. Для интерпретации фактов астрономы вынуждены прибегать к различного рода предположениям. Так, Шепли полагал, что межзвездная среда прозрачна для излучения вне темных облаков, которые мы наблюдаем на фоне Млечного Пути (левый рис., с. 132). Впоследствии было доказано, что это предположение неверно. Как только было обнаружено явление межзвездного поглощения и покраснения излучения, факты, ранее свидетельствовавшие в пользу гелиоцентрической модели Галактики и галактоцентрической структуры Вселенной, поведали совсем другую историю — историю, написанную Кантом почти два века назад.



Непрозрачное облако пыли, частично закрывающее богатую звездами область,— туманность Конская Голова. (Фотри.)

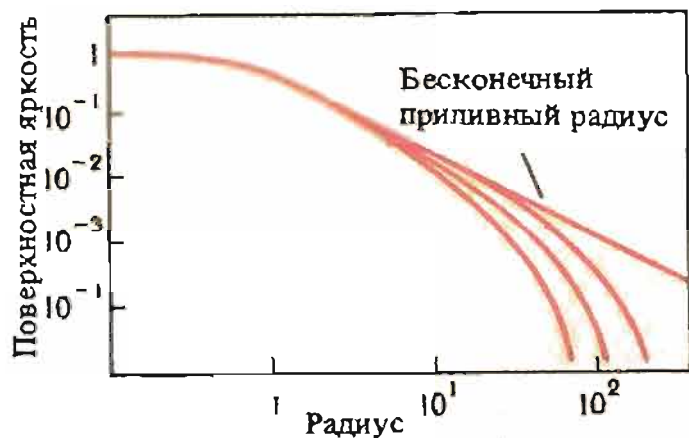


Эволюция галактик; эту напоминающую камертон диаграмму Хаббл привел в своей книге «Царство туманностей» (1936).

Стереотипность структур: два типа звездного населения

В то время как две взаимодействующие посредством гравитации частицы описывают вокруг друг друга эллипсы, три взаимодействующие частицы могут иметь множество качественно различных видов траекторий. Количество возможных конфигураций системы из 10^{11} гравитирующих частиц трудно вообразить, однако, как обнаружилось, формы галактик не отличаются особым разнообразием. В 1920—1923 гг. Эдвин Хаббл разработал простую схему для классификации галактик, которая воспроизведена на правом рисунке. Тот факт, что его схема используется сегодня столь же успешно, как и в первые годы после опубликования, свидетельствует не только об искусстве Хаббла как классификатора, но и о том, что число структурно различных типов галактик невелико.

Рассмотрим эллиптические галактики. Согласно хаббловской классификации, они отличаются друг от друга лишь одним параметром — отношением осей эллипса, вид которого галактики этого типа имеют на небе. Если изображения двух галактик с одинаковым отношением осей привести к одинаковому размеру, то они будут практически неотличимы друг от друга. Но еще более интересно то, что по своему силуэту эллиптические галактики весьма напоминают шаровые звездные скопления и богатые сфероидальные скопления галактик, подобные скоплению Кома (см. с. 130). Как это объяснить? Если система, состоящая из огромного множества взаимодействующих частиц, достаточно долгое время не испытывает никакого внешнего воздействия, то она приходит к простому, стереотипному состоянию. Так, воздух в изолированной комнате приходит к равновесному состоянию с постоянной температурой и плотностью. Аналогично самогравитирующая система, состоящая из большого числа членов, постепенно переходит в состояние, при котором температура (определяемая по средней скорости членов системы) постоянна, а плотность уменьшается от центра к периферии по закону, выведенному впервые в 1882 г. немецким математиком А. Риттером; эта зависимость представлена кривой (над которой написано «бесконечный приливный радиус»), изображенной на рисунке. Центральные области богатой, близкой к сферической системы почти точно описываются этим законом, однако при значительном удалении от центра системы наблюдаемая яркость уменьшается быстрее, чем предсказывает закон Риттера.

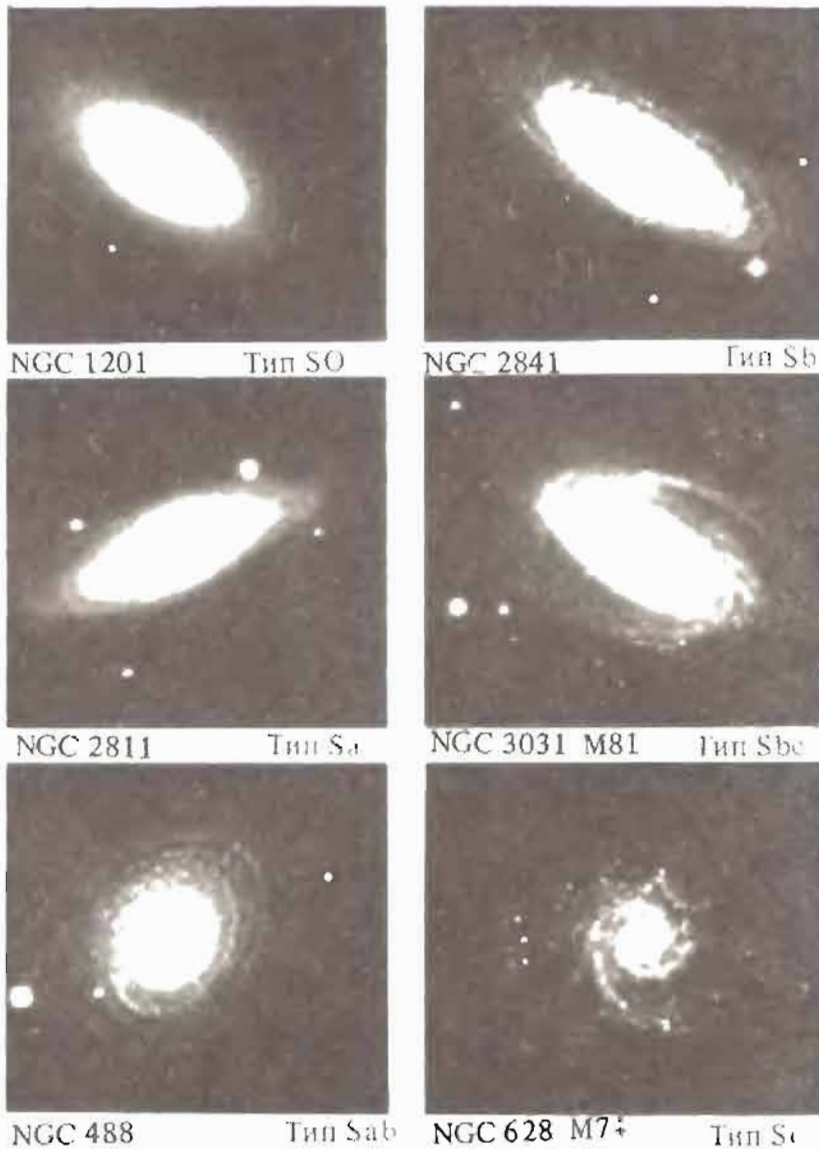


Распределение яркости вдоль богатых сферических, полностью «отрелаксировавших» звездных систем при различных значениях приливного радиуса (по расчетам Айвана Кинга). Приливным радиусом называется расстояние от центра самогравитирующей системы, на котором приливные силы, вызванные действием вещества вне системы, сравнимы с внутренним гравитационным притяжением системы. Верхняя кривая, отмеченная надписью «бесконечный приливный радиус», показывает распределение яркости в гипотетической системе с бесконечными массой и радиусом. Остальные кривые соответствуют системам с конечной величиной приливного радиуса. (Заимствовано из статьи А. Кинга, *Astronomical Journal*, vol. 71, p. 64, 1966.)

Это объясняется тем, что на определенном (легко вычисляемом) расстоянии от любой реальной системы приливные силы, действующие на каждый из членов системы извне, становятся сравнимыми по величине с силами притяжения внутри самой системы. Это расстояние называется приливным радиусом. Айван Кинг из Калифорнийского университета в Беркли рассчитал кривые изменения яркости (показанные на рисунке) систем, близких к равновесному состоянию, для различных значений приливного радиуса и сравнил эти теоретические кривые с наблюдаемым распределением яркости в звездных скоплениях и эллиптических галактиках. Предсказываемые и наблюдаемые кривые совпадают почти полностью — это означает, что сфероидальные самогравитирующие системы с большим числом членов близки к равновесному состоянию.

Структура равновесных самогравитирующих систем зависит лишь от трех параметров, не считая приливного радиуса: плотности в центре, радиального расстояния от центра, на котором плотность составляет определенную долю (скажем, одну вторую) от плотности в центре, и степени сплюснутости. Эти три параметра сами определяются тремя динамическими величинами: массой, энергией и угловым моментом. В изолированной (в динамическом смысле) системе значения этих трех величин (и, вообще говоря, только этих величин) не изменяются со временем, тогда как внутренняя структура системы может претерпевать изменения. Это означает, что сфероидальные самогравитирующие системы, включающие большое число членов, обязаны своей стереотипной структурой эволюционным процессам, в ходе которых «забывается» информация о промежуточной и начальной структурах системы, кроме той информации, которая «содержится» в сохраняющихся величинах: массе, энергии и угловом моменте. В дальнейшем мы увидим, что масса и энергия, вместе взятые, определяют центральную плотность системы и ее диаметр, тогда как степень сплюснутости системы зависит от всех трех величин.

В своем космогоническом трактате «Всеобщая естественная история и теория неба», написанном в 1755 г., Кант указывал, что Солнечная система состоит из двух типов «населения»: населения диска, включающего планеты, движущиеся по орбитам, близким к окружностям, плоскости которых почти совпадают, и населения гало, состоящего из комет, движущихся по вытянутым траекториям, наклоненным под большими углами к плоскости планетных орбит. Кант предполагал, что Галактика также состоит из *населения диска* и *населения гало*, причем свойства этих подсистем аналогичны свойствам двух типов населения Солнечной системы. В 1944 г. Вальтер Бааде, астроном из

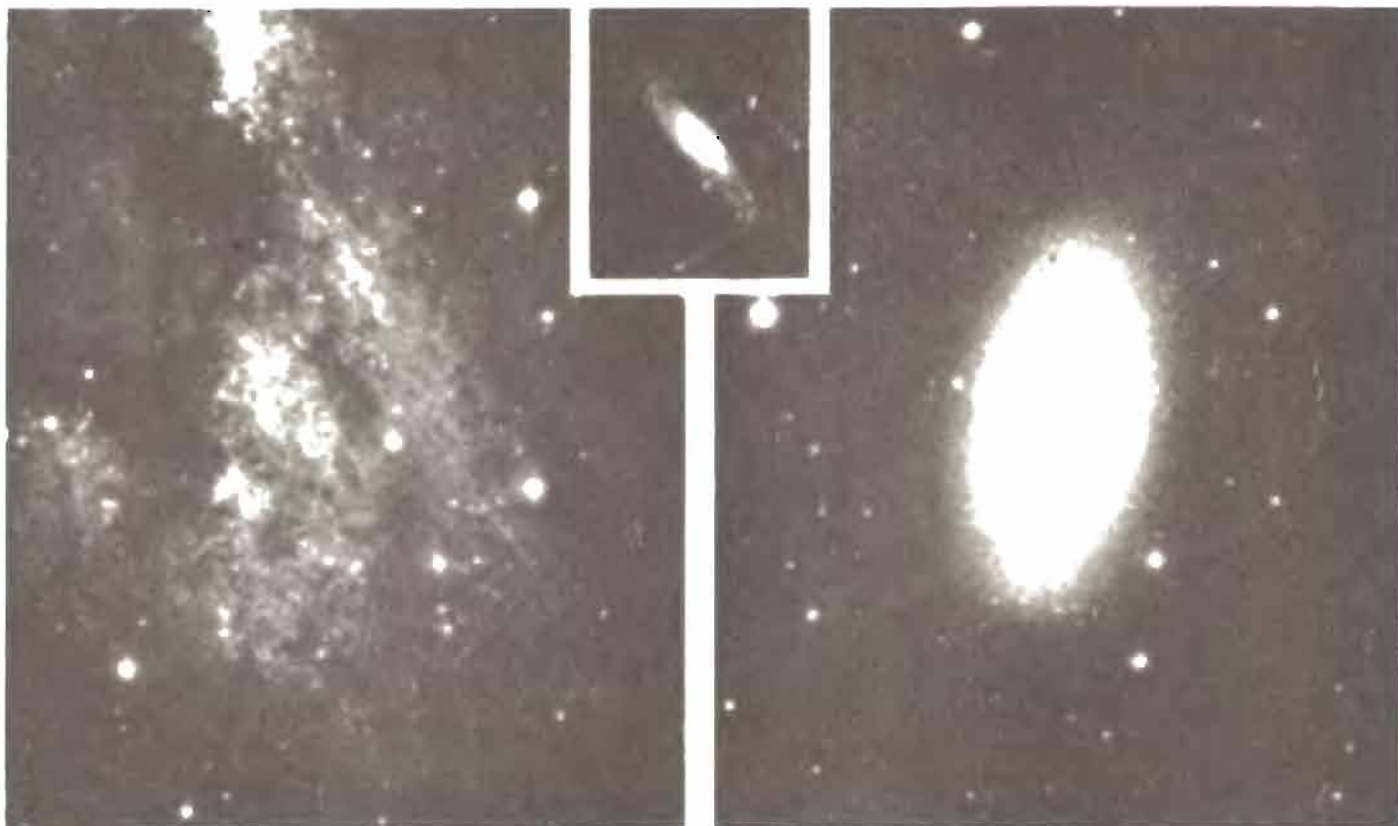


Фотографии шести галактик. Указаны номера галактик по каталогу NGC (New General Catalog) и тип по классификации Хаббла (Обсерватория им. Хейла)

обсерватории Маунт-Вилсон, выдвинул более общую и детальную версию гипотезы Канта. Он предположил, что звездные системы состоят из двух различных типов звездного населения. К *населению I типа* принадлежит дисковая составляющая спиральных галактик. В нашей Галактике к этому населению относятся Солнце и ближайшие к нему звезды. Наиболее типичными представителями этого типа населения являются: голубые горячие звезды (сверхгиганты); цефеиды (разновидность переменных звезд, о которой мы вскоре будем говорить особо) с периодом, превышающим одни сутки; звездные скопления, подобные Плеядам и Гиадам; межзвездный газ и пыль. Эти объекты обладают одинаковыми статистическими свойствами во всех спиральных галактиках.

Звезды, входящие в состав эллиптических галактик и в сфероидальную составляющую спиральных галактик, относятся к *населению II типа*. Эллиптические галактики почти в чистом виде представляют собой население II типа, тогда как спиральные галактики объединяют население двух типов: в диске преобладает население I типа, а в центральном сгущении (балдже) и гало — население II типа.

Смелое предположение Бааде было впоследствии убедительно подтверждено результатами наблюдений. Стало ясно, что звездные системы имеют две основные стереотипные структуры: сфероидальную и дисковую. Далее мы остановимся на некоторых наиболее фундаментальных физических принципах, которые помогут нам понять причину этого явления.

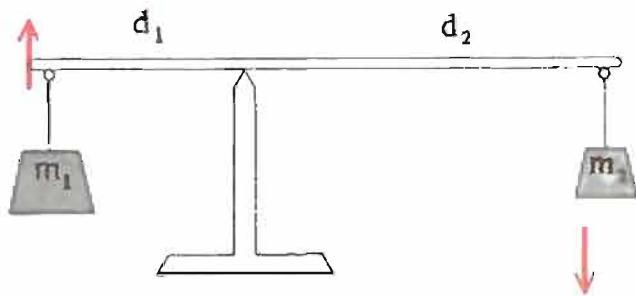


Фотография туманности Андромеды (*слева*), сделанная в синем свете; в спектральных рукавах галактики видны яркие голубые звезды, принадлежащие к населению I типа. Фотография галактики NGC 205 — спутника туманности Андромеды (*справа*), сделанная в желтом свете, позволяет увидеть звезды населения II типа, яркость которых в 100 раз меньше, чем ярких голубых звезд населения I типа. На врезке видны туманность Андромеды и галактика NGC 205 (Обсерватория им. Хейла)

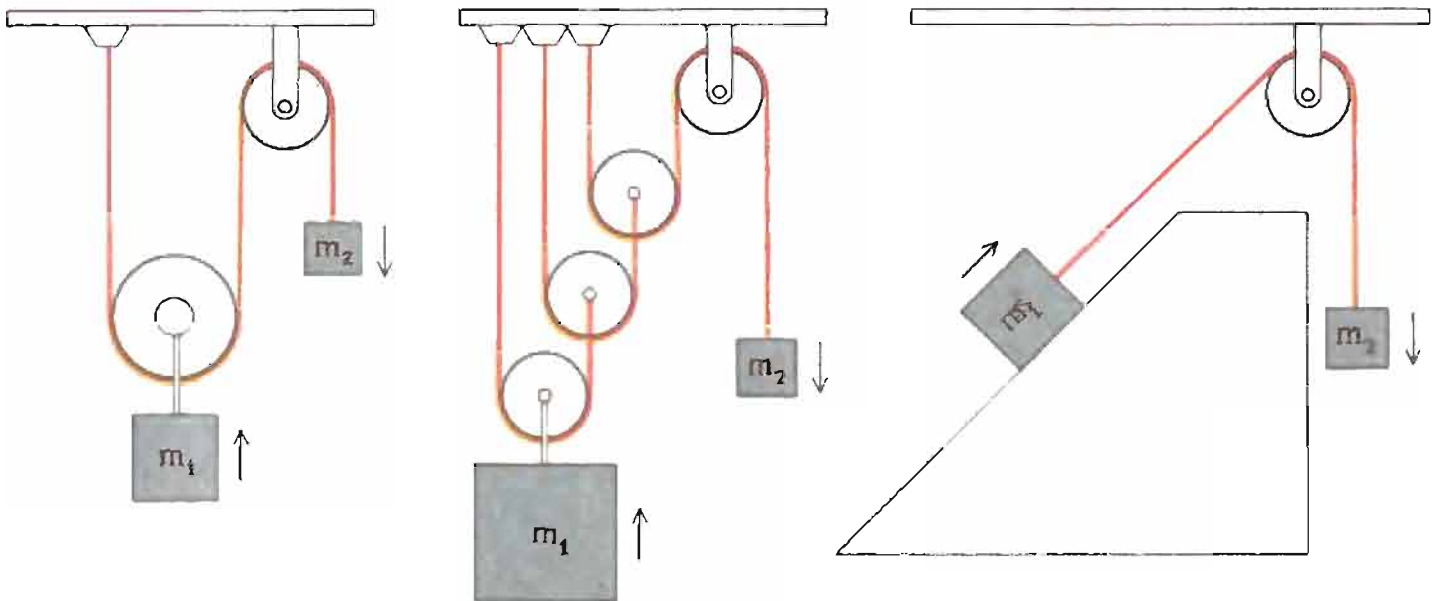
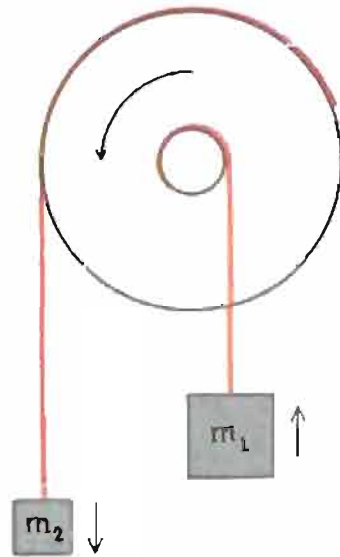
Энергия

Одна из не дошедших до нас книг Архимеда «О рычагах», по-видимому, содержала обобщенное изложение его теории простых механизмов: рычагов, различных комбинаций блоков, винтов, вóрота и т. п. Каждая из сохранившихся книг Архимеда развивает логические следствия одной-единственной идеи. На какой идее построил Архимед свою теорию простых механизмов? Вполне возможно, что это был один из самых ранних вариантов закона, который ныне именуется законом сохранения энергии.

Рассмотрим этот закон на примере рычага. Рычаг представляет собой те же неравноплечные весы (о которых говорилось в гл. 3), но работающие в «активном», а не «пассивном» режиме. Предположим, что груз массой 10 кг уравновешен грузом в 100 кг посредством невесомого стержня, опирающегося на заостренную опору. Если добавить к первому грузу песчинку, он начнет медленно опускаться, заставляя более тяжелый груз подниматься. Из верхнего левого рисунка (см. с. 136) видно, что закон статического равновесия, согласно которому точка опоры делит соединительный стержень b на части, обратно пропорциональные массам грузов, включает в себе и архимедов закон рычага: массу m_2 , расположенную на расстоянии d_2 от точки опоры рычага, можно поднять с помощью груза m_1 , расположенного по другую сторону от точки опоры на расстоянии d_1 , если $m_1 d_1 = m_2 d_2$. Этот вывод справедлив и в том случае, если при равновесии рычаг расположен не горизонтально. Следовательно, вертикальное смещение Δz_2 массы m_2 и верти-



Рычаг как неравноплечные весы «в активном режиме»



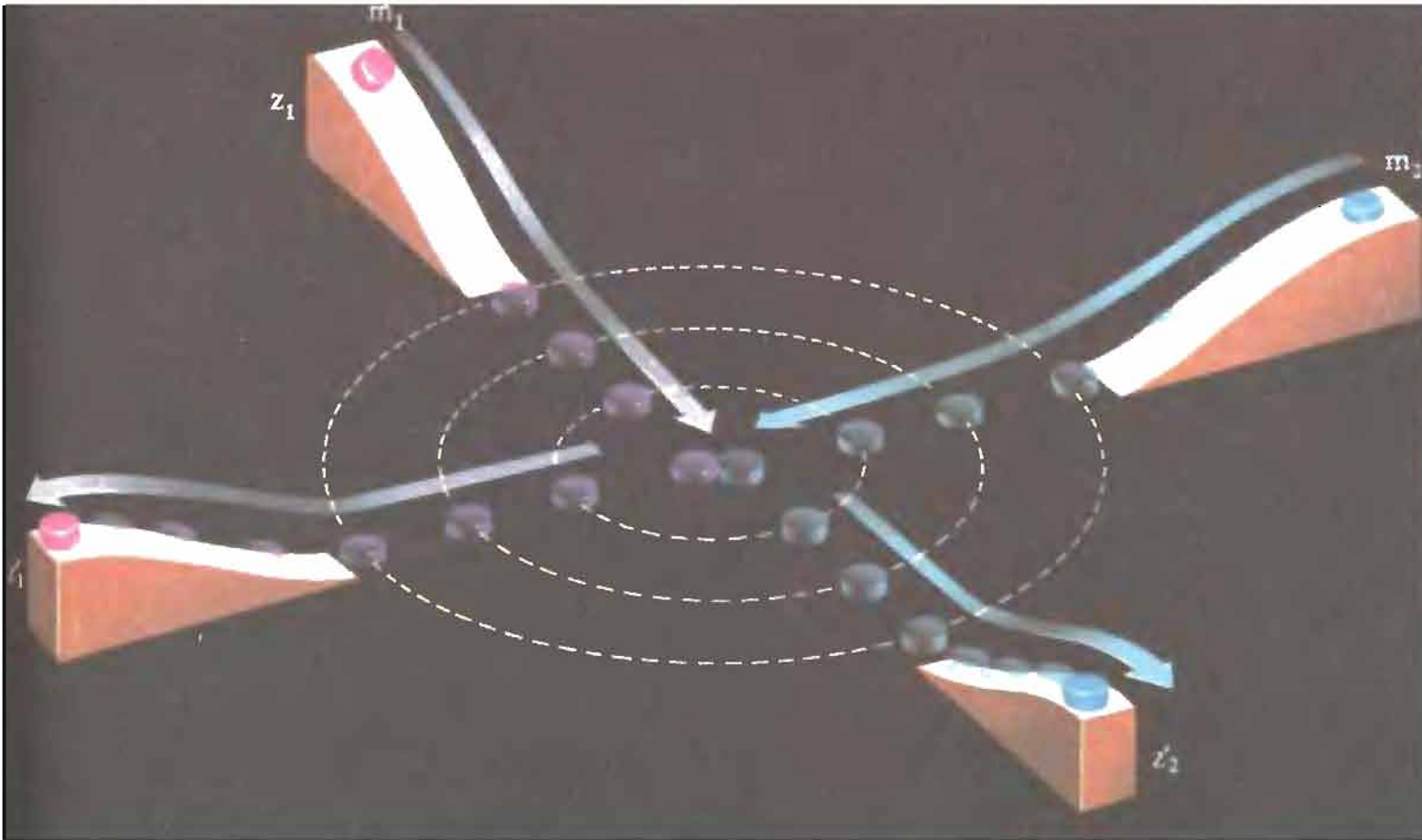
Некоторые примеры простых машин.

кальное смещение $-\Delta z_1$ массы m_1 удовлетворяют равенству $m_1 \Delta z_1 + m_2 \Delta z_2 = 0$ или

$$m_1 z_1 + m_2 z_2 = \text{const.} \quad (4.6)$$

Этому же закону следуют равновесные конфигурации простых механизмов (вверху справа и внизу): в каждом из них медленное опускание груза m_1 приводит к медленному подъему груза m_2 .

Поднимая груз, мы совершаем работу (в обыденном смысле этого слова). Более строго, работа определяется как произведение приложенной силы на перемещение, произошедшее под действием этой силы. В простом механизме мы имели дело с ситуацией, когда два груза первоначально покоятся, а затем начинают очень медленно перемещаться под влиянием крохотной песчинки, добавленной к одному из грузов. Следовательно, приложенная сила точно уравновешивает вес mg , и работа, совершаемая над одним из грузов при изменении его высоты на величину Δz , равна $mg\Delta z$. Когда эта величина отрицательна, т. е. когда груз опускается, говорят, что работу совершает груз. Из уравнения (4.6) следует, что в простых механизмах, близких к состоянию равновесия, работа, совершаемая одним из грузов, равна работе, совершенной над другим грузом.



Графическое представление мысленного эксперимента, на основании которого Гюйгенс вывел закон сохранения кинетической энергии при упругом соударении из закона сохранения потенциальной энергии, на котором основана работа рычагов, блоков и других простых машин.

Назовем величину mgz *потенциальной энергией* и обозначим ее символом U : следовательно, $U = mgz$. Если обе части уравнения (4.6) умножить на ускорение свободного падения g , то получим соотношение, которое можно сформулировать так: когда простой механизм работает вблизи состояния равновесия, сумма потенциальных энергий грузов остается постоянной:

$$m_1gz_1 + m_2gz_2 = U_1 + U_2 = \text{const.} \quad (4.7)$$

Это утверждение могло играть роль исходного принципа в архимедовой теории простых механизмов. Его обобщение на случай произвольного числа грузов, находящихся вблизи положения равновесия, вполне очевидно: суммарная потенциальная энергия грузов не изменяется при подъеме или опускании отдельных грузов.

В главе 3 мы узнали, как Галилей пришел к формуле $v^2 = 2gh$, позволяющей вычислить конечную скорость тела, падающего с постоянным ускорением g из состояния покоя с высоты h . Это соотношение можно записать в более общем виде:

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgz \equiv K + U \equiv E = \text{const.} \quad (4.8)$$

пригодном и для описания движения тел, начальная скорость которых отлична от нуля (эту скорость тело могло приобрести, падая с некоторой высоты из состояния покоя). Величина $K = mv^2/2$ называется *кинетической энергией*. Уравнение (4.8) говорит, что тело может изменять кинетическую энергию за счет потенциальной и наоборот: полная энергия $E = K + U$ тела,

например скользящего без трения в аттракционе «американские горки», не изменяется при подъемах и спусках, ускорении и замедлении.

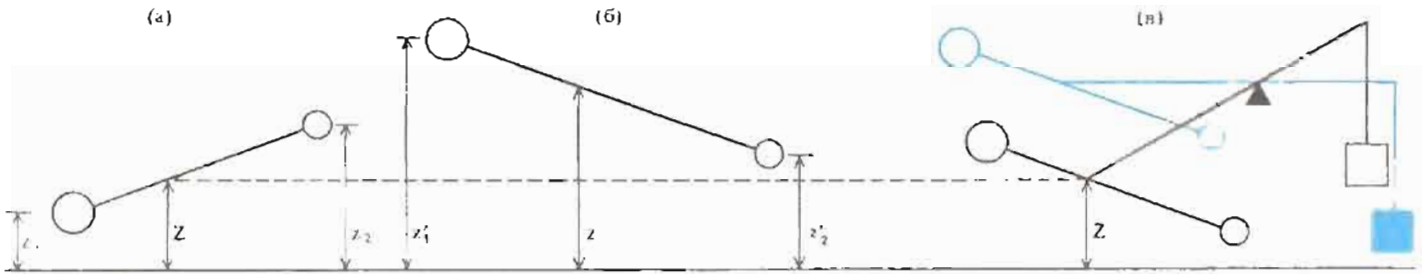
Рассмотрим следующий эксперимент, который в свое время мысленно проделал Гюйгенс (см. рисунок). Две плашки, находящиеся первоначально в состоянии покоя на высотах h_1 и h_2 соответственно, скользят без трения с наклонных плоскостей на горизонтальную поверхность стола и там сталкиваются. После столкновения каждая плашка начинает подниматься по наклонной плоскости вплоть до полной остановки на высотах h'_1 и h'_2 соответственно. Предположим, что этот эксперимент заснят на киноленту. Сможем ли мы, просматривая впоследствии заснятый ролик, определить, прокручивается пленка с начала или с конца? Иными словами, можно ли с помощью подобного эксперимента выявить различие между прямым и обратным направлениями течения времени? Конечно, та часть пленки, на которой запечатлено скатывание плашек с наклонной плоскости и подъем их на нее, полностью обратима: согласно законам механики Галилея, если тело, падая из состояния покоя с высоты h , приобретает скорость v , то, начав подъем с той же скоростью v , оно поднимается на ту же высоту. Гюйгенс предположил, что в отсутствие трения столкновение двух плашек (в описываемом эксперименте), скользящих вдоль горизонтальной плоскости, также обратимо. Далее он утверждал, что центр масс двух плашек должен быть на одной и той же высоте в начальном и конечном состояниях. Поскольку высота центра масс Z определяется формулой Архимеда $(m_1 + m_2)Z = m_1z_1 + m_2z_2$, этот вывод с формальной точки зрения идентичен уравнениям (4.6) или (4.7), выражающим условия равновесия простых механизмов: неравноплечных весов и рычага. Гюйгенс рассуждал следующим образом.

Предположим, что в начальном и конечном состояниях высота центра масс различна. Поскольку любая возможная последовательность событий обратима во времени, можно подобрать такие начальные условия, когда центр масс будет выше в конечном состоянии. Это дает возможность создать машину, действующую в замкнутом цикле, единственным результатом работы которой (с точки зрения внешнего наблюдателя) будет подъем груза на определенную высоту за каждый рабочий цикл. Для создания такой машины поступим следующим образом (см. рисунок, приведенный далее): соединим две плашки в конечном состоянии невесомым стержнем, затем точку равновесия на стержне соединим с одним концом рычага и будем использовать этот рычаг для подъема груза до тех пор, пока центр масс системы из двух плашек не опустится до высоты, равной высоте центра масс в начальном состоянии. Плашки теперь можно переместить в их начальное положение, затратив при этом ничтожно малое количество работы, и тем самым завершить цикл.

В свое время Симон Стевин (1548—1620), современник Галилея и соотечественник Гюйгенса, высказал удивительно смелую и пророческую мысль о том, что невозможно построить машину, самопроизвольно создающую и неограниченно поддерживающую движение без какого-либо воздействия извне. Гюйгенс пришел к выводу, что центр масс двух грузов должен находиться на одной и той же высоте в начальном и конечном состояниях, т. е.

$$m_1z_1 + m_2z_2 = m_1z'_1 + m_2z'_2. \quad (4.9)$$

Формально это уравнение идентично закону Архимеда, выраженному уравнением (4.6), однако оно применимо к гораздо более широкому классу физических процессов и, в частности, к анализу описанного нами эксперимента. Наконец, воспользовавшись формулой Галилея $v^2 = 2gh$, можно записать уравнение (4.9) в виде, выражающем закон сохранения кинетической энергии при упругих столкновениях:



Если бы в эксперименте, изображенном на предыдущем рисунке, центр масс двух тел не находился в начальном и конечном состоянии на одинаковой высоте (L), то можно было бы создать машину, работающую по замкнутому циклу так, что при наблюдении извне результат ее работы сводился бы к подъему груза на небольшую высоту за каждый цикл (v). Два тела соединены невесомым стержнем. Центр масс системы лежит на конце одного из плеч рычага, который используется для подъема груза и одновременно для того, чтобы вернуть центр масс на первоначальную высоту (a). После этого, затратив бесконечно малую работу, каждое тело можно вернуть на исходную высоту и начать цикл заново. Следуя Стевину, Гюйгенс постулировал, что подобное устройство — вечный двигатель — не может существовать, откуда и заключил, что центр масс в начальном и конечном состоянии должен находиться на одинаковой высоте.



Симон Стевин (1548—1620) — голландский математик, который постулировал невозможность непрерывного движения, его работа легла в основу первого варианта закона сохранения энергии, выведенного позднее Гюйгенсом (Коллекция Грейнджера)

$$\begin{aligned}
 K &\equiv K_1 + K_2 = m_1 v_1^2 / 2 + m_2 v_2^2 / 2 = \\
 &= m_1 v_1'^2 / 2 + m_2 v_2'^2 / 2 = K_1' + K_2' \equiv K'.
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Этот закон гласит, что при упругих столкновениях тела обмениваются кинетической энергией: сколько потеряет одно тело, столько же приобретет другое.

Из уравнений (4.8) и (4.9) можно получить теперь более общее соотношение:

$$E \equiv E_1 + E_2 = \text{const},
 \tag{4.11}$$

где E — полная энергия, выраженная уравнением (4.8). Это математическая запись закона, утверждающего, что сумма энергий двух тел в описанном эксперименте все время остается постоянной: при соскальзывании плашек с наклонных плоскостей, при столкновении и последующим движением вверх по наклонным плоскостям.

Потенциальная энергия частицы в поле точечной массы

Рассмотрим тело, падающее по радиусу к центру Земли. В этом случае скорость тела $v = dr/dt$, а ускорение $a = dv/dt$. Ускорение вычисляется из закона тяготения Ньютона

$$dv/dt = -M/r^2. \quad (1)$$

Умножив левую часть уравнения (1) на v , правую на $dr/dt(=v)$, в левой части получим

$$v \left(\frac{dv}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} v^2 \right),$$

а в правой

$$-\left(\frac{M}{r^2} \right) \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{r} \right).$$

Если скорости изменения двух величин равны, то сами величины отличаются на постоянную величину. Поэтому

$$v^2/2 - M/r = \text{const} \equiv E/m. \quad (2)$$

Рассмотрим теперь снаряд или спутник, движущиеся в произвольном направлении. Вместо уравнения (1) воспользуемся вторым законом Ньютона, записанным в векторной форме

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = - \frac{M\mathbf{r}}{r^3}. \quad (3)$$

который эквивалентен системе из трех скалярных уравнений

$$\begin{aligned} dv_x/dt &= -M_x/r^3, & \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{M_y}{r^3}, \\ \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{M_z}{r^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

Действуя тем же методом, что и при выводе уравнения (2), умножим левую часть первого уравнения системы (4) на v_x , а правую — на dx/dt ; во втором — соответственно на v_y и dy/dt и в третьем — на v_z и dz/dt , а затем почленно сложим полученные уравнения. Как и ранее, можно выразить правую и левую части равенства в виде производных, заключив далее, что из условия равенства производных следует, что дифференцируемые величины должны отличаться на величину, не зависящую от времени. Таким образом, мы получим уравнение, идентичное уравнению (2), но применимое в случае произвольной траектории тела, движущегося в поле тяготения точечной массы, неподвижно закрепленной в начале координат. Постоянная в уравнении (2) равна в этом случае полной энергии тела единичной массы. Если эта постоянная отрицательна, то траектория тела — кеплеровский эллипс, если равна нулю — то парабола, а если положительна, то тело будет двигаться по гиперболе.

Закон сохранения энергии (4.8), выведенный Галилеем для снарядов и тел, падающих вблизи поверхности Земли, представляет собой предельный случай закона, описывающего движение тел, расстояние которых от центра Земли изменяется произвольным образом. Этот обобщенный закон имеет тот же вид, что и уравнение (4.8), но потенциальная энергия U определяется соотношением $U = -mM/r$, где M — масса Земли, а r — расстояние от пада-

ющего тела до центра Земли (см. врезку). Рассмотрим теперь пару взаимодействующих точечных масс, ускорения которых выражаются соотношениями

$$\begin{aligned} m_1 \frac{dv_1}{dt} &= -m_1 \frac{\dot{M}_2 r_{12}}{r_{12}^3}, \\ m_2 \frac{dv_2}{dt} &= -m_2 \frac{M_1 r_{21}}{r_{12}^3}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где m_1 и m_2 — инертные массы, а M_1 и M_2 — гравитационные ($M = mG$), причем $m_1 M_2 = m_2 M_1$, а $r_{12} = r_1 - r_2 = -r_{21}$. За короткий интервал времени Δt частица 1 сместится на расстояние $v_1 \Delta t$, а частица 2 — на расстояние $v_2 \Delta t$. Смещение каждой из частиц приводит к изменению r_{12} на величину Δr_{12} . Имея это в виду, можно осуществить выкладки, аналогичные тем, что проведены на врезке; тогда получим закон сохранения энергии для данного случая:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{G m_1 m_2}{r_{12}} &\equiv \\ \equiv K_1 + K_2 + U_{12} &\equiv E = \text{const.} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Чтобы подчеркнуть симметрию взаимодействия, произведение $m_1 M_2 (= m_2 M_1)$ в полученном выражении мы записали в виде $G m_1 m_2$. Отличительная особенность уравнения (4.13) состоит в том, что потенциальная энергия $U_{12} = -G m_1 m_2 / r_{12}$ представляет собой не сумму независимых вкладов двух частиц, а единый член, отражающий взаимодействие.

Закон сохранения энергии для пары взаимодействующих частиц можно легко обобщить на случай изолированной системы с произвольным числом частиц:

$$\begin{aligned} \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 - \sum_{i < j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}} &\equiv \sum_i K_i + \sum_{i < j} U_{ij} \equiv \\ \equiv K + U + E &= \text{const.} \end{aligned} \quad (4.14)$$

где суммирование производится по всем частицам и по всем парам частиц.

Каков смысл закона сохранения энергии? Мы видели, что этот закон является следствием второго закона Ньютона и его закона всемирного тяготения. Негравитационные силы, например силы, возникающие при растяжении и сжатии пружины, также могут давать вклад в потенциальную энергию, и, рассуждая как и при выводе уравнения (4.14), можно получить более общую форму закона сохранения энергии:

$$K + U_{\text{грав}} + U_{\text{упруг}} + \dots = E = \text{const.} \quad (4.15)$$

Многообразие предполагает, что в потенциальную энергию вносят вклад и все остальные виды взаимодействия, которые имеют место в системе.

Однако закон сохранения энергии остается в силе и в более общем случае, чем описывает механика Ньютона. Например, он справедлив и тогда, когда механическая энергия переходит в тепло или электромагнитное излучение. Энергия также сохраняется в изолированных системах, подчиняющихся законам квантовой механики или частной и общей теории относительности Эйнштейна. Очевидно, что первооснова закона сохранения энергии заключена в принципах, общих для всех этих теорий. Природу этих принципов открывает нам закон сохранения кинетической энергии при упругих соударениях тел, доказанный Гюйгенсом. В своем мысленном эксперименте Гюйгенс не указывал никакого конкретного закона взаимодействия между сталкивающимися телами, подразумевая тем не менее, что в этом законе не делается различия между двумя направлениями хода времени. Это специальное условие выра-

жает то, что впоследствии получило название *принципов симметрии* (или *инвариантности*). Самый глубокий ответ, который физик может дать на вопрос: «Почему сохраняется энергия?» будет звучать так: «Потому что законы, которым подчиняются элементарные процессы, не зависят ни от того, когда произошло взаимодействие, ни от направления течения времени».

Для вывода самого первого варианта закона сохранения импульса Гюйгенс использовал другой принцип симметрии — принцип относительности равномерного движения. Его рассуждения (в несколько более общей форме) примерно таковы. Предположим, что эксперимент, о котором говорилось ранее (см. с. 137), проводится на берегу реки, причем наблюдатель находится в плывущей по реке лодке. В свое время Галилей доказал, что равномерное движение относительно, т. е. невозможно поставить такой эксперимент, который позволил бы установить, что покоится «в действительности»: лодка или берег, если только их относительное движение равномерно. Поэтому наблюдатель в лодке должен согласиться с экспериментатором на берегу, что кинетическая энергия при упругих столкновениях сохраняется. Если лодка движется со скоростью V , сталкивающиеся плашки для наблюдателя в лодке будут иметь до столкновения скорости $v_1 - V$ и $v_2 - V$, а после столкновения $v'_1 - V$ и $v'_2 - V$ соответственно. Если записать уравнение, аналогичное уравнению (4.10) и выражающее закон сохранения кинетической энергии в системе отсчета лодки, то легко видеть, что новое уравнение и уравнение (4.10) удовлетворяются одновременно (независимо от величины относительной скорости V) тогда и только тогда, когда

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2. \quad (4.16)$$

Это уравнение показывает, что суммарный импульс двух тел не меняется при упругих столкновениях. В следующей главе мы воспользуемся методом Гюйгенса для вывода обобщенной релятивистской формулы ньютоновского соотношения $p = mv$, связывающего скорость и импульс.

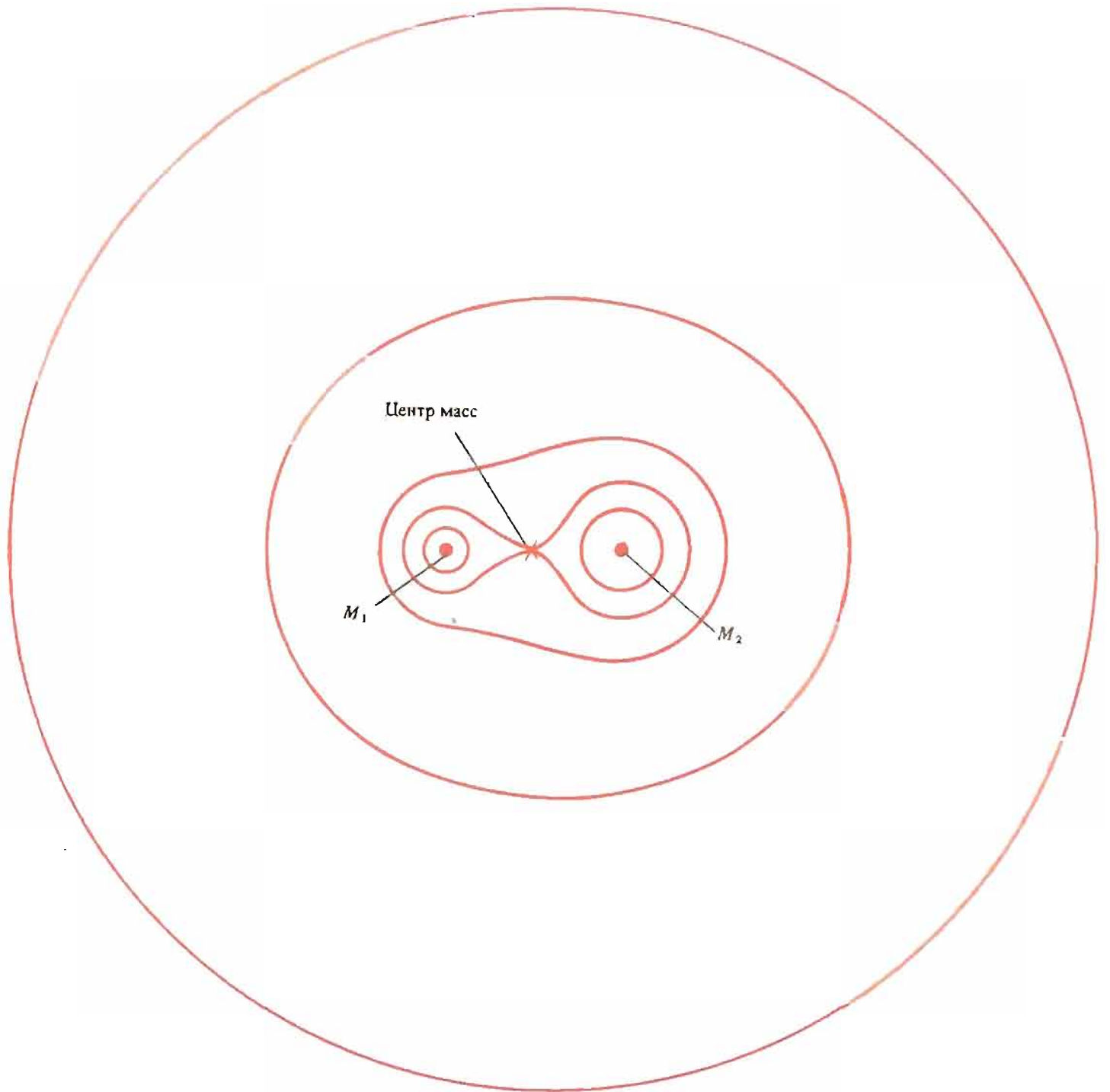
Гравитационный потенциал

В третьей главе мы видели, как с помощью понятия силовых линий можно описать величину и направление гравитационного ускорения в каждой точке пространства. Использование понятия энергии открывает нам другой способ описания гравитационного поля, более простой и глубокий по своей сути.

Поместим пробную частицу массой m в статическое гравитационное поле. Когда частица перемещается на Δr , ее потенциальная энергия *изменяется* на величину ΔU , равную работе, совершенной полем над частицей. Сила F , смещение Δr и изменение потенциальной энергии ΔU связаны между собой соотношением

$$\Delta U = -F \cdot \Delta r \cdot \cos \theta, \quad (4.17)$$

где θ — угол между направлениями силы и смещением. Предположим сначала, что частица перемещается в направлении, перпендикулярном силе ($\theta = 90^\circ$). Тогда $\Delta U = \cos \theta = 0$, т. е. смещение происходит между точками с одинаковым значением U . Другими словами, *силовые линии (которые всегда параллельны вектору силы) перпендикулярны поверхностям, на которых U постоянно* (так называемым эквипотенциальным поверхностям, или поверхностям, равного потенциала). Допустим теперь, что частица смещается вдоль силовой линии ($\theta = 0$). В этом случае из уравнения (4.17) следует, что $\Delta U = -F \Delta r$, т. е. $\Delta r = -\Delta U / F$. Поскольку Δr измеряется вдоль силовых линий, которые в свою



очередь перпендикулярны поверхностям равного потенциала, соотношение $\Delta r = -\Delta U/F$ означает, что расстояние между соседними поверхностями $U = \text{const}$ пропорционально разности ΔU между значениями U на этих поверхностях и обратно пропорционально величине F в точке с координатой r . Эта зависимость между совокупностью поверхностей $U = \text{const}$ и совокупностью силовых линий позволяет построить любую из них, если известна другая.

Поверхности с $U = \text{const}$ построить нетрудно. Как мы уже знаем, потенциальная энергия частицы, находящейся в поле другой частицы точечной массы, закрепленной в начале координат, равна $-Mm/r$, так что поверхности $U = \text{const}$ представляют собой концентрические сферы. Для двух неподвижных точечных масс M_1 и M_2 с координатами r_1 и r_2

$$U/m = -M_1/|r - r_1| - M_2/|r - r_2|.$$

Соответствующие поверхности $U = \text{const}$ изображены на приведенном здесь рисунке. В общем случае потенциал поля определяется соотношением

$$\frac{U}{m} \equiv \varphi(r) = - \sum_i \frac{M_i}{|r - r_i|},$$

а уравнение (4.17) теперь можно записать в виде

$$\varphi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r}) \equiv \Delta\varphi = - (F/m)\Delta r \cdot \cos\theta.$$

Это соотношение применимо даже тогда, когда точечные массы, создающие гравитационное поле, не являются неподвижными, но в таком случае значения $\varphi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})$ и $\varphi(\mathbf{r})$ должны соответствовать одному и тому же моменту времени. Как видно из формулы, поверхности $\varphi = \text{const}$ в каждой точке перпендикулярны силовым линиям и расстояние между поверхностями везде обратно пропорционально напряженности поля.

Величина φ называется *гравитационным потенциалом*, а поверхности $\varphi = \text{const}$ эквипотенциальными или поверхностями равного уровня. Именно такие поверхности мы проводим, например, с помощью плотницкого уровня. Тело, скользящее без трения по эквипотенциальной поверхности, движется с постоянной скоростью вдоль локально прямой линии. Иллюстрацией этого может служить принцип «горизонтальной инерции», предложенный Галилеем: тело, скользящее без трения по поверхности сферической планеты, движется вдоль большого круга с постоянной скоростью.

Угловой момент

Закон сохранения импульса гласит, что скорость центра масс изолированной системы постоянна по величине и направлению. Аналогично закон сохранения углового момента, который мы далее выведем, утверждает, что *угловой момент* изолированной системы не меняется по величине и по направлению.

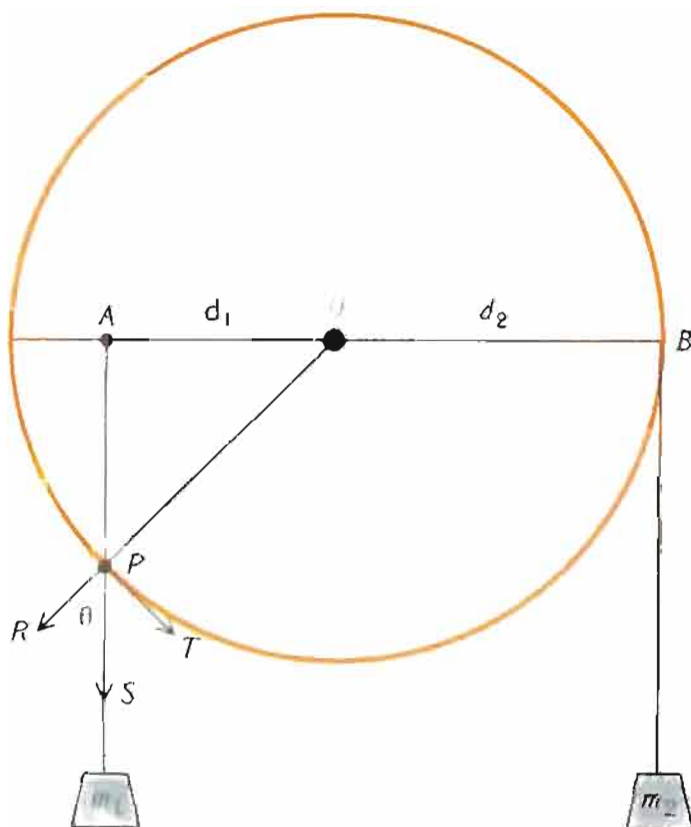
Второй закон Ньютона утверждает, что скорость изменения импульса системы взаимодействующих частиц равна силе, действующей на систему извне. Аналогично скорость изменения полного момента системы взаимодействующих частиц равна *моменту силы*, обусловленному внешним воздействием.

Импульс системы частиц пропорционален скорости центра масс системы, причем коэффициент пропорциональности равен массе системы. Аналогично угловой момент твердого тела, вращающегося вокруг оси симметрии, пропорционален угловой скорости вращения, и коэффициент пропорциональности равен моменту инерции тела относительно этой оси. Масса — мера инертности тела по отношению к линейному ускорению; *момент инерции* (относительно данной оси) — мера инертности по отношению к изменению углового момента (относительно той же оси).

Проведенная аналогия отражена в таблице. (Объяснение смысла векторного умножения, обозначенного знаком « \times » см. в Приложении.)

Архимедов закон равновесия неравноплечных весов, сформулированный Ньютоном в строгом математическом виде, естественным образом приводит к понятиям момента силы и углового момента. Хотя сам Ньютон и не использовал эти понятия в явном виде, он отчетливо понимал, что полученное еще Архимедом условие равновесия означает, что гантель, образованная двумя грузами, соединенными невесомым стержнем, не будет вращаться относительно точки опоры. Ньютон представил, что эта точка опоры является центром колеса, на горизонтальных спицах которого подвешены грузы. Следуя ходу рассуждений, изложенному в подписи под рисунком, он доказал, что если соотношение Архимеда выполняется, то силы, действующие на колесо со стороны грузов, эквивалентны равным по величине тангенциальным силам, приложенным к ободу колеса и стремящимся вращать его в противоположных направлениях.

Массы m_1 и m_2 подвешены в точках A и B , удаленных от точки опоры O невесомого горизонтального стержня AB соответственно на расстояния d_1 и d_2 . Предположим, что m_2 меньше m_1 . Опишем окружность радиусом d_2 вокруг точки O и предположим, что точки A и B лежат на горизонтальных «спицах» получившегося «колеса». Из точки A проведем перпендикуляр к горизонтальной линии AB , который пересечет окружность в точке P . Можно представить, что масса m_1 подвешена в точке P , а не в точке A , так как если веревку, поддерживающую груз, закрепить в точках A и P и кусок веревки AP убрать, то ничего не изменится. Разложим силу m_1g , изображенную на рисунке вектором \vec{PS} , на радиальную \vec{PR} и тангенциальную \vec{PT} составляющие. Действие радиальной составляющей сводится к натяжению спицы OP . Тангенциальная составляющая силы, равная $m_1g \sin\theta$ (где θ — угол между радиусом OP и вертикальным направлением PS), стремится повернуть колесо против часовой стрелки. Сила m_2g , действующая на колесо со стороны массы m_2 , также направлена по касательной к ободу колеса, но стремится повернуть его по часовой стрелке. Вращающий эффект тангенциальных сил одинаков во всех точках обода колеса. Поэтому колесо будет в равновесии, если действующие на него силы равны, т. е. если $m_2g = m_1g \sin\theta$; но поскольку $\sin\theta = d_1/d_2$, это условие можно записать в виде $m_1d_1 = m_2d_2$, что совпадает с условием равновесия разноплечных весов, полученным Архимедом



Движение центра масс

Поступательное движение		Вращательное движение	
Величина	Математическое выражение	Величина	Математическое выражение
Масса	$m = \sum m_i$	Момент инерции относительно оси симметрии	$I = \sum m_i R_i^2$
Импульс	$p = \sum m_i v_i$	Угловой момент	$S = \sum m_i (r_i \times v_i)$
Скорость	$v = p/m$	Угловая скорость	$\omega = S/I$
Сила	$F = \sum F_i$	Момент силы	$K = \sum r_i \times F_i$
Связь между силой и импульсом	$\dot{p} = F$	Связь между моментом сил и угловым моментом	$\dot{S} = K$

Назовем *моментом силы* величину, характеризующую вращающее действие приложенной силы, и обозначим его буквой K . В Приложении доказывается, что

$$K = r \times F = dJ/dt, \tag{4.18}$$

где \mathbf{J} — *угловой момент*. Таким образом, момент силы — это скорость изменения углового момента, подобно тому как сила — это скорость изменения импульса.

Момент силы, приложенный к частице, равен нулю, если прямая, вдоль которой действует сила, проходит через начало координат O , поскольку в этом случае угол θ между векторами \mathbf{r} и \mathbf{F} равен нулю и по этой причине $|\mathbf{r} \times \mathbf{F}| = rF \sin \theta = 0$. Так как сила тяготения, действующая на каждую из двух взаимодействующих частиц, направлена к центру масс, момент силы относительно этой точки равен нулю и угловой момент каждой частицы пары не меняется со временем. Этот вывод, хотя и в скрытой форме, нам уже известен. Дело в том, что

$$\mathbf{r} \times \mathbf{p} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) = m(\mathbf{r} \times d\mathbf{r}/dt).$$

Вектор $\mathbf{r} \times d\mathbf{r}$ перпендикулярен плоскости, образованной векторами \mathbf{r} и $d\mathbf{r}$, а его величина равна удвоенной площади треугольника, состоящего из векторов \mathbf{r} , $d\mathbf{r}$ и отрезка, соединяющего их концы. Таким образом, постоянство вектора $\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ означает, что, во-первых, каждая из орбит лежит в плоскости (общей для обеих частиц, поскольку линия, соединяющая частицы, проходит через центр масс), и, во-вторых, радиус-вектор каждой из частиц описывает равные площади за равные интервалы времени.

В системе из трех взаимодействующих частиц результирующая сила, действующая на каждую частицу, вообще говоря, не направлена к центру масс системы. Поэтому угловой момент каждой из частиц непрерывно меняется. Однако сумма угловых моментов остается неизменной:

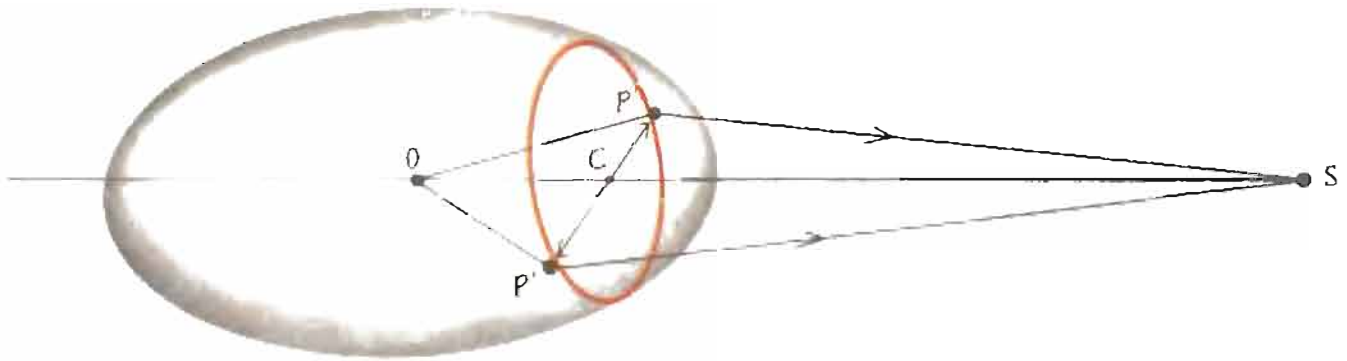
$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_3 &= \frac{d}{dt}(\mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2 + \mathbf{J}_3) = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{F}_1 + \mathbf{r}_2 \times \mathbf{F}_2 + \mathbf{r}_3 \times \mathbf{F}_3 = \\ &= \mathbf{r}_1 \times (\mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}) + \mathbf{r}_2 \times (\mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{23}) + \mathbf{r}_3 (\mathbf{F}_{31} + \mathbf{F}_{32}) = \\ &= (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \times \mathbf{F}_{12} + (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3) \times \mathbf{F}_{13} + (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3) \times \mathbf{F}_{23} = 0. \end{aligned}$$

Символом \mathbf{F}_{ij} обозначена сила, действующая на j -частицу со стороны i -частицы: она направлена вдоль вектора $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$, соединяющего частицу j с частицей i . Этот результат вытекает из третьего закона Ньютона, так что он, очевидно, будет справедлив и для системы с произвольным числом частиц, в которой сила взаимодействия между каждой парой частиц направлена вдоль линии, соединяющей их друг с другом. (Такое взаимодействие называется *центральной*.) Итак, *полный угловой момент любой изолированной системы центрально взаимодействующих частиц не меняется во времени*. Частицы в такой системе обмениваются угловым моментом так же, как они обмениваются импульсом и энергией.

Полный *угловой момент* вращающейся планеты довольно просто связан с угловой скоростью ее вращения (обозначим ее через $\boldsymbol{\omega}$). Этот вектор направлен таким образом, что если смотреть с его конца, вращение точек планеты будет происходить против часовой стрелки в плоскости, перпендикулярной вектору $\boldsymbol{\omega}$, а по величине $\omega = 2\pi/T$, где T — период вращения. Если планета вращается вокруг собственной оси симметрии, то ее угловой момент \mathbf{S} пропорционален $\boldsymbol{\omega}$:

$$\mathbf{J} \equiv \mathbf{S} = I\boldsymbol{\omega}, \quad I = \sum_i m_i R_i^2, \quad (4.20)$$

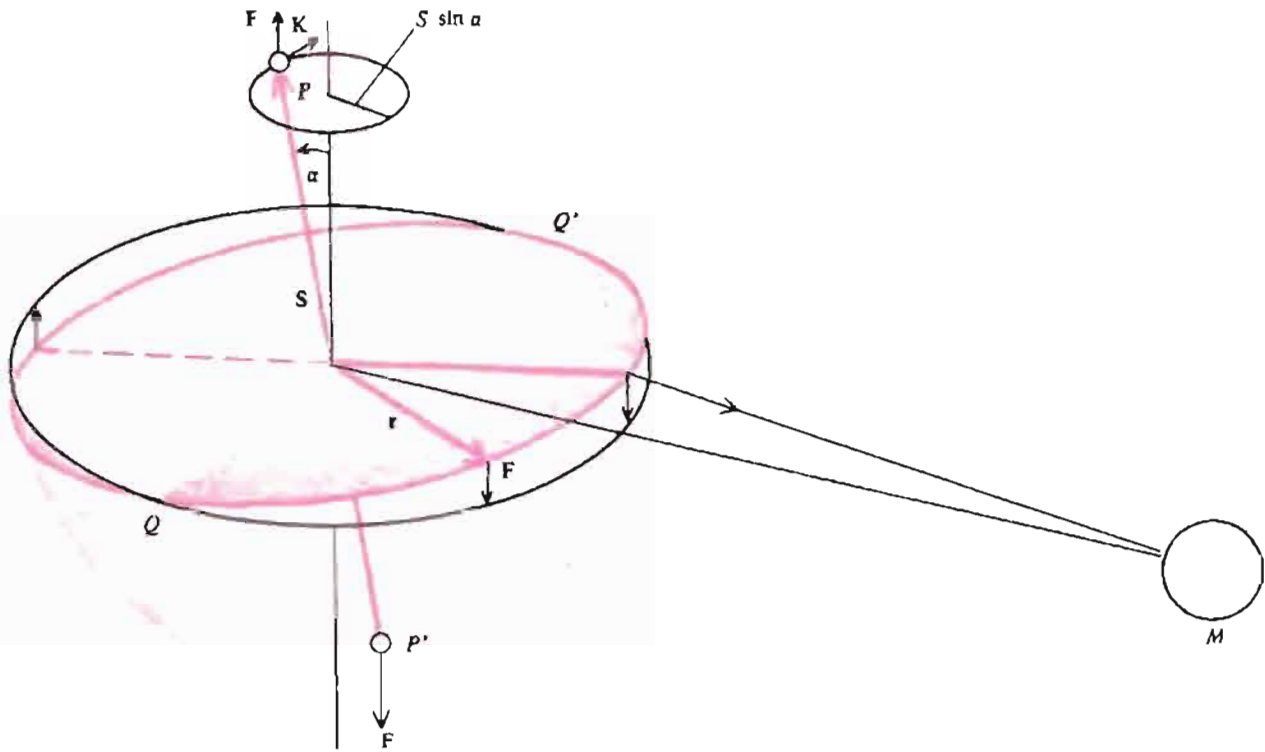
где R_i — расстояние i -частицы от оси вращения, а суммирование производится по всем частицам системы. Для однородной сферы (радиусом a) $I = \frac{2}{5}ma^2$. Для Земли $I \approx \frac{1}{3}ma^2$, поскольку плотность внутри Земли увеличивается к центру.



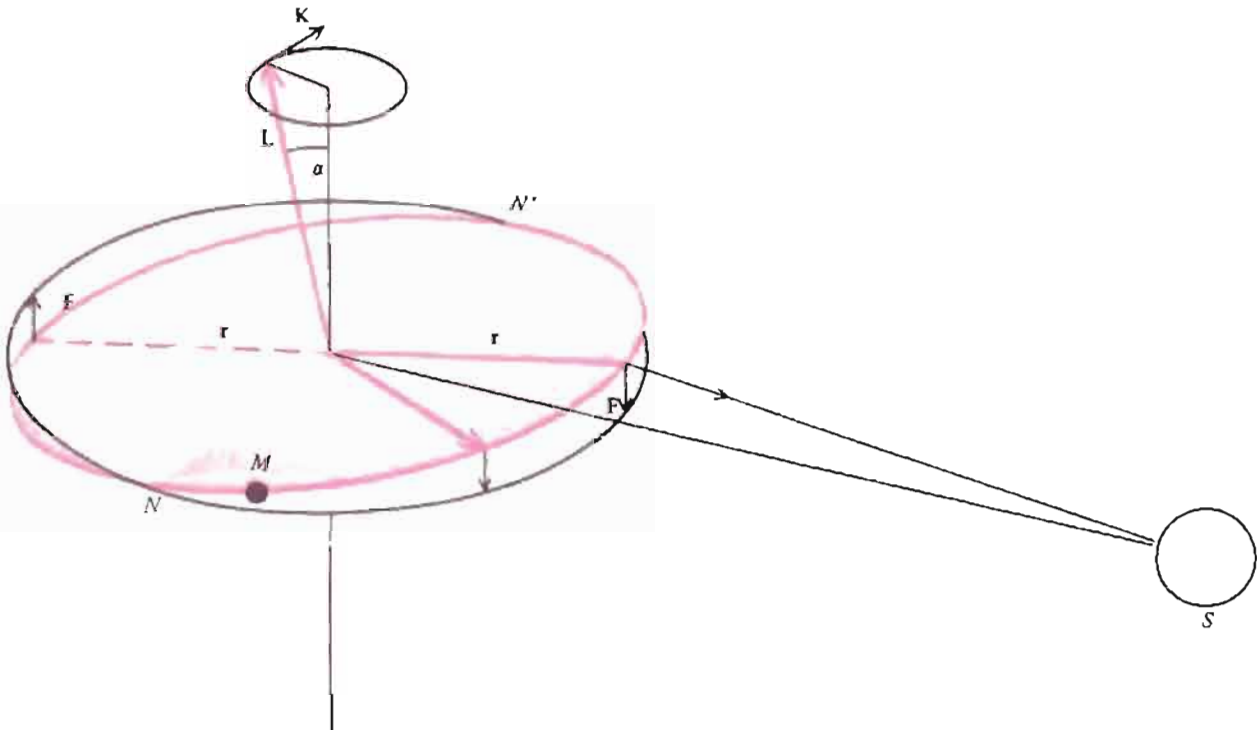
Пусть OS — ось симметрии тела, центр масс которого лежит в точке O . Тогда вращающие моменты, обусловленные тяготением точки S , уравниваются друг друга в симметрично расположенных точках, например в P и P' .

Из закона сохранения углового момента следует, что если момент силы, приложенной к Земле, равен нулю, то ее ось вращения должна быть все время направлена в одну сторону и продолжительность звездных суток будет постоянной. Это заключение не столь очевидно, как может показаться на первый взгляд. Вектор угловой скорости твердого тела, которое вращается вокруг оси, не являющейся его осью симметрии, не сохраняет своего направления: он прецессирует вокруг неизменно направленного вектора углового момента \mathbf{J} (который в этом случае не совпадает с ω). Оси симметрии вращающихся планет и звезд совпадают с их осями симметрии, поскольку отклонение от сферической формы у них обусловлено центробежной силой, которая симметрична относительно оси вращения. Внешнее гравитационное поле, действуя на сферически-симметричное тело, не создает момента силы, как и показано на рисунке. Даже в случае взаимодействия несферического тела с точечной массой последняя не создает вращающего момента, приложенного к телу, если только распределение массы внутри тела симметрично относительно линии, соединяющей точечную массу с центром масс тела (см. рисунок).

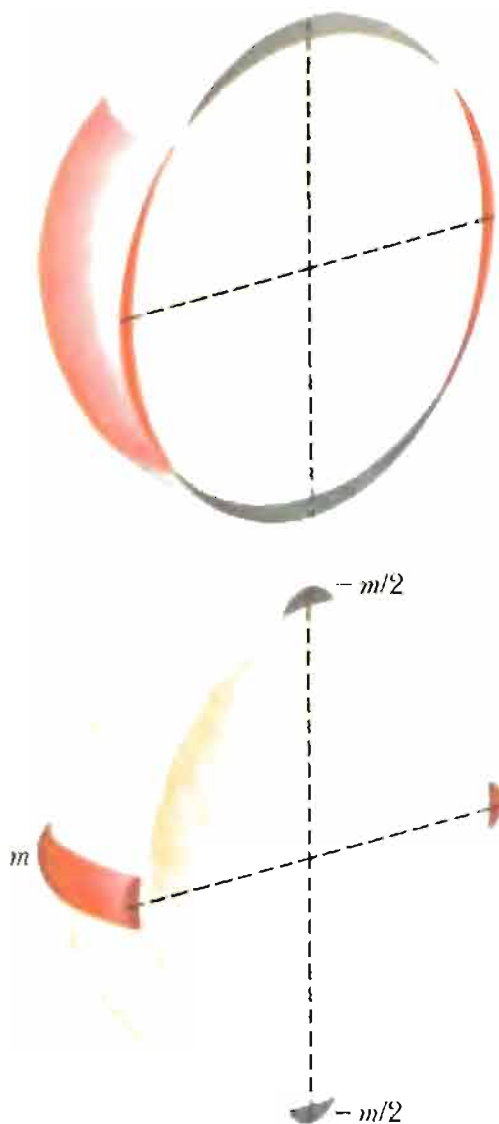
Теперь мы можем объяснить, почему происходит прецессия равноденствия и попятное движение линии узлов лунной орбиты. Если бы плоскости земного экватора, лунной орбиты и орбиты Земли совпадали, то момент сил, действующих на сфероидальную Землю со стороны как Луны, так и Солнца, был бы равен нулю (см. подпись к рисунку). Но так как плоскость земного экватора наклонена к плоскостям орбит Луны и Земли, момент силы, обусловленный тяготением Луны и Солнца, оказывается отличным от нуля. Вскоре мы убедимся, что сила (усредненная за лунный месяц), действующая на Землю со стороны Луны, стремится повернуть ось вращения Земли (и вектор ее углового момента) к вертикали, т. е. в направлении, перпендикулярном плоскости орбиты Луны (см. верхний из приведенных далее рисунков). Однако, как следует из уравнения (4.18), угловой момент изменяется в направлении момента силы, который перпендикулярен как самому угловому моменту, так и вертикальной оси. Следовательно, под действием тяготения Луны конец вектора углового момента описывает окружность вокруг вертикальной оси. При этом сам вектор описывает конус, как изображено на верхнем рисунке. Таким образом, усредненный за месяц момент сил, обусловленный воздействием Луны, не вызывает изменения ни величины углового момента, ни его наклона к вертикали. Более того, если мы примем направление углового момента за основное (*прямое*), то с помощью верхнего рисунка нетрудно убедиться, что сила, которая стремится совместить вектор углового момента с вертикалью, вынуждает его (и линию узлов QQ') прецессировать в *обратном* (попятном) направлении.



Вертикальная составляющая силы F , обусловленной притяжением Луны (M), действуя на экваториальный пояс QQ' и полярные шапки с «отрицательной массой» P и P' (см. рисунок на с. 149), создает вращающий момент K . Он направлен параллельно линии QQ' , по которой плоскость орбиты Луны пересекается с плоскостью земного экватора, стремясь повернуть вектор углового момента S в вертикальном направлении. В результате конец вектора S движется по окружности длиной $2\pi S \sin \alpha$ со скоростью K . Следовательно, период прецессии равен $2\pi S \sin \alpha / K$, а угловая скорость прецессии — $K / S \cdot \sin \alpha$.



Вертикальная составляющая приливной силы, вызванной Солнцем, действует на Луну, массу которой мы будем считать равномерно распределенной вдоль ее орбиты. Эта составляющая силы создает вращающий момент K , параллельный линии NN' , по которой плоскость лунной орбиты пересекается с плоскостью земной орбиты, и заставляет вектор углового момента лунной орбиты L прецессировать относительно вертикали.



Сфероид можно представить как сферу, к которой добавлен экваториальный пояс, состоящий из вещества, изъятого с полюсов

Аналогичные рассуждения применимы и к моменту сил, обусловленному гравитационным воздействием Солнца, усредненным за год. Поскольку направления нормалей к плоскостям орбит Земли и Луны почти совпадают, усредненные векторы моментов сил, обусловленных воздействием Луны и Солнца, почти параллельны. Отношение величин этих векторов примерно равно отношению приливных ускорений ($2\frac{1}{4}$), вызванных Луной и Солнцем и ответственных за возникновение момента сил.

Проведенный качественный анализ позволяет объяснить прецессию оси вращения Земли как результат действия на Землю моментов приливных сил, обусловленных влиянием Луны и Солнца. Однако объяснение нельзя считать исчерпывающим, пока мы не убедимся, что наблюдаемая величина периода прецессии (равная 26 тыс. лет) хорошо согласуется с результатами расчетов, сделанных на основе нашей теории. В свое время именно количественные оценки стали камнем преткновения, о который разбились многие остроумные и казавшиеся весьма правдоподобными гипотезы. Из подписи к верхнему из приведенных здесь рисунков следует, что угловая скорость прецессии равна $K/(S \cdot \sin \alpha)$, где K — момент силы, S — угловой момент, α — угол между вектором углового момента и вертикальным направлением, вокруг которого происходит прецессия. Таким образом, чтобы оценить скорость прецессии, нужно вычислить момент сил, а для этого необходимо знать величину приливных сил, обусловленных притяжением Солнца и Луны, а также степень отклонения распределения массы внутри Земли от сферически-симметричного. Метод вычисления приливных сил, действующих на Землю, мы изложили ранее (см. врезку на с. 120—121).

Пренебрегая локальными неровностями типа гор и долин, можно считать Землю сфероидом, полярный диаметр которого примерно на $1/300$ меньше, чем экваториальный. Для оценки величины момента сил можно представить Землю в виде сферы (для которой момент внешних сил равен нулю), окруженной тонким экваториальным выступом, состоящим из вещества, «изъятото» с полюсов. Рассчитать момент сил, действующих на кольцо экваториального выступа со стороны Луны и Солнца, не составляет особого труда. Однако выясняется, что вычисленное значение момента сил дает скорость прецессии, в три раза меньшую, чем следует из наблюдений. Причину расхождения нетрудно понять из приведенного здесь рисунка: при оценке момента сил мы должны учитывать не только избыток массы на экваторе, но и ее дефицит на полюсах. Полярные шапки «отрицательной массы» дают вклад в момент внешних сил в два раза больший, чем экваториальный выступ.

Применимость данного метода расчета можно продемонстрировать и другим путем. Вектор углового момента, связанного с движением Луны по орбите, прецессирует в направлении, обратном направлению прецессии перпендикуляра к плоскости земной орбиты (см. нижний из приведенных ранее рисунков). Поскольку период прецессии вектора лунного углового момента (18,6 лет) много больше, чем орбитальный период Луны (27,3 суток), этот эффект прецессии можно описать, предположив, что масса Луны распределена в виде тонкого кольца вдоль лунной орбиты. Я попытался оценить скорость прецессии вектора углового момента этого кольца под действием момента приливных сил, обусловленных Солнцем, используя ту же формулу, что и при оценке момента сил, действующих на экваториальный выступ Земли со стороны Луны; расчетная величина периода прецессии (равна 17,8 лет) оказалась достаточно близкой к наблюдаемому, если, конечно, учесть приближенность оценки.

Эволюционные процессы

Отличительные особенности астрономических систем отчасти были «заложены» в них при формировании, а отчасти возникли в ходе последующего развития. В этом разделе мы кратко рассмотрим процессы второго типа, а процессы, связанные с формированием систем, обсудим в гл. 8.

Радиальная компонента крупномасштабных движений имеет тенденцию к затуханию. Если чай сильно взболтать в стакане, а затем оставить в покое, то постепенно он придет в некое состояние равновесия. Кинетическая энергия, первоначально сосредоточенная в крупномасштабном движении, будет последовательно переходить в энергию движения все более мелких масштабов и наконец перейдет в хаотическое тепловое движение молекул воды. Аналогичным образом и по тем же самым причинам направленное движение в гигантских самогравитирующих системах, состоящих из множества атомов, звезд или галактик, со временем постепенно переходит в менее направленное движение меньших масштабов и в конце концов — в тепловое движение «частиц», образующих систему. Вследствие закона сохранения углового момента вращательное движение относительно оси вращения остается неизменным — оно не может затухать. Но та составляющая направленного движения, которая не дает вклада в полный угловой момент системы, не сохраняется и со временем затухает.

Систематическое движение в радиальном направлении (которое не влияет на величину полного углового момента системы), по сути дела, встречается лишь в определенных видах самогравитирующих систем. У звезд, например,

пульсации, коллапс или взрывы возникают в результате специфических неустойчивостей. Расширяющееся звездное скопление представляет собой интересное, но крайне редкое явление; это область недавнего звездообразования — процесса, сопровождающегося выделением большого количества энергии за сравнительно короткий промежуток времени.

В системе, состоящей из большого числа членов, в отсутствие систематических радиальных движений полная кинетическая энергия K и потенциальная энергия U связаны между собой соотношением, называемым *теоремой вириала*:

$$2K + U = 0. \quad (4.21)$$

Это уравнение — аналог выведенного Рудольфом Клаузиусом в 1870 г. соотношения между кинетической и потенциальной энергиями, а также объемом и давлением неидеального газа. В гл. 8 мы воспользуемся космологическим аналогом соотношения Клаузиуса.

Поскольку $K + U = E$, из (4.21) вытекает, что

$$K = -\frac{1}{2}U = -E. \quad (4.22)$$

Величина E называется *энергией связи*. Именно такую энергию нужно затратить, чтобы разъединить систему на отдельные «частицы». Согласно уравнению (4.22), в отсутствие систематических радиальных движений энергия связи самогравитирующей системы равна кинетической энергии.

Уравнение (4.22) связывает три наиболее фундаментальные характеристики самогравитирующей системы частиц: массу M , эффективный диаметр D и дисперсию скоростей $\langle v^2 \rangle$. Последние две величины определяются соотношением

$$U \equiv -\frac{mM}{D}, \quad K \equiv \frac{1}{2}m \langle v^2 \rangle^*. \quad (4.23)$$

Подставляя выражения для U и K в уравнение (4.22), получим

$$\langle v^2 \rangle = M/D, \quad (4.24)$$

т. е. дисперсия скоростей частиц, образующих самогравитирующую систему, определяется гравитационной массой и эффективными размерами системы.

Пользуясь этим соотношением, можно определить среднюю температуру Солнца (которая пропорциональна дисперсии скоростей частиц солнечного вещества), если диаметр и массу Солнца считать известными. Расчет показывает, что средняя температура Солнца порядка нескольких миллионов градусов. При такой температуре водород и гелий, которые составляют 98% массы Солнца, полностью ионизованы, так же как и атомы легких элементов: углерода, азота и кислорода, на долю которых приходится остальная часть массы Солнца. Поскольку размеры атомных ядер и электронов очень малы (порядка 10^{-13} см), вещество в центре Солнца представляет собой почти идеальный газ, хотя его плотность в сто раз превосходит плотность воды.

Уравнение (4.24) можно также использовать для определения массы M систем, «частицами» которых являются звезды и галактики, предварительно оценив диаметр D и среднеквадратичную скорость $\langle v^2 \rangle^{1/2}$. Подобного рода оценки дают возможность определить гравитационную массу, сосредоточенную внутри подсистемы объектов, которые служат своего рода «вехами», позволяющими измерять размеры всей системы и дисперсию скоростей. На

* m можно трактовать как инертную массу системы, а M — как гравитационную. — Прим. перев.

основании этих измерений был сделан важный вывод: не менее 90% массы, входящей в состав галактик и скоплений галактик, сосредоточено в несветящемся веществе. Эти оценки и вытекающие из них следствия мы обсудим в гл. 8.

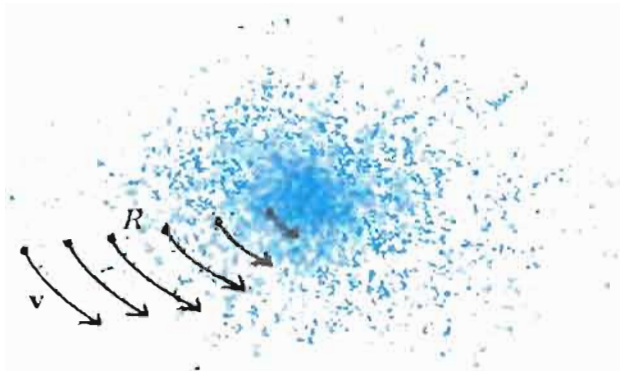
Газовые системы теряют энергию посредством излучения. Энергия изолированной системы гравитирующих частиц строго сохраняется. Но если бы астрономические системы состояли из простых частиц, связанных лишь гравитационным взаимодействием, то эти системы были бы невидимы. Свет звезд — это одна из разновидностей энергии, и сам факт его существования указывает на то, что механическая (т. е. кинетическая плюс потенциальная) энергия не всегда сохраняется. В системах, состоящих из газа, вследствие столкновений между молекулами кинетическая энергия движения молекул (теплота) преобразуется в излучение, которое уходит из системы. Таким образом, полная механическая энергия излучающих систем непрерывно уменьшается.

Этот вывод имеет любопытное следствие, на которое впервые указал в 1870 г. американский математик Хомер Лейн. Рассмотрим сферическое самогравитирующее газовое облако. В равновесном состоянии кинетическая энергия облака определяется из уравнения (4.22): $K = -E$. Поскольку облако излучает энергию, его полная (отрицательная) энергия увеличивается по абсолютной величине, становясь еще «более отрицательной», а следовательно, величина K возрастает. Это означает, что средняя температура облака (которая пропорциональна средней кинетической энергии молекул) возрастает при излучении энергии вовне. Самогравитирующее облако при охлаждении становится горячее! Такое облако обладает *отрицательной теплоемкостью*: его температура уменьшается, когда в систему добавляется энергия, и возрастает — когда энергия излучается.

Будучи математиком, а не астрономом, Лейн не увидел в этом выводе ничего абсурдного. Астрономы же, не найдя никаких изъянов в математических выкладках Лейна, благоразумно заключили, что реальная звезда должна стать твердой, когда плотность ее ядра окажется сравнимой с плотностью воды, после чего звезда начнет остывать «обычным» путем — как остывает раскаленная кочерга. Эта теория звездной эволюции была широко распространена вплоть до 20-х годов нашего столетия и еще излагалась в учебниках 30-х годов. Действительно, в рассуждениях Лейна нет ошибки. Самогравитирующее облако *должно* иметь отрицательную теплоемкость. Но хотя облако и близко к состоянию механического равновесия, оно не находится вблизи состояния термодинамического равновесия, т. е. состояния, соответствующего максимуму энтропии. Более того, самогравитирующее газовое облако вообще не имеет состояния с максимальной энтропией.

Гравитационные взаимодействия мало способствуют передаче углового момента. Изолированная система может посредством излучения терять энергию, но не угловой момент*. Вместе с тем внешние силы, действующие на почти сферическую систему, создают небольшой момент силы. Отсюда следует, что диссипативные самогравитирующие системы, т. е. системы, в которых возможен переход внутренней кинетической энергии в тепло и излучение, имеют тенденцию превращаться в холодные, вращающиеся диски, в каждой точке которых сила гравитационного притяжения уравновешена центробежной силой (см. рисунок). В этих дисках в излучение преобразуется любая кинетическая энергия, не связанная с вращательным движением, которое дает вклад в угловой момент системы. В идеальном диске все частицы движутся по концентрическим окружностям, лежащим в параллельных плоскостях. Пла-

* Если пренебречь излучением гравитационных волн. — *Прим. ред.*



Из соображений симметрии следует, что в идеальном диске гравитационное ускорение направлено к центру. Каждая частица движется по круговой орбите со скоростью v , величина которой определяется равенством ее центростремительного и гравитационного ускорений.

нетную систему Солнца, а также системы спутников Юпитера и Сатурна можно в первом приближении назвать идеальными дисками. Диски спиральных галактик, по-видимому, образовались из первоначально менее сплюснутых систем в результате диссипации (рассеяния) внутренней кинетической энергии при сохранении углового момента.

Царство туманностей*

В 1923 г. Эдвин Хаббл приступил к составлению карты пространственного распределения галактик; в основу ее были положены результаты наблюдений, проведенных с помощью 100-дюймового телескопа на обсерватории Маунт-Вилсон. Тогда это был крупнейший телескоп в мире, а сам Хаббл обладал редкостным для астронома сочетанием широких научных интересов с умением хорошо разбираться в технических проблемах, которые необходимо было решить, чтобы перейти от догадок к научной картине мира. Возможно, это было самое плодотворное со времен Галилея соединение мощного телескопа и могучего ума.

Что надеялся обнаружить Хаббл? Судя по распределению ярких галактик на небесной сфере, ясно вырисовывалась тенденция к образованию групп галактик; очевидно, распределение галактик в пространстве также должно следовать этой тенденции. Было естественно предполагать, что галактики, подобно звездам, образуют иерархические структуры. Нижний уровень иерархии наглядно виден на примере пространственного распределения ближайших галактик. Малое и Большое Магеллановы Облака, несомненно, являются спутниками нашей Галактики; наша Галактика и Туманность Андромеды являются, по-видимому, самыми массивными членами более крупной группировки — Местной Группы, а еще более протяженные группировки, ряд из которых содержит сотни галактик, явно просматривались на фотографиях, полученных с помощью 100-дюймового телескопа при длительных экспозициях. Исходя из того что галактики, подобно звездам, образуют иерархию самогравитирующих скоплений, какие выводы можно было сделать об их пространственном распределении в очень больших масштабах? На этот вопрос возможны три различных ответа.

1. *Имеется крупнейшая самогравитирующая система галактик — Метагалактика, которая для отдельных галактик играет ту же роль, что Млечный Путь для отдельных звезд. Эту точку зрения вплоть до 1965 г. отстаивали шведские физики-теоретики Оскар Клейн и Ханс Альфвен.*

2. *Иерархия скоплений безгранична: имеются системы, массы и размеры которых больше, а средняя плотность меньше любого наперед заданного зна-*

* Так называлась книга Э. Хаббла, вышедшая в свет в 1936 г. — Прим. перев.

чения. Эта модель Вселенной была предложена в 1908 г. шведским астрономом К. Шарлье.

3. *Существует максимальный масштаб сгущивания. При усреднении по областям размером, намного превосходящим этот масштаб, пространственное распределение галактик однородно.* Именно эту свою гипотезу и намеревался проверить Хаббл.

Если брать распределение ярких галактик, то оно неоднородно в очень больших угловых масштабах. Хаббл понял, что единственный путь обнаружить возможную крупномасштабную однородность — попытаться сфотографировать настолько удаленные галактики, что даже самые крупные скопления на этих расстояниях будут иметь очень малые угловые размеры. 60-дюймовый и 100-дюймовый рефлекторы позволяли Хабблу фотографировать очень слабые и удаленные галактики, хотя на каждой отдельной фотографии получалось изображение лишь небольшой области неба. 100-дюймовый телескоп, например, дает возможность получить резкие изображения области, по размерам равной полной Луне. Таким образом, Хабблу пришлось пожертвовать полнотой охвата неба ради глубины проникновения. За несколько лет, используя оба больших рефлектора, он выявил «1283 отдельных объекта, довольно равномерно распределенные на 75% площади небесной сферы».

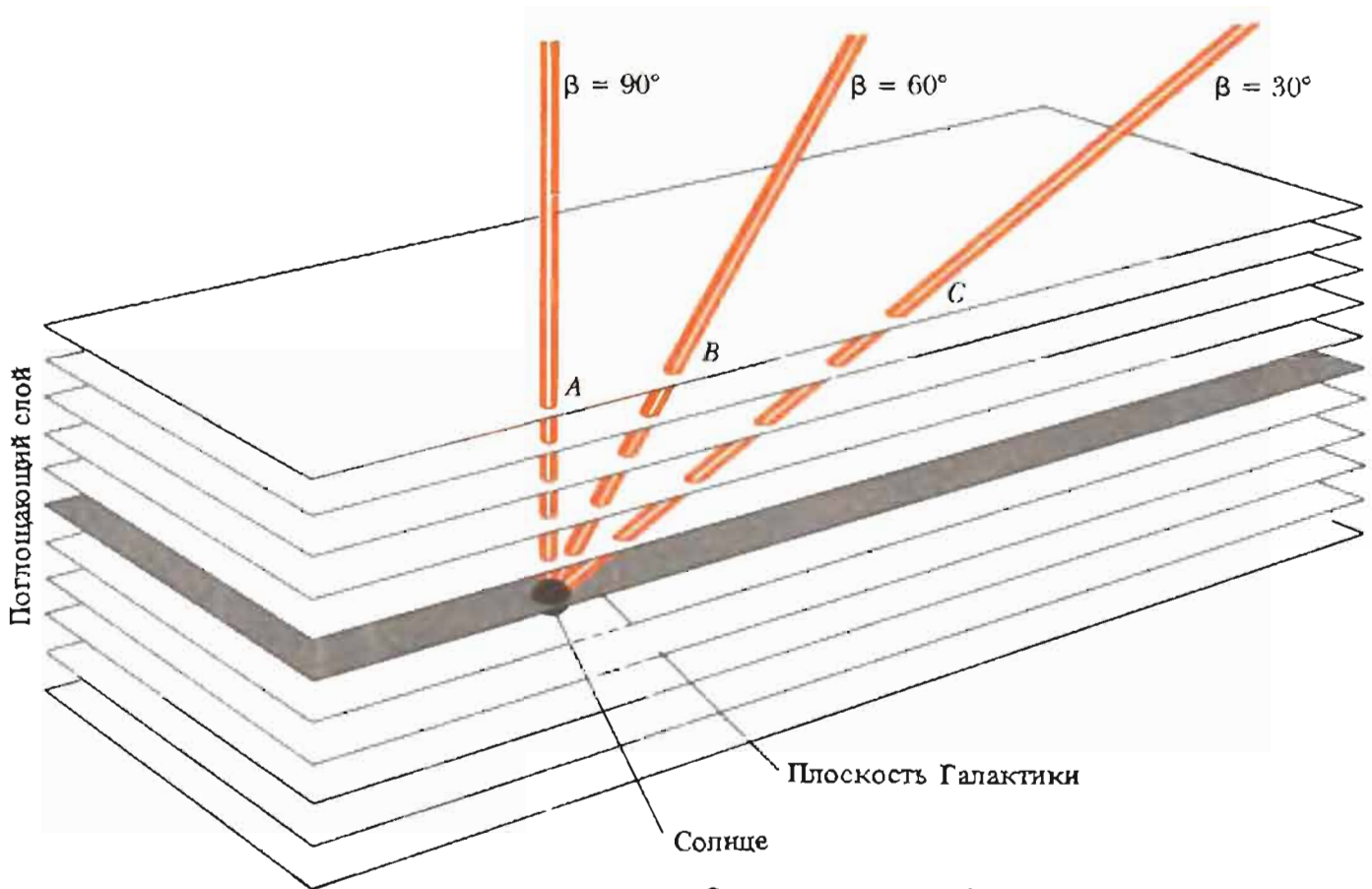
В высоких широтах Галактики, т. е. вблизи двух галактических полюсов, распределение галактик было почти однородным. По мере уменьшения галактической широты количество галактик с яркостью выше заданного значения, приходящихся на площадь в 1 кв. градус, систематически уменьшалось, а в непосредственной близости от галактического экватора галактик вообще не было видно. Это распределение показано на приведенном здесь рисунке.

Ширина области, в которой не наблюдается ни одной галактики, меняется в пределах 10—40°; эта область имеет асимметричную форму. Хаббл заключил, что наличие такой «зоны избегания» обусловлено сравнительно небольшим числом плотных, поглощающих свет облаков; подобные соображения высказывались астрономами и прежде. Затем, перейдя к изучению распределения галактик на небе вне названной зоны, Хаббл обнаружил, что в областях неба, где не наблюдается непосредственно поглощение света, число галактик на 1 кв. градус систематически уменьшается в направлении к галактическому экватору. Он объяснил это уменьшение, предположив существование поглощающего свет однородного слоя вещества, который расположен симметрично вдоль плоскости Галактики.

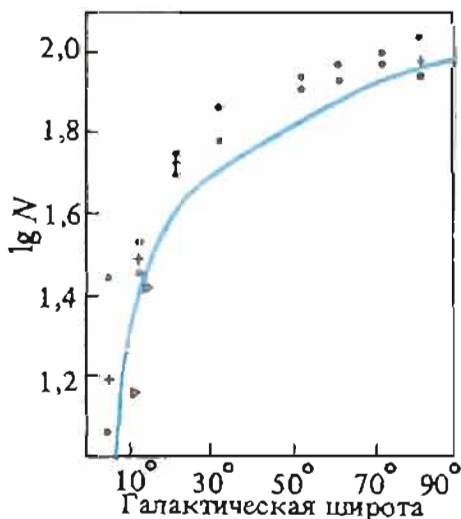
Затем Хаббл перешел к изучению распределения галактик в пространстве, т. е. по глубине. Равномерное распределение слабых галактик по небесной сфере в областях, не экранированных пылевыми облаками Галактики, могло означать либо то, что Вселенная представляет собой сферу (и мы волею судьбы оказались вблизи ее центра), либо то, что пространственное распределение галактик действительно равномерное, если пренебречь некоторыми локальными неоднородностями. Чтобы сделать «выбор» между этими возможностями, следует определить из наблюдений, как быстро возрастает число видимых галактик в пределах области площадью 1 кв. градус по мере уменьшения предельного значения яркости l , ограничивающего подсчет. Предположим, что светимость всех галактик одинакова и расположены они в пространстве равномерно. Поскольку видимая яркость галактики обратно пропорциональна квадрату расстояния до нее, а объем сферы пропорционален кубу радиуса, число галактик с яркостью выше некоторой данной пропорционально $l^{-3/2}$. Та же зависимость справедлива и для однородного распределения галактик с различной светимостью. Таким образом, Хаббл смог проверить гипотезу статической однородности, производя подсчеты числа галактик с яркостью выше



Положение 4364 галактик нанесено Жераром де Вокулером из Техасского университета на проекцию небесной сферы, построенную таким образом, что равные площади на рисунке соответствуют равным по площади участкам неба. Галактики отсутствуют в пределах центральной вертикальной полосы и по границам рисунка. Эти области образуют полосу неправильной формы, центр которой совпадает с экватором Галактики. Наличие «зоны избегания» обусловлено поглощающим свет веществом, сосредоточенным вблизи галактической плоскости. В северном полушарии Галактики (справа) больше галактик, чем в южном (слева). Это связано с наличием крупного скопления галактик в созвездии Дева, расположенном вблизи северного полюса Галактики. (Замечено из «Второго опорного каталога ярких галактик» Ж.-А. де Вокулера и Х. Дж. Корвина-мл., © «Чикаго юниверсити пресс», 1976.)



Схематическое изображение поглощающего слоя. При наблюдении из окрестностей Солнца внегалактические объекты затмеваются тем больше, чем длиннее путь, проходимый светом через поглощающий слой. Меньше всего ослабляется свет объектов, расположенных в направлении галактических полюсов, больше всего — тех объектов, которые лежат в более низких галактических широтах. Среднее число туманностей, расположенных в пределах участка единичной площади (яркость которых превышает заданное предельное значение), возрастает с увеличением галактической широты участка в соответствии со следующей зависимостью: $\lg N = \text{const} - 0,15 \operatorname{cosec} \beta$. Светлые и темные кружки на графике показывают результаты измерений в северном и южном полушариях Галактики соответственно; крестики — среднее из этих двух значений. Пара треугольников отмечает дополнительные результаты наблюдений в низких широтах. (Э. Хаббл, «Царство туманностей».)



некоторого предельного значения, которое постепенно уменьшалось. Он обнаружил, что результаты подсчетов соответствуют предсказанной зависимости (если учесть ослабление света, обусловленное расширением Вселенной, к обсуждению которого мы далее перейдем). В 1936 г. Хаббл подвел итог своим исследованиям:

Нет доказательств оскудения, нет никаких следов физической границы. Нет ни малейшего намека на существование сверхсистемы туманностей, отделенной от ос-

тального мира. Таким образом, в дальнейшем мы с полным основанием можем применять принцип однородности, считая, что любая другая область Вселенной в среднем точно такая же, как и наблюдаемая нами. Мы можем предполагать, что царство туманностей и есть Вселенная, а доступная наблюдению область — одна из ничем не примечательных ее частей.

Расширение Вселенной и шкала космических расстояний

Спектр галактики представляет собой совокупность спектров звезд, которые дают основной вклад в излучение галактик. Длины волн λ линий поглощения в спектре каждой звезды смещены (по сравнению со спектральными линиями неподвижного источника излучения. — *Перев.*) на величину $\Delta\lambda$, пропорциональную радиальной компоненте скорости звезды относительно Земли. Относительное смещение длины волны не зависит от длины волны, и при малом его значении может быть вычислено по формуле Доплера:

$$\Delta\lambda/\lambda = v_r/c,$$

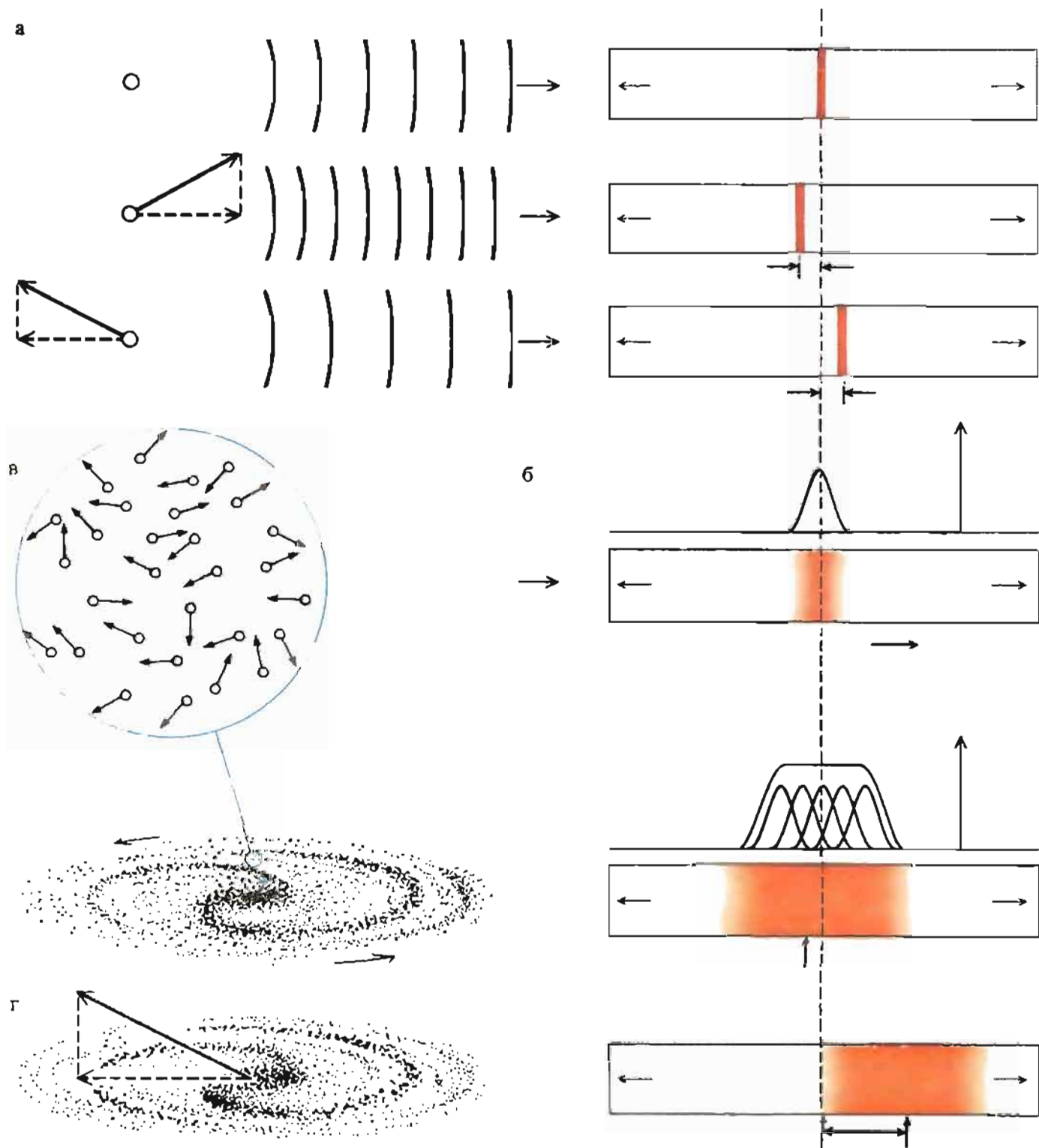
где v_r — радиальная составляющая относительной скорости (положительная при удалении, и отрицательная — при приближении звезды), а c — скорость света. В составном спектре галактики каждая линия уширена, поскольку представляет собой совокупность линий отдельных звезд, сдвинутых в разные стороны и на разную величину в соответствии с движением отдельных звезд относительно центра масс галактики. Линии в центральной части спектра галактик также смещены на величину, пропорциональную радиальной компоненте скорости центра масс галактики относительно Земли (см. рисунок). Таким образом, мы можем определить скорость удаления или приближения галактик, измеряя относительное изменение длин волн центральных спектральных линий.

Поскольку спектры галактик слабы, их трудно измерять. Спектрограф растягивает спектральное изображение галактик, еще более понижая их поверхностную яркость, которая и без того мала. В 1912 г. В. М. Слайфер измерил доплеровский сдвиг в спектре самой яркой из галактик — Туманности Андромеды с помощью спектрографа, соединенного с 24-дюймовым телескопом обсерватории Лоуэлла в Аризоне. Два года спустя он опубликовал результаты измерений лучевых скоростей 13 спиральных галактик.

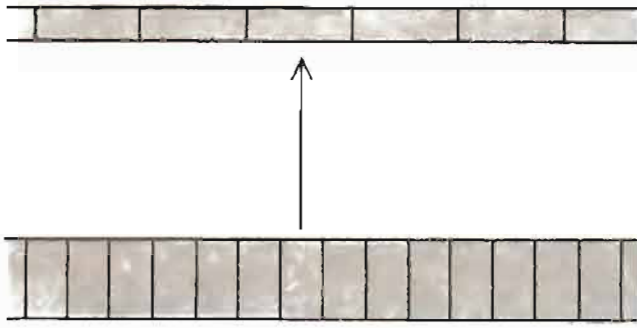
Скорости большинства исследованных Слайфером галактик были положительны, что свидетельствовало об их удалении от Солнца, а скорости нескольких галактик намного превосходили все измеренные до того времени. Не вызывало сомнений, что эти спиральные галактики удалялись от нашей Галактики с громадными скоростями.

К 1925 г. Слайфер измерил лучевые скорости 45 спиральных галактик. К тому моменту картина начала проясняться. Все галактики, за исключением нескольких, самых ярчайших и, по-видимому, ближайших, удалялись от Солнца. Скорость удаления галактик явно возрастала по мере уменьшения их видимой яркости. Наибольшая скорость удаления среди галактик, выбранных Слайфером, достигала 1800 км/с. Создавалось впечатление, что галактики разбегаются прочь от Млечного Пути во всех направлениях, причем скорость убегания возрастает по мере удаления. Есть ли смысл в такой картине движения?

Вывод Хаббла о том, что галактики (за исключением локальных группировок) распределены в пространстве равномерно, накладывает сильное ограничение на вид крупномасштабного движения, которое мы могли бы надеяться

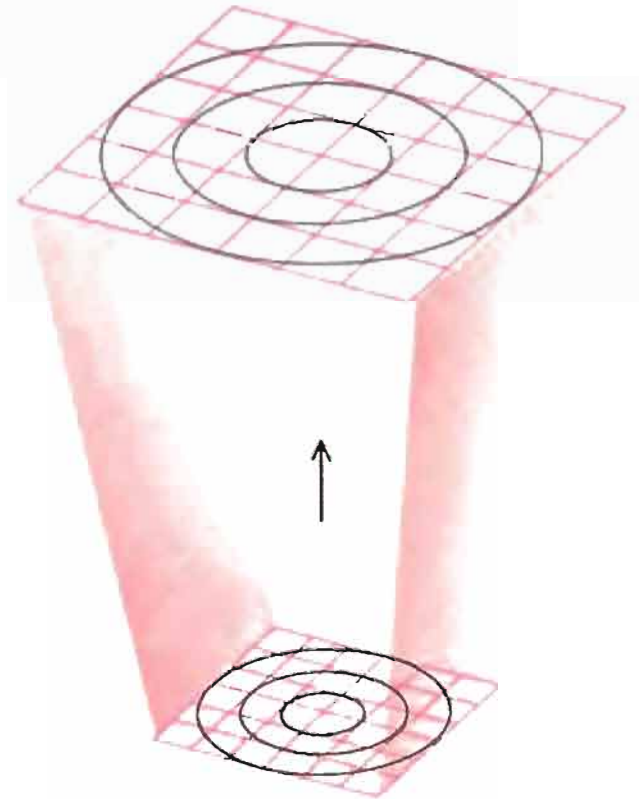


Образование линии в спектре галактики. Каждый отдельный атом излучает свет с дискретным набором длин волн, включая длину волны, которую мы обозначим λ_0 (а). В наблюдаемом спектре излучения галактики эта линия смещена на $\Delta\lambda$, пропорциональную относительной скорости атома и приемника излучения. Смещение происходит в красную область спектра (в сторону больших длин волн), если источник удаляется от наблюдателя, и в фиолетовую, если источник приближается. Свет, излучаемый совокупностью атомов горячего газа, образует спектральную «линию», ширина которой пропорциональна разбросу лучевых скоростей атомов, т. е. составляющих скорости, направленных вдоль луча зрения (б). Каждый малый объем газа спиральной галактики, видимый сбоку, имеет свою лучевую скорость (в). Результирующая спектральная «линия» представляет собой сумму спектральных линий, излучаемых каждым малым объемом; эти линии сдвинуты в красную или фиолетовую сторону на величину, пропорциональную соответствующей лучевой скорости. Наконец, широкая линия как целое сдвинута вдоль шкалы длин волн на величину, пропорциональную относительной лучевой скорости наблюдателя и центра масс галактики (г). Этот рисунок иллюстрирует образование эмиссионной линии в спектре галактики. Смещение и уширение линий поглощения обусловлены теми же причинами.



Однородное линейное расширение.

Однородное расширение (двумерной) поверхности: масштаб изменяется, но форма остается неизменной.

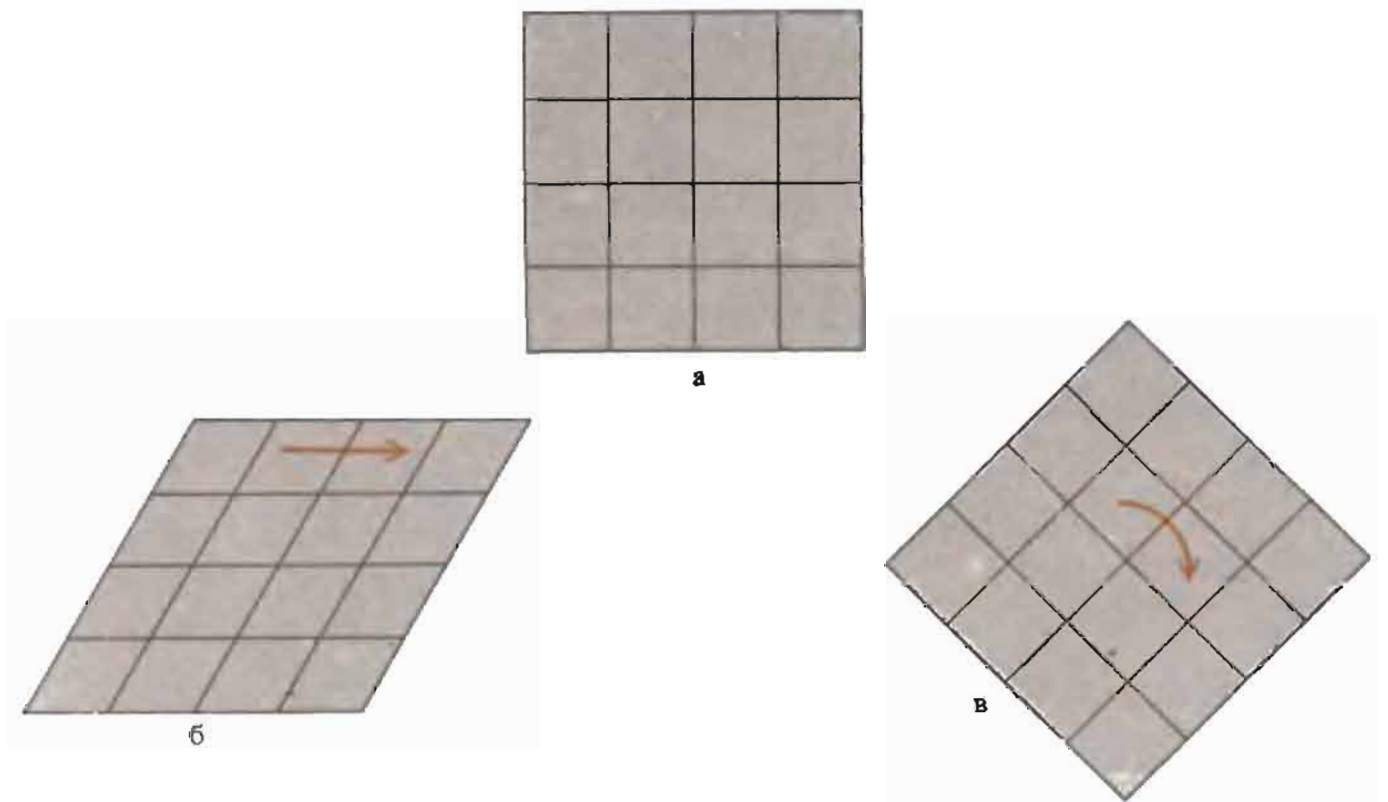


наблюдать. При однородном распределении нет какого-либо выделенного положения или направления (если исключить локальные неоднородности). Крупномасштабное движение может нарушить эту симметрию, если только оно само ею не обладает. Какие же виды движения в больших масштабах сохраняют крупномасштабную однородность?

Рассмотрим вначале одномерный случай. Представьте себе бесконечно длинную, тонкую, прямую резиновую ленту, на которой через равные расстояния (скажем, через 1 дюйм) нанесены деления. Единственное крупномасштабное растягивающее движение, которое не приводит к утончению или утолщению ленты в отдельных местах, — это растяжение, при котором расстояние между каждой парой соседних делений возрастает в одинаковое число раз (см. левый из приведенных рисунков). Предположим, что резиновую ленту растягивают таким образом, что за минуту расстояние между соседними делениями удваивается. В этом случае расстояние между двумя произвольными делениями также удваивается за минуту. Отсюда следует, что относительная скорость произвольной пары деления пропорциональна расстоянию между делениями.

Растягивающее движение описанного вида не придает ни одному из делений преимущественного положения. Наблюдатель, помещенный на любое деление, увидит, что другие деления удаляются от него со скоростью, пропорциональной расстоянию до них. Центр этой одномерной Вселенной — везде, а границы она не имеет.

Представьте теперь плоский резиновый лист, разделенный на одинаковые квадратные клетки. Единственное крупномасштабное движение, которое не приводит к тому, что лист в одних местах становится тоньше, а в других толще, — это движение, при котором все квадраты увеличиваются в размерах в одинаковое число раз, не изменяя своей формы (см. правый из рисунков). Подобного рода растяжение изменяет размеры, но не меняет формы любой фигуры, нарисованной на листе. Как и ранее, относительная скорость двух любых делений пропорциональна расстоянию между ними, и любая точка может считаться центром этой двумерной Вселенной.



Однородный сдвиг переводит тело из положения (а) в положение (б), выделяя преимущественное направление (указанное стрелкой). Однородное вращение переводит тело из положения (а) в положение (в), также выделяя преимущественное направление (перпендикулярное плоскости чертежа).

Аналогичная картина наблюдается и в случае трехмерной поверхности. Единственное крупномасштабное движение, сохраняющее однородность точек в узлах трехмерной сетки, — это движение, в процессе которого каждая сферическая поверхность расширяется со скоростью, пропорциональной ее радиусу. Любую точку можно рассматривать как центр среды, расширяющейся подобным образом: картина расширения будет абсолютно одинаковой при наблюдении из любой точки пространства.

Крупномасштабное движение рассмотренного выше типа называется *однородным расширением*. При однородном сжатии (движении в обратном направлении) пространственная однородность, естественно, также сохраняется. Однородное сжатие и расширение — это единственные разновидности крупномасштабного движения, которые не выделяют преимущественного положения или *направления* в пространстве. Однородный сдвиг или однородное вращение (см. рисунок) — примеры крупномасштабных движений, которые, не выделяя преимущественного положения, задают тем не менее выделенное направление (соответственно направление сдвига и ось вращения. — *Перев.*).

Обнаруженное Слайфером удаление галактик от Млечного Пути с громадными скоростями дает основание полагать, что система галактик в целом подвержена однородному расширению. Никакая другая интерпретация наблюдений не согласуется с выводом Хаббла об однородном и изотропном (исключая локальные неоднородности) распределении галактик в пространстве. Но действительно ли система галактик расширяется однородно? Если это так, то лучевая скорость (проекция вектора скорости на луч зрения) слабых галактик должна быть пропорциональна расстоянию до них. Галактики, расположенные в 10 раз дальше (они выглядят в сто раз слабее), чем наиболее удаленные

галактики из списка Слайфера, должны иметь лучевую скорость 18 000 км/с, а галактики, находящиеся еще в 10 раз дальше, — 180 000 км/с (что составляет более половины скорости света!).

Чтобы проверить гипотезу однородного расширения Вселенной, Хаббл нужно было определить расстояние до спиральных галактик из списка Слайфера. Оценка расстояний до далеких галактик и скоплений галактик относится к числу главных проблем наблюдательной космологии. Теория, лежащая в основе этих оценок, элементарна. Почти все оценки расстояний в космологии основаны на одной из двух следующих зависимостей:

1. Светимость L и видимая яркость l удаленных объектов связаны с расстоянием до них r законом обратных квадратов: $l = L/r^2$.

2. Линейный D и угловой θ диаметры объекта и расстояние r до него удовлетворяют соотношению: $\theta = D/r$ (при $\theta \ll 1$).

Эти формулы применимы для относительно близких объектов. Их релятивистское обобщение мы получим в гл. 7. Фундаментальная и сложная проблема заключается в том, как их применить. Как найти светимость L очень слабых звезд, удаленных на неизвестное расстояние, либо светимость или линейный размер удаленных галактик и скоплений галактик?

Существует стандартный подход к решению этих проблем. Космологи строят шкалу космических расстояний. На самом деле это скорее напоминает постройку пирамиды: на каждом уровне мы подготавливаем материал, из которого будем строить следующий уровень.

Звезды, расположенные достаточно близко, чтобы можно было измерить их параллакс (т. е. звезды, расстояние до которых можно измерить методом триангуляции, предложенным еще Фалесом), создают основание пирамиды. Некоторые из звезд, параллакс которых настолько велик, что его можно точно измерить, имеют яркость гораздо выше, чем Солнце, и обладают рядом характерных признаков, например цветом; это позволяет идентифицировать звезды подобного типа на расстояниях, превышающих предел возможностей метода триангуляции. Однако среди звезд с измеренным параллаксом нет настолько ярких, чтобы их можно было идентифицировать, если они находятся не только в других галактиках, но и в нашей Галактике за пределами относительно малой окрестности Солнца.

Крупный шаг вперед, ознаменовавший начало современной наблюдательной космологии, был сделан в 1912 г.: Генриетта Сван Левитт, научный сотрудник Гарвардской обсерватории, обнаружила связь между периодом и видимой яркостью цефеид (разновидностью звезд, изменяющих свой блеск) в Малом Магеллановом Облаке. Магеллановы Облака — это пара небольших галактик, спутников нашей Галактики — Млечного Пути, — наблюдаемых в южном полушарии. Цефеиды изменяют свой блеск регулярным образом с периодом 1—100 дней. На верхнем рисунке (с. 163) дана кривая блеска звезды δ Цефея — прототипа класса цефеид, переменность которой была обнаружена Джоном Гудрайком в 1784 г. Современный вид графика зависимости периода цефеид от их яркости приведен на нижнем рисунке, а на врезке в нем воспроизведен график, полученный Левитт.

Датский астроном Эйнар Герцшпрунг сразу же осознал революционный подтекст открытия Г. Левитт. Цефеиды — чрезвычайно яркие звезды, одни из наиболее ярких звезд Магеллановых Облаков. Периодический характер изменения блеска позволяет легко их обнаружить, а период нетрудно определить. Поскольку угловые размеры на небе Малого Магелланова Облака невелики, его линейный диаметр, а следовательно, и толщина много меньше расстояния до него. Поэтому можно считать, что все цефеиды в Малом Магеллановом Облаке находятся от нас примерно на одинаковом расстоянии и выявлен-



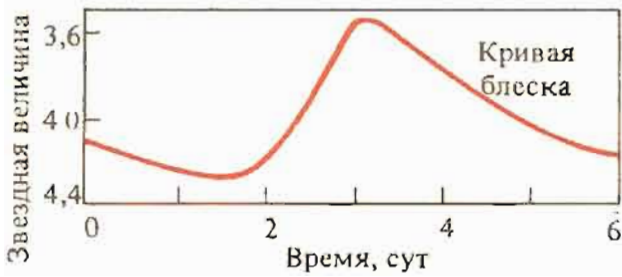
Американский астроном Генриетта Сван Левитт (1868—1921). Обнаруженная ею зависимость между периодом изменения блеска и видимой яркостью цефеид в Магеллановых Облаках положила начало современной наблюдательной космологии. (Коллекция Грейнджера.)



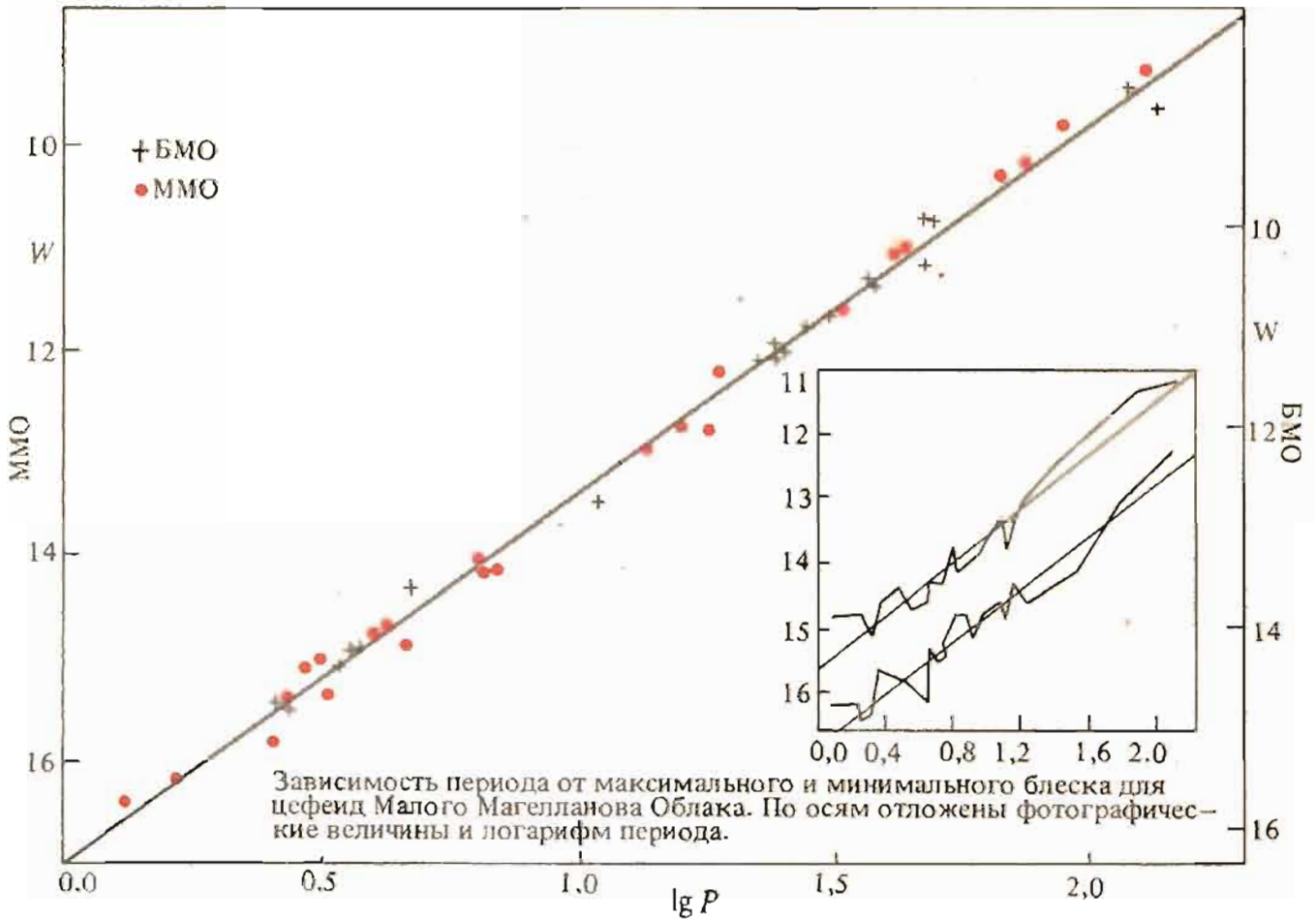
Эйнар Герцшпрунг (1873—1967) — датский астроном, обнаруживший зависимость между абсолютной звездной величиной и спектральным классом звезды, так, он установил, что желтые, оранжевые и красные звезды бывают двух типов, которые получили название «гигантов» и «карликов». Герцшпрунг также откалибровал найденную Г Левитт зависимость период — видимая яркость, переведя ее в зависимость период — светимость; оценил расстояние до 13 цефеид в Галактике. (Коллекция Грейнджера.)

ная Левитт зависимость между их периодом и видимой яркостью означает наличие такой же зависимости между их периодом и абсолютной яркостью, или светимостью. Таким образом, цефеиды могли бы служить идеальными индикаторами расстояний, если бы удалось откалибровать зависимость период — светимость, т. е. определить светимость одной или нескольких цефеид. Цефеиды были обнаружены и в нашей Галактике: к 1913 г. было известно 13 цефеид, положение которых на небесной сфере точно измерялось на протяжении многих лет. Герцшпрунг смог оценить расстояние до этих 13 звезд, используя метод *векового параллакса*, суть которого поясняется в подписи к рисунку (см. далее, с. 164). Оценив расстояния и видимую яркость галактических цефеид, Герцшпрунг определил их светимость и таким образом смог перевести найденную Левитт зависимость «период — видимая яркость» в зависимость между периодом и светимостью. После этого Герцшпрунг оценил расстояние до Малого Магелланова Облака, и хотя полученная им величина составила всего одну седьмую от ныне принятого значения этого расстояния (примерно 200 тыс. св. лет), он убедился в правильности своей гипотезы, что Магеллановы Облака являются самостоятельными звездными системами, не связанными с Млечным Путем. Это было первым прямым подтверждением предположения Канта о существовании галактик за пределами нашей звездной системы.

С помощью 100-дюймового телескопа Хаббл удалось обнаружить и исследовать цефеиды в нескольких ближайших галактиках, благодаря чему он смог



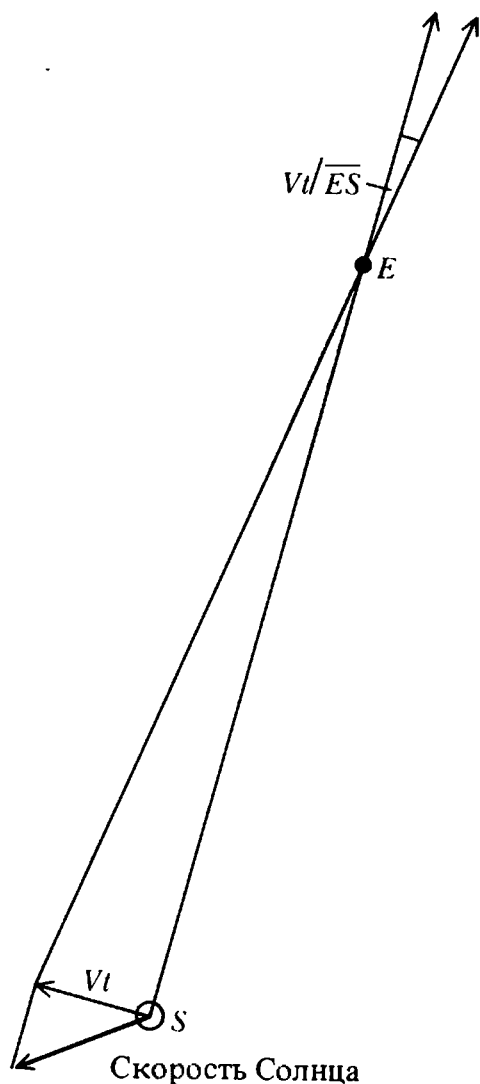
Кривая блеска звезды δ Цефея



Построенная Г Левитт зависимость период — видимая яркость для цефеид в Малом Магеллановом Облаке (на врезке) и современный вид той же зависимости для цефеид в Большом и Малом Магеллановых Облаках (БМО и ММО соответственно) W — линейная комбинация звездных величин в голубой и видимой (желтой — *Перев*) областях спектра, которая нечувствительна к покраснению, обусловленному межзвездной пылью

оценить расстояние до них. Зная эти расстояния, он определил далее светимость других объектов, более ярких, чем цефеиды, а именно: новых звезд, голубых сверхгигантов и ярких неправильных переменных. Эти объекты, отличавшиеся рядом специфических особенностей, не зависящих от видимой яркости, в свою очередь, как и цефеиды, послужили новыми индикаторами расстояний.

Используя эти индикаторы расстояний, Хаббл получил затем возможность выбрать на роль индикатора расстояний объекты, казавшиеся наиболее привлекательными: ярчайшие звезды в спиральных галактиках. К сожалению, выяснилось, что различие светимостей ярчайших звезд в разных галактиках

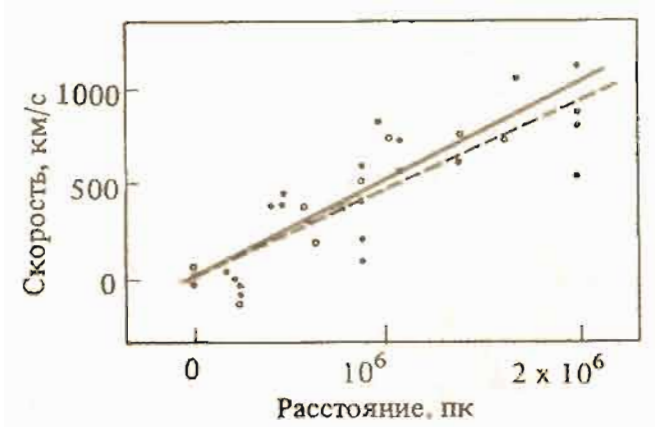


Метод векового параллакса. Предположим, что удаленная звезда E покоится относительно гораздо более далекого фона, например внегалактических туманностей. Допустим далее, что в движении Солнца можно выделить составляющую скорости V , перпендикулярную лучу зрения SE . За время t направление луча зрения сместится на величину Vt/SE , которую можно измерить, если интервал времени t достаточно велик. К сожалению, мы не можем предполагать, что точка E неподвижна относительно фона: скорее всего тангенциальная составляющая ее скорости сравнима по величине с аналогичной составляющей скорости Солнца. Однако если мы наблюдаем группу сходных между собой звезд на одинаковом расстоянии, то их движение, по-видимому, должно скомпенсироваться. Поэтому, вычислив среднестатистическое угловое смещение звезд, принадлежащих к однородной группе, можно определить средний параллактический сдвиг и, следовательно, расстояние до этой группы звезд.

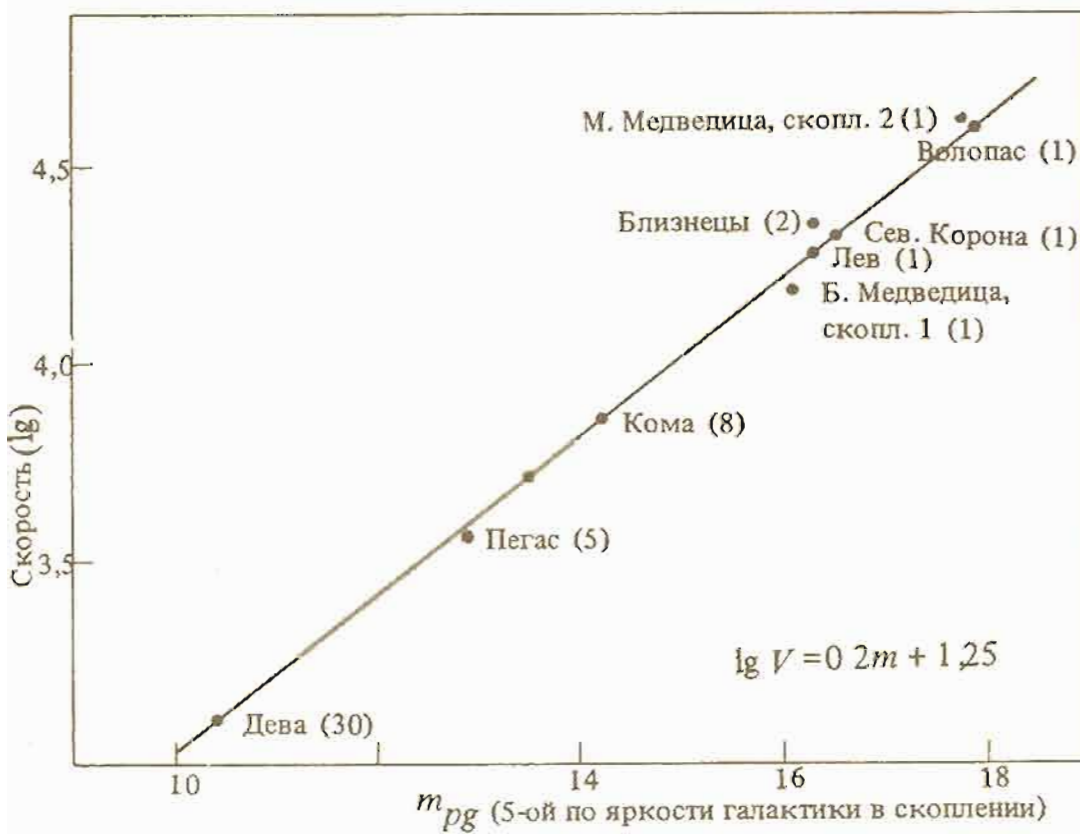
очень велико. Если усреднить блеск ярчайших звезд в галактиках, принадлежащих одному скоплению, то эта величина от скопления к скоплению меняется уже гораздо меньше; используя это обстоятельство, Хаббл оценил расстояние до скопления галактик в созвездии Дева. Наконец, определив расстояние до скопления Кома, Хаббл оценил светимость отдельных галактик этого скопления, что позволило взять за индикаторы расстояний галактики как целое. Воспользовавшись этим, Хаббл сумел оценить расстояние до галактик, настолько далеких, что даже с помощью 100-дюймового телескопа не удавалось выделить (разрешить) в них ни одной звезды.

Предварительные результаты определения расстояний до 22 галактик из выборки Слайфера приведены на верхнем из помещенных здесь рисунков (он был опубликован в 1929 г.). Линейная зависимость между расстоянием и скоростью на этом графике скорее угадывается, чем проявляется безусловно. Чтобы продолжить график в область больших скоростей и больших расстояний, Хабблу пришлось прибегнуть к помощи Мильтона Хьюмасона. Используя 100-дюймовый рефлексор, оборудованный новой камерой с малым фокусным расстоянием, Хьюмасон получил спектры настолько слабых галактик, что их диск не был виден в касегреновском фокусе телескопа (фокусе, вынесенном за пределы трубы телескопа и используемом наблюдателями для гидирования при длительных экспозициях). На основании измеренных Хьюмасоном красных смещений ($\Delta\lambda/\lambda$) и его оценок расстояний Хаббл построил зависимость, изображенную на нижнем из рисунков. Пропорциональность между скоростью убегания галактик и расстоянием до них больше не вызывала сомнений.

Наблюдательная космология со времен Хаббла шагнула далеко вперед.

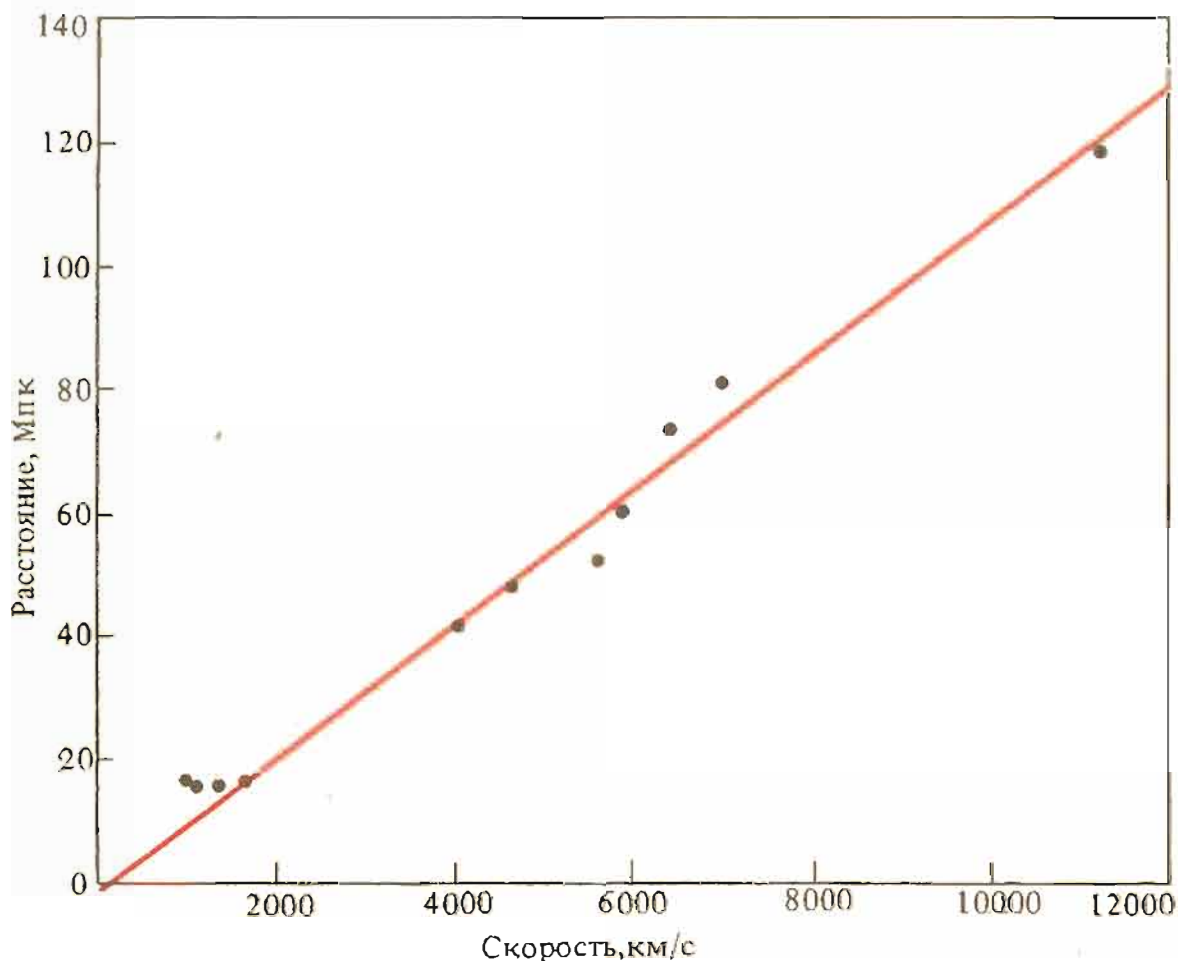


Характер зависимости скорость — расстояние. Скорректированная с учетом движения Солнца радиальная скорость (км/с) отложена в функции расстояния (пк), определенного по звездам, входящим в состав галактик, а в случае скопления в Деве (представленного четырьмя наиболее удаленными туманностями) — по средней светимости всех туманностей в скоплении. Черные кружки и непрерывная линия соответствуют зависимости, определенной по отдельным туманностям; светлые кружки и штриховая линия — результаты, полученные при объединении туманностей в группы (Э. Хаббл, «Царство туманностей».)



Изменение логарифма скорости (км/с), скорректированное с учетом движения Солнца, в зависимости от видимой звездной величины пятой по яркости галактики в скоплениях галактик (учтено поглощение света в Галактике) Скорость каждого скопления определяется как среднее значение ряда отдельных скоростей, наблюдаемых в скоплении. В скобках после названия скопления указано количество галактик, по которым проводилось усреднение» (Э Хаббл, «Царство туманностей»)

Современные телескопы позволяют измерять блеск, цвет и красные смещения галактик в объеме пространства, превосходящем в 10 млн. раз область, исследованную Хабблом. Новые виды приемников излучения, установленные на воздушных шарах, ракетах и космических аппаратах, расширили доступную астрономам область электромагнитного излучения от одной октавы (т. е. диапазона, границы которого отличаются по частоте в два раза) до диапазона, охватывающего по частоте более двенадцати порядков. Наблюдения последних лет позволили выявить особенности структуры Вселенной, о кото-



Современный (1984) вариант космологической зависимости скорость — расстояние (по данным М. Ааронсона, Дж. Хугра и Дж. Моулд, частично использовавших результаты более ранней работы Р. Б. Тулли и Дж. Р. Фишера).

рых Хаббл и его современники не имели ни малейшего представления. Но вместе с тем эти исследования существенно подкрепили гипотезу, которую Хаббл принял за отправную точку: пространственное распределение, движение и «демографические» характеристики галактик одинаковы во всех областях и направлениях, исключая некоторые локальные неоднородности. На рисунке изображен современный вариант полученной Хабблом зависимости красного смещения от видимой яркости.

Не все ученые согласны с картиной расширяющейся Вселенной, нарисованной Хабблом. Даже сегодня есть люди, отрицающие ее; они рассуждают, как правило, следующим образом: «Научная гипотеза, сколь привлекательной она бы ни выглядела, никогда не может быть доказана безусловно, но доказать ее несостоятельность можно, обнаружив хотя бы одно противоречащее ей явление. «Вещественные доказательства А» (фотографии, статистические анализы и тому подобное) противоречат гипотезе расширения; следовательно, эта гипотеза ошибочна». Однако ни одно из «вещественных доказательств А», предъявленных до сих пор, нельзя воспринимать как однозначное опровержение гипотезы расширения. В каждом отдельном случае доказательства либо весьма ненадежны (например, фотографии, показывающие, что некоторые объекты с большим красным смещением физически связаны с яркими близкими галактиками), либо допускают интерпретацию, не противоречащую гипотезе расширения Вселенной.

Позднее мы увидим, что эта гипотеза подтверждается наблюдениями совсем другого рода, о которых не подозревали в 1929 г., когда Хаббл ее выдвинул, и которые связаны с существованием однородного излучения (микроволнового фона), заполняющего все пространство (см. гл. 7). Гипотеза расши-

рения имеет также надежное теоретическое обоснование. Однородное расширение Вселенной вытекает из общей теории относительности Эйнштейна и общего представления об однородности пространства (см. гл. 7). Фактически идея расширяющейся Вселенной была выдвинута впервые русским математиком А. А. Фридманом в 1922 г., т. е. за семь лет до того, как Хаббл обнародовал результаты своих исследований зависимости скорости убегания галактик от расстояния до них.



Специальная теория относительности: теория равномерного движения Эйнштейна

Отныне пространство и время, взятые по отдельности, обречены влачить лишь призрачное существование, и только единство их обоих сохранит реальность и самостоятельность

Герман Минковский

Стало очевидным, что теория тяготения Ньютона оказывается несостоятельной применительно к простейшей модели Вселенной, построенной на основании астрономических наблюдений: однородному, бесконечному, расширяющемуся распределению массы. В гл. 7 мы узнаем, что самосогласованную и экономную теорию Вселенной позволяет создать теория тяготения Эйнштейна. Однако Эйнштейн не имел намерения решать космологические проблемы. Он взялся за перестройку ньютоновской физики* в самом начале XX в. — когда еще не было обнаружено никаких свидетельств крупномасштабной однородности структуры космоса, и задолго до того, как были высказаны первые соображения о расширении Вселенной. К созданию новой теории его побудило не разногласие между существующими теориями и результатами наблюдений или экспериментов, а ощущение отсутствия симметрии в физических теориях того времени.

Руководствуясь соображениями симметрии при выводе новых физических законов, Эйнштейн пошел по пути Гюйгенса. В гл. 4 мы узнали, как Гюйгенс вывел закон сохранения энергии, постулировав, что столкновение между двумя идеальными телами обратимо во времени, и как он получил закон сохранения импульса, постулировав, что при описании подобных столкновений все равномерно движущиеся системы отсчета равноправны. Выражение для центробежной силы Гюйгенс вывел из предположения, которое, будучи соответ-

* Перестройкой классической физики занимался, конечно, не только Эйнштейн. В частности, в создании и окончательной формулировке специальной теории относительности, о которой пойдет речь в этой главе книги, важнейшую роль сыграли также труды Х. Лоренца, А. Пуанкаре, Г. Минковского — *Прим ред*

ствующим образом обобщено, явилось краеугольным камнем теории тяготения Эйнштейна: сила, действующая на груз, вращающийся на конце веревки, неотличима от силы, действующей на тот же груз, когда он подвешен в гравитационном поле соответствующей величины. С появлением механики Ньютона большинство физиков стали рассматривать метод Гюйгенса как некий анахронизм. Только в XX в., благодаря работам Эйнштейна и его последователей, мы пришли к пониманию того, что законы симметрии более фундаментальны, чем конкретные физические законы, даже такие общие, как законы Ньютона или Максвелла.

Теории пространства, времени и энергии (специальная и общая теории относительности, а также релятивистская космология), созданные Эйнштейном, — это различные аспекты единой общей теории. Космология, например, не является только приложением общей теории относительности (теории тяготения) Эйнштейна — она сама служит составной частью этой теории. В данной и последующих двух главах мы рассмотрим основные этапы разработки этой теории.

Классическая теория равномерного движения

Еще до Аристотеля древнегреческие математики разработали утонченный метод описания равномерного движения (или движения без ускорения), т. е. прямолинейного движения с постоянной скоростью. Это описание включает в себя два ключевых понятия: *событие* и *линия времени*. Хотя эти термины вошли в обиход недавно, идеи, которые они отражают, кажутся почти очевидными. Вместе с тем эти идеи не принадлежат к категории великих идей, общих для всех человеческих культур: они были высказаны в Древней Греции и, насколько известно, нигде более не выдвигались. Без этих представлений Галилей не мог бы приступить к разработке своей теории движения.

Рассмотрим частицу, движущуюся вдоль прямой линии. Древнегреческие математики утверждали, что такая частица находится в определенном *месте* линии в каждый данный момент времени. Таким образом, они представляли *историю* движущейся частицы как совокупность *событий*, каждое из которых происходит в определенном месте и в определенное время. Они изображали моменты времени точками на линии и отождествляли длину отрезка этой линии с *продолжительностью* интервала времени. В «Физике» Аристотеля приводится диаграмма, подобная той, что изображена здесь на рисунке, где положение и момент времени, характеризующие каждое событие, соединены между собой красной линией. Основываясь на этой диаграмме, Аристотель определил равномерное движение как движение, при котором

$$AB:BC:CD:\dots = PQ:QR:RS:\dots$$

Это означает, что частица, движущаяся с постоянной скоростью, проходит равные расстояния за равные промежутки времени.

Хотя это представление позволяло Аристотелю сравнивать одну скорость с другой, древнегреческие математики, по-видимому, не дошли до понимания того, что саму скорость можно рассматривать как величину с непрерывным интервалом допустимых значений. Этот важный шаг сделал французский математик Никола Орем примерно в середине XIV в. Орем нарисовал чертеж (см. левый верхний рисунок из приведенных далее четырех построений), где скорость впервые представлена как величина, которая может принимать непрерывную совокупность значений, изображенную на графике в зависимости от времени. Горизонтальная линия *CD* соответствует равномерному движению

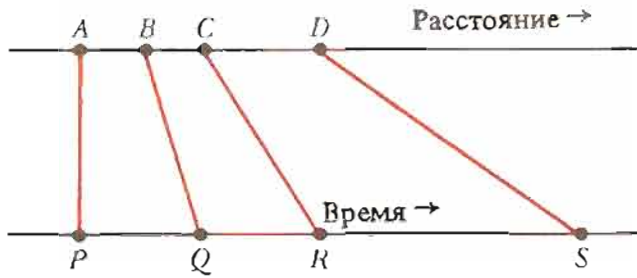
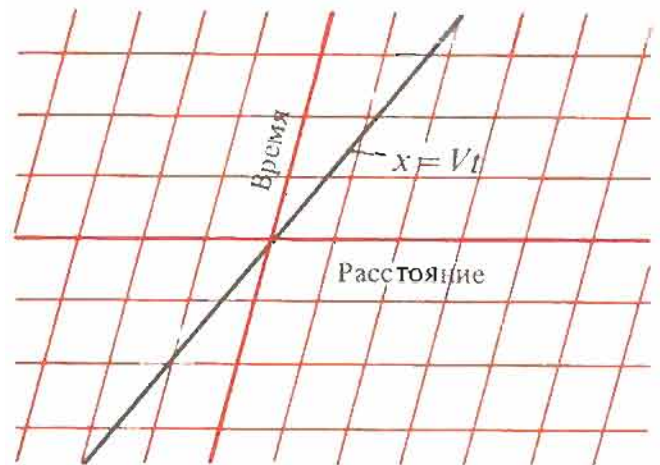
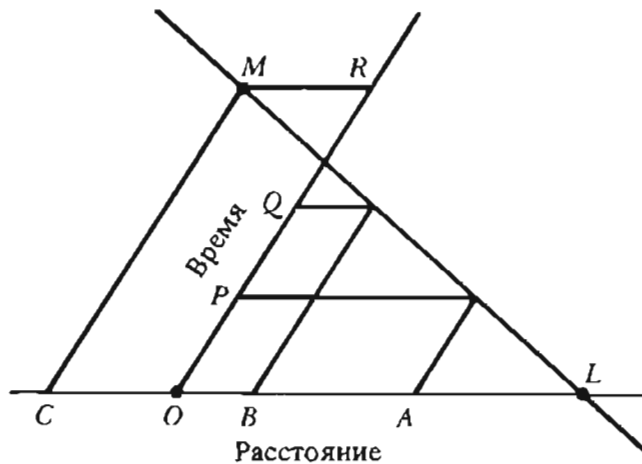
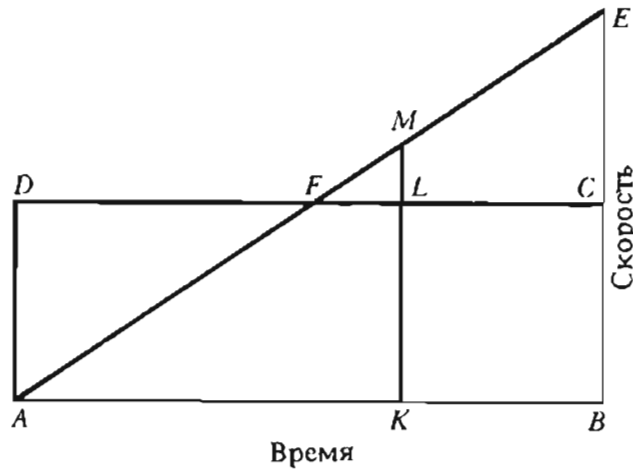


Диаграмма расстояние — время, построенная Аристотелем. Точки A, B, C, D , изображающие положение тела, соединены с соответствующими моментами времени (P, Q, R, S) цветными линиями



Придуманый Оремом график зависимости скорости от времени при равномерном (линия DC) и равноускоренном (линия AE) движении. Пройденное расстояние равно площади, очерченной этими линиями (вверху слева). Пространственно-временная диаграмма для случая равномерного движения (вверху справа). Пространственно-временная диаграмма с наклонными осями (внизу слева). Наклонная пространственно-временная координатная сетка (внизу справа)

со скоростью, определяемой величиной отрезка BC . Равноускоренное движение изображается линией AE . Скорость в произвольный момент времени K равна длине вертикальной линии (ординате), например KL или KM . Орем показал, что расстояние, пройденное за время AB частицей, равноускоренное движение которой изображено линией AE , равно расстоянию, пройденному за то же время частицей, скорость которой постоянна и равна среднему значению скорости равноускоренно движущейся частицы в начальном и конечном состоянии:

$$BC = \frac{1}{2}(0 + BE) = \frac{1}{2}BE.$$

Полтора века спустя Галилей, нарисовав аналогичный чертеж, пришел к такому же выводу.

Галилей (или кто-то из его современников), возможно, нарисовал первую настоящую пространственно-временную диаграмму (см. верхний правый рисунок). На ней «история» частицы, движущейся равномерно и прямолинейно, изображена прямой линией, точки которой, например L и M , представляют собой события этой истории. Скорость частицы равна отношению пути ко времени, LD/DM , определяющему наклон прямой LM . Любое движение без ускорения можно изобразить на этой диаграмме прямой линией, и наоборот — каждая прямая линия служит графиком равномерного движения.

Ось времени и ось расстояний не обязательно должны быть перпендикулярны друг другу. В дальнейшем нам часто будет удобнее пользоваться наклонными осями (см. левый нижний рисунок). Пространственная и временная координаты событий в этом случае измеряются вдоль линий, параллельных координатным осям. В частности, пространственная и временная координаты события M равны соответственно MR и MS . Скорость частицы, историю которой изображает линия LM , равна LC/CM .

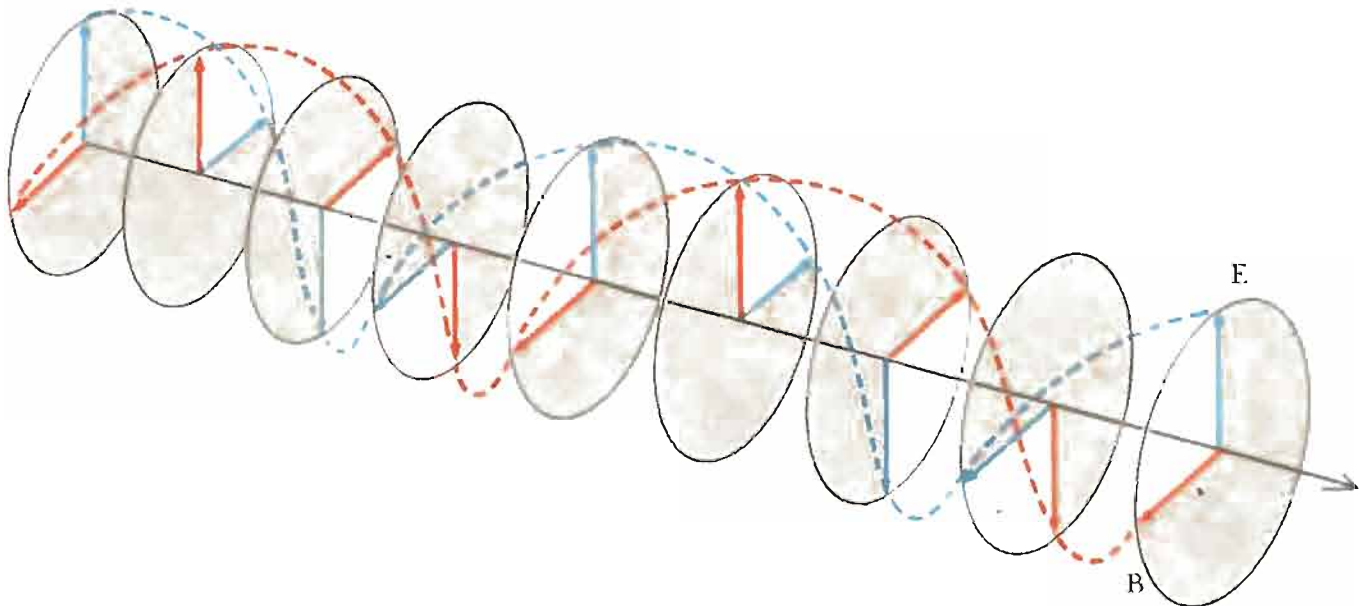
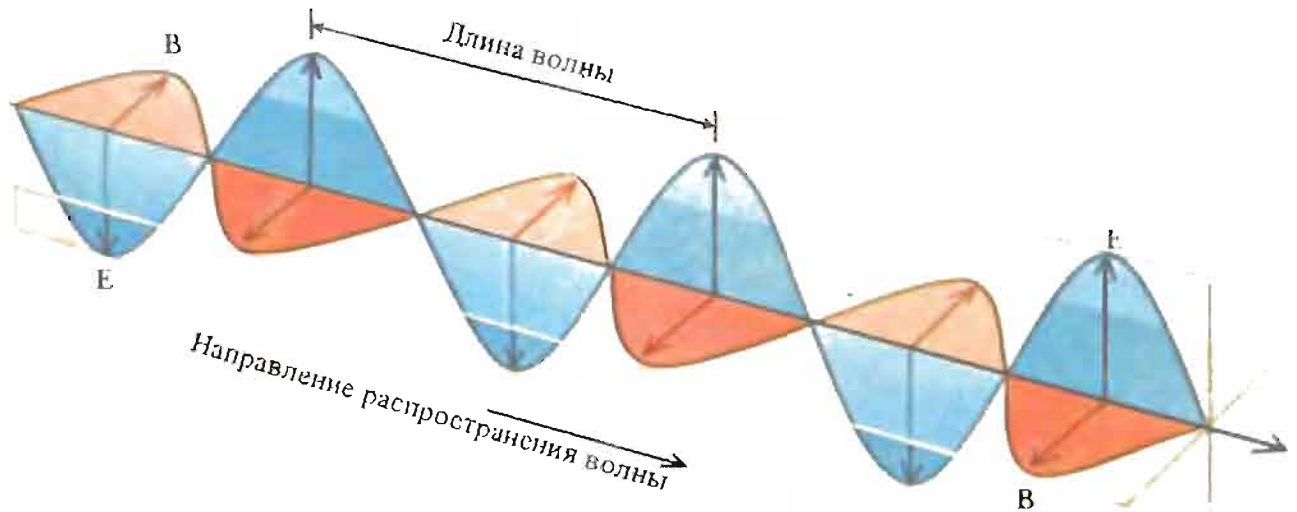
В физике Ньютона и Галилея все точки пространства и все моменты времени равноправны. Это значит, что за начало координат можно принять любое событие, а роль пространственной и временной осей может выполнять любая прямая, параллельная соответствующим осям (см. левый нижний или правый верхний рисунки). Чтобы подчеркнуть равноправие событий, можно изображать пространственно-временные координаты, не выделяя специальную пару осей, а используя *координатную сетку*, каждая из точек которой может служить началом координат, а каждая пара пересекающихся линий — играть роль координатных осей. На нижнем правом из приведенных рисунков изображен участок наклонной координатной сетки.

Вплоть до этого места описание равномерного движения одинаково в теориях Ньютона и Эйнштейна. Две теории расходятся в том, как два наблюдателя, равномерно движущиеся относительно друг друга, будут описывать одну и ту же последовательность событий, например в истории равномерно движущейся частицы или фотона. Ясное понимание классической теории и лежащих в ее основе предположений поможет нам понять релятивистскую теорию.

Фотоны

Луч света оказывает на кусочек металлической фольги давление, величину которого можно измерить. Он также нагревает фольгу. Следовательно, свет обладает как импульсом, так и энергией. В этом отношении луч света напоминает пучок частиц вещества. Но свет также обладает свойством, которое отличает его от пучка частиц. Если расщепить луч монохроматического света на два луча, а затем, после того как лучи пройдут несколько различающиеся пути, свести их вместе, то можно наблюдать на экране *интерференционные полосы* (если, конечно, эксперимент поставлен достаточно аккуратно). Подобного рода эксперименты показывают, что монохроматический свет обладает волновыми свойствами. Две части одного луча можно заставить взаимодействовать (интерферировать) друг с другом так, что они будут усиливать или, наоборот, ослаблять друг друга (см. рисунок). Яркие полосы образуются там, где гребни волн, соответствующих обоим лучам, совпадают, а темные полосы — там, где гребни одного луча приходятся на впадины другого. Частицы вещества не могут взаимодействовать подобным образом, а следовательно, свет не может состоять из крошечных частиц, как полагал Ньютон.

В 1905 г. Эйнштейн предположил, что обмен энергией и импульсом между светом и веществом всегда происходит дискретными порциями, величина которых пропорциональна частоте света. Точнее говоря, если атомное ядро, атом, молекула или кристалл поглощают (или излучают) монохроматический свет с частотой ν ,



Плоская линейно поляризованная волна. Векторы E и B , характеризующие соответственно электрическое и магнитное поле, колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны (*вверху*). Плоская волна с круговой поляризацией. За время, пока векторы E и B , двигаясь слева направо, проходят путь, равный длине волны, они поворачиваются на 360° (*внизу*). В зависимости от частоты (длины волны) электромагнитное излучение разделяют на несколько диапазонов: радиоволны, инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение.

то их энергия должна возрастать (или убывать) на величину, кратную кванту энергии $\Delta E = h\nu$, а импульс должен возрастать (или убывать) на величину, кратную кванту импульса $\Delta p = h\nu/c$, где c — скорость света ($\approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с), h ($\approx 6,6 \cdot 10^{-27}$ г·см²/с) — универсальная константа, называемая постоянной Планка. В результате одного акта взаимодействия происходит обмен одним квантом энергии и одним квантом импульса. Таким образом, монохроматический свет при взаимодействии с веществом ведет себя так, как будто состоит из дискретных волновых пакетов, переносящих импульс $h\nu/c$ и энергию $h\nu$. Более того, эти пакеты движутся с постоянной скоростью c . Однако в отличие от частиц вещества их нельзя локализовать в пространстве. Когда мы говорим об x -координате фотона и изображаем его историю посредством линии на x, t -плоскости, мы имеем в виду x -координату и историю плоского фронта волны бесконечной протяженности. Фронт такой

волны перпендикулярен оси x , вдоль которой распространяется волна. Если описываемый таким образом фотон поглощается атомом, то это происходит в определенном месте, а именно там, где находится атом. Но вероятность того, что фотон будет поглощен в данной области своего волнового фронта, зависит лишь от площади поглощающей области, а не от ее положения.

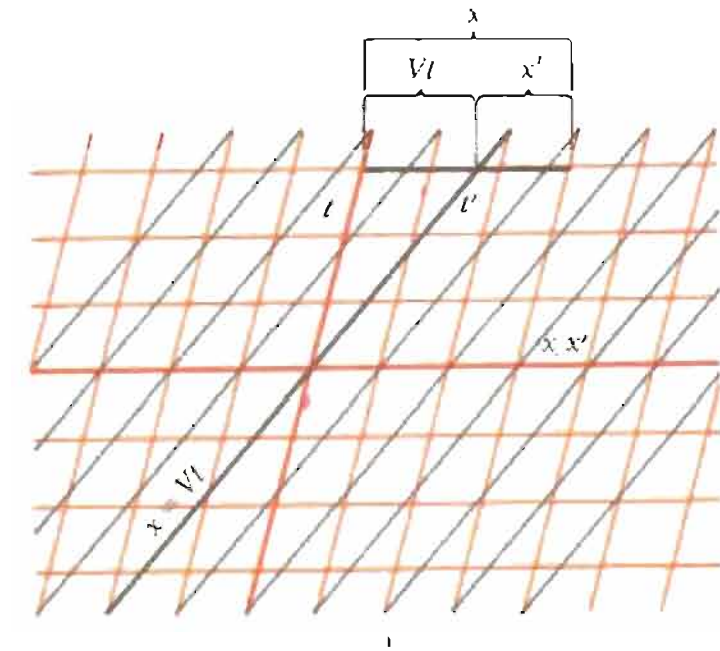
Обозначим через F систему отсчета, в которой справедливы ньютоновские законы движения, а через G — координатную сетку, связанную с этой системой отсчета. На такой сетке история покоящейся частицы изображается линией $x = \text{const}$, т. е. линией, параллельной оси времени. Прямые линии, наклонные к оси времени, изображают истории частиц, движущихся с постоянными скоростями. История одной из таких частиц, движущейся с постоянной скоростью V и проходящей через начало координат $x=0$ в момент времени $t=0$, изображена на правом нижнем рисунке (см. с. 171) линией $x = Vt$. Рассмотрим теперь новую систему отсчета F' , которая связана с движущейся частицей. Линия $x = Vt$ служит осью времени в координатной сетке G' , связанной с движущейся системой отсчета F' , поскольку ось времени любой пространственно-временной сетки изображает историю частицы, покоящейся в точке $x=0$. До этого момента представления Эйнштейна еще согласуются с представлениями Галилея и Аристотеля. Классический и релятивистский подходы начинают отличаться со следующего этапа описания.

Как провести ось расстояний в новой сетке G' ? События, изображаемые точками новой оси расстояний, должны представлять собой события, имеющие временную координату $t'=0$, где t' — время, измеренное в движущейся системе отсчета F' . Галилею, Аристотелю и Ньютону казалось очевидным, что измерение времени не зависит от системы отсчета, так что интервал времени между любой парой событий имеет одинаковую продолжительность во всех (движущихся без ускорения) системах отсчета. Если мы примем это допущение и будем считать, что событие с координатами $x=0$, $t=0$ имело место в момент $t'=0$, т. е. совместим начало отсчета сеток G и G' , то в этом случае ось x' совпадет с осью x . Это случится потому, что события, изображаемые точками на оси x , одновременно происходят в системе отсчета F' и, следовательно, они все должны иметь временную координату $t'=0$, что и задает, по определению, положение оси x' .

У двух координатных сеток должны совпадать не только оси x и x' , но и все линии $t' = \text{const}$ и $t = \text{const}$ (см. рисунок), поскольку временные координаты любого события одинаковы в обеих системах отсчета: $t = t'$.

Теперь остается только зафиксировать «густоту» координатных линий, параллельных оси t' , т. е. пространственный масштаб. С его помощью определяется расстояние между двумя одновременными событиями в системе отсчета F' . В частности, он позволяет определить в системе F' длину жесткого стержня, имеющего по предположению единичную длину в системе F . Согласно Галилею и Ньютону, *длина жесткого стержня не меняется при его движении*. Учитывая это предположение, мы должны провести линии, параллельные оси времени $t'=0$, так, чтобы расстояние между ними (измеренное вдоль линий, параллельных оси расстояний) было одинаковым в обеих сетках, G и G' (см. приведенный далее рисунок). На этом завершается построение сетки G' . Выше мы убедились, что в основе построения лежат два предположения: 1) временной интервал между двумя любыми событиями одинаков в обеих системах отсчета; 2) расстояние между двумя одновременными событиями одинаково в обеих системах отсчета.

Эти выводы можно обобщить с помощью формул, которые связывают



Пространственно-временные сетки двух систем отсчета, равномерно движущихся относительно друг друга.

координаты x , t произвольного события, измеренные в системе F , с координатами x' , t' того же события, измеренными в системе F' , движущейся со скоростью V относительно F :

$$x' = x - Vt, \quad t' = t. \quad (5.1)$$

Первое соотношение поясняет приведенный здесь рисунок, а второе отражает тот факт, что оси расстояний и параллельные им координатные линии совпадают у обеих сеток.

Заменяя t на t' в первом из равенств (5.1), после перестановки получаем:

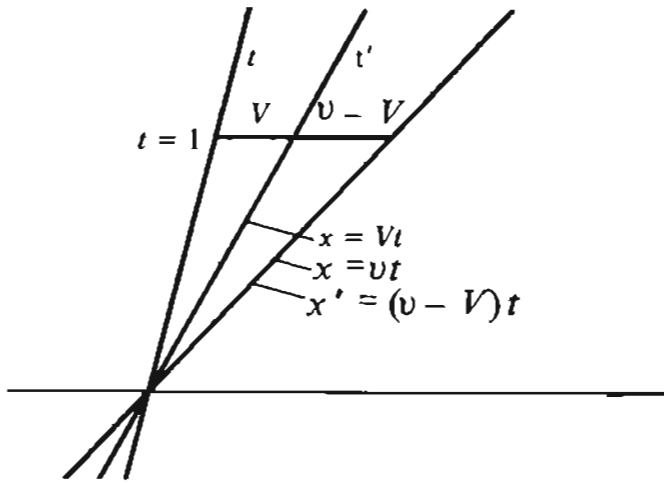
$$x = x' + Vt', \quad t = t'. \quad (5.2)$$

Уравнения (5.2) позволяют вычислить координаты x , t произвольного события по известным координатам x' , t' . По своему виду эти уравнения подобны уравнениям (5.1), с помощью которых можно вычислить пару координат x' , t' , если известны координаты x , t . Мы можем получить уравнения (5.2) из (5.1), поменяв местами величины со штрихами и без них и заменив V , т. е. скорость системы F' относительно системы F , на $-V$, т. е. на скорость системы F относительно F' . Таким образом, преобразование (5.1) описывает относительное движение совершенно симметричным образом.

Скорость света и принцип относительности

Рассмотрим частицу, движущуюся со скоростью v относительно системы отсчета F . Из приведенного здесь графика видно, что скорость этой частицы v' относительно системы F' , которая сама движется со скоростью V относительно системы F , равна $v - V$. Это универсальное правило классической физики, которое применимо как к волнам, так и к частицам. Например, если скорость звуковой волны относительно поверхности Земли равна v , то для наблюдателя, летящего со скоростью V в том же направлении, скорость звуковой волны будет равна $v - V$. Эксперименты показывают, что этот вывод справедлив даже в том случае, когда V больше v , как это имеет место, например, в случае, когда наблюдатель расположен на борту самолета, летящего со сверхзвуковой скоростью.

Применим ли этот закон к световым волнам? В 1887 г. А. А. Майкельсон и Э. У. Морли опубликовал результаты эксперимента, дающего ответ на



Классический закон сложения скоростей.



Американский физик Альберт А. Майкельсон (1852—1931). (Коллекция Грейнджера.)

этот вопрос. В основе эксперимента лежали следующие соображения.

1. Существует система отсчета F , в которой скорость света имеет одно и то же значение c во всех направлениях.

2. Вследствие своего движения вокруг Солнца Земля не может *всегда* находиться в покое относительно системы F , определенной вышеуказанным способом. Если Земля покоится относительно системы F в некоторый момент времени, то шесть месяцев спустя она наверняка будет двигаться относительно F .

3. Предположим, что Земля движется со скоростью V вдоль оси x относительно системы отсчета F . Тогда скорость света, распространяющегося также вдоль оси x , будет для земного наблюдателя равна $c - V$, а скорость света, распространяющегося в направлении, противоположном оси x , составит $c + V$. В эксперименте Майкельсона — Морли (см. рисунок с изображением схемы эксперимента) свет, распространяясь вдоль плеча интерферометра длиной L , отражается от зеркала и возвращается в исходную точку. Если это плечо параллельно направлению движения Земли относительно системы F , то время, за которое свет проходит путь туда и обратно, равно

$$\Delta t_{\parallel} = \frac{L}{c-V} + \frac{L}{c+V} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1-V^2/c^2} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{V^2}{c^2}\right). \quad (5.3)$$

4. Если свет распространяется под прямым углом к направлению движения Земли, то его скорость равна $\sqrt{c^2 - V^2}$, поскольку она представляет собой векторную сумму скорости света c в системе отсчета F и скорости движения Земли $-V$ в той же системе отсчета. Следовательно, когда плечо интерферометра перпендикулярно направлению движения Земли, время, затраченное светом на путь до зеркала и обратно, равно

$$\Delta t_{\perp} = \frac{L}{(c^2 - V^2)^{1/2}} + \frac{L}{(c^2 - V^2)^{1/2}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}\right). \quad (5.4)$$

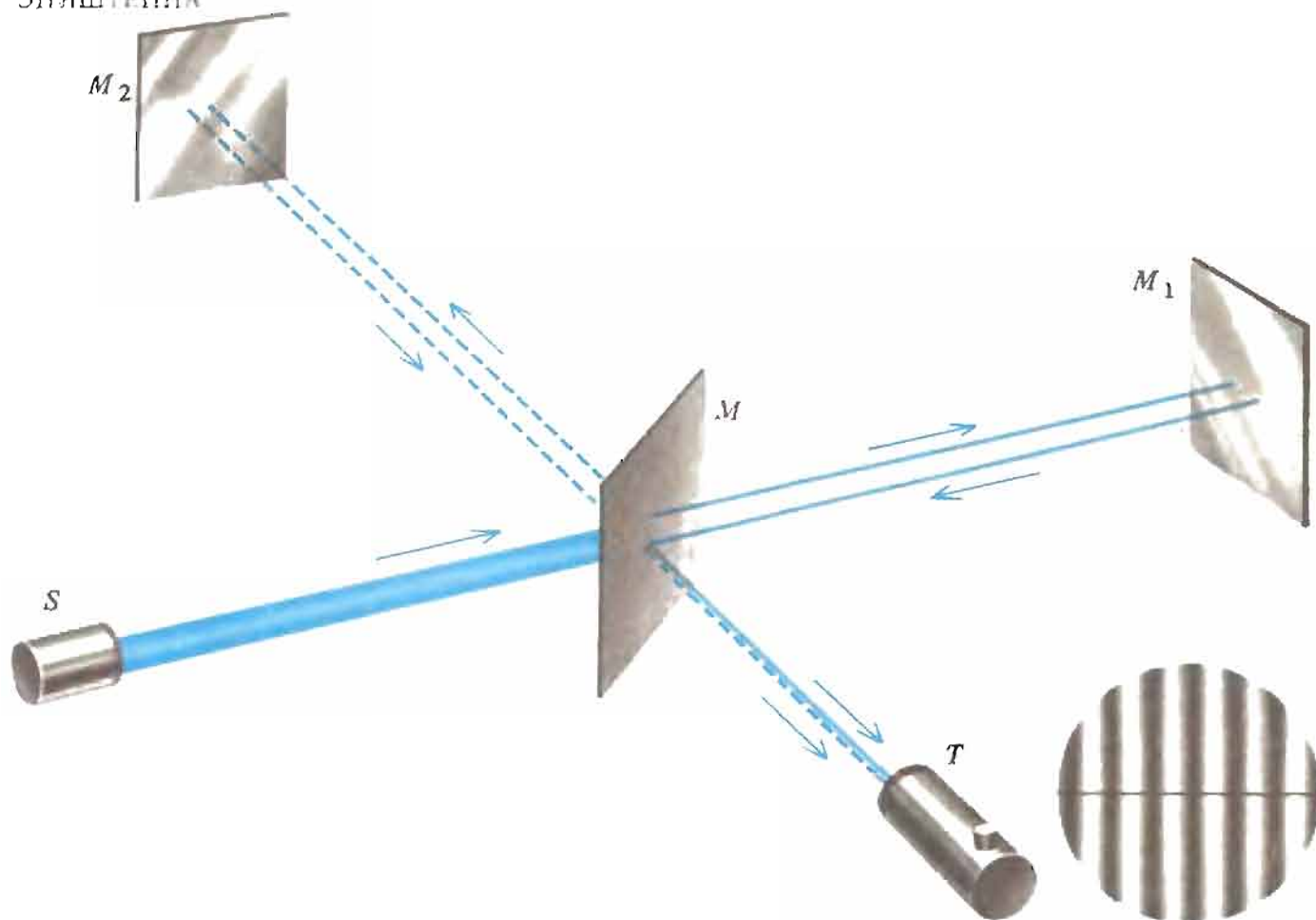


Схема эксперимента Майкельсона—Морли. Пучок монохроматического света от источника S , попадая на полупрозрачное зеркало M , разделяется на два пучка. После отражения от зеркал M_1 и M_2 пучки сходятся на зеркале M , откуда направляются к телескопу T . Если пути MM_1 и MM_2 почти одинаковы, а зеркала M_1 и M_2 расположены не точно под прямым углом к падающим пучкам, то в телескоп будет наблюдаться система интерференционных полос, подобная той, что изображена в левом нижнем углу рисунка.

Временные интервалы Δt_{\parallel} и Δt_{\perp} несколько отличаются друг от друга. Относительная разность их равна

$$\frac{\Delta t_{\parallel} - \Delta t_{\perp}}{\Delta t_{\parallel}} = \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}.$$

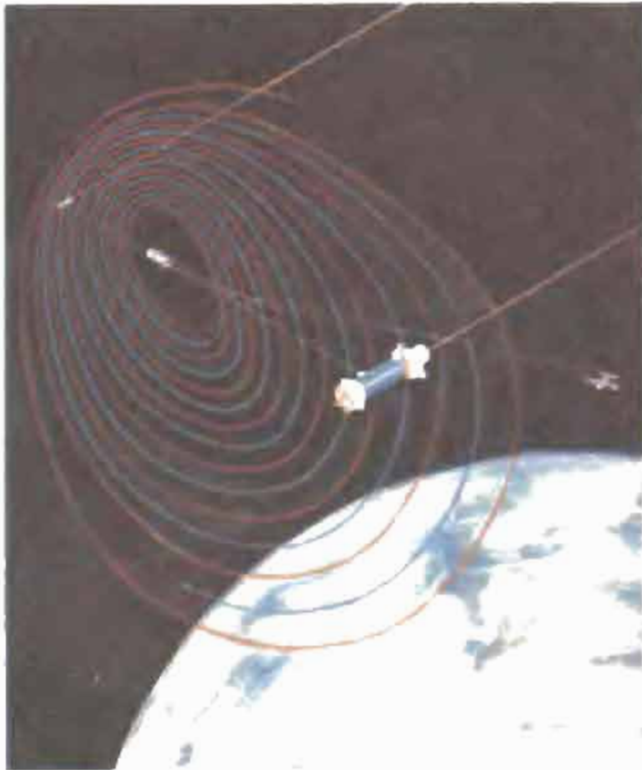
Скорость движения Земли по орбите составляет около 30 км/с, скорость света равна $3 \cdot 10^5$ км/с; следовательно, относительное различие временных интервалов составляет $5 \cdot 10^{-9}$.

5. Майкельсон придумал способ, позволяющий зарегистрировать ничтожно малое различие интервалов времени, за которые свет проходит путь туда и обратно, распространяясь в параллельном и перпендикулярном направлениях. Как видно из схемы эксперимента, луч монохроматического света расщепляется на два пучка, которые, двигаясь во взаимно перпендикулярных направлениях, доходят до зеркала, отражаются, а затем соединяются вместе. При сложении они интерферируют, создавая комбинацию ярких и темных полос (см. врезку на с. 172). Экспериментальную установку можно повернуть на 90° , одновременно наблюдая картину интерференционных полос в телескоп. Предположим, что одно плечо интерферометра вначале было параллельно направлению движения Земли относительно системы отсчета F , в которой скорость света одинакова во всех направлениях. При таком повороте время, затрачиваемое светом на путь вдоль отмеченного плеча, уменьшится от величины,

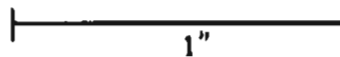
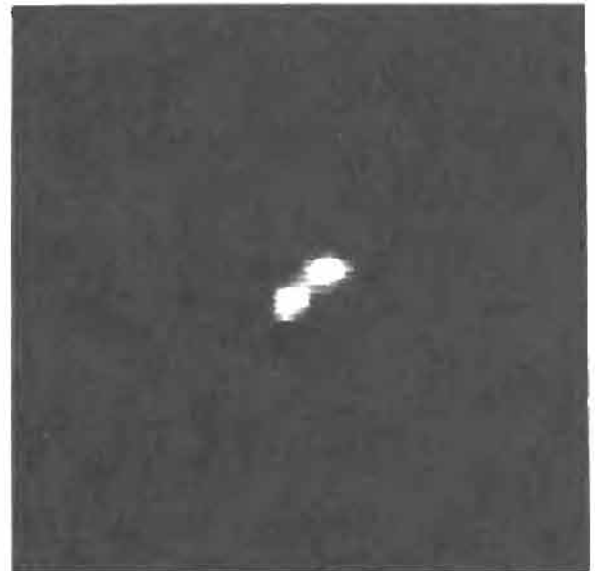
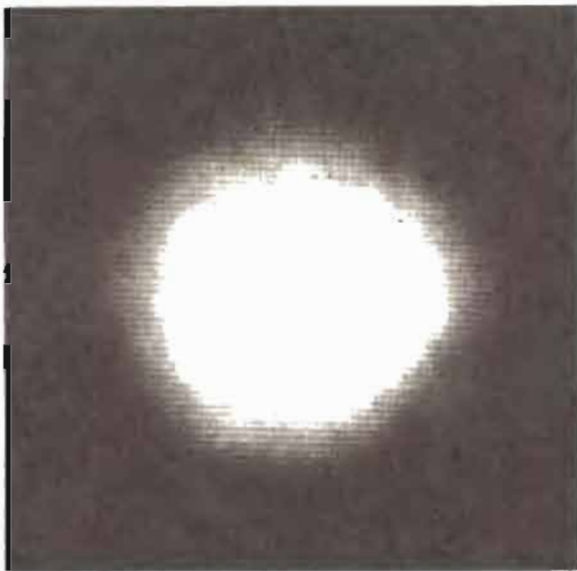
определяемой соотношением (5.3), до чуть меньшего значения, вычисляемого по формуле (5.4). Вместе с тем время, за которое свет проходит вдоль другого плеча, возрастает от значения (5.4), где вместо L надо поставить L' (два плеча интерферометра трудно сделать так, чтобы они имели *абсолютно* одинаковую длину), до значения (5.3), где вместо L надо поставить L' . Таким образом, разность интервалов времени, за которые свет проходит оба плеча, возрастает вдвое по сравнению с разностью значений, определяемых по формулам (5.3) и (5.4). Следовательно, относительное изменение времени равно V^2/c^2 , что составляет примерно 10^{-8} . Предположим, что длина плеча интерферометра 10 м. Тогда разность хода световых лучей изменится при повороте установки на 90° на величину $10^{-8} \times 2 \times 1000 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Майкельсон и Морли использовали желтый свет с длиной волны около $6 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Таким образом, изменение разности хода двух лучей составляет примерно треть длины волны, что должно было бы привести к заметному смещению картины интерференционных полос. Однако Майкельсон и Морли вообще не обнаружили изменения интерференционной картины, на основании чего сделали вывод, что изменение разности хода, если оно вообще имеет место, должно быть в шесть раз меньше предсказываемой величины.

Когда эксперимент приводит к неожиданному результату, физики задают вопрос: «*Следует* ли считать этот результат удивительным? На чем основывались ожидания: на неподтвержденных предположениях или на обманчивых аналогиях»? В частности, существует ли причина, по которой простое правило сложения $v' = v - V$, применимое для звуковых волн или, скажем, волн на поверхности воды, не выполняется столь же точно для световых волн? Звуковые волны представляют собой колебания в веществе: газе, жидкости или твердом теле. Они распространяются *относительно среды* с определенной скоростью, величина которой зависит от свойств и физического состояния среды. Например, скорость звука в газе пропорциональна корню квадратному из температуры газа и обратно пропорциональна корню квадратному из его среднего молекулярного веса. Чтобы вычислить скорость звуковой волны в данной системе отсчета, нужно сложить скорость волны относительно среды со скоростью среды относительно системы отсчета. Те же рассуждения применимы и к волнам на поверхности воды, а также к любому другому виду волн в материальной среде. Следовательно, *если* световые волны также представляют собой возмущения в материальной среде, то можно ожидать, что они будут вести себя точно так же. Тогда система отсчета F , в которой свет распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях, должна быть такой системой, относительно которой эта среда покоится.

Все выдающиеся физики XVII—XIX вв. верили в существование такой среды — так называемого *эфира*; это название использовали еще древнегреческие философы для обозначения неосязаемой субстанции, из которой, по их мнению, состоят небесные тела. Гюйгенс построил логичную математическую теорию распространения света в материальной среде, основываясь на аналогии между световыми волнами и волнами на поверхности воды. Ньютон утверждал, что передача тепла внутри полости, из которой откачан воздух, доказывает существование эфира, и высказал предположение, что свет возбуждает периодические колебания в эфире, который передает их твердым телам. Великий математик Леонард Эйлер (1707—1783) выдвинул гипотезу о том, что эфир передает не только тепло и свет, но и магнитные, электрические силы и гравитацию. Физики, разработавшие в XIX в. новую волновую теорию света, сделали эфир основным предметом экспериментальных и теоретических исследований. Они вдруг обнаружили, что эфир обладает свойствами, не похожими на свойства никакой другой среды (например, свойством



Так художник Берил Лангер изобразил космический интерферометр Майкельсона (система SAMS1), который предполагается установить на космической станции будущего. По мысли автора проекта Роберта Стачника в этом интерферометре, движущемся по орбите вокруг Земли, два разнесенных на большое расстояние телескопа «собирают» свет звезды, направляя его к расположенному посередине между ними устройству. Накладываясь друг на друга, пучки света создают интерференционную картину, подобную той, которая наблюдалась в эксперименте Майкельсона. Для контроля и регулировки расстояния между телескопами, которое систематически изменяется вследствие их движения, используется луч лазера. Угловое разрешение такой системы определяется максимальным расстоянием между телескопами. Если телескопы разнести на 10 км, то разрешение достигает 10^{-5} угловой секунды. (С разрешения Р. Стачника и Б. Лангера.)



Спекл-интерферометрия (от англ. *speckle* — пятнышко) — основанный на явлении интерференции сложнейший метод восстановления изображений, полученных с помощью телескопа, которые искажены атмосферными флуктуациями. Левая фотография представляет собой результат наложения 100 изображений источника ADS 1164A, полученных с короткой экспозицией и смещенных относительно друг друга случайным образом. Правая фотография получена в результате анализа отдельных изображений, сделанных с короткой экспозицией (они имеют пятнистый вид); осуществленный методом спекл-интерферометрии, этот анализ позволяет восстановить информацию, скрытую в, казалось бы, хаотической картине пятен. Видно, что на самом деле источник представляет собой двойную звезду, компоненты которой разделены расстоянием примерно в $1/7''$. Этот метод позволяет не только раздельно наблюдать две близкие звезды, но и выяснить их взаимную ориентацию и относительную яркость.



Известный математик Леонард Эйлер (1707—1783). С гравюры 1835 г. (Коллекция Грейнджера.)



Английский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879). (Коллекция Грейнджера.)

передавать только поперечные колебания). Более того, почти каждый качественно новый эксперимент выявлял неожиданные свойства эфира, вынуждая физиков с невероятной изобретательностью пересматривать свои теоретические модели. Даже Джеймс Клерк Максвелл, создатель теории электромагнитного поля, которая объясняла все известные свойства света без каких-либо предположений о свойствах эфира, был абсолютно уверен в его существовании; он написал об эфире обширную статью для Британской энциклопедии. В 1880 г. Максвелл направил Майкельсону письмо, предлагая осуществить эксперимент, который теперь называют экспериментом Майкельсона — Морли.

Теория Максвелла

Атомы состоят из электрически заряженных частиц: электронов, имеющих отрицательный заряд, и ядер, положительный заряд которых кратен заряду электрона. Равные и противоположно направленные силы, с которыми два неподвижных заряда действуют друг на друга, подобно гравитации, убывают обратно пропорционально квадрату расстояния. Сила электрического взаимодействия также прямо пропорциональна произведению зарядов, причем одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Атомы, молекулы, жидкости и твердые тела удерживаются как целое силами электростатического притяжения.

Подобно тому как масса порождает гравитационное поле, электрический заряд создает вокруг себя *электрическое поле*. Величина и направление напряженности электрического поля E связаны с распределением зарядов так же, как ускорение в гравитационном поле g с распределением масс. Силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Электрическое поле E действует на заряд q с силой qE .

Движущиеся электрические заряды создают электрические токи, которые в свою очередь порождают *магнитные поля*. Связь между током и магнитным полем выражается законом Ампера. Все магнитные поля обязаны своим происхождением электрическим токам.

Когда количество силовых линий магнитного поля, пересекающих рамку из проводника, изменяется со временем, в проводнике возникает ток. Этот ток обусловлен электрическим полем, величина которого пропорциональна скорости изменения числа магнитных силовых линий, пересекающих рамку (эта закономерность отражена в законе электромагнитной индукции Фарадея). На этом принципе осно-

Джеймс Клерк Максвелл, основываясь на предшествующих работах Карла Фридриха Гаусса и Джорджа Габриеля Стокса, развил созданную ими векторную алгебру (основы которой изложены в Приложении), выразив математически созданное Майклом Фарадеем представление о силовых линиях электрического и магнитного поля и связи силовых линий с движением электрических зарядов. Максвелл пришел к выводу, что для получения согласованной совокупности математических законов необходимо ввести новый источник магнитного поля, т. е. новый вид электрического тока, пропорциональный скорости изменения электрического поля; Максвелл назвал его *током смещения*. Из этого предположения Максвелла вытекало важное следствие: изменяющиеся магнитные и электрические поля могут распространяться в пустом пространстве, перенося импульс и энергию. Согласно теории Максвелла, такое изменяющееся во времени электромагнитное поле можно представить в виде плоских монохроматических волн, каждая из которых характеризуется своей частотой и распространяется в определенном направлении с определенной скоростью. Теория предсказывает величину этой скорости, а также ее независимость от частоты. Максвелл отождествил электромагнитные волны, существование которых вытекало из его теории, со световыми волнами. Все предсказываемые теорией Максвелла свойства электромагнитных волн, включая скорость распространения, в точности совпадали с экспериментально обнаруженными свойствами световых волн.

Из теории Максвелла также следовало, что быстро колеблющиеся электрические заряды порождают электромагнитные волны. Генрих Герц подтвердил это, сконструировав первый генератор и первый приемник радиоволн — электромагнитных колебаний с длиной волны больше 100 мкм.

Обобщив теорию Максвелла в двух отношениях, Эйнштейн заложил основы двух великих теорий физики XX в.: теории относительности и квантовой механики. Согласно принципу относительности, законы электромагнетизма (уравнения Максвелла) должны иметь одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Представление о фотонах, изложенное Эйнштейном в том же году, когда была опубликована его работа по специальной теории относительности, состоит в том, что поглощение и излучение электромагнитной энергии и импульса носит «квантовый» характер.

Чтобы объяснить отрицательный результат эксперимента Майкельсона — Морли, ирландский физик Дж. Ф. Фицджеральд и независимо нидерландский физик Х. А. Лоренц высказали предположение, что жесткие тела сжимаются вдоль направления своего движения относительно эфира. Из сравнения соотношений (5.3) и (5.4) видно, что время, за которое свет проходит в оба конца вдоль плеч интерферометра, будет одинаковым, если длину пути вдоль направления движения Земли относительно эфира уменьшить в $(1 - V^2/c^2)^{1/2}$ раз. В 1904 г. Лоренц опубликовал обобщенную теорию Максвелла, в которой гипотеза Лоренца — Фицджеральда являлась следствием более общих предположений. Теория Лоренца также объясняла, почему оканчивались неудачей и все другие попытки обнаружить какое-либо движение Земли относительно эфира.

Тем временем Альберт Эйнштейн, работавший рядовым сотрудником патентного бюро в Берне, подошел к проблеме с другой стороны. Ему казалось удивительным, что математические уравнения, описывающие электромагнетизм и свет (т. е. законы Максвелла, распространенные Лоренцем на атомы и электроны), выделяют преимущественную систему отсчета (систему F в нашем обозначении), в то время как в механике Ньютона и его законе всемирного тяготения такая система отсутствует. Почему должны механические процессы предпочитать «демократию» в инерциальных системах отсчета, а электромагнитные явления — «монархию»? Отсутствие математической гармонии значило для Эйнштейна больше, чем трехвековая традиция представ-



Нидерландский физик Хендрик А. Лоренц (1853—1928). (Архив Беттмана.)



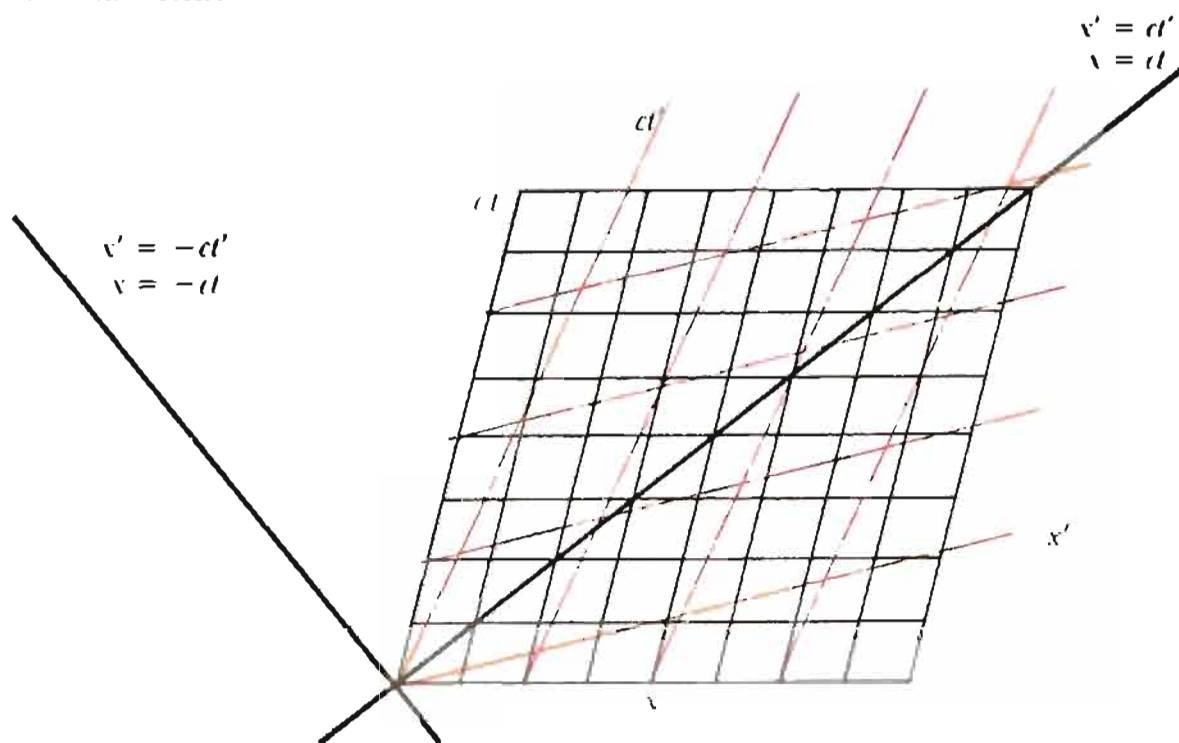
Немецкий физик Генрих Г. Герц (1857—1894). (Коллекция Грейнджера.)

лений об эфире. Предшественники Эйнштейна, в сущности, утверждали: «Эфир должен существовать, ибо невозможно представить колебания без того, что именно колеблется». Эйнштейн понял, что физические законы не должны быть связаны тем, что могут и чего не могут вообразить себе физики. Подобно Герцу, который на основании уравнений Максвелла пришел к выводу о существовании радиоволн и получил их в лаборатории, Эйнштейн считал, что уравнения Максвелла и есть его теория. Уравнения Максвелла не подразумевали существования среды, передающей электромагнитные волны, но они неявно выделяли преимущественную систему отсчета — систему F , в которой свет распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях. Но если нет эфира, подтверждающего привилегированный статус этой системы отсчета, то законы, описывающие электромагнитные явления, *не должны* делать различия между системой F и другими инерциальными системами. Этот вывод Эйнштейна представлял собой обобщенный принцип относительности Галилея: законы, которым подчиняются электромагнитные и механические явления, имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. В частности, скорость света, которая появляется (при другой физической интерпретации) как коэффициент в уравнениях Максвелла, должна иметь одно и то же значение во всех направлениях и во всех системах отсчета.

Этот вывод противоречит простому правилу $v' = v - V$, поскольку, согласно принципу относительности, $v' = v$, если v и v' — скорость света, измеренная соответственно в системах отсчета F и F' , которые движутся относительно друг друга со скоростью V . Эйнштейн пришел к выводу, что это простое правило неверно.

Построение пространственно-временной релятивистской диаграммы

Вернемся к пространственно-временной диаграмме (см. рисунок на с. 175), отражающей связь между расстояниями, временами и скоростями двух инерциальных систем отсчета, и попробуем понять, на каком этапе ее построения мы допустили ошибку. При построении пространственно-временной сетки для системы F (см. правый нижний рисунок на с. 171) было сделано единственное предположение: пространство и время считались однородными, в сетке не должно быть предпочтения ни какой-либо одной точке пространства, ни како-



Ромбические сетки двух систем отсчета, равномерно движущихся относительно друг друга.

му-либо одному моменту времени. Далее мы отождествили линию $x = Vt$ с осью t' пространственно-временной сетки системы отсчета F' . Этот шаг также не вызывает сомнений. Но затем мы сделали еще два предположения. Во-первых, мы предположили, что каждое событие имеет одинаковую временную координату в обеих системах отсчета и, следовательно, интервал времени между любыми двумя событиями должен быть в обеих системах одинаков. Во-вторых, мы считали, что в обеих системах жесткий стержень должен иметь одинаковую длину. Теперь заменим эти два допущения, хотя они и вполне правдоподобны, принципом относительности, сформулированным в конце предыдущего раздела.

Прежде всего заметим, что координатные линии сетки G' , как и сетки G , должны всюду иметь одинаковую «густоту». В противном случае получится, что, во-первых, часы, которые с точки зрения наблюдателя в системе F идут равномерно, для наблюдателя в системе F' будут идти неравномерно и, во-вторых, метки на жестком стержне, расположенные на равном расстоянии друг от друга для наблюдателя в системе F , будут расположены неравномерно для наблюдателя в системе F' .

Рассмотрим теперь следствия, вытекающие из предположения о том, что скорость света в обеих системах отсчета одинакова. Для удобства рассуждений заменим временную координату t на ct , где c — скорость света (см. приведенный здесь рисунок). Тогда линии, изображающие световые сигналы, которые распространяются вдоль положительного направления оси x , на сетке G будут иметь вид семейства диагоналей ромбических ячеек, а световые сигналы, распространяющиеся в обратном направлении, образуют другое семейство диагоналей. (Равенство сторон ячеек сетки выражается условием $\Delta x = \pm c\Delta t$. Интервалы расстояния и времени между событиями при описании светового сигнала удовлетворяют тому или другому из этих равенств в зависимости от направления распространения света: слева направо или справа налево. Заметим, что диагонали каждого из семейств параллельны друг другу и перпендикулярны диагоналям другого семейства.) Поскольку сетки G и G' должны быть качественно неотличимы друг от друга, диагонали сетки G должны также служить диагоналями ромбических ячеек сетки G' . Иными

словами, диагонали должны одновременно удовлетворять как соотношению $\Delta x' = \pm c\Delta t'$, так и соотношению $\Delta x = \pm c\Delta t$ (см. рисунок). Отметим, что вид диаграммы не изменится, если ее повернуть на 180° вокруг любой из световых линий, т. е. линий, отражающих «историю» световых сигналов. Любое вращение такого рода не изменяет сами световые линии, но меняет местами два семейства координатных сеток.

Теперь остается только выяснить, как размер единичной ячейки сетки G' (ячейки со сторонами $\Delta x' = c\Delta t' = 1$) связан с размером единичной ячейки сетки G (для которой $\Delta x = c\Delta t = 1$). Прежде всего выразим сделанные нами выводы математически. Чтобы сохранить симметрию между пространством и временем и придать формулам наиболее простой вид, будем далее измерять время и расстояние в одинаковых единицах и положим $c = 1^*$. Связь между сетками G и G' , о которой шла речь выше, в этом случае можно записать в виде

$$x' = \gamma(x - Vt), \quad t' = \gamma(t - Vx), \quad (5.5)$$

где γ — постоянная, значение которой мы пока не установили. Чтобы доказать справедливость уравнения (5.5), достаточно перевести его в графическую форму. Заметим прежде всего, что если заменить в этих уравнениях x на t и одновременно x' на t' , то первое уравнение превратится во второе, а второе — в первое. Эта симметрия уравнений отражает симметрию пространственно-временной диаграммы относительно поворота вокруг световых линий.

Теперь попытаемся интерпретировать уравнение $x' = \gamma(x - Vt)$. Это не так просто, поскольку масштабы сеток G и G' не обязательно одинаковы. Более того, мы вскоре увидим, что сделать их одинаковыми по собственному произволу невозможно, поскольку отношение между двумя масштабами определяется принципом относительности. Иными словами, отрезкам одинаковой длины на осях x и x' не соответствуют равные интервалы координат Δx и $\Delta x'$. Обозначим через u длину отрезка $\Delta x = 1$, отложенного вдоль оси x , а через u' — длину отрезка $\Delta x' = 1$, отложенного вдоль оси x' . На приведенном рисунке точка E изображает произвольное событие, x -координата которого представлена отрезком

$$AE = x \cdot u.$$

Аналогично

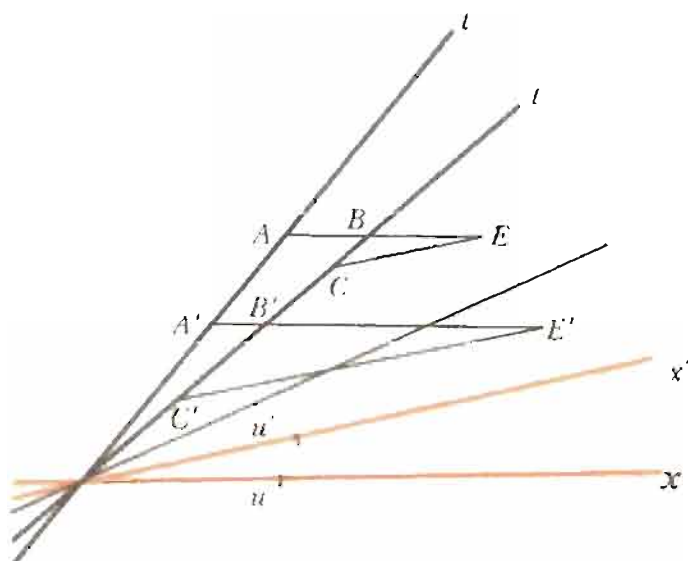
$$AB = Vt \cdot u, \quad BE = (x - Vt) \cdot u.$$

Соответственно координата x' того же события E изображается отрезком

$$CE = x' \cdot u'.$$

Отношение BE/CE не зависит от положения точки E , поэтому, выбрав другое событие E' , можем записать: $BE/CE = B'E'/C'E'$. Таким образом, отношение $(x - Vt)u/x'u'$ имеет одну и ту же величину во всех точках пространственно-временной диаграммы и, следовательно, $x' = \gamma(x - Vt)$, где γ — постоянная.

* Измерение расстояний по вертикали и по горизонтали в одинаковых единицах позволяет с помощью теоремы Пифагора выразить квадрат расстояния между двумя произвольными точками в пространстве в виде суммы квадратов. Аналогично (мы убедимся в этом позднее), измеряя время и расстояние в одинаковых единицах и полагая скорость света (которая теперь представляет собой отношение двух расстояний) равной единице, мы можем (по формуле, подобной формуле Пифагора) выразить квадрат пространственно-временного интервала между событиями. Подобно тому как гравитационная постоянная в формуле, выражающей закон всемирного тяготения Ньютона, представляет собой отношение «естественной» и «общепринятой» единиц измерения массы скорость света соответствует отношению двух независимо выбранных произвольных единиц



Этот рисунок наглядно поясняет, что величина γ [см. уравнения (5.5)] имеет одно и то же значение для любых двух событий E и E'

Подобным же образом можно доказать и второе равенство (5.5). Коэффициент пропорциональности в обоих уравнениях должен быть одинаковым, поскольку пространственно-временная диаграмма симметрична относительно поворота на 180° вокруг световых линий $x = \pm t$.

Уравнения (5.5) позволяют вычислить координаты x' , t' некоторого события, имеющего в системе F координаты x , t . Мы можем также рассматривать (5.5) как пару уравнений, в которых известны координаты x' , t' некоторого события в системе F' , и нужно найти координаты x , t того же события в системе F . Чтобы решить эту задачу, образуем из уравнений (5.5) комбинацию $x' + Vt'$ и $t' + Vx'$

$$\begin{aligned} x' + Vt' &= \gamma(1 - V^2)x \\ t' + Vx' &= \gamma(1 - V^2)t. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Согласно принципу относительности, уравнения (5.6) должны иметь тот же вид, что и уравнения (5.5) при замене V на $-V$. Это возможно в том и только том случае, если

$$\gamma(1 - V^2) = 1/\gamma,$$

или

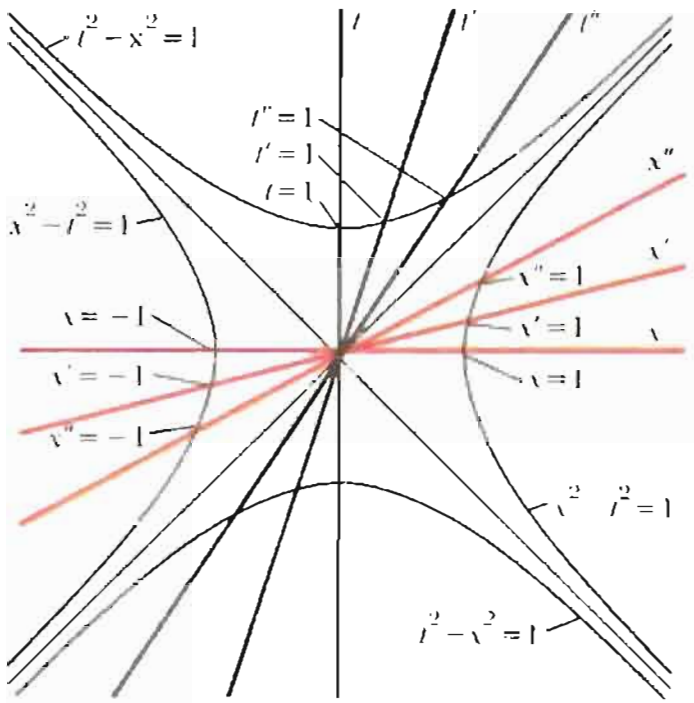
$$\gamma = (1 - V^2)^{-1/2}. \quad (5.7)$$

Теперь сетка G' определена полностью. Чтобы построить ее координатные линии, нужно на оси x' отметить точку с координатой $x'=1$. На оси x' всюду $t'=0$, поэтому из второго уравнения (5.5) получаем $t=Vx$. Полагая $t=Vx$ и $x'=1$ в первом уравнении (5.5) и используя уравнение (5.7), находим, что x -координата этой точки ($x'=1$, $t'=0$) равна γ . Аналогично получим, что ее t -координата равна γV . Разность между квадратами координат, таким образом, равна

$$x^2 - t^2 = \gamma^2 - \gamma^2 V^2 = \gamma^2(1 - V^2) = 1.$$

Итак, точка $x'=1$ на оси x' — это точка, в которой ось пересекается с гиперболой $x^2 - t^2 = 1$ (см. приведенный далее рисунок). Легко показать, что точка $t'=1$ на оси t' — это точка пересечения оси t' с гиперболой $t^2 - x^2 = 1$, изображенной на том же рисунке.

Полученные результаты имеют более общее и важное значение, чем может показаться на первый взгляд. Единица измерения времени (или расстояния)



Два семейства калибровочных гипербол соединяют события, координаты которых (собственное расстояние или собственное время) отстоят от начала координат на одинаковую величину.

произвольна, а в качестве начала координат пространственно-временной диаграммы можно выбрать любое событие.

Последнюю мысль можно выразить иначе: если $\Delta t'$ — интервал времени между двумя событиями на оси t' (для этой пары событий $\Delta x' = 0$) и если Δt и Δx — соответственно интервалы времени и длины между теми же событиями, измеренными в другой системе отсчета, то

$$(\Delta t')^2 = (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2.$$

Время, измеренное неподвижными часами (обозначенное t'), — достаточно важное понятие и потому имеет специальное название и обозначение; его называют *собственным временем* и обозначают τ . С учетом этого предыдущее равенство можно записать в виде

$$(\Delta \tau)^2 = (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2.$$

Точно так же назовем длину стержня, измеренную в системе отсчета, где стержень покоится, его *собственной длиной* и обозначим ее Δl . *Собственное расстояние* между двумя событиями — это расстояние Δl , измеренное в системе отсчета, в которой события одновременны. Оно связано с пространственным и временным интервалами между этими событиями, измеренными в любой другой системе отсчета формулой

$$(\Delta l)^2 = (\Delta x)^2 - (\Delta t)^2.$$

Рассмотрим теперь два произвольных события, отделенные друг от друга в некоторой произвольной системе отсчета расстоянием Δx и интервалом времени Δt . Как уже было показано, разность квадратов этих интервалов $(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$ одинакова во всех системах отсчета. Если эта разность положительна, то она представляет собой квадрат собственного времени, отделяющего два рассматриваемых события, т. е. квадрат интервала времени, измеренного с помощью часов, покоящихся в системе отсчета, в которой оба события происходят в одном месте. В этом случае говорят, что пространственно-временной интервал *временноподобный*. Если разность отрицательна, то она представляет собой (отрицательный) квадрат собственного расстояния между событиями, т. е. взятый со знаком минус квадрат расстояния, измеренного в системе отсчета, в которой события происходят одновременно. В этом случае интервал

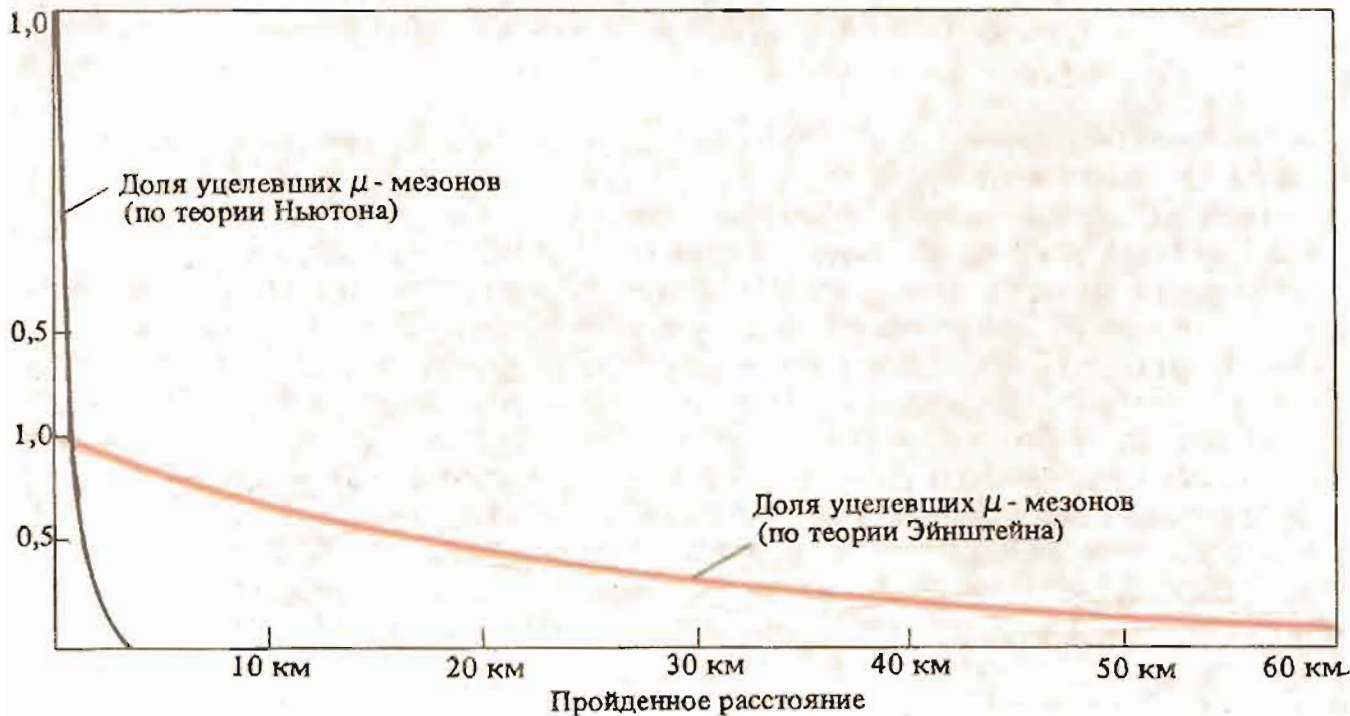
принято называть *пространственноподобным*. Если, наконец, разность равна нулю, так что $\Delta t = \pm \Delta x$, то два рассматриваемых события могут относиться к частице, движущейся со скоростью света: интервал при этом называется *светоподобным*.

Собственное время и собственная длина — релятивистское обобщение классических понятий времени и расстояния. В классической физике интервал времени между двумя произвольными событиями и расстояние между двумя любыми одновременными событиями имеют одинаковое значение во всех системах отсчета. В теории Эйнштейна пространственно-временной интервал между двумя событиями может быть либо времениподобным, либо пространственноподобным, либо светоподобным; он равен корню квадратному из разности квадрата интервала времени и квадрата расстояния между событиями, измеренными в произвольной системе отсчета. *Инвариантность* пространственно-временного интервала, т. е. факт независимости разности $(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$ от системы отсчета, в которой она измерена, является аналогом инвариантности интервала длины в евклидовой геометрии, где квадрат расстояния между двумя точками на плоскости (равный сумме квадратов разностей координат x и y концов отрезка) не зависит от ориентации координатных осей и положения начала координат.

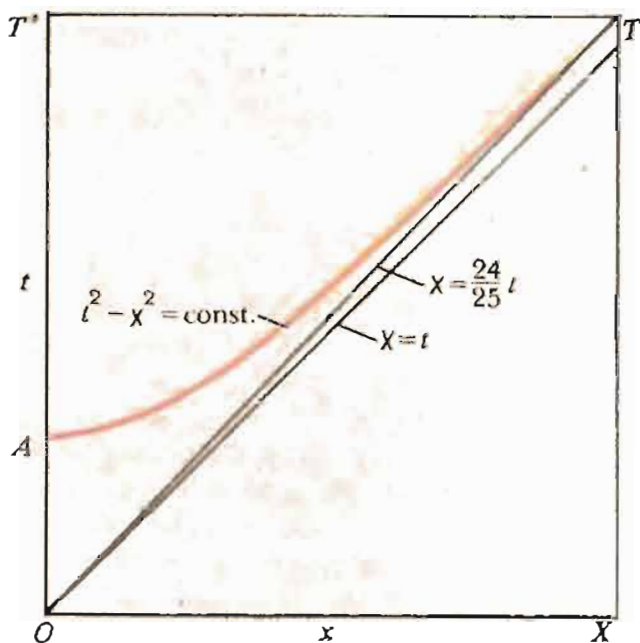
Таким образом, мы приходим к выводу, что более общая форма принципа относительности Эйнштейна возможна в том и только том случае, когда координатные сетки инерциальных систем связаны между собой уравнениями (5.5) и (5.7); эти уравнения называются *преобразованиями Лоренца* — в честь Х. А. Лоренца, который привел эти уравнения (хотя и вкладывая в них другой смысл) в своей работе 1904 г., т. е. за год до публикации Эйнштейном специальной теории относительности. Если относительная скорость двух систем отсчета V много меньше скорости света (в наших единицах это означает $V \ll 1$), то преобразования Лоренца неотличимы от классических (называемых преобразованиями Галилея. — *Перев.*), в которых длина жесткого стержня и интервал времени между событиями сохраняются неизменными. Однако далее мы узнаем, что при относительных скоростях, близких к скорости света, явления разительно отличаются от своих классических аналогов.

Измерения времени и расстояния в движущихся системах отсчета

Космические лучи представляют собой потоки высокоэнергетических частиц, влетающих в земную атмосферу из космического пространства. Некоторые из этих частиц приходят от Солнца, большинство частиц, обладающих наибольшей энергией, — из Галактики, а некоторое количество, возможно, даже из межгалактического пространства. Предполагается, что космические лучи — это вторичные продукты взрывных процессов, в том числе тех, которые ответственны за солнечные вспышки, взрывы сверхновых и, возможно, феномен квазаров. По-видимому, частицы космических лучей ускоряются магнитными полями, которые играют важную роль во всех этих процессах. В результате столкновений частиц высокой энергии с ядрами молекул в верхних слоях земной атмосферы рождается множество короткоживущих частиц, включая μ -мезоны. Все эти короткоживущие частицы в наши дни можно получить в лабораториях высоких энергий, что позволило с большой точностью измерить время жизни большинства частиц, в том числе и μ -мезона. Обозначим через t время жизни μ -мезона. Какой путь пройдет μ -мезон, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, за время своей жизни? Согласно классиче-



Распад μ -мезонов, образовавшихся в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей. Вследствие релятивистского замедления времени мезон, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, живет в 50 раз дольше, чем мезон, образовавшийся в ускорителе при сравнительно низких энергиях. Поэтому до своего распада релятивистские мезоны успевают пройти в 50 раз большее расстояние.



Отрезки OT и OA изображают один и тот же интервал времени, равный периоду полураспада μ -мезона в системе отсчета, относительно которой он покоится. Отрезок OT' соответствует периоду полураспада μ -мезона в системе отсчета, относительно которой он движется со скоростью, равной $24/25$ скорости света.

ской физике, этот путь равен ct , т. е. произведению скорости света на время жизни. Однако на самом деле оказалось, что μ -мезоны, образовавшиеся в верхних слоях земной атмосферы, проходят до своего распада путь, в 50 раз больший. Поскольку, как мы вскоре убедимся, скорость частицы не может превосходить скорость света и зависимость $d=vt$ между пройденным путем, скоростью и затраченным временем имеет место и при движении частиц со скоростью, близкой к скорости света, напрашивается вывод, что μ -мезоны,

порождаемые частицами космических лучей, живут в 50 раз дольше, чем μ -мезоны, полученные в лаборатории.

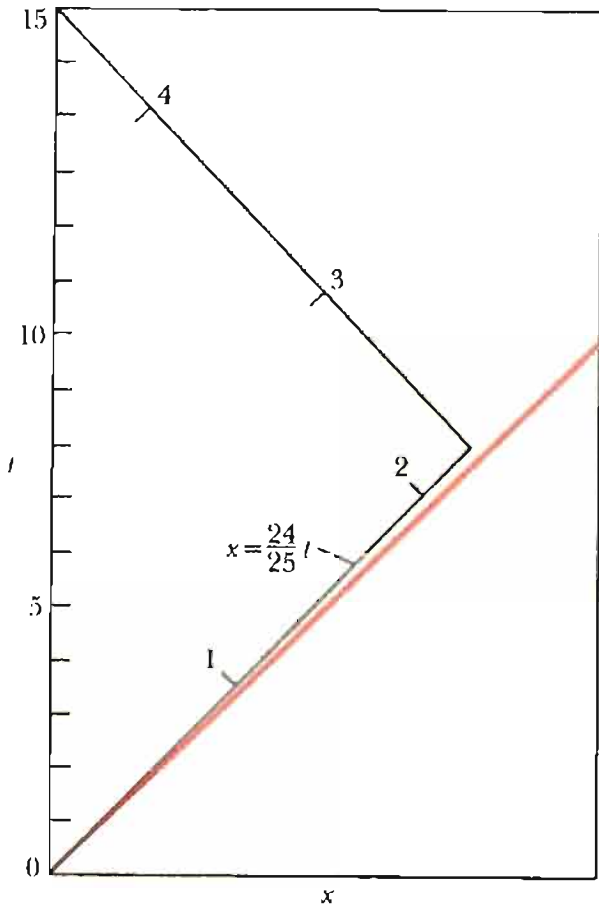
Преобразования, полученные в предыдущем разделе, позволяют объяснить это несоответствие. На приведенном ранее рисунке координата x отложена по вертикали сверху вниз от той точки атмосферы, в которой родился μ -мезон, а время t отсчитывается от этого момента. История исключительно медленного (по космическим меркам) μ -мезона, летящего со скоростью, равной «всего лишь» $24/25$ скорости света, представлена на рисунке прямой $x = \frac{24}{25}t$. Эта линия представляет собой ось времени для наблюдателя, движущегося вместе с μ -мезоном. Пусть отрезок OT на чертеже изображает время жизни мезона по измерениям этого наблюдателя. Если принцип относительности справедлив, то результат измерения не будет зависеть от того, движется ли *наблюдатель* вместе с μ -мезоном к Земле или находится в лаборатории, скажем, в Пало-Альто*; поскольку мезоны, рожденные в лаборатории, движутся относительно медленно, собственное время жизни μ -мезонов OT будет сравнимо с результатами лабораторных измерений. Продолжительность полета частицы, по измерениям неподвижного (находящегося на Земле) наблюдателя, представлена на рисунке отрезком OT' . Калибровочная гипербола, проходящая через точку T , пересекает ось времени земного наблюдателя в точке A . Интервал времени OA , измеренный земным наблюдателем, равен интервалу времени OT , измеренному наблюдателем, движущимся вместе с мезоном. Следовательно, OA представляет время жизни частицы по измерениям в лаборатории; последнее составляет лишь $(7/25)$ времени OT' , которое, как мы видели, соответствует результатам, полученным земным наблюдателем. И чем ближе скорость частицы к скорости света, тем больше различие между собственным временем жизни частицы (регистрируемым наблюдателем, движущимся с частицей) и продолжительностью ее полета с точки зрения земного наблюдателя (см. рисунок). Заметим, что расстояние OX , которое частица проходит за время жизни, и продолжительность ее полета OT' связаны между собой так, как обычно связаны расстояние и скорость при равномерном движении, а именно: $OX = \frac{24}{25}OT'$.

Хотя проведенный нами расчет несколько упрощен, описанный эксперимент — подлинный. Его результат так же, как и результаты бесчисленного множества других экспериментов по проверке специальной теории относительности Эйнштейна, полностью согласуется с теоретическими предсказаниями. Ни одна другая теория не подтверждается с такой высокой точностью.

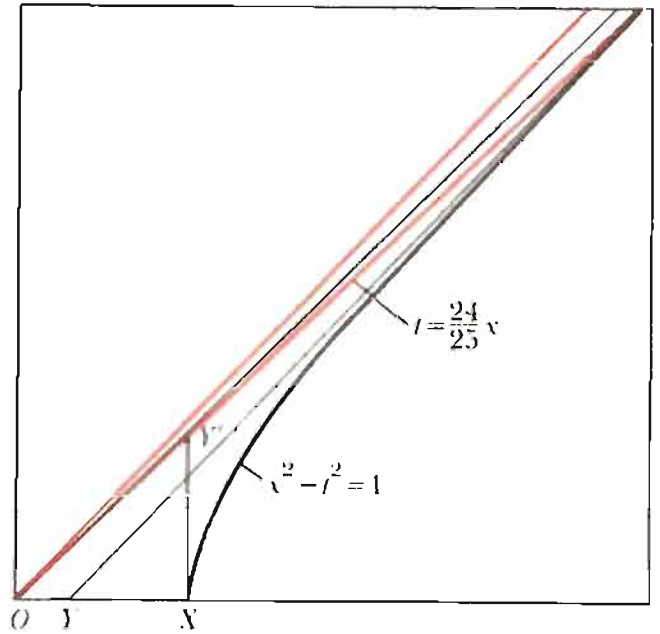
Рассмотрим другой эксперимент. Пусть Паула и Петра — близнецы. В тот день, когда Петре исполнилось двадцать лет, она вышла замуж, а Паула на космическом корабле отправилась в путешествие к ближайшей звезде. Паула летела к звезде по прямолинейной траектории 3,5 года со скоростью $\frac{24}{25}$ скорости света, затем с той же скоростью — в обратном направлении и вернулась на Землю в тот день, когда ей исполнилось двадцать семь лет. Поздравить Паулу пришли Петра, к тому времени сорокапятилетняя дама, и два ее сына-близнеца: Питер и Поль, которые только что отпраздновали свой двадцать четвертый день рождения.

Расчеты в этом примере аналогичны тем, что проводились ранее. С точки зрения Петры путешествие Паулы продолжительней, чем по оценкам самой Паулы; это обусловлено той же причиной, по которой длительность полета μ -мезона земному наблюдателю кажется больше, чем самой частице (точнее, движущемуся с ней наблюдателю).

* Город на западе США, в котором расположен один из крупнейших в мире ускорителей — Станфордский линейный ускоритель — *Прим перев*



Интервалы собственного времени Паулы и Петры вдоль их мировых линий (т. е. вдоль пространственно-временных траекторий).



Отрезки OX на оси x и OX' на оси x' равны единице (служат единицей измерения расстояний в системе F и F' соответственно. — *Перев.*). Стержень единичной длины в системе F для наблюдателя в системе F' имеет длину OY' , стержень, длина которого в системе F' равна единице, в системе F имеет длину OY . В обоих случаях длина движущегося стержня составляет $7/25$ ($= \sqrt{1 - (24/25)^2}$) длины неподвижного стержня. Отметим, что $OY/OX = OY'/OX'$, а линия $X'Y'$, проведенная параллельно оси t' , касается калибровочной гиперболы в точке x' .

Отсутствие симметрии в опыте с близнецами нередко озадачивает. При этом выдвигаются такие возражения: так как движение относительно, то с точки зрения Паулы двигалась именно Петра, и, следовательно — по тем же самым расчетам — она должна оказаться моложе Паулы. Поскольку оба заключения должны быть верны одновременно, то оба они неверны; следовательно, Паула и Петра к моменту встречи должны иметь одинаковый возраст.

Эти аргументы основаны на ошибочной предпосылке о наличии симметрии в опыте с близнецами. Это становится ясно, если посмотреть на левый из приведенных здесь рисунков. Линии, изображающие историю Паулы на пространственно-временной диаграмме, образуют две стороны треугольника, третьей стороной которого служит линия, изображающая историю Петры. Продолжительность полета по часам Паулы (ему соответствуют две стороны треугольника) короче, чем по часам Петры (третья линия треугольника), и это не более удивительно (если учесть правила расчета затраченного времени), чем то, что расстояние между двумя точками, измеренное вдоль собачьего следа, больше, чем расстояние между теми же точками по прямой.

Относительное движение приводит к различию не только измеряемых интервалов времени, но и расстояний. На моментальном снимке мчащегося космического корабля Паулы, сделанном наблюдателем станции, расположенной на окраине Солнечной системы, мы увидели бы несколько размытое изображение, длина которого составляет $7/25$ той длины, которую корабль имел в состоянии покоя. Правый из приведенных выше рисунков позволяет понять, почему это так. Уменьшение длины быстро движущейся ракеты хорошо

согласуется с предсказаниями теории Фицджеральда и Лоренца, разработанной для объяснения отрицательного результата эксперимента Майкельсона — Морли. Однако физическая интерпретация эффекта сокращения длины другая. Согласно Лоренцу и Фицджеральду, объект, движущийся относительно эфира, действительно становится короче, хотя наблюдатель, движущийся в том же направлении и с той же скоростью, этого не может обнаружить, поскольку используемый им для измерения длины эталон укорачивается во столько же раз. В теории Эйнштейна длина стержня (т. е. разность координат его концов, измеренных одновременно в системе отсчета наблюдателя) зависит лишь от относительного движения стержня и наблюдателя (см. рисунок на с. 190).

Сложение скоростей и абберация света

Рассмотрим частицу, движущуюся со скоростью v относительно системы отсчета F . Какова будет скорость этой частицы в системе отсчета F' , движущейся относительно системы F со скоростью V ? В механике Галилея и Ньютона всегда $v' = v - V$. В теории Эйнштейна ответ заведомо другой, поскольку если «частица» является фотоном, то ее скорость должна быть одинаковой во всех системах отсчета во всех направлениях. Из приведенного чертежа видно, что результирующая двух скоростей, направленных в одну сторону, никогда не может превзойти скорость света и что частица, движущаяся со скоростью света в системе F , имеет ту же скорость в системе F' .

Посмотрим, как связаны между собой скорости v , v' и V в случае, если они имеют одинаковое направление. Пусть Δx и Δt — интервалы длины и времени между двумя событиями на линии $x = vt$, изображающей историю движущейся частицы в системе F , а $\Delta x'$ и $\Delta t'$ — соответствующие интервалы по измерениям наблюдателя, находящегося в системе F' , которая движется со скоростью V относительно системы F . Тогда $v = \Delta x / \Delta t$ и $v' = \Delta x' / \Delta t'$. Пары координат x , t и x' , t' каждого события связаны между собой преобразованием Лоренца (5.5). Запишем эти уравнения для каждого из двух событий и, вычтя вторую пару уравнений из соответствующих уравнений первой пары, получим

$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - V\Delta t), \quad \Delta t' = \gamma(\Delta t - V\Delta x). \quad (5.8)$$

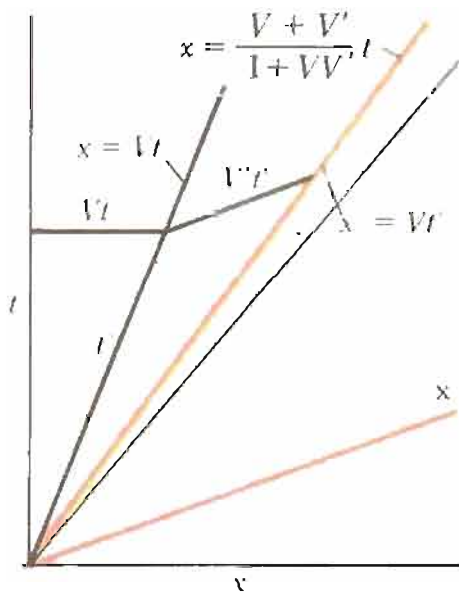
Почленно поделив первое уравнение на второе, находим:

$$v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\Delta x - V\Delta t}{\Delta t - V\Delta x} = \frac{\Delta x/\Delta t - V}{1 - V\Delta x/\Delta t} = \frac{v - V}{1 - vV}. \quad (5.9)$$

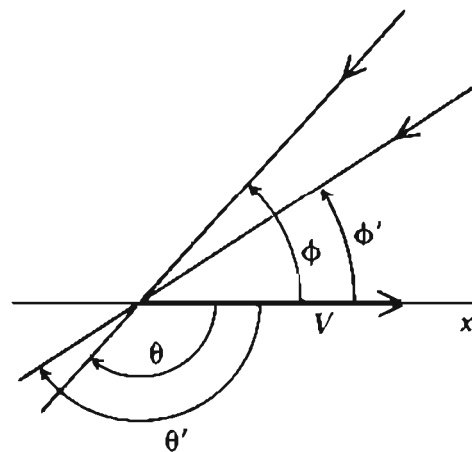
Эта формула и выражает правило сложения двух параллельных скоростей в специальной теории относительности Эйнштейна. От классического это выражение отличается множителем $(1 - vV)^{-1}$, вследствие которого v' не может превысить единицу (т. е. скорость света в нашей системе единиц), поскольку численные значения v и V не превышают единицы. Отметим также, что $v' = 1$, если $v = 1$ независимо от величины V : если частица имеет скорость света в одной системе отсчета, то ту же скорость она имеет и в любой другой.

А как относительное движение двух систем отсчета влияет на *направление* движения частицы? Этот вопрос особенно интересен, когда «частицей» является фотон: как движение наблюдателя относительно источника света сказывается на направлении световых лучей?

В системе F мы можем выбрать ось x так, чтобы ее направление совпадало с направлением скорости V , с которой система отсчета F' движется относи-



Закон сложения скоростей в релятивистской физике.



Направление, под которым наблюдатель видит световой луч, зависит от движения наблюдателя

тельно системы F , и без ограничения общности предположить, что скорость v интересующей нас частицы лежит в плоскости x, y . Поскольку относительное движение двух систем происходит вдоль оси x , координаты частицы y и z должны быть одинаковы в обеих системах:

$$y' = y, \quad z' = z. \quad (5.10)$$

Так как частица движется в плоскости x, y , то $z = 0$. Из второго уравнения (5.10) следует, что $z' = 0$, т. е. и в системе F' движение частицы происходит в плоскости x', y' . Предположим, что вектор скорости v образует угол θ с осью x , т. е.

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \operatorname{tg} \theta, \quad (5.11)$$

где Δx и Δy — разность координат между двумя некоторыми событиями в истории частицы. Мы хотим найти угол θ' между скоростью частицы v' и осью x' . Этот угол связан с разностью координат в системе F' так же, как угол θ в системе F :

$$\frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \operatorname{tg} \theta'. \quad (5.12)$$

Разность координат $\Delta x'$ вычисляется из первого уравнения системы (5.8), тогда как из первого уравнения (5.10) следует, что $\Delta y' = \Delta y$. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \frac{\Delta y}{\gamma(\Delta x - V\Delta t)} = \frac{v_y}{\gamma(v_x - V)} = \frac{v \sin \theta}{\gamma(v \cos \theta - V)}, \quad (5.13)$$

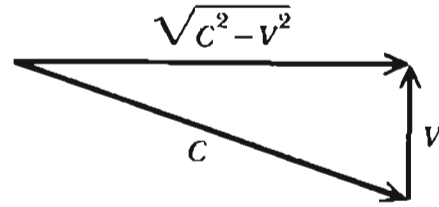
где v_x и v_y — проекции вектора v на оси x и y .

Эта довольно сложная формула несколько упрощается, если частицей является фотон, для которого $v = 1$. Если скорость фотона v составляет угол θ с осью x , то направление, в котором он движется (луч зрения), образует с осью x угол $180^\circ - \theta$, как видно из приведенного здесь рисунка. Обозначим этот угол буквой Φ . Полагая $v = 1$ и учитывая, что $\cos \Phi = \cos(180^\circ - \theta) = -\cos \theta$, а $\operatorname{tg}(180^\circ - \theta) = -\operatorname{tg} \theta$, получим

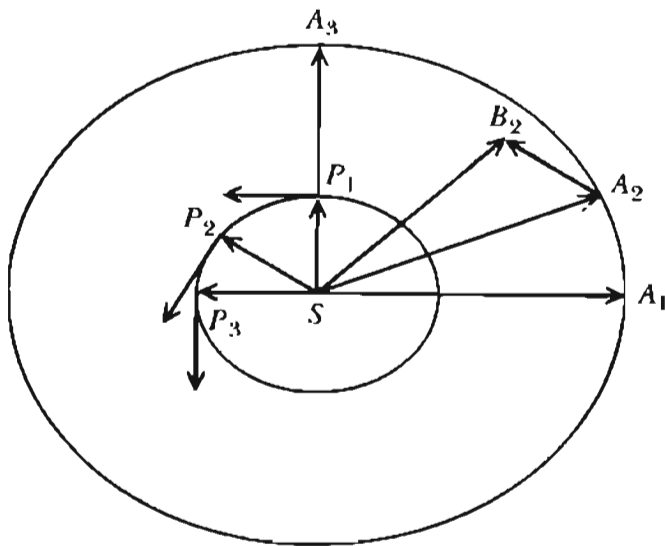
$$\operatorname{tg} \Phi' = \frac{\sin \Phi}{\gamma(\cos \Phi + V)}; \quad (5.14)$$



Английский астроном Джеймс Брадлей (1693—1762). (Коллекция Грейнджера.)



Объяснение аберрации света по Брадлею: c — скорость фотона в неподвижной системе отсчета, V — скорость наблюдателя, векторная сумма $c + V$ — скорость фотона относительно движущегося наблюдателя.



Аберрационные смещения звезды SA_1 , SA_2 , SA_3 пропорциональны по величине и противоположны по направлению угловым скоростям звезды в точках P_1 , P_2 , P_3 ее параллактического эллипса. Два изображенных здесь эллипса подобны; отношение малой оси к большой каждого из них равно синусу высоты звезды над эклипстикой (т. е. эклиптической широте). Относительный размер параллактического эллипса на рисунке сильно преувеличен. Полное смещение звезды равно векторной сумме ее параллактического и аберрационного смещений, т. е. SB_2 .

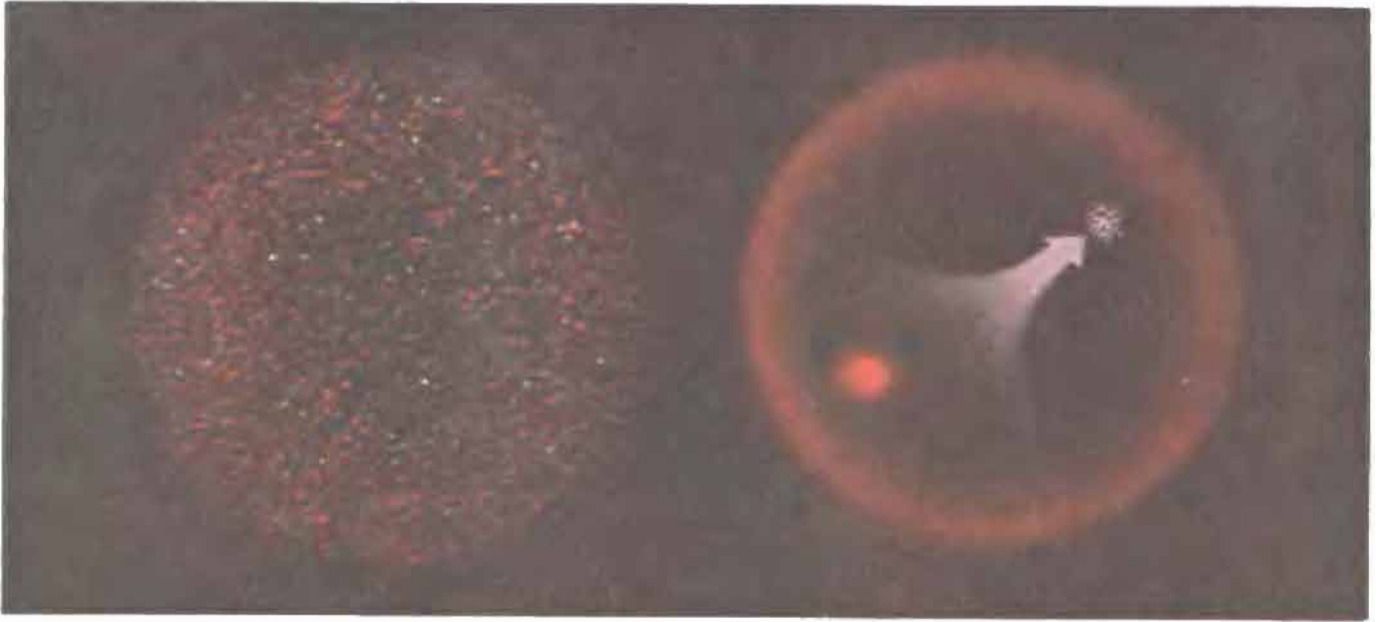
это соотношение выражает связь между углами, которые луч зрения образует с направлением относительного движения в двух системах отсчета.

Чтобы понять смысл равенства (5.14), рассмотрим вначале предельный случай, когда относительная скорость наблюдателя и источника света гораздо меньше скорости света ($V \ll 1$); это так называемый классический предел. В этом пределе величину γ в (5.14) можно положить равной единице, и тогда уравнение (5.14) говорит, что, поскольку $V \ll 1$, $\text{tg } \Phi'$ почти равен $\text{tg } \Phi$. Это значит, что изменение угла между лучами зрения и направлением скорости относительного движения, $\Delta\Phi = \Phi' - \Phi$, должно быть малым. Подставляя в (5.14) $\Phi' = \Phi + \Delta\Phi$ и отбрасывая члены, содержащие квадраты и произведения малых величин $\Delta\Phi$ и V , после длительных, хотя и не сложных, выкладок получим

$$\Delta\Phi = -V \sin \Phi. \tag{5.15}$$

Эта формула описывает так называемую аберрацию света (звезд) — явление, обнаруженное Джеймсом Брадлеем в 1725 г.: изменение направления светового луча из-за движения источника и приемника света относительно друг друга, в результате чего угол между направлением на звезду и направлением ее движения относительно Земли отличается от угла Φ , под которым звезда была бы видна в системе отсчета, где она покоится, на малую величину $-V \sin \Phi$.

Скорость звезды относительно Земли можно представить как векторную сумму скорости звезды относительно Солнца и скорости Солнца относительно Земли (см. рисунок). Вследствие движения звезды относительно Солнца

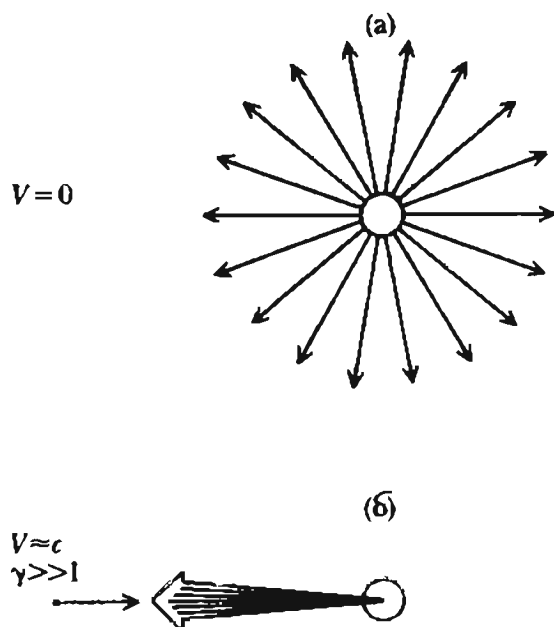


Вид небесной сферы с точки зрения покоящегося наблюдателя (слева) и наблюдателя, движущегося с почти световой скоростью, $\gamma \gg 1$. Для наблюдателя, движущегося с ультрарелятивистской скоростью, все звезды на небе (за исключением тех, которые находятся точно позади него) сосредоточиваются внутри окружности радиусом $1/\gamma$ радиан.

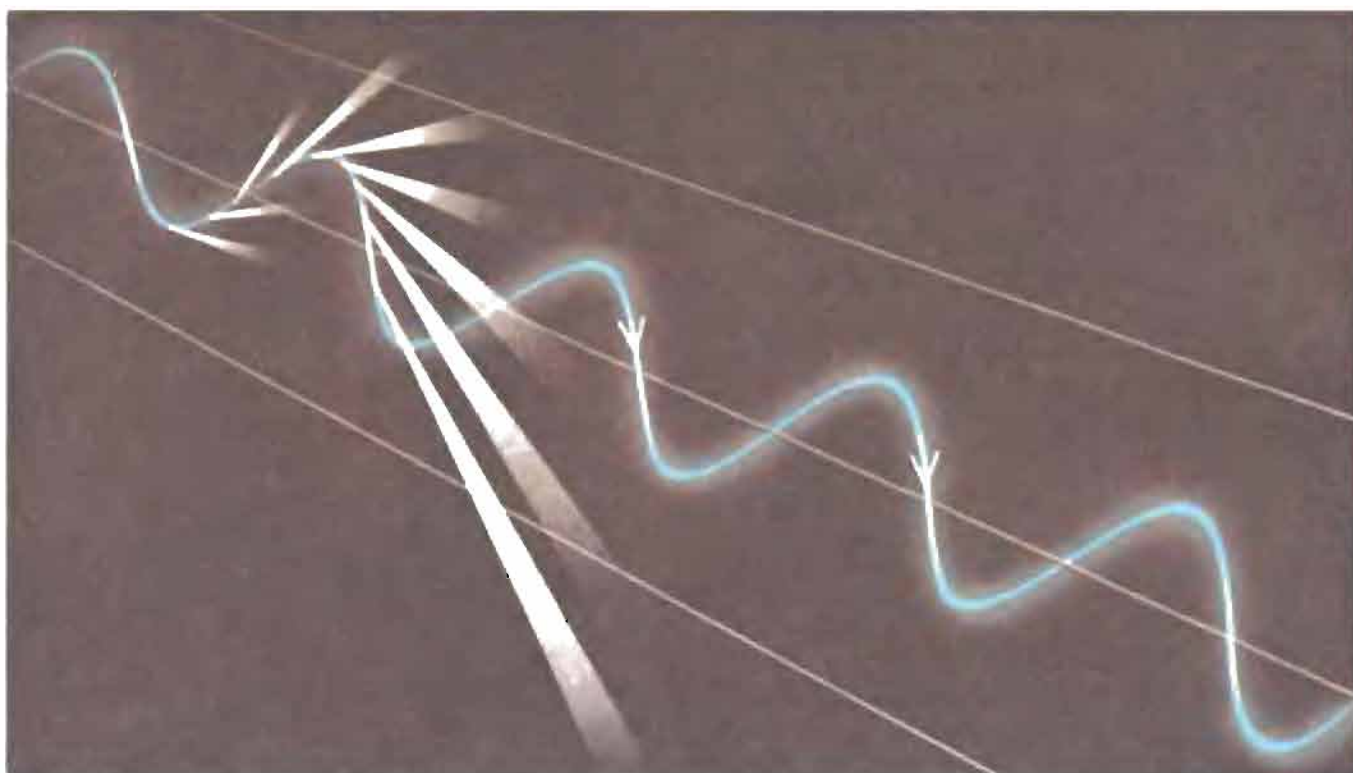
направление на звезду изменяется на величину, которая практически остается постоянной на протяжении года (если только звезда не является членом тесной двойной системы). Из-за движения Солнца относительно Земли положение звезд на небе периодически меняется (с периодом в один год). Как видно из нижнего рисунка на с. 193, в результате звезда описывает на небе крошечный эллипс. Этот эллипс по форме напоминает параллактический эллипс звезды (который выглядит так же, как земная орбита при наблюдении со звезды), но абберрационный сдвиг достигает максимума, когда параллактический сдвиг минимален, и наоборот. Большая ось абберрационного эллипса равна $2V$ радиан, где V — орбитальная скорость Земли, равная примерно 30 км/с или $1/10000$ скорости света. Поскольку в одном радиане $2 \cdot 10^5$ угловых секунд, полуось абберрационного эллипса равна примерно 20 угловым секундам. Для сравнения укажем, что даже для ближайших звезд большая полуось параллактического эллипса (параллакс звезды) не превышает нескольких десятых долей угловой секунды.

Рассмотрим теперь противоположный предельный случай уравнения (5.14) — «ультрарелятивистский предел», когда относительная скорость V близка к единице, а величина γ , определяемая уравнением (5.7), гораздо больше единицы. Предположим, что в системе F звезды распределены на небе однородно. Как изменится картина неба, если мы станем двигаться относительно системы F со скоростью, столь близкой к скорости света, что $\gamma = 100$? Из уравнения (5.14) в этом случае следует, что Φ' очень близко к нулю, если только Φ не близко к 180° . Другими словами, все звезды на небе, исключая те, которые расположены точно позади нас, окажутся впереди нас, сосредоточившись в круге радиусом порядка $1/\gamma$ радиан, что ненамного превышает половину углового градуса, или диаметр полной Луны (см. приведенную здесь фотографию).

Мы не можем непосредственно наблюдать описанный эффект, однако похожее явление можно изучать в лабораторных условиях. Рассмотрим источник света, который в собственной системе отсчета излучает равномерно во всех направлениях. Предположим, что мы наблюдаем этот источник из другой систе-



Источник, изотропно излучающий свет в системе отсчета, где он покоится (а), с точки зрения наблюдателя, движущегося с ультрарелятивистской скоростью ($\gamma \gg 1$), излучает весь свет внутри конуса с углом раствора $1/\gamma$ радиан (б).



Электроны, движущиеся в магнитном поле со скоростью, близкой к скорости света, излучают в узком конусе, ось которого направлена вдоль вектора мгновенной скорости.

мы F' , относительно которой он движется настолько быстро, что величина γ , определяемая уравнением (5.7), становится много больше единицы. Из уравнения (5.14) следует, что в этой системе почти весь свет сконцентрируется в узком конусе с углом раствора порядка $1/\gamma$, осью симметрии которого будет направление движения источника. Кроме того, как мы увидим в следующем разделе, полная мощность, излучаемая источником, в γ^2 раз больше в системе F' , чем в системе, где источник покоится. Именно так излучают заряженные частицы, ускоряемые до ультрарелятивистских скоростей в кольцеобразных ускорителях — синхротронах. Излучение сосредоточено в очень узком конусе, осью симметрии которого является направление мгновенной скорости движения частицы. Предполагается, что наиболее мощные астрономические источни-

ки радиоволн представляют собой гигантские синхротроны, в которых ускоренные до ультрарелятивистских скоростей электроны (механизм этого ускорения до конца не ясен) движутся по спирали вокруг силовых линий магнитного поля, как показано на рисунке.

Эффект Доплера

Вероятно, вам приходилось замечать, как изменяется высота тона сигнала проносящегося мимо поезда или автомобиля. Приближающийся источник звука издает сигнал более высокого тона, чем неподвижный источник, а удаляющийся — напротив, более низкий.

Разность $\Delta\nu$ между частотой ν' приближающегося (или удаляющегося) источника и частотой ν , излучаемой покоящимся источником, определяется по формуле

$$\Delta\nu/\nu = -V/c, \quad (5.16)$$

где V — скорость, с которой источник удаляется от наблюдателя (отрицательная величина V , таким образом, соответствует движению к наблюдателю), c — скорость распространения сигнала. Вскоре мы увидим, что эта формула справедлива лишь для случая, когда V много меньше скорости света, однако она применима ко всем видам волн: световым, звуковым, волнам на воде.

Изменение частоты периодического сигнала, обусловленное относительным движением источника и наблюдателя, называется эффектом Доплера — по имени австрийского физика Кристиана Доплера (1803—1853). Однако, по сути дела, это явление было обнаружено и объяснено в 1675 г. датским астрономом Оле Рёмером (1644—1710), который заметил, что интервал времени между последующими затмениями ближайшего спутника Юпитера Ио возрастает, когда Юпитер движется от противостояния к соединению, а затем уменьшается, когда Юпитер движется от соединения к противостоянию (см. приведенную ниже схему). Когда Юпитер движется от противостояния к соединению, он удаляется от Земли. Рёмер объяснил увеличение интервала времени между последующими затмениями на этом участке тем, что вследствие увеличения расстояния между Юпитером и Землей свет проходит это расстояние за более продолжительное время. Обозначим через T орбитальный период Ио, измеренный в системе отсчета, связанной с Юпитером, а через T' — тот же период, но измеренный с Земли. Последняя величина представляет собой интервал между последующими затмениями Ио Юпитером. Если расстояние между Юпитером и Землей возросло на величину Δr за один орбитальный период T , то наблюдаемый интервал между последующими затмениями будет больше T на величину $\Delta r/c$, где c — скорость света:

$$T' = T + \Delta r/c. \quad (5.17)$$

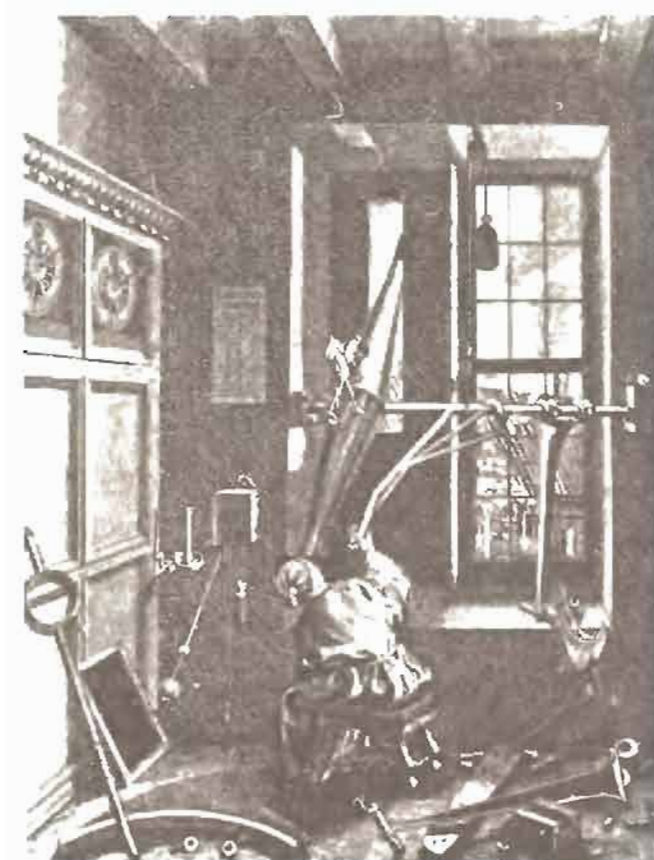
Используя накопленные к тому времени сведения о времени запаздывания моментов затмений в соединении по сравнению с противостоянием, а также результаты измерений диаметра земной орбиты (сделанные незадолго до этого; см. гл. 2), Рёмер с помощью этой формулы получил первую надежную оценку скорости света.

Но уравнение (5.17) позволяет также оценить эффект Доплера. Положим, $\Delta r = V \cdot T$, где V — радиальная составляющая относительной скорости Земли и Юпитера. Тогда (5.17) принимает вид

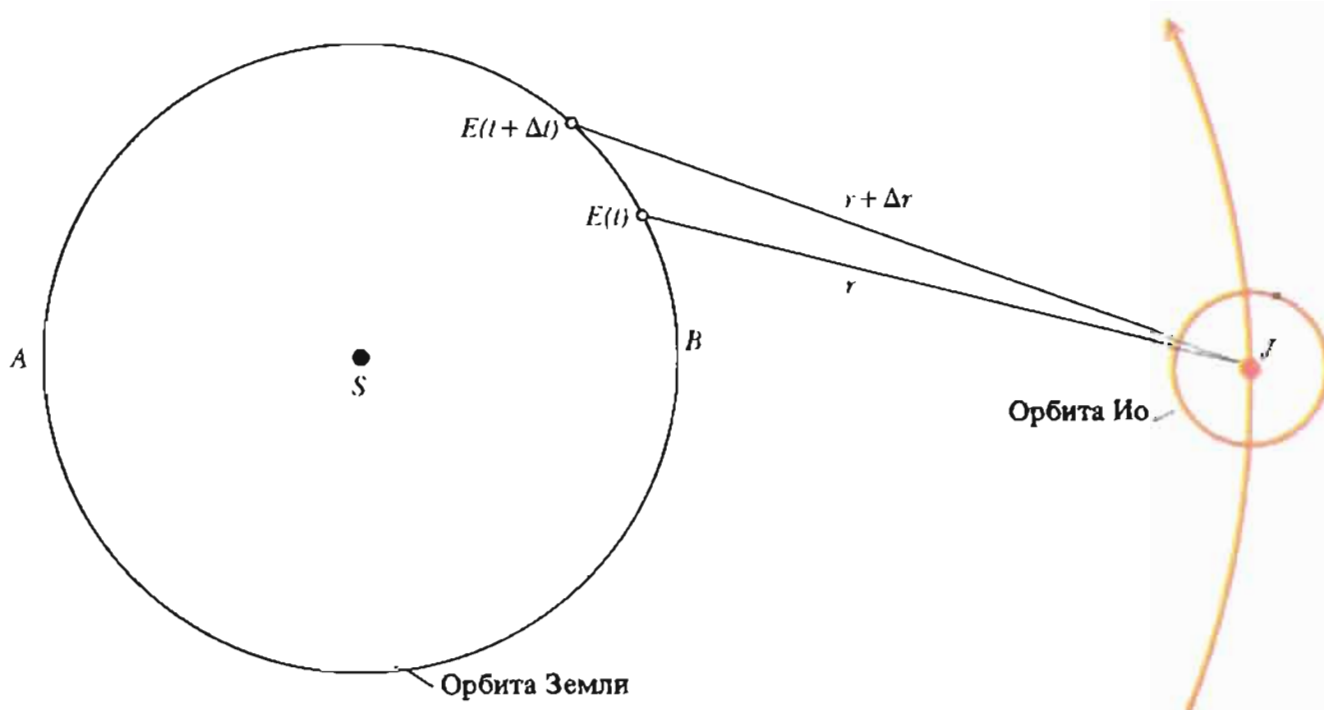
$$T' = T(1 + V/c). \quad (5.18)$$



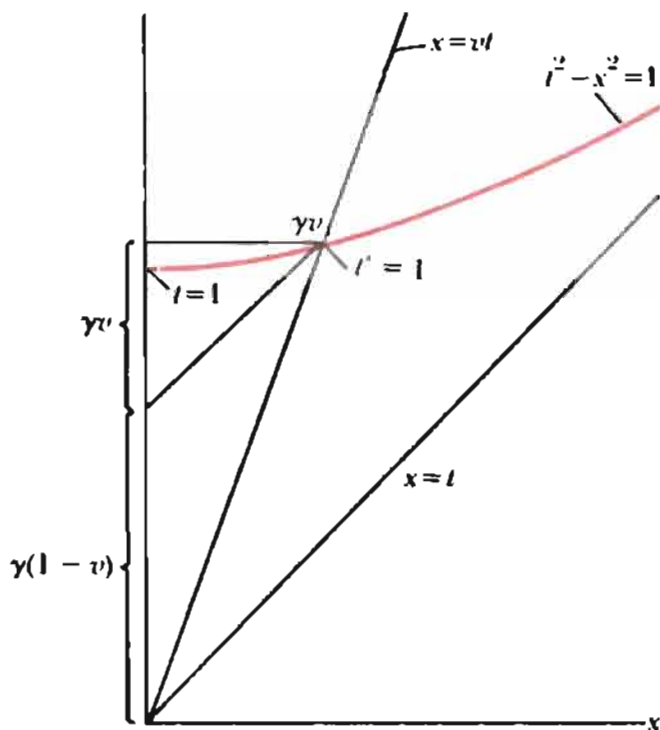
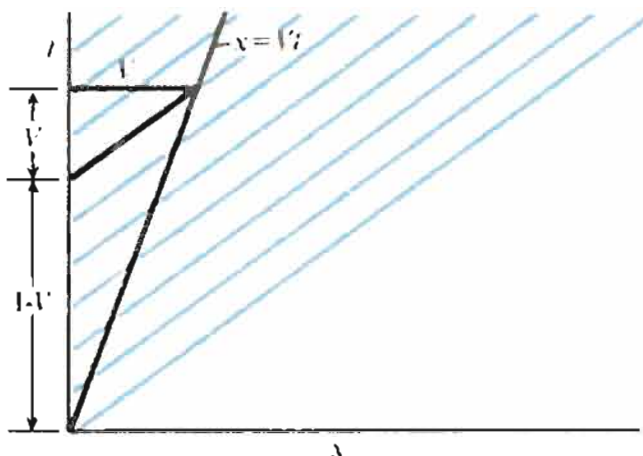
Датский астроном Оле Рёмер (1644—1710) (Коллекция Грейнджера.)



Гравюра, на которой изображен Рёмер во время наблюдений (Архив Беттмана.)



Эксперимент Рёмера с точки зрения наблюдателя, связанного с вращающейся системой отсчета, в которой линия SJ , соединяющая Солнце и Юпитер, направлена все время в одну сторону. Время JE/c , за которое свет проходит путь от Юпитера до Земли, минимально, когда Земля находится в точке B (противостояние) и максимально, когда Земля находится в точке A (соединение). При движении Земли из B в A интервалы времени между последующими покрытиями Ио Юпитером возрастают, а затем, на обратном пути из A и B , сокращаются.



Нерелятивистский (слева) и релятивистский (справа) эффекты Доплера.

Период между затмениями Ио — это величина, обратная частоте повторения затмений, поэтому из (5.18) получаем:

$$1/v' = 1/v(1 + V/c), \tag{5.19}$$

что эквивалентно уравнению (5.16) при $V/c \ll 1$. Та же формула, очевидно, связывает частоту любого излученного и принятого периодического сигнала, распространяющегося со скоростью c .

Левый из приведенных выше рисунков обобщает классическую теорию эффекта Доплера на случай световых волн. Наклонные параллельные линии изображают гребни световых волн, распространяющихся вдоль оси x . За одну секунду через точку $x = 0$ проходит v гребней, где v — частота света. Из рисунка видно, что за то же время мимо наблюдателя, движущегося со скоростью V вдоль оси x , проходит $(1 - V)v$ гребней. Эта величина и соответствует частоте v' света, воспринимаемого движущимся наблюдателем. Таким образом,

$$v' = (1 - V)v, \tag{5.20}$$

причем здесь мы опять перешли к измерению скорости в единицах скорости света. Если положить $\Delta v = v' - v$, то мы вновь приходим к уравнению (5.16), которое обобщает данное Рёмером объяснение последовательного изменения продолжительности затмений.

Выполним те же расчеты с помощью релятивистской пространственно-временной диаграммы, изображенной на правом из рисунков. Теперь следует использовать то обстоятельство, что по измерениям неподвижного и движущегося наблюдателя интервалы времени между двумя данными событиями будут различны. Из рисунка видно, что за промежуток времени, равный по часам неподвижного наблюдателя 1 с, движущийся наблюдатель зарегистрирует $\gamma(1 - V)v$ гребней. Следовательно, с точки зрения движущегося наблюдателя частота света будет равна

$$v' = \gamma(1 - V)v = \sqrt{\frac{1 - V}{1 + V}} v, \tag{5.21}$$

где γ , как и раньше, определяется из уравнения (5.7).

Релятивистская формула (5.21) отличается от своего классического аналога в двух важных аспектах.

Во-первых, соотношение между принимаемой и излучаемой частотами зависит лишь от относительной скорости приемника и излучателя. Если мы заменим V на $-V$ и поменяем местами v и v' , релятивистская формула не изменится. Нерелятивистская формула (5.20) в этом случае меняется: множитель $1 - V$ в правой части превращается в $1/(1 + V)$. Эта формула асимметрична относительно приемника и излучателя, поскольку в классической теории скорость света имеет разную величину в двух системах отсчета.

Во-вторых, релятивистская формула (5.21) предсказывает, что частота световой волны, движущейся к наблюдателю, беспредельно возрастает, когда относительная скорость стремится к скорости света. Вместе с тем нерелятивистская формула (5.20) предсказывает, что частота принимаемого светового сигнала приближается к удвоенной частоте, когда относительная скорость стремится к скорости света.

Движение наблюдателя относительно источника света изменяет не только частоту принимаемого излучения, но и его интенсивность. Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим монохроматический источник света, излучающий за секунду f фотонов с энергией $h\nu$ (см. врезку на с. 172). Частота ν' каждого принимаемого фотона определяется из уравнения (5.21). Более того, аналогичная формула связывает темп поступления фотонов f' , приходящих к наблюдателю от движущегося источника, с величиной f , характеризующей темп излучения фотонов для наблюдателя, неподвижного относительно источника света:

$$f' = \sqrt{\frac{1 - V}{1 + V}} f. \tag{5.22}$$

Видимая яркость источника пропорциональна частоте прихода фотонов f и энергии каждого фотона $h\nu'$, где h — постоянная Планка. Энергия, падающая за единицу времени на поверхность с площадью A , перпендикулярную лучу зрения, вычисляется по формуле:

$$\text{Принимаемая мощность} = f' \cdot h\nu' \cdot \frac{A}{4\pi r^2} \cdot g(\Phi). \tag{5.23}$$

Здесь r — мгновенное расстояние до источника, $A/4\pi r^2$ — часть площади сферической поверхности (описанной вокруг источника света), занятой приемником излучения, $g(\Phi)$ — множитель, который учитывает неравномерность излучения света в различных направлениях, обусловленную, в частности, эффектом релятивистской фокусировки, рассмотренным в предыдущем разделе. Для источника, движущегося к приемнику с ультрарелятивистской скоростью ($\gamma \gg 1$), этот множитель $g(\Phi)$ составляет порядка γ^2 . В этом случае $1 + V \approx \approx 1/2\gamma^2$, так что принимаемая мощность примерно в $\gamma^2 \cdot \gamma^2 = \gamma^4$ раз превышает мощность, которую принимал бы наблюдатель от неподвижного источника, удаленного (с точки зрения наблюдателя) на такое же расстояние.

Представьте себе космический корабль, вначале покоящийся относительно звезд, а затем начавший разгоняться с постоянным ускорением, равным гравитационному ускорению на поверхности Земли. Пассажиры будут ощущать действие силы, сходной с тяготением: весить они будут столько же, сколько на Земле, тела будут падать в направлении кормы космического корабля так же, как тела вблизи земной поверхности падают в направлении к центру Земли. По мере приближения скорости корабля к скорости света звезды станут сдвигаться вдоль больших кругов к точке на небесной сфере, лежащей прямо по курсу корабля. Ближе к зениту звезды в верхней (передней) полусфере

становятся все голубее и ярче. Звезды в нижней полусфере становятся слабее и краснее, пока не достигнут горизонтального круга, после чего они начинают становиться ярче и голубее. Продолжая двигаться ускоренно, космический корабль все более приближается к скорости света. При этом яркое пятно звездного света вблизи зенита становится все меньше, голубее и ярче, в то время как все остальное небо постепенно покрывается мраком.

Релятивистские энергия и импульс

В теории Ньютона инерция рассматривается как наиболее существенное свойство материи. Согласно второму закону Ньютона, инерция тела, т. е. способность сопротивляться ускорению, пропорциональна массе тела. Ньютон и его последователи считали, что каждая частица вещества имеет постоянную, неизменную массу, а масса макроскопического тела равна сумме масс частиц, из которых оно состоит. В короткой заметке, скромно озаглавленной «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?», написанной сразу же после статьи 1905 г. по специальной теории относительности, Эйнштейн опроверг эти представления. Он утверждал, что поглощая или излучая энергию, тело может приобретать и терять массу. Это означало, что масса любой составной системы, включая атомы и атомные ядра, не может быть равна сумме масс составляющих систему частиц, поскольку движение и взаимодействие этих частиц дает вклад в энергию системы и, следовательно, в ее массу.

Эйнштейн не подчеркивает поистине революционного значения своей заметки. Стремясь уложить ее в скромные рамки, он посвящает каждому выводу, обсуждению и резюме по одному короткому предложению:

Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии, если энергия изменяется на величину L , то масса меняется соответственно на величину $L/9 \cdot 10^{20}$, причем здесь энергия измеряется в эргах, а масса — в граммах. Не исключена возможность того, что теорию удастся проверить для веществ, энергия которых меняется в большой степени (например, для солей радия). Если теория соответствует фактам, то излучение переносит инерцию между излучающими и поглощающими телами ([1], т. 1 с. 38.)

Эйнштейн пришел к выводу об эквивалентности массы и энергии из следующего мысленного эксперимента. Предположим, что некоторое тело, покоящееся в системе отсчета F , излучает в противоположных направлениях два фотона с частотой ν . Из соображений симметрии вытекает, что, излучив фотоны, тело должно остаться в покое. Если энергия тела до излучения фотонов была равна E_0 , после этого E_1 , то

$$E_0 = E_1 + h\nu + h\nu, \quad (5.24)$$

поскольку энергия фотона с частотой ν равна $h\nu$ (см. врезку на с. 172).

Запишем теперь аналог уравнения (5.24) в системе отсчета F' , движущейся со скоростью V параллельно направлению полета фотонов. Пусть E'_0 — энергия тела до излучения фотонов в движущейся системе отсчета, а E'_1 — после излучения. В соответствии с релятивистской формулой (5.21) эффекта Доплера, частоты двух фотонов, измеренные в системе F' , равны $\nu' = \gamma(1 \pm V)\nu$. Следовательно,

$$E'_0 = E'_1 + \gamma(1 - V + 1 + V)h\nu = E'_1 + 2\gamma h\nu. \quad (5.25)$$

Вычитая почленно из уравнения (5.25) уравнение (5.24), получим

$$E'_0 - E_0 = E'_1 - E_1 + 2h\nu(\gamma - 1) \quad (5.26)$$

или

$$K'_0 = K'_1 + 2h\nu(\gamma - 1). \quad (5.27)$$

Разности $E'_0 - E_0 = K'_0$ и $E'_1 - E_1 = K'_1$ представляют собой *кинетическую энергию* тела до и после излучения фотонов. В самом деле, кинетическая энергия тела — это энергия, связанная с его поступательным движением, т. е. разность между энергией тела в системе отсчета, где оно имеет скорость V , и энергией в той системе отсчета, где тело покоится.

Из уравнения (5.27) следует, что при излучении двух фотонов кинетическая энергия тела изменяется на величину $2h\nu(\gamma - 1)$. Но излучение двух фотонов не изменило скорости тела, так как оно покоилось в системе F до излучения фотонов и остается в покое после излучения. Поскольку кинетическая энергия зависит только от массы и скорости, а скорость не изменяется, излучение фотонов должно привести к изменению массы. Мы можем подтвердить этот вывод, рассмотрев случай $V \ll 1$. При этом $K = \frac{1}{2}mV^2$, а $\gamma - 1 \simeq \frac{1}{2}V^2$. В таком случае уравнение (5.27) принимает вид

$$\frac{1}{2}m_0V^2 = \frac{1}{2}m_1V^2 + \frac{1}{2}(2h\nu)V^2, \quad (5.28)$$

где m_0 — масса тела до излучения двух фотонов, а m_1 — после излучения. Таким образом,

$$m_0 = m_1 + 2h\nu = m_1 + \Delta E, \quad (5.29)$$

где ΔE — полная энергия излученных фотонов, измеренная в системе F . Это завершает доказательство утверждения Эйнштейна о том, что если энергия тела изменяется на величину ΔE , то его масса изменяется на ту же величину (или, в общепринятых единицах измерения массы, на величину $\Delta E/c^2$).

Но мы не до конца исчерпали возможности, заложенные в уравнении (5.27). Поскольку это соотношение справедливо при любых значениях V , а не только при $V \ll 1$, кинетическая энергия K должна зависеть от V пропорционально $(\gamma - 1)$. А поскольку при $V \ll 1$ $K = \frac{1}{2}mV^2$, точная формула должна иметь вид:

$$K = m(\gamma - 1). \quad (5.30)$$

Действуя таким же образом, как при выводе (5.29), получим

$$\Delta m = \Delta E, \quad (5.31)$$

где ΔE — величина излученной энергии. Если отсчитывать энергию и массу от одной и той же нулевой точки (т. е. измерять в одинаковых единицах), то полную энергию E можно вычислить по формуле

$$E = K + m = \gamma m = \frac{m}{\sqrt{1 - V^2}}, \quad (5.32)$$

или, в общепринятых единицах,

$$E = \gamma mc^2. \quad (5.33)$$

В системе отсчета, где тело покоится, т. е. $\gamma = 1$, это уравнение принимает знакомый всем вид: $E = mc^2$.

Уравнение (5.32) показывает, что энергия тела конечной массы m неограниченно возрастает по мере приближения скорости тела к скорости света. Следовательно, *частицу с ненулевой массой покоя невозможно ускорить до скорости света*. И наоборот, если частица с ненулевой энергией движется со скоростью света, то ее масса покоя должна быть равна нулю. Кроме фотонов,

единственная из известных нам частиц с нулевой массой покоя — это нейтрино, которое, следовательно, должно двигаться со скоростью света*.

В гл. 4 мы видели, как Гюйгенс воспользовался принципом относительности, чтобы ввести понятие импульса и получить закон его сохранения из закона сохранения кинетической энергии при упругих столкновениях. Используя те же аргументы и предложенное Эйнштейном правило сложения скоростей (5.9), мы получим релятивистское определение импульса:

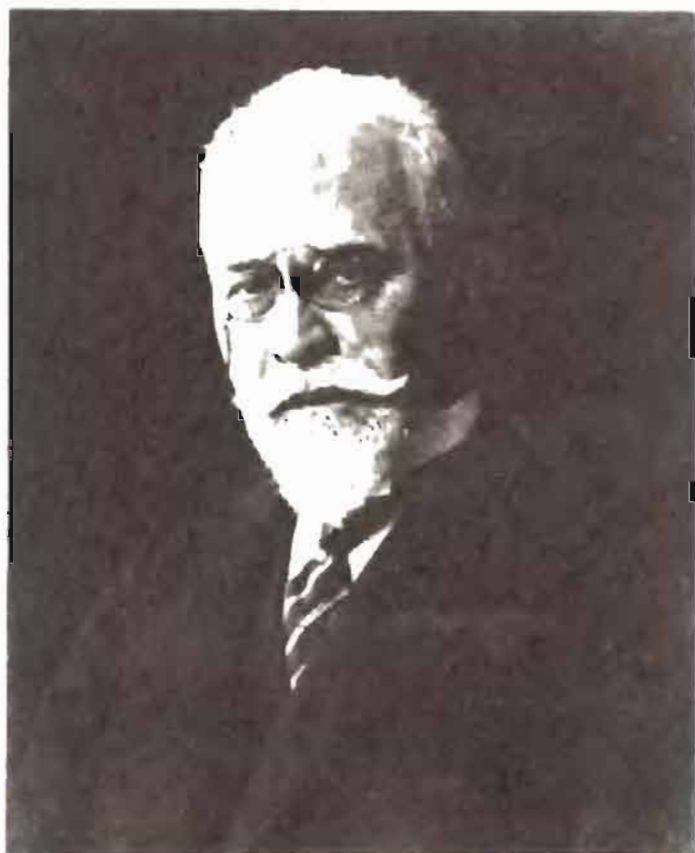
$$\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v} = E\mathbf{v}. \quad (5.34)$$

Для фотонов и нейтрино $v = 1$, следовательно, $p = E$.

Мы заканчиваем рассмотрение равномерного движения с точки зрения специальной теории относительности. Мы видели, что теория Эйнштейна не просто вносит малые поправки в классическую теорию — она предсказывает качественно иное поведение частиц, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Фотон всегда имеет одинаковую скорость, даже для наблюдателя, летящего за ним со скоростью, равной 0,99 c . Космонавт может покинуть Землю в 2000 г. в возрасте тридцати лет и вернуться сто лет спустя в возрасте сорока лет, но, путешествуя с такой скоростью, он должен позаботиться о защите от слепящего света ночного неба, который будет сконцентрирован в крохотном диске, расположенном прямо по курсу корабля. Нет разумных оснований сомневаться в том, что эти и другие, казалось бы, столь необычные предсказания теории Эйнштейна справедливы, поскольку ни одна физическая теория, даже закон всемирного тяготения Ньютона, не выдержала столь разнообразных и строгих проверок, как теория Эйнштейна. Эксперимент показывает, что неустойчивые ультрарелятивистские частицы, способные к самопроизвольному распаду, живут дольше, чем медленно движущиеся частицы того же типа, причем именно во столько раз, во сколько предсказывает теория Эйнштейна. Эксперименты также подтверждают, что свет, излученный ультрарелятивистской заряженной частицей, смещен в область высоких частот и сфокусирован в направлении движения — в точном соответствии с предсказанием теории Эйнштейна. Даже сейчас, более чем через восемьдесят лет после того, как Эйнштейн опубликовал свою теорию, кажется удивительным, что такое простое и правдоподобное предположение, как принцип относительности, может иметь столь многочисленные и впечатляющие следствия.

В этой главе мы ограничились лишь рассмотрением специальной теории относительности применительно к равномерному движению. Но теория Эйнштейна в полном объеме столь же успешно описывает и ускоренное движение. Существуют релятивистские аналоги второго закона Ньютона, максвелловской теории электромагнетизма и электромагнитного излучения, а также электронной теории Лоренца. Все эти теории включают свои классические прототипы в качестве предельных случаев, применимых при малых относительных скоростях, и все они существенно отличаются (порой весьма существенно от противоположного, ультрарелятивистского предела. Эйнштейн сам описал наиболее важные из этих теорий в своей работе 1905 г., а три года спустя математик Герман Минковский разработал для теории Эйнштейна специальный математический аппарат, позволивший со всей полнотой выразить глубинную математическую структуру теории. Сформулированные с помощью этого аппарата релятивистские обобщения теорий Ньютона и Максвелла приобретают большую ясность и простоту, чем их классические аналоги. Например, классические законы сохранения энергии и импульса, сформулированные на

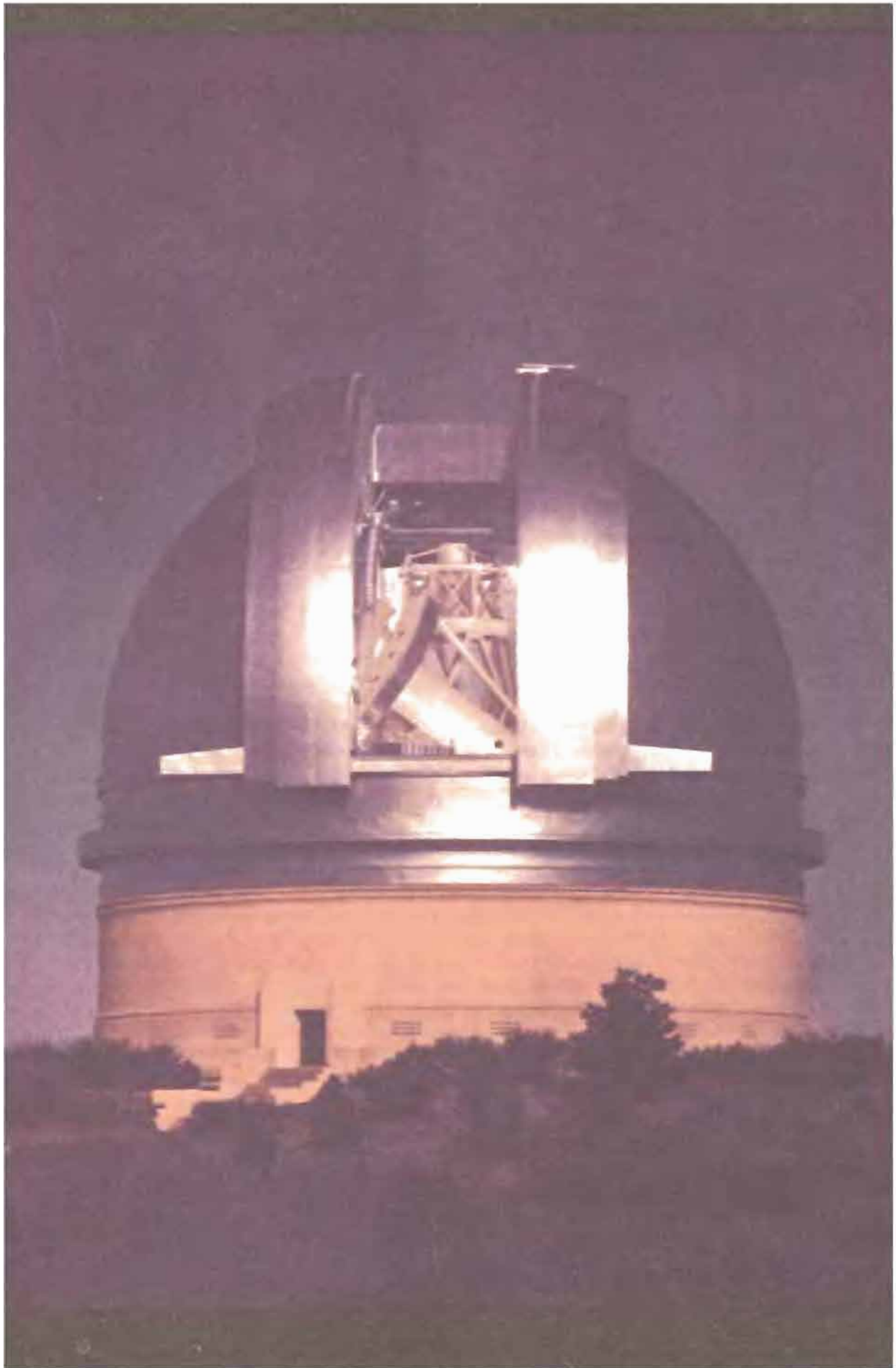
* Безмассовой частицей, движущейся со скоростью света, является также гравитон. — Прим. ред.



Герман Минковский (1864—1909) сформулировал специальную теорию относительности Эйнштейна на математическом языке, как нельзя лучше отвечающем глубокому смыслу этой теории. (Архив Бетмана.)

математическом языке Минковского, превращаются в единый закон, который описывается одним уравнением.

По-видимому, Эйнштейн никогда не рассматривал специальную теорию относительности иначе как первый шаг. На первый взгляд может показаться, что больше вообще ничего не нужно делать, по крайней мере за рамками атомной и субатомной физики. Эйнштейн, однако, чувствовал, что принцип относительности в том виде, в каком он его сформулировал, слишком узок. Он устранил различие между инерциальными системами отсчета, однако, сохранив неизменным существовавшее в теории Ньютона фундаментальное отличие между инерциальными и неинерциальными системами отсчета. Но по отношению к чему ускоренное (или неускоренное) движение? В гл. 4 мы видели, что Ньютон не смог ответить на этот вопрос. Земля вращается вокруг оси по отношению к космологической системе отсчета, задаваемой усредненным движением удаленных галактик. Системы отсчета, в которых справедлив первый закон Ньютона, т. е. системы, где свободная частица не испытывает ускорения, не имеют доступного измерению вращения относительно этой космологической системы. Это утверждение сугубо эмпирическое, и ни теория Ньютона, ни специальная теория относительности Эйнштейна не касаются этого вопроса. Поэтому Эйнштейн решил «релятивизировать» ускоренное движение: построить теорию, в которой инерциальные и неинерциальные системы отсчета определялись бы распределением вещества и энергии в космических масштабах. В двух следующих главах мы проследим, как он двигался к этой цели.



Теория гравитации Эйнштейна

...Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция ...Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории. В этом суть того, что Лейбниц удачно назвал «предустановленной гармонией»

А. Эйнштейн

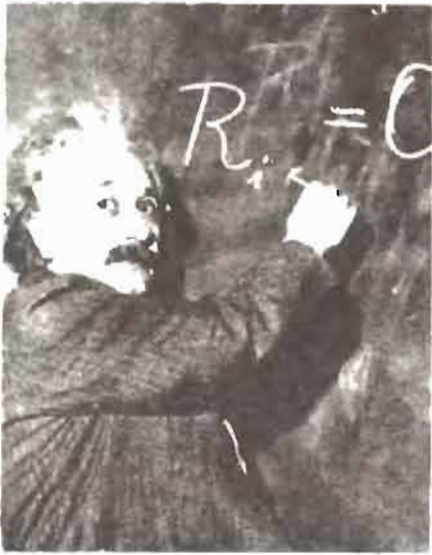
Общая теория относительности Эйнштейна (теория пространства, времени и гравитации) произвела революцию как в методах, так и в самом содержании теоретической физики. Эйнштейн открыл не только новые физические законы, но и новый способ обнаружения новых законов. Подобно тому как в свое время пифагорейцы пришли к выводу, что математика является более надежным «советчиком» в познании физической реальности, чем здравый смысл, Эйнштейн понял, что принципы симметрии глубже и фундаментальнее, чем физические законы. В гл. 5 мы рассказали, что Эйнштейн построил специальную теорию относительности, основываясь на принципе равноправия всех инерциальных систем отсчета. В этой главе мы узнаем, как он построил новую теорию гравитации (общую теорию относительности), исходя, казалось бы, из вполне безобидного предположения об отсутствии различия между гравитационными силами и силами, действующими на частицу в ускоренно движущейся системе отсчета.

«Реальная» ли сила гравитация?

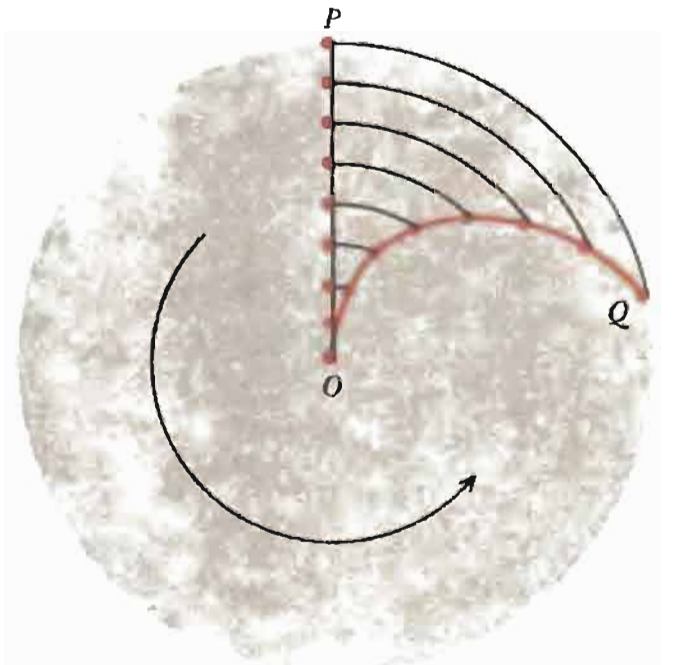
Второй закон Ньютона гласит, что в инерциальной системе отсчета ускорение тела пропорционально приложенной силе. Коэффициент пропорциональности называется *инертной массой* и обозначается буквой *m*. Математически этот закон записывается следующим образом:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (6.1)$$

где \mathbf{F} — приложенная сила, \mathbf{a} — ускорение тела.



Альберт Эйнштейн (1879—1955). (Коллекция Грейнджера.)



Траектория шайбы, скользящей без трения по поверхности вращающегося катка. OQ — траектория относительно катка, OP — траектория в пространстве. Если следить за шайбой из вращающейся системы отсчета, то ее движение будет казаться ускоренным.

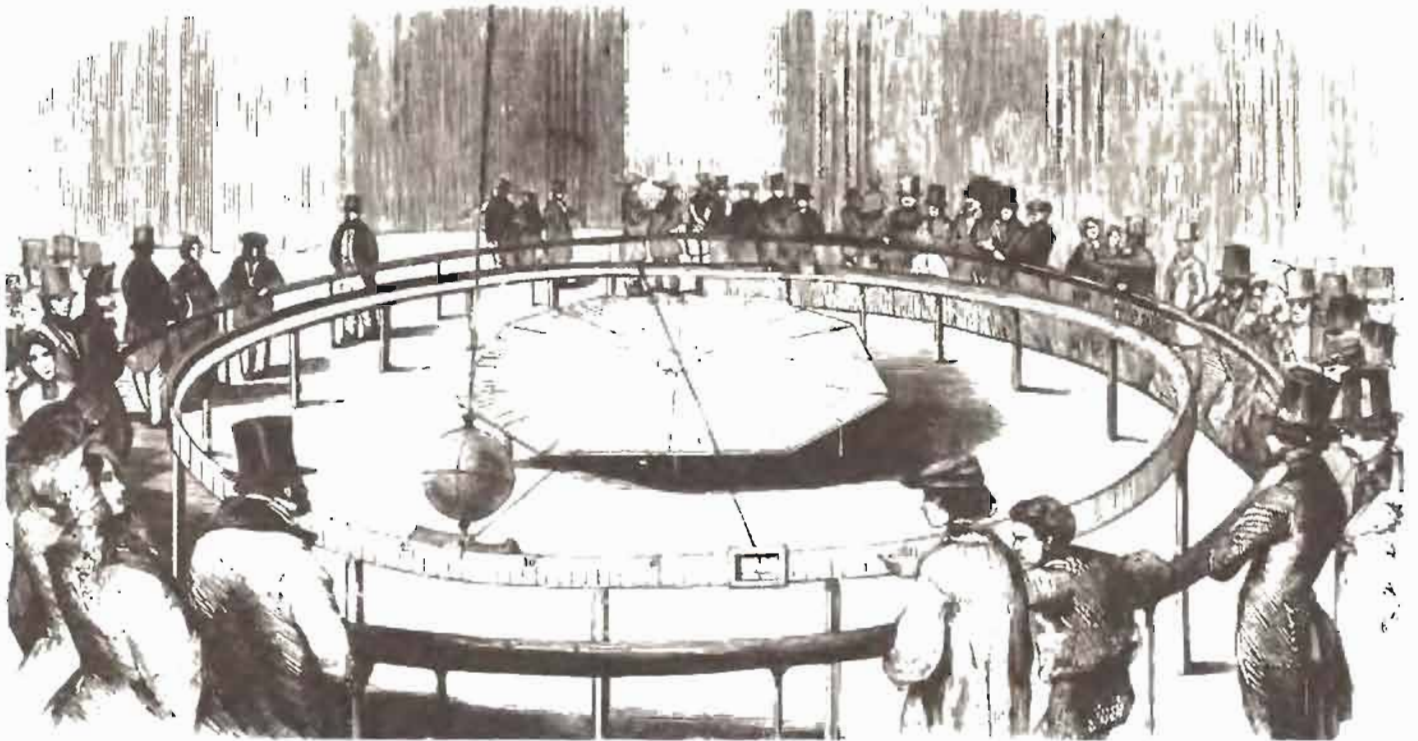
Что означает «инерциальная система отсчета»? Это система, в которой ускорение каждого тела пропорционально приложенной силе. Это определение не тавтология, как может показаться на первый взгляд. Предположим, что мы измеряем ускорение пробного тела в системе отсчета F , о которой заранее нам ничего неизвестно. Предположим также, что нам известно, каким образом различные силы, которые могут здесь действовать, зависят от положения, скорости и физических свойств пробного тела. Тогда нетрудно вычислить приложенные к телу силы и, поставив соответствующий эксперимент, выяснить, можно ли приписать инертную массу всем пробным телам так, чтобы *измеренное* ускорение было связано с *вычисленной* силой соотношением (6.1). Обычно этого сделать не удастся. Однако, если теория Ньютона справедлива, мы должны иметь возможность исключить все остаточные ускорения, выбрав новую систему отсчета.

Предположим, например, что, двигаясь по льду, хоккейная шайба всегда описывает траекторию в виде архимедовой спирали, которая задается уравнениями

$$r = V(t - t_0), \quad \theta = \omega(t - t_0),$$

где r — радиальное расстояние шайбы от исходного положения, V — начальная скорость шайбы, а θ — угловая координата, отсчитываемая от первоначального направления. Отсюда можно было бы заключить, что каток вращается вокруг оси с угловой скоростью ω .

Обычно бывает нетрудно отличить «фиктивные» силы (т. е. силы, обусловленные движением системы отсчета) от реальных. Ускорение, обусловленное реальными силами, зависит от ряда физических свойств тела, на которое действуют силы, и его величина различна для разных тел. Например, ускорение, обусловленное электрическим полем, зависит от электрического заряда ускоряемого объекта. Поскольку объекты с одинаковой массой могут



Маятник Фуко, установленный в Парижской обсерватории, позволяет убедиться в том, что Земля вращается вокруг своей оси. Относительно невращающейся системы отсчета маятник колеблется в одной, фиксированной, плоскости. Вследствие вращения Земли пол Парижской обсерватории, расположенной на широте 49° с. ш., вращается относительно этой системы с периодом, равным $\sin 49^\circ \times 24$ ч.

иметь различные электрические заряды, одно и то же электрическое поле сообщает разным телам различное ускорение. Ускорение, обусловленное фиктивной силой, не зависит от физических свойств тела и определяется лишь его положением и скоростью.

Вспомним теперь, что гравитационное ускорение тел также зависит лишь от их положения и не зависит от массы или каких-то других физических свойств. Галилей проверил этот закон двояким образом: сбрасывая с Пизанской башни тела разного веса и состава, а также замечая, что период колебаний маятника не зависит от веса или состава гири. Ньютон в свою очередь установил, что третий закон Кеплера, связывающий диаметры планетных орбит и орбитальные периоды, вытекает из закона обратных квадратов, если предположить, что гравитационное ускорение планет не зависит от их физических свойств.

Опыты Этвеша

В 1889 г. Лоранд фон Этвеш поставил эксперимент по проверке закона Галилея. Предположим, что гравитационное ускорение куска дерева отличается от гравитационного ускорения куска платины, но их центробежные ускорения во вращающейся системе отсчета должны быть одинаковыми. Следовательно, результат совместного действия гравитационного и центробежного ускорений не может быть одинаковым для этих двух тел. Отсюда вытекает, что на поверхности вращающейся Земли в средних широтах результирующие ускорения грузов из дерева и платины будут отличаться и по величине, и по направлению. Если поместить грузы на архимедовы весы, то проволока, из которой сделано коромысло весов, должна испытывать малый вращающийся момент, когда грузы уравновесятся. Опыт, поставленный Этвешем, позволил измерить этот вращающийся момент с очень высокой точностью. Оказалось, что гравитационная масса совпадает с инертной с относительной точностью

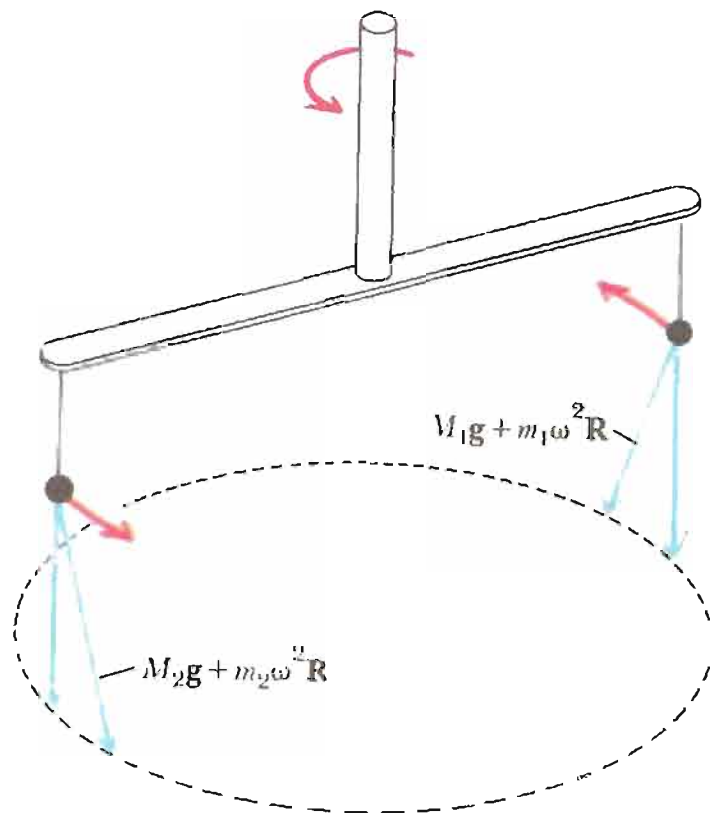


Схема эксперимента Л. Этвеша

10^{-9} . В усовершенствованном варианте опыта Этвеша, выполненном Р Дикке и его коллегами из Принстонского университета, точность достигла 10^{-11} *.

Законы Галилея навели Эйнштейна на мысль, что гравитация — это фиктивная сила, т. е. она обусловлена ускорением системы отсчета, в которой сила измеряется. Придерживаясь такой точки зрения, Эйнштейн был вынужден изменить ньютоновское определение инерциальной системы отсчета. Поскольку гравитационное ускорение равно нулю в начале координат любой свободно падающей невращающейся системы отсчета, мы должны считать все свободно падающие невращающиеся системы отсчета инерциальными, хотя, вообще говоря, любые две такие системы движутся относительно друг друга с ускорением! Далее мы узнаем, как Эйнштейну удалось устранить это противоречие.

Предложенное Эйнштейном толкование закона Галилея кажется на первый взгляд чрезмерно сложным. Не удивительно, что Эрнст Мах, который рассматривал физические законы лишь как «экономный способ» обобщения экспериментальных результатов, резко критиковал теорию Эйнштейна. Но Эйнштейн был убежден, что, несмотря на кажущуюся сложность, его подход к гравитации более прост с фундаментальной точки зрения и, следовательно, ближе к истине, чем подход Ньютона. Более того, из такой трактовки гравитации вытекали следствия, которые Эйнштейн продемонстрировал с помощью простого мысленного эксперимента, касающегося поведения света в гравитационном поле.

Сколько весит фотон?

Представим две абсолютно одинаково оборудованные лаборатории: одну — на Земле, а вторую — на равноускоренно движущемся космическом корабле. *Принцип эквивалентности* Эйнштейна гласит, что любой эксперимент приводит

* Дальнейшее повышение точности, до 10^{-12} , достигнуто в опытах, проведенных в МГУ В. Б. Брагинским и его сотрудниками — *Прим. ред.*

к одинаковым результатам в обеих лабораториях при условии, что ускорение космического корабля g равно ускорению силы тяжести на поверхности Земли*. Рассмотрим тело, инертная масса которого равна m , подвешенное на пружинных весах к потолку космической лаборатории (мы считаем, что ускорение корабля направлено от пола к потолку лаборатории). Весы покажут силу mg . Если тело поглотит фотон с энергией ΔE , то его инертная масса возрастет на величину $\Delta E/c^2$ (см. гл. 5) и весы покажут силу $(m + \Delta E/c^2)g$. Повторив эксперимент в земной лаборатории, мы должны получить тот же результат: динамометр, прикрепленный к потолку земной лаборатории, должен показать силу $(m + \Delta E/c^2)g$. Но в последнем случае сила представляет собой *вес* объекта. Таким образом, поглощение порции энергии ΔE увеличивает гравитационную массу объекта на величину $\Delta E/c^2$, т. е. на величину инертной массы, связанной с данной порцией энергии.

Это простое рассуждение — наряду с предшествующими утверждениями относительно эквивалентности энергии и инертной массы — показывает, что *энергия, инертная масса и гравитационная масса* — эквивалентные понятия, а три этих термина — лишь разное название одной величины. В теории Ньютона гравитационная и инертная массы равны численно, но различны по смыслу. Если же учесть принцип эквивалентности Эйнштейна, то два этих понятия оказываются тождественными. В дальнейшем термин «масса» будет использоваться без уточнения, какая именно масса имеется в виду. Поскольку «масса» в свою очередь — это синоним понятия «энергия», оба этих термина мы будем использовать как взаимозаменяемые**.

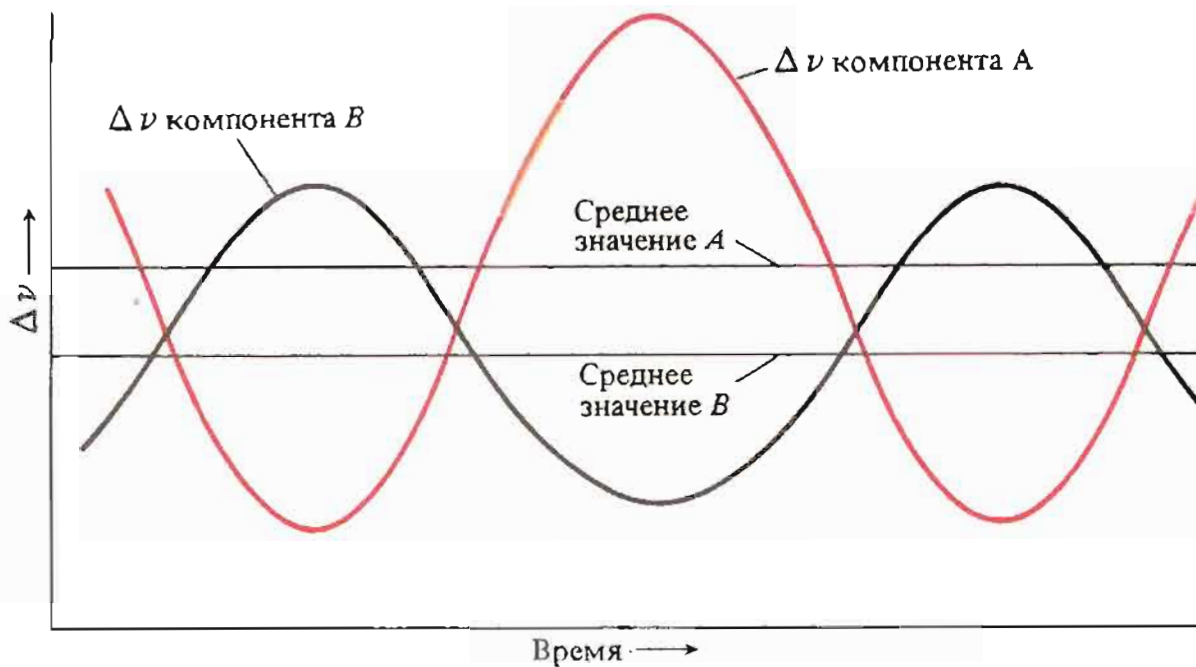
В общепринятой системе единиц три названные величины связаны между собой соотношениями $E = mc^2$ и $M = Gm$, где c — скорость света в вакууме, а G — гравитационная постоянная. Можно ввести «естественную» систему единиц, в которой $c = G = 1$ и $m = M = E$. Чтобы не загромождать уравнения символами c и G , мы будем впредь использовать систему единиц, в которой время, расстояние и масса (или энергия) имеют одинаковую размерность***.

Теория Эйнштейна гласит, что масса (или энергия) — но не вещество — есть тот «неуничтожимый» материал, из которого сделан мир. В V в. до н. э. Левкипп и Демокрит утверждали, что мир состоит из неразрушимых частиц и все изменения — как количественные, так и качественные — обусловлены лишь перегруппировкой этих частиц и изменением их движения. Ньютон столь свято верил в это, что распространил подобный взгляд на свет и эфир, считая, что они состоят из крошечных частиц вещества. Мы знаем теперь, что так называемые фундаментальные частицы не являются «неуничтожимыми». Протон и антипротон могут столкнуться и исчезнуть, породив вспышку света. Энергия (масса) одновременно вещественна и невещественна, непрерывна и дискретна. И во всех своих формах энергия является источником гравитационных полей.

* Эта формулировка принципа эквивалентности не точна. Эксперимент, который позволяет обнаружить изменения величины или направления гравитационного поля, приводит к различным результатам в рассматриваемых системах отсчета. Результаты будут неотличимы лишь в пределе исчезающе малых по размерам лабораторий. Пользуясь физической терминологией, можно сказать, что принцип эквивалентности справедлив лишь локально, но не глобально.

** В рамках механики Ньютона этого делать нельзя. — *Прим. перев.*

*** Так как $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с, а $G \approx 7 \cdot 10^{-8}$ см³/г·с², то в «естественных» единицах $1 \text{ с} \approx 3 \cdot 10^{10}$ см, $1 \text{ г} \approx 10^{-28}$ см. Таким образом, время, массу и длину можно выражать в одних и тех же единицах, например в сантиметрах. Удобство этих единиц состоит в том, что к обычной размерности можно переходить в самом конце вычислений, подставляя выражения, связывающие сантиметры и секунды или соответственно сантиметры и граммы. — *Прим. ред.* •



Схематическое изображение периодического изменения сдвига линий в спектре Сириуса и его спутника — белого карлика. Гравитационный потенциал на поверхности белого карлика гораздо больше, чем на поверхности обычной звезды, поэтому гравитационное красное смещение у белого карлика гораздо больше. Разность гравитационных красных смещений можно найти, вычитая средние значения сдвига идентичных спектральных линий Сириуса и его спутника.

Гравитационное красное смещение

Когда частица с массой m , падая в однородном гравитационном поле с ускорением g , проходит путь Δz , ее энергия (масса) возрастает на величину

$$\Delta m = \Delta E = mg\Delta z. \quad (6.2)$$

Из предыдущего раздела мы знаем, что этот вывод в равной степени применим как к фотонам, так и к частицам вещества. Энергия фотона пропорциональна его частоте: $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. Таким образом, частота падающего фотона возрастает по закону

$$\Delta\nu/\nu = g\Delta z. \quad (6.3)$$

В общепринятых единицах $g\Delta z = g\Delta z/c^2$. На поверхности Земли $g \approx 10^3$ см/с². Если $\Delta z \approx 23$ м (см. врезку на с. 211), то сдвиг частоты $\Delta\nu/\nu$ составляет примерно $2,5 \cdot 10^{-15}$.

Фотон, испускаемый звездой, совершает работу против сил тяготения. Следовательно, его частота уменьшается. Заменяв в уравнениях (6.2) и (6.3) величину $g\Delta z$ на $\Delta\phi$, где ϕ — гравитационный потенциал (см. гл. 4), получим соотношение

$$\Delta m/m = \Delta\nu/\nu = \Delta\phi, \quad (6.4)$$

применимое для любого гравитационного поля. Относительное красное смещение фотона, излученного звездой массой M и радиусом R , равно M/R или (в общепринятых единицах) GM/Rc^2 . Для Солнца относительное изменение частоты фотона $\Delta\nu/\nu \approx 2 \cdot 10^{-6}$, а для спутника Сириуса, белого карлика, $\Delta\nu/\nu \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Относительное изменение частоты такого порядка измерить нетрудно. Сложность заключается в том, чтобы отличить гравитационное

смещение от смещения, обусловленного эффектом Доплера, который вызван движением звезды как целого. Однако в определенных случаях это вполне можно сделать.

Рассмотрим двойную звезду, компоненты которой обращаются вокруг общего центра масс по круговым орбитам, предположив для простоты, что наблюдатель находится в орбитальной плоскости пары. Каждая звезда одну половину периода движется к наблюдателю, а в течение другой — удаляется от него. Частота каждой спектральной линии звезды колеблется относительно среднего значения, которое само по себе смещено от частоты, наблюдаемой в лабораторной системе отсчета в отсутствие гравитационного поля. Это смещение обусловлено двумя эффектами: доплеровским сдвигом, связанным с движением центра масс, и красным гравитационным смещением (см. рисунок). Предположим теперь, что одна из двух звезд — белый карлик, а другая — обычная звезда. Гравитационное смещение изучения белого карлика в 100 раз больше, чем у обычной звезды. Следовательно, разность между средними значениями $\Delta\nu/\nu$ для названных двух звезд примерно равна красному гравитационному смещению фотона, испускаемого белым карликом.

Таким методом удалось оценить гравитационное красное смещение для нескольких белых карликов. Полученные результаты согласуются с предсказаниями теории Эйнштейна.

Эксперименты Паунда—Рибки и Вессо

В 1960 г. сотрудники Гарвардского университета Р. В. Паунд и Г. А. Рибка-мл. поставили эксперимент с целью измерения красного гравитационного смещения. Ядра железа Fe^{57} , образующие кристаллическую решетку твердого тела, испускают



В 1976 г. Роберт Ф. С. Вессо и его сотрудники из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра провели эксперимент по измерению сдвига частоты излучения в гравитационном поле, используя с этой целью водородный мазер (он изображен на фотографии), который установили на ракете. Разность гравитационных потенциалов в точках минимального и максимального удаления ракеты от Земли, согласно теории Эйнштейна, соответствовала относительному

сдвигу частоты $\Delta\nu/\nu = 4 \cdot 10^{-10}$, что более чем в 100 тыс. раз превосходит величину сдвига в эксперименте Паунда—Рибки. Поскольку ракета двигалась, монохроматическое излучение водородного лазера, кроме того, испытывало сдвиг в красную (при подъеме ракеты) или в фиолетовую (при ее спуске) область спектра вследствие релятивистского эффекта Доплера (см. с. 196). Вессо нашел остроумный (чисто электронный) способ исключения доплеровского сдвига первого порядка (соответствующего классической формуле Доплера). Таким образом, в эксперименте измерялся сдвиг по частоте, складывающийся из гравитационного сдвига и остаточного доплер-эффекта, связанного с релятивистским замедлением времени. Вклад обеих составляющих примерно одинаков на протяжении большей части полета. Водородный мазер, созданный Норманом Ф. Рамсеем из Гарвардского университета, имел стабильность по частоте 10^{-14} . Измеренный сдвиг согласуется с величиной, предсказываемой теорией Эйнштейна, с точностью $7 \cdot 10^{-5}$, что в сто раз выше точности эксперимента Паунда—Рибки. (НАСА, Хант-свилл; с разрешения Роберта Ф. С. Вессо.)

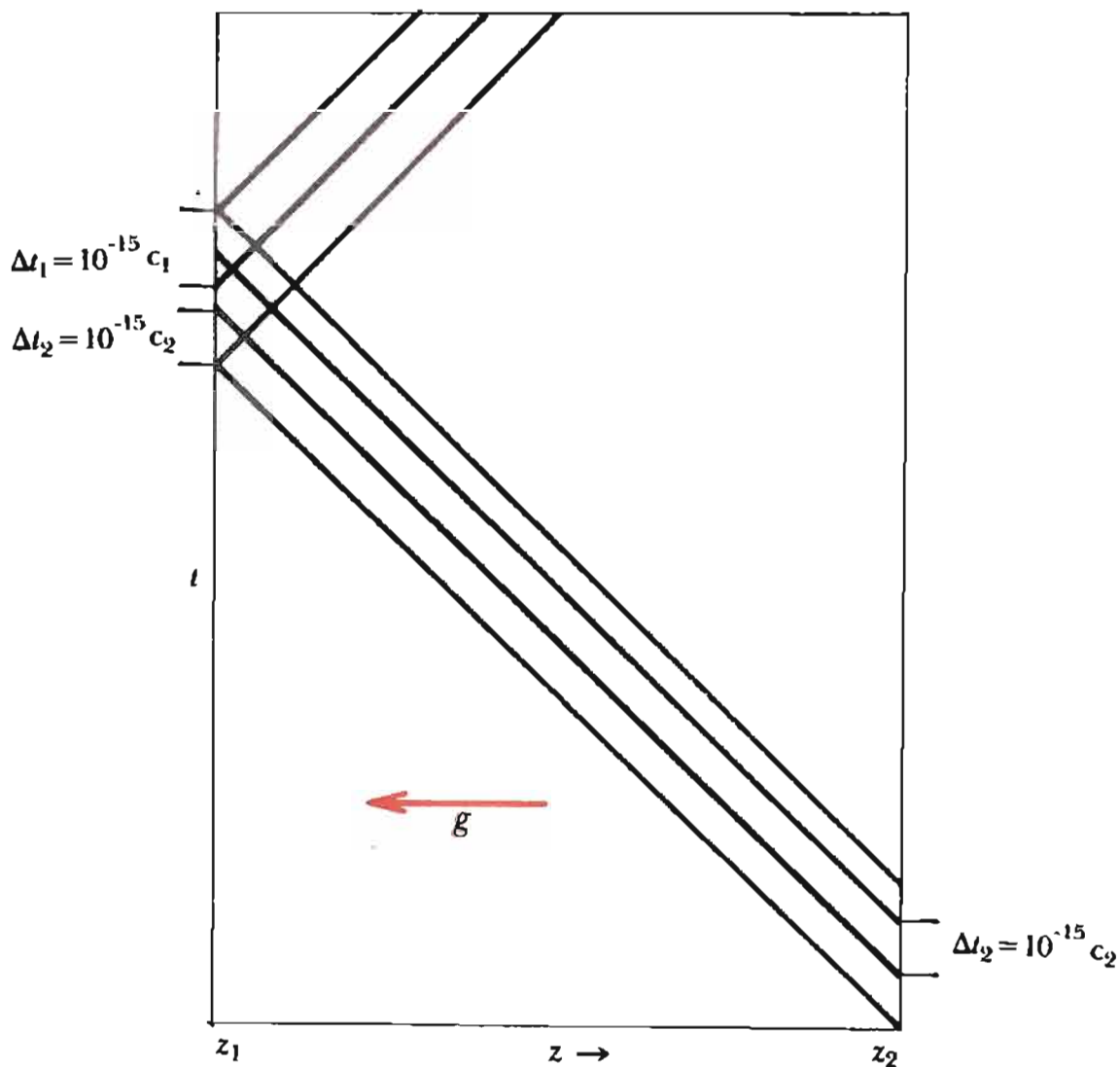
и поглощают фотоны в очень узком диапазоне частот ($\Delta\nu/\nu = 3 \cdot 10^{-13}$), центр которого приходится примерно на частоту $3,5 \cdot 10^{18}$ Гц. В эксперименте Паунда—Рибки источник и поглотитель этого строго монохроматического излучения располагались друг над другом на расстоянии 22,5 м, так что поглощаемое излучение было сдвинуто по частоте относительно испускаемого на величину $\Delta\nu/\nu \approx gh/c^2 \approx 2,5 \cdot 10^{-15}$. Величина поглощения была несколько меньше, чем это было бы в отсутствие гравитационного красного смещения. Чтобы скомпенсировать это различие в поглощении, вводилось соответствующее доплеровское смещение — путем перемещения источника относительно поглотителя с малой, точно измеряемой скоростью. Введенный таким образом доплеровский сдвиг соответствовал величине, предсказываемой теорией Эйнштейна, с точностью до 10%. Впоследствии расхождение было уменьшено до 1%.

Гравитационное замедление времени: замедление и отклонение света в гравитационном поле

В предыдущем разделе, рассматривая фотоны как частицы, обладающие массой, мы пришли к выводу, что энергия фотона в поле тяготения зависит от гравитационного потенциала. Поскольку энергия фотона пропорциональна частоте, частота испускаемого им света также должна меняться в зависимости от высоты или гравитационного потенциала. Исходя из этого, Эйнштейн пришел к выводу, что *темп протекания всех физических процессов в гравитационном поле замедляется*.

Аргументация тут довольно проста. Предположим, что источник, расположенный на потолке высокой комнаты, испускает монохроматический свет с частотой ν_2 , который поступает на неподвижный приемник, расположенный на полу. Поскольку свойства источника света, расстояние между источником и приемником, а также гравитационное поле не меняются со временем, разность времен $t_1 - t_2$, соответствующих моментам излучения и приема каждого данного фотона (или гребня световой волны), также не должна изменяться со временем, по какой бы пространственно-временной траектории ни двигался фотон. Следовательно, интервал временной координаты между соседними гребнями световой волны должен быть одинаковым как в источнике, так и в приемнике (а также во всех промежуточных точках), что и подтверждается приведенной здесь пространственно-временной диаграммой.

Как в классической физике, так и в специальной теории относительности принимается, что частота волны в данной системе отсчета — это величина, обратная интервалу временной координаты между следующими друг за другом, гребнями волны (по измерениям неподвижного в этой системе отсчета наблюдателя). В гравитационном поле (или в ускоренно движущейся системе отсчета) это соотношение не выполняется, поскольку, как мы только что видели, интервал времени между соседними гребнями световой волны, распространяющейся вдоль оси z , одинаков на разных высотах, тогда как частота меняется с высотой. В таком случае мы можем выбрать в качестве локального эталона времени интервал между соседними гребнями световой волны, излучаемой при определенном атомном переходе, т. е. будем считать, что частота света, излучаемого при данном атомном переходе, не зависит от локального гравитационного потенциала. Любые другие идеализированные часы (стандарты частоты), например крошечный маятник, будут вести себя точно так же. В самом деле, из принципа эквивалентности следует, что часы, идущие с одинаковой скоростью в отсутствие гравитационного поля, будут и при его наличии идти с одинаковой скоростью, если только они находятся в точках с одним и тем же гравитационным потенциалом. На основании сделанного ранее



Интервал временной координаты между соседними гребнями волны света, излученного на высоте z_2 , равен интервалу временной координаты между соседними гребнями той же волны в точке приема, расположенной на высоте z_1 . Предположим, что свет излучается в результате атомного перехода с частотой 10^{15} Гц. Тогда этот интервал $\Delta t_2 = 10^{-15} c_2$, где c_2 — единица измерения времени на высоте z_2 . При том же атомном переходе на высоте z_1 излучается свет такой же частоты, следовательно, $\Delta t_1 = 10^{-15} c_1$. Эти рассуждения показывают, как мы *выбираем* единицы измерения времени на разных высотах. Мы установили, что частота света, излученного на высоте z_2 и принятого на высоте z_1 , изменяется в $(1 + \varphi_2)/(1 + \varphi_1)$ раз. Поэтому $\Delta t_1/\Delta t_2 = (1 + \varphi_2)/(1 + \varphi_1)$.

вывода о возрастании частоты падающего вниз фотона мы можем — вслед за Эйнштейном — заключить, что *идентичные часы идут с разной скоростью при разных гравитационных потенциалах*. Только таким путем можно согласовать наш вывод о том, что интервал временной координаты между соседними гребнями монохроматической световой волны не зависит от высоты, с утверждением (доказанным Паундом и Ребкой) об изменении частоты волны в зависимости от высоты.

Из уравнения (6.4) можно найти, как эталонный интервал времени Δt , определяемый данным атомным переходом, изменяется в зависимости от высоты. Обозначим через Δt_1 и Δt_2 эталонные интервалы между соседними гребнями световой волны (излученной при выбранном атомном переходе) на высотах z_1 и z_2 соответственно. Когда свет, излученный на высоте z_2 , достигает высоты z_1 , интервал между соседними гребнями, как мы уже знаем, остается равным Δt_2 . Наблюдатель, находящийся на высоте z_1 , увидит свет, излученный на высоте z_2 при том же атомном переходе, смещенным по частоте (по сравнению со светом, излученным при том же переходе, но атомом, расположенным на высоте z_1). Запишем уравнение (6.4) в следующем виде:

$$\frac{\nu(z_2 \rightarrow z_1) - \nu(z_1 \rightarrow z_2)}{\nu(z_1 \rightarrow z_1)} = \varphi(z_2) - \varphi(z_1). \quad (6.5)$$

Здесь $\nu(z_2 \rightarrow z_1)$ — частота света, излученного на высоте z_2 и принятого на высоте z_1 , а $\nu(z_1 \rightarrow z_1)$ — частота света, излученного и принятого на высоте z_1 . Эти величины связаны с «эталонными интервалами» Δt_1 и Δt_2 , определенными выше, соотношениями

$$\nu(z_2 \rightarrow z_1) = 1/\Delta t_2, \quad \nu(z_1 \rightarrow z_1) = 1/\Delta t_1. \quad (6.6)$$

Подставляя (6.6) в (6.5), после преобразований получаем

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = 1 + \varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{1 + \varphi_2}{1 - \varphi_1}, \quad (6.7)$$

где через φ_i обозначено $\varphi(z_i)$ при $i = 1, 2$ (так как в земных условиях φ_1 и $\varphi_2 \ll 1$. — *Перев*).

Мы определили гравитационный потенциал таким образом, чтобы он был равен нулю в отсутствие гравитационного поля. Пусть теперь Δt — интервал времени между соседними гребнями волны по измерениям в свободно падающей системе отсчета, относительно которой атом в момент излучения покоился. Если через Δt обозначить интервал между соседними гребнями световой волны, излученной тем же атомом, когда он покоится в гравитационном поле с потенциалом φ , то уравнение (6.7) примет вид

$$\Delta \tau = (1 + \varphi)\Delta t. \quad (6.8)$$

До сих пор мы говорили о покоящихся часах в статическом гравитационном поле, однако нетрудно догадаться, как обобщить наше описание на случай движущихся часов. В уравнении (6.8) Δt — это интервал между последующими «тик-так» часов, т. е. между двумя последующими гребнями световой волны, излучаемой атомом при наблюдении в локально свободно падающей (т. е. не испытывающей действия гравитации) системе отсчета. Из гл. 5 мы знаем, что в такой системе интервал собственного времени между последующими «тик-так» движущихся часов вычисляется по формуле

$$d\tau^2 = dt^2 - dl^2, \quad dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

где dt , dx , dy и dz — координатные интервалы между близкими событиями в истории движущихся часов. Это наводит на мысль, что подходящим обобщенным вариантом уравнения (6.8) в случае движущихся часов будет

$$d\tau^2 = [1 + 2\varphi(z)]dt^2 - dl^2, \quad (6.9)$$

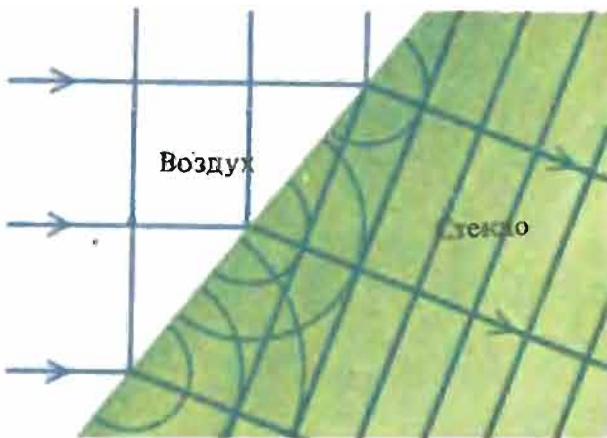
где учтено, что $(1 + \varphi)^2 \approx 1 + 2\varphi$, так как $\varphi \ll 1$.

Уравнение (6.9) позволяет сделать интересные предсказания о поведении света в гравитационном поле. Из гл. 5 мы знаем, что интервал собственного времени между событиями в истории фотона равен нулю. Поскольку величина $d\tau$ в (6.9) имеет тот же смысл, что и в гл. 5, положив $d\tau = 0$ в уравнении (6.9), мы получим соотношение, связывающее интервал временной координаты и отрезок пространственной координаты между событиями в истории фотона, движущегося в гравитационном поле:

$$dl^2 = (1 + 2\varphi)dt^2 \quad \text{или} \quad dl/dt \equiv c = 1 + \varphi(z). \quad (6.10)$$

Поскольку $\varphi \leq 0$, это уравнение гласит, что фотоны в гравитационном поле движутся медленнее, чем в вакууме*. (Эксперименты, в которых используется это предсказание, мы рассмотрим ниже.)

* Речь здесь, конечно, идет о скорости света, определенной как путь, пройденный за интервал координатного времени. — *Прим. ред.*



Искривление светового луча при переходе из воздуха в стекло. Поскольку в стекле свет распространяется медленнее, чем в воздухе, соседние гребни световой волны в стекле расположены ближе, и луч, который всегда перпендикулярен волновому фронту, отклоняется в направлении перпендикуляра к поверхности раздела. Соответствующее геометрическое построение показано на рисунке, помещенном на следующей странице.



Диаграмма, показывающая ход солнечных лучей на закате. В момент заката Солнце в действительности уже находится за горизонтом, но, поскольку его лучи отклоняются в направлении к земной поверхности, мы можем видеть заходящее Солнце.

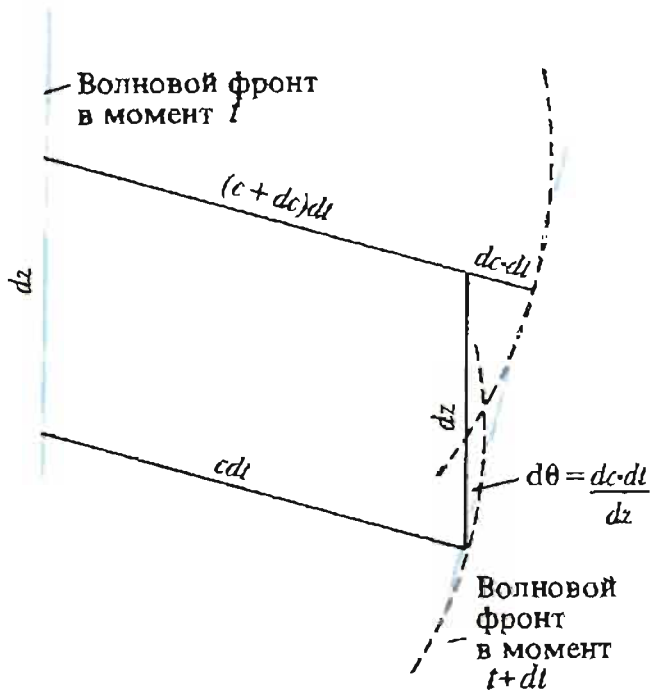
Замедление света в гравитационном поле чем-то напоминает замедление света в веществе. В воздухе свет движется медленнее, чем в вакууме, а в стекле медленнее, чем в воздухе. Распространяясь в среде, в которой скорость света меняется от точки к точке, световые лучи искривляются. Проходя из воздуха в стекло или в воду, световой луч отклоняется в направлении, перпендикулярном границе раздела двух сред. Подобным же образом лучи заходящего Солнца отклоняются в направлении поверхности Земли, поскольку плотность воздуха уменьшается, а скорость света возрастает с высотой над уровнем моря. По этой причине нам кажется, что заходящее Солнце находится на небе выше, чем на самом деле.

На приведенном здесь чертеже показано простое геометрическое построение, которое Гюйгенс использовал для определения траектории световых лучей в среде, где скорость света меняется от точки к точке. Из рисунка видно, что световой луч, первоначально перпендикулярный гравитационному полю, за короткий интервал времени dt отклоняется на угол $d\theta$, величина которого равна

$$d\theta = \frac{|c(z+dz) - c(z)| dt}{dz} = \frac{|\varphi(z+dz) - \varphi(z)|}{dz} dt = \frac{d\varphi}{dz} dt \quad (6.11)$$

в соответствии с уравнением (6.10). Поскольку $d\varphi = -gdz$, из уравнения (6.11) следует, что отклонение $d\theta$, соответствующее временному интервалу dt вдоль траектории луча, вычисляется по простой формуле

$$d\theta = gdt. \quad (6.12)$$



Построение Гюйгенса. Вокруг каждой точки волнового фронта в момент времени t описывается сфера с радиусом cdt , где c — локальная скорость света. Волновой фронт в момент времени $t + dt$ представляет собой поверхность, касательную к этим сферам.

Построение Гюйгенса показывает, что световые лучи отклоняются в направлении возрастания гравитационного поля.

К тому же выводу можно прийти гораздо проще; поскольку фотон имеет конечную массу (= энергию), он должен ускоряться гравитационным полем. Рассмотрим фотон, движущийся вдоль оси x перпендикулярно вектору \mathbf{g} , который параллелен оси z . За малый интервал времени dt фотон приобретает составляющую скорости $c_z = gdt$, перпендикулярную его первоначальной скорости $c_x = 1$. Как следует из (6.12), за время dt направление движения фотона изменится на угол $d\theta = c_z/c_x = gdt$.

Оценим временное запаздывание δt и отклонение $\Delta\theta$ фотона, летящего по касательной к Солнцу. Запаздывание по времени δt на пути длиной Δl , согласно (6.10), равно

$$\delta t = \frac{\Delta l}{1 + \varphi} - \Delta l \approx -\varphi \Delta l,$$

а отклонение

$$\Delta\theta = g\Delta t = g\Delta l.*$$

На поверхности Солнца $\varphi = -M/R$, $g = M/R^2$. Таким образом, полное временное запаздывание

$$\Delta t \approx 2R\varphi(R) = 2M = 2Gm/c^2 \approx 10^{-5} \text{ с},$$

а полное отклонение

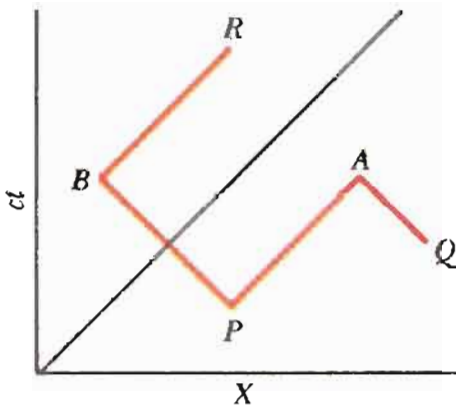
$$\Delta\theta \approx 2gR \approx 2M/R = 2Gm/Rc^2 \approx 1''.$$

Как видим, предсказываемое отклонение светового луча в гравитационном поле действительно очень мало. Позднее мы более тщательно обсудим эти предсказания и их экспериментальную проверку.

Кривизна пространства-времени и движение свободной частицы

Соотношение (6.8), определяющее интервал собственного времени между близкими событиями, показывает, что гравитационное поле искажает прост-

* Δt в этой формуле — это время, за которое свет проходит путь Δl . — Прим. перев.



В пространственно-временном континууме Минковского два произвольных события, например P и Q или P и R , можно соединить траекторией с нулевой собственной «длиной»: PAQ и PBQ соответственно. Эти траектории составлены из отрезков траекторий фотонов.

ранство-время. В отсутствие гравитационного поля интервал собственного времени вычисляется по формуле Минковского:

$$d\tau^2 = dt^2 - dl^2, \quad (6.13)$$

где dt — интервал времени, а dl — интервал длины между двумя событиями. Это соотношение напоминает формулировку теоремы Пифагора, если распространить ее на случай четырехмерного пространства и не считать того, что в формуле (6.13) стоит знак минус. В гл. 5 мы показали, что минус здесь важен: он обуславливает качественное отличие между времениподобными, пространственноподобными и светоподобными интервалами, которое сохраняется во всех инерциальных системах отсчета. Вместе с тем пространство-время Минковского (пространство-время в специальной теории относительности) в одном важном отношении сходно с евклидовым пространством: в обоих случаях график прямой линии — прямая.

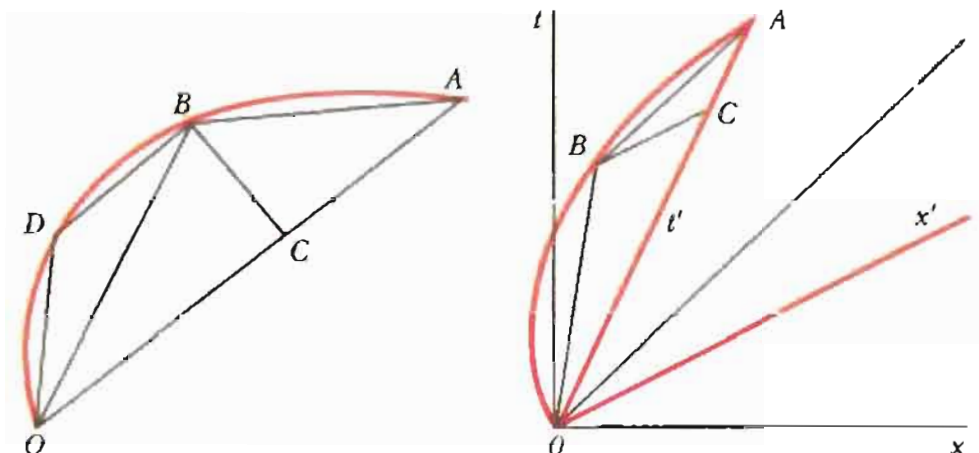
Это утверждение следует пояснить. Для простоты сравним двумерное пространство-время Минковского с двумерным евклидовым пространством. В евклидовом пространстве прямой линией *по определению* называется линия, указывающая кратчайшее расстояние между двумя точками. Преимущество такого определения прямой линии заключается в том, что оно применимо к *любому* пространству; при этом подразумевается, что понятие расстояния уже определено. Например, из нашего определения следует, что прямые линии на поверхности сферы — это дуги больших кругов, т. е. кругов, центры которых совпадают с центром сферы.

В пространстве-времени Минковского евклидово определение прямой линии не применимо, поскольку, как видно из рисунка, всегда можно построить путь с нулевой «длиной», соединяющий любую пару событий. На пространственно-временной диаграмме Минковского прямая линия (в обычном, евклидовом, смысле), соединяющая два события, отделенных времениподобным интервалом, *длиннее*, чем интервал собственного времени, измеренного вдоль любого другого пути, соединяющего те же события. Доказательство этого утверждения приведено ниже.

В пространстве-времени Минковского прямая линия соответствует наибольшему расстоянию между двумя событиями

Докажем вначале известное утверждение «прямая линия — это кратчайшее расстояние между двумя точками» для евклидовой плоскости. Пусть O и A — две произвольные точки (см. рисунок).

Следует доказать, что прямая OA короче любой другой линии, например $ABDO$, соединяющей эти точки. Произвольно выберем на рассматриваемой кривой точку B и опустим из нее перпендикуляр на OA . Из теоремы Пифагора следует, что $AB > AC$ и $OB > OC$. Следовательно, ломаная ABO больше, чем прямая AO . Аналогично,



если D — точка на кривой OB , ломаная ODB больше прямой OB , так что ломаная $ODBA$ больше, чем прямая OA . При добавлении точек на кривой OA длина ломаной, соединяющей эти точки между собой, будет возрастать, стремясь к длине рассматриваемой кривой. Таким образом, прямая OA — кратчайшее расстояние между точками A и O .

Чтобы убедиться в том, что прямая линия — это кратчайшее расстояние между двумя точками в искривленном пространстве, следует рассуждать несколько иначе. Если кривая, соединяющая две данные точки A и B , не прямая, то она должна быть кривой и в евклидовой окрестности, по крайней мере одной точки. Выбрав внутри этой окрестности на кривой две точки P и O , соединим их отрезком прямой PO . Кривая $APOB$ теперь короче, чем исходная кривая, соединяющая точки A и B . Кривую можно укорачивать таким образом до тех пор, пока она полностью не превратится в прямую линию в окрестности каждой из лежащих на ней точек. Сам метод построения этой прямой доказывает, что она представляет собой кратчайшее расстояние между двумя заданными точками.

Если заменить теперь «пространство» на «пространство-время», «точку» — на «событие», а «расстояние» — на «собственное время», то приведенные выше рассуждения применимы к времениподобным кривым в пространственно-временном континууме, но при этом слово «кратчайший» нужно заменить на «самый длинный». На рисунке интервал собственного времени $\tau(OA)$, измеренный вдоль времениподобной прямой OA , больше, чем сумма $\tau(OB) + \tau(BA)$, где обе прямые, OB и BA , — времениподобные, поскольку линию OA можно принять за ось времени t' . В этом случае, если BC провести параллельно соответствующей оси x' , мы получим $\tau(OB) = \tau^2(OC) - x^2(BC)$ и, следовательно, $\tau(OC) > \tau(OB)$. Аналогично можно показать, что $\tau(CA) > \tau(BA)$. Таким образом, $\tau(OA) = \tau(OC) + \tau(CA) > \tau(OB) + \tau(BA)$. Рассуждая далее подобным же образом, приходим к выводу: в пространственно-временном континууме Минковского собственное время, измеренное вдоль времениподобной прямой, соединяющей два события, больше, чем собственное время, измеренное вдоль любой времениподобной кривой, соединяющей те же два события. Временеподобные прямые в искривленном пространстве-времени обладают тем же свойством.

В пространственно-временном континууме Минковского времениподобные прямые изображают траектории свободных частиц. Их уравнение имеет вид: $x - x_0 = V(t - t_0)$, причем $V < 1$. Утверждение, что интервал собственного времени между двумя данными событиями максимален, когда он измеряется вдоль времениподобной прямой, соединяющей события, есть не что иное, как математическая формулировка парадокса близнецов, который мы рассматривали в гл. 5. Поскольку траектория космической путешественницы на диаграмме Минковского представляет собой ломаную линию, ее собственное время, затраченное на полет от старта до посадки, будет меньше, чем собственное время между теми же событиями по восприятию ее оставшейся на Земле сестры.

При наличии гравитационного поля, направленного вдоль оси z , интервал собственного времени между двумя близлежащими событиями можно вычислить с помощью (6.9):

$$d\tau^2 = [1 + 2\varphi(z)]dt^2 - dz^2. \quad (6.14)$$

Это выражение напоминает формулу для вычисления расстояний между двумя близлежащими точками на искривленной поверхности. Например, на поверхности сферы единичного радиуса расстояние между близлежащими точками равно

$$dl^2 = \sin^2\theta \cdot d\lambda^2 + d\theta^2, \quad (6.15)$$

где θ — полярный угол, λ — долгота. Множитель $\sin^2\theta$, на который умножается $d\lambda$, аналогичен множителю $(1 + 2\varphi)$, на который в уравнении (6.9) умножается dt^2 .

Аналогичные построения для интервала собственного времени между близлежащими событиями можно выполнить в двумерном пространстве-времени, описываемом уравнением (6.14). Аналогом локально плоской координатной сетки в этом случае служит *сетка Минковского*. Локальной системой отсчета Минковского называется система, в которой отсутствует гравитационное ускорение. В такой системе отсчета времениподобные прямые изображают траектории свободно движущихся частиц. Поскольку прямая линия в искривленном пространственно-временном континууме, определяемом уравнением (6.14), состоит из крохотных, локально прямых отрезков, мы приходим к выводу: *прямые времениподобные линии в искривленном пространстве-времени, определяемом уравнением (6.14), изображают траектории свободно движущихся частиц в гравитационном поле с заданным потенциалом φ .*

Именно этот вывод и был целью наших рассуждений. Он позволяет описывать движение частиц в гравитационном поле, не используя представления о силе или инертной массе. Пространственно-временные траектории частиц, свободно движущихся в гравитационном поле, — это прямые линии в искривленном пространственно-временном континууме, структуру которого определяет уравнение (6.14). Строго говоря, этот результат мы получили лишь для статического гравитационного поля, направленного вдоль оси z , однако приведенные выше рассуждения можно обобщить на случай произвольного гравитационного поля. Для этого следует лишь заменить потенциал $\varphi(z)$ на более общий вид зависимости потенциала от координат: $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$.

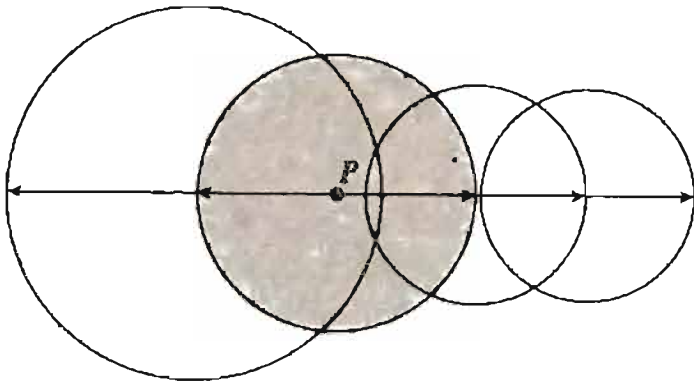
Хотя евклидова геометрия не применима на поверхности сферы, тем не менее можно построить на сферической поверхности прямые линии, воспользовавшись тем, что в малой окрестности любой выбранной точки практически справедливы законы евклидовой геометрии. (Математики говорят, что поверхность сферы *локально евклидова*). Мы можем, например, построить на квадратной сетке довольно точную карту Канзас-Сити, но не всей территории Соединенных Штатов.

Используя свойство локальной «евклидовости» сферической поверхности, можно построить прямую линию, проходящую через данную точку P в интересующем нас направлении, следующим образом (см. рисунок на с. 220).

1. Построим вокруг точки P малый круг, внутри которого отклонения от евклидовой геометрии можно считать пренебрежимо малыми. Через P проведем короткий отрезок прямой в интересующем нас направлении.

2. Построим вокруг концов этого отрезка два круга настолько малого радиуса, чтобы область внутри них можно было считать плоской.

3. Продолжим проведенный отрезок в обе стороны до пересечения с окружностями.



Построение прямой линии на искривленной поверхности.

Продолжая этот процесс, мы можем неограниченно продлять линию в обе стороны. Локальные отклонения от прямолинейности можно сделать сколь угодно малыми, выбирая достаточно малые радиусы кругов. При стремлении радиуса к нулю число окружностей возрастает и построенная нами кривая приближается к идеальной прямой. На поверхности сферы в результате такого рода построений получаются большие круги.

На первый взгляд наш геометрический подход к описанию движения частиц в гравитационном поле совсем не похож на алгебраический метод Ньютона. Но с точки зрения математики оба подхода эквивалентны. Задача нахождения пути между двумя точками пространства, соответствующего минимальному (или максимальному) значению некоторой интегральной величины, например длины, была впервые сформулирована Галилеем, который поставил вопрос так: «Какова форма пути, по которому тело в поле тяготения Земли быстрее всего упадет из точки A в точку B ?» (Галилей ошибочно предполагал, что траектория, вдоль которой падение происходит за минимальное время, представляет собой дугу окружности.) Несколько лет спустя французский математик Ферма постулировал, что траектория светового луча в среде с переменным показателем преломления соответствует минимальному времени распространения света между двумя любыми точками траектории. Даниил Бернулли решил поставленную Галилеем задачу, применив принцип Ферма для нахождения траектории светового луча в среде, в которой скорость света изменяется с высотой так же, как скорость частицы в однородном гравитационном поле. В 1736 г. Эйлер показал, что все задачи подобного рода можно свести к определенной системе дифференциальных уравнений. В задаче о нахождении пространственно-временной траектории, соответствующей максимальному собственному времени между двумя событиями в искривленном пространстве-времени, эти дифференциальные уравнения идентичны ньютоновским уравнениям движения! Таким образом, с математической точки зрения алгебраическое и геометрическое описания движения в гравитационном поле эквивалентны, по крайней мере, когда гравитационный потенциал мал.

Искривленное пространство: уравнения поля Эйнштейна

Если бы структура пространства-времени описывалась формулой

$$d\tau^2 = (1 + 2\phi)dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (6.16)$$

то 3-мерное пространство само по себе было бы евклидовым. Для двух близких пространственноподобных событий собственное расстояние dl вычисляется по формуле $dl^2 = -d\tau^2$ (см. с. 186, гл. 5). Следовательно, согласно (6.16), собственное расстояние между одновременными событиями должно вычисляться по теореме Пифагора:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (6.17)$$

Простой мысленный эксперимент убедил Эйнштейна в том, что эта формула не может быть точной.

Представьте себе космический корабль в форме вращающегося диска — такую летающую тарелку. Гюйгенс в свое время показал, что тело во вращающейся системе отсчета испытывает ускорение, обусловленное действием направленного вовне гравитационного поля, величина которого равна $g = \omega^2 r$, где ω — угловая скорость вращения, r — расстояние от оси вращения.

Прежде чем исследовать геометрию вращающегося диска, рассмотрим, как изменяется ход часов в зависимости от их положения на диске. Если наш космический корабль как целое свободно падает, то расположенные в его центре часы идут с «нормальной» скоростью (т. е. со скоростью, предсказываемой специальной теорией относительности). Однако, как мы сможем убедиться далее, идентичные часы, расположенные на периферии диска, идут медленнее.

В любой произвольный момент времени ускоренно движущиеся часы имеют такую же скорость хода, как идентичные часы в свободно падающей системе отсчета, относительно которой ускоренно движущиеся часы в данный момент покоятся. Вращающаяся система отсчета движется со скоростью ωr относительно свободно падающей системы отсчета, связанной с центром вращающегося диска, причем скорость вращающейся системы направлена перпендикулярно радиусу диска. Следовательно, как мы видели в гл. 5, скорость хода часов, расположенных на краю диска, будет меньше, чем у идентичных часов, находящихся в центре, в

$$\gamma = (1 - V^2)^{-1/2} = (1 - \omega^2 r^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}\omega^2 r^2$$

раз.

Рассуждая аналогичным образом, Эйнштейн исследовал геометрию диска. Представим себе, что множество идентичных стержней длиной Δl (измеренной в отсутствие гравитации), расположены по краю диска и вдоль его диаметра. По измерениям в свободно падающей системе отсчета, связанной с центром диска, все стержни, расположенные вдоль диаметра, будут иметь одинаковую длину независимо от того, вращается диск или нет, поскольку в этом случае стержни движутся в направлении, перпендикулярном их длине. Но стержни, расположенные по краю диска, будут иметь длину $\Delta l/\gamma$, как это следует из соотношений Лоренца (см. гл. 5). Таким образом, наблюдатель, находящийся на диске, для которого все стержни, расположенные по краю, имеют одинаковую длину, обнаружит, что длина окружности равна $\gamma \cdot 2\pi r$, т. е. она в $\pi(1 + \frac{1}{2}\omega^2 r^2)$ раз больше диаметра. Итак, *евклидова геометрия неприменима на вращающемся диске: гравитационное поле должно исказить как пространство, так и пространство-время.*

Чтобы в полной мере отразить это обстоятельство, следует заменить уравнение (6.16), определяющее интервал собственного времени между двумя близлежащими событиями, уравнением, которое позволило бы одновременно учесть как искривление пространства, так и замедление времени. Наиболее общее выражение такого рода имеет вид:

$$\begin{aligned} d\tau^2 = & (1 + 2\varphi_{00})dt^2 - (1 + 2\varphi_{11})dx^2 - (1 + 2\varphi_{22})dy^2 - (1 + 2\varphi_{33})dz^2 + \\ & + 2\varphi_{01}dt dx + 2\varphi_{02}dt dy + 2\varphi_{03}dtdz + \\ & + 2\varphi_{12}dxdy + 2\varphi_{13}dx dz + 2\varphi_{23}dydz. \end{aligned} \quad (6.18)$$

Вместо единственного гравитационного потенциала $\varphi (\equiv \varphi_{00})$ мы теперь имеем десять гравитационных потенциалов φ_{ij} , где $i < j = 0, 1, 2, 3$.

От каких факторов зависят эти потенциалы? В теории Ньютона потенциал φ вычисляется по формуле

$$\varphi = - \sum_i \frac{M_i}{r_i}.$$

Потенциалы φ_{ij} в общей теории относительности Эйнштейна также должны зависеть от распределения энергии (массы) во Вселенной, но *не только* от распределения энергии. Как мы уже убедились, вследствие относительности равномерного движения энергия и импульс неразрывно связаны между собой. Так, частица, имеющая энергию E_0 и нулевой импульс в системе отсчета, где она покоится, обладает энергией γE_0 и импульсом $-\gamma E_0 \mathbf{V}$ в системе отсчета, движущейся со скоростью \mathbf{V} относительно покоящейся системы. Множитель, определяющий эффект замедления времени, равен:

$$\gamma = (1 - V^2)^{-1/2} = \frac{dt}{d\tau},$$

поскольку

$$d\tau^2 = dt^2 - dl^2 = dt^2 \left[1 - \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \right] = (1 - V^2) dt^2.$$

Таким образом, энергия и три составляющие вектора импульса вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} E &= E_0 \left(\frac{dt}{d\tau} \right), \\ p_x &= E_0 \left(\frac{dx}{d\tau} \right), \quad p_y = E_0 \left(\frac{dy}{d\tau} \right), \quad p_z = E_0 \left(\frac{dz}{d\tau} \right). \end{aligned} \quad (6.19)$$

Из этих формул следует, что энергия частицы связана с импульсом точно так же, как ее смещение во времени связано с пространственным смещением:

$$E : p_x : p_y : p_z = dt : dx : dy : dz.$$

Рассмотрим теперь пространственное распределение частиц, каждая из которых имеет массу m_0 в собственной системе покоя. Пусть $n(x, y, z, t)$ — число частиц в единице объема в окрестности точки (x, y, z) в момент времени t . Предположим далее, что все эти частицы имеют одинаковую скорость $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t)$. (В реальном газе все частицы, кроме того, участвуют в хаотическом тепловом движении, однако пока мы будем считать газ настолько холодным, что скорости теплового движения частиц пренебрежимо малы по сравнению со скоростью направленного движения \mathbf{v} .) Плотность массы ρ равна произведению числа частиц n на массу одной частицы $\gamma m_0 = m_0 (dt/d\tau)$. Аналогично x -компонента импульса единицы объема равна $nm(dx/d\tau)$. Но вследствие эффекта сокращения длины (см. гл. 5) число частиц в единице объема будет различным в разных системах отсчета. Можно доказать, что $n = n_0 (dt/d\tau)$, где n_0 — концентрация частиц в системе, относительно которой они покоятся*.

Таким образом, энергию и импульс единицы объема можно выразить соответственно следующим образом:

* Доказательство. Параллелепипед объемом dV содержит ndV частиц. Очевидно, это число одинаково во всех системах отсчета. Объем dV различен в разных системах отсчета, однако «четырёхмерный объем» $dV \cdot dt$ одинаков во всех системах отсчета. Поскольку ndV и $dV \cdot dt$ одинаковы во всех системах отсчета, число частиц n должно быть пропорционально dt . В покоящейся системе отсчета $n = n_0$, а $dt = d\tau$, следовательно, $n = n_0 (dt/d\tau)$.

$$n_0 m_0 (dt/d\tau), \quad n_0 m_0 (dt/d\tau) (dx/d\tau), \\ n_0 m_0 (dt/d\tau) (dy/d\tau) \text{ и } n_0 m_0 (dt/d\tau) (dz/d\tau).$$

Эти четыре величины, очевидно, можно объединить более общей формой записи: $n_0 m_0 (dx_i/d\tau) (dx_j/d\tau)$, где $i, j = 0, 1, 2, 3$, причем $x_0 = t$, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$. (Всего имеется $4 \times 4 = 16$ величин такого вида, но лишь 10 из них, вообще говоря, различны*.) Четыре из этих величин мы уже рассмотрели — они представляют собой пространственную плотность энергии и импульса. Остальные шесть величин характеризуют поток импульса. (Поток энергии и плотность импульса описываются тремя одинаковыми величинами).

Итак, мы убедились, что, согласно принципу относительности, пространственное распределение массы неразрывно связано с пространственным распределением потока импульса. При релятивистском описании распределения массы необходимо задать десять независимых величин

$$T_{ij} = n_0 m_0 \left(\frac{dx_i}{d\tau} \right) \left(\frac{dx_j}{d\tau} \right), \quad i \leq j = 0, 1, 2, 3, \quad (6.20)$$

вместо одной: $\rho_0 = n_0 m_0$. Так должно быть потому, что мы хотим, чтобы структура пространственно-временного континуума, которая характеризуется десятью гравитационными потенциалами φ_{ij} , определялась содержимым пространства-времени, которое описывается десятью величинами T_{ij} .

Уравнение (6.20), определяющее величины T_{ij} , применимо в системе отсчета, которую локально можно рассматривать как систему Минковского, т. е. свободную от гравитационного поля. Чтобы учесть вклад гравитации, нужно лишь воспользоваться для определения интервала собственного времени $d\tau$ уравнением (6.18) вместо формулы Минковского $d\tau = dt/\gamma$. Этот, казалось бы, незначительный шаг позволяет выявить одну замечательную особенность теории гравитации Эйнштейна. Чтобы описать распределение и поток энергии и импульса, необходимо не только знать плотность массы и скорость в системе отсчета, где гравитация локально отсутствует, но и уметь перейти от этой системы к другим системам отсчета, т. е. нужно знать гравитационные потенциалы φ_{ij} . Но они зависят, в свою очередь, как мы вскоре увидим, от распределения и потока энергии и импульса. Таким образом, в теории Эйнштейна структура и содержимое пространства-времени нельзя рассматривать по отдельности, как в теории Ньютона. К этому важному аспекту общей теории относительности Эйнштейна мы вернемся позднее.

Уравнение (6.20) применимо к холодному газу, состоящему из невзаимодействующих частиц. Этот частный случай показывает, что плотность массы — всего лишь одна из десяти взаимосвязанных величин, которые, вместе взятые, характеризуют содержимое пространства-времени. Как в частном, так и в общем случае эти десять величин описывают распределение и поток энергии и импульса. В общей теории относительности Эйнштейн постулировал, что энергия и импульс — сохраняющиеся величины, как в теории Ньютона и в специальной теории относительности. Это значит, что величина энергии, заключенной внутри замкнутого объема, изменяется лишь вследствие притока или оттока энергии. Точно так же изменение импульса внутри замкнутого объема может быть вызвано лишь притоком или оттоком импульса. Следовательно, десять величин T_{ij} , описывающих распределение и поток энергии

* Имеется $(16-4)/2=6$ величин $n_0 m_0 (dx_k/d\tau) (dx_l/d\tau)$ (где $k=0, 1, 2, 3; k \neq l$), которые равны величинам $n_0 m_0 (dx_l/d\tau) (dx_k/d\tau)$. Таким образом, остается $16-6=10$ независимых величин. — Прим. перев.

и импульса, удовлетворяют четырем соотношениям, выражающим закон сохранения энергии и импульса.

Все эти рассуждения дают представление о том, какие математические проблемы пришлось решать Эйнштейну при разработке самосогласованной геометрической теории гравитации. Для замены ньютоновской формулы, связывающей гравитационный потенциал ϕ с пространственным распределением массы, ему нужно было получить систему из десяти уравнений, связывающих десять гравитационных потенциалов ϕ_{ij} с десятью величинами T_{ij} , которые описывают распределение и поток энергии, причем эти десять соотношений должны быть совместимы с четырьмя уравнениями, выражающими закон сохранения энергии и импульса. В пределе слабого гравитационного поля эти десять соотношений должны сводиться к одному уравнению Ньютона, связывающему гравитационный потенциал с распределением массы.

К счастью, в распоряжении Эйнштейна была совершенная теория искривленных поверхностей и пространств, созданная в XIX в. Карлом Фридрихом Гауссом и Бернхардом Риманом. Воспользовавшись этой теорией, Эйнштейн получил простейшую систему из десяти «уравнений поля», удовлетворявших вышеуказанным требованиям.

Уравнения поля Эйнштейна и по форме и по существу гораздо сложнее, чем уравнения Ньютона, однако с чисто математической точки зрения они удивительно просты и элегантны, так как наиболее просто выражают связь между структурой и содержимым пространства-времени, удовлетворяя всем вышеназванным условиям.

Можно подумать, что теория Эйнштейна, рассматривающая десять гравитационных потенциалов и десять уравнений поля, в 10 раз труднее для применения, чем теория Ньютона, ограничивающаяся всего одним потенциалом и одним уравнением. Но дело не в числе уравнений, а в их природе.

Прежде всего следует отметить, что в отличие от ньютоновского уравнения уравнения Эйнштейна *нелинейны*. В теории Ньютона гравитационный потенциал, связанный с совокупностью точечных масс, равен сумме потенциалов, каждый из которых обусловлен отдельной массой. Гравитационный потенциал в теории Эйнштейна подобным свойством не обладает. Мы не можем найти гравитационный потенциал двух точечных масс, зная их гравитационные потенциалы по отдельности. До сих пор удалось получить точное решение уравнений Эйнштейна лишь для ограниченного числа особенно простых распределений массы, среди которых, кстати сказать, отсутствует случай двух взаимодействующих точечных масс.

Не менее серьезные затруднения порождает на практике взаимосвязанность полевых уравнений Эйнштейна. В его теории потенциалы ϕ_{ij} зависят от величин T_{ij} , характеризующих распределение и поток энергии и импульса. Но чтобы задать величины T_{ij} , необходимо знать структуру пространства-времени, которая в свою очередь определяется потенциалами ϕ_{ij} !

Это взаимосвязанность создает гораздо более труднопреодолимые препятствия, чем нелинейность.

Вместе с тем такая взаимосвязанность разрешает старую философскую проблему — спор между Ньютоном и его последователями, с одной стороны, и Лейбницем и английскими эмпириками (Беркли, Локком и Юмом) — с другой, о природе пространства и времени. Ньютон утверждал, что пространство и время абсолютны, т. е. существуют «безотносительно к чему-либо внешнему». Лейбниц и английские эмпирики доказывали, что пространство и время не есть независимые реальности — реальна лишь связь между физическими телами и событиями. Согласно теории Эйнштейна, точка зрения Ньютона ошибочна, поскольку структура пространства-времени определяется тем, что

его заполняет. Но взгляды критиков Ньютона столь же ошибочны, поскольку пространство-время не менее реально или фундаментально, чем материя и движение (другими словами, энергия и импульс). Структура пространства-времени определяется его содержимым ничуть не в меньшей степени, чем движение материи структурой пространства-времени. Структура и содержимое — взаимозависимые и неразделимые составляющие единой физической реальности: пространства-времени-энергии.

Экспериментальная проверка общей теории относительности Эйнштейна

Эйнштейн, как и Ньютон, прежде всего применил свою теорию к исследованию движения пробной частицы вблизи изолированной точечной массы. В ньютоновском приближении теории Эйнштейна интервал собственного времени определяется по формуле*

$$d\tau^2 = (1 - 2M/r)dt^2 - dl^2. \quad (6.21)$$

А какова точная формула для этого интервала?

Изолированная точечная масса создает в пространстве некое выделенное положение, но не преимущественное направление. Следовательно, интервал $d\tau$ должен зависеть лишь от радиальной координаты r . Более того, задав массу M , которая в естественных единицах имеет размерность длины, мы выделяем характерный пространственный размер в гравитационном поле. Естественно предположить поэтому, что в выражение для интервала координата r войдет в виде комбинации r/M . С учетом сказанного будем искать точную формулу для интервала собственного времени в виде

$$d\tau^2 = a(u)dt^2 - b(u)dl^2, \quad (6.22)$$

где $u = M/r$, a и b — функции, которые следует найти. Если подставить (6.22) в уравнения поля Эйнштейна, то нетрудно увидеть, что они допускают решения такого вида, если функции a и b равны

$$a(u) = \left(\frac{1 - u/2}{1 + u/2} \right)^2, \quad (6.23)$$

$$b(u) = (1 + u/2)^4.$$

Это точное решение уравнений Эйнштейна впервые получил немецкий астроном Карл Шварцшильд в 1916 г.**

Ранее мы уже отмечали, что отношение $u = M/r$ очень мало для обычных астрономических объектов. Масса Солнца в естественных единицах равна 1,5 км, а его радиус — $7 \cdot 10^5$ км, так что на поверхности Солнца $u \approx 2 \cdot 10^{-6}$. При малых u с целью упрощения выражений для $a(u)$ и $b(u)$ можно использовать приближенное равенство $(1 + u)^n \approx 1 + nu$, где n — любое действительное (положительное или отрицательное) число. В результате получим

* Строго говоря, в ньютоновском приближении интервал должен содержать перед dl^2 еще множитель $1 + 2M/r$. Но при описании медленных движений член $2M/r$ в этом множителе оказывается несущественным. — *Прим. ред.*

** В этом и следующих разделах автор использует запись решения Шварцшильда в так называемых изотропных координатах. По этой причине выражение для задержки радиолокационного сигнала (6.27) и значение радиуса черной дыры отличаются по виду от их значений в более употребительных шварцшильдовских координатах. Разумеется, все физические выводы, формулируемые с использованием операционно определяемых величин, от этого не изменяются. — *Прим. ред.*

$$\begin{aligned} a(u) &\approx 1 - 2u + 2u^2, \\ b(u) &\approx 1 + 2u. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Это первые поправки к выражению (6.21). Они применимы при описании движения фотонов и частиц вещества вблизи Солнца, и Эйнштейн использовал их с этой целью в 1915 г., до того как Шварцшильд получил точное решение.

Общая теория относительности Эйнштейна предсказывает, что фотоны, испускаемые массивными телами, испытывают гравитационное красное смещение. Обозначим через Δt интервал между последовательными «щелчками» часов, находящихся в гравитационном поле точечной массы, а через $\Delta \tau$ — аналогичный интервал для идентичных часов в отсутствие гравитационного поля. Связь между Δt и $\Delta \tau$ задается уравнением (6.22) при $\Delta t = 0$, поскольку пространственный интервал между двумя последовательными «щелчками» часов равен нулю. Тогда в соответствии с нашими предыдущими рассуждениями

$$\Delta \tau = [a(u)]^{1/2} \Delta t \approx (1 - M/r) \Delta t. \quad (6.25)$$

Теория Эйнштейна также предсказывает, что фотоны, движущиеся мимо Солнца, должны замедляться и отклоняться. Интервал собственного времени $d\tau$ между соседними событиями в истории фотона равен нулю. В таком случае, как следует из уравнения (6.22), скорость света dl/dt зависит от радиальной координаты r , однако при данном конкретном значении r имеет одинаковую величину во всех направлениях:

$$c = \frac{dl}{dt} = \sqrt{\frac{a(r)}{b(r)}} \approx 1 - \frac{2M}{r}. \quad (6.26)$$

Сравнивая это выражение с (6.10), где $\varphi = -M/r$, мы видим, что предсказываемое изменение скорости света в два раза превышает прежнее значение, полученное в ньютоновском приближении, которое учитывало замедление времени в гравитационном поле, но не учитывало искривление пространства.

Расчет эффекта отклонения и замедления света в окрестности Солнца

Предположим, что световой луч представляет собой прямую EV , отстоящую от центра Солнца S на расстоянии r_0 . Время, затраченное на путь от точки E до точки V и обратно, равно $2T$, где

$$T = \int_0^{r_2} \frac{dz}{c(z)} + \int_0^{r_1} \frac{dz}{c(z)}.$$

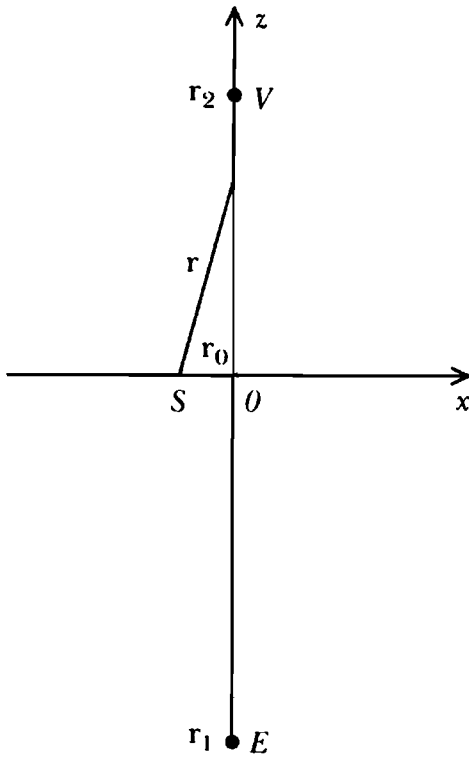
Так как, согласно (6.26), $c(z) = 1 - 2M/r$, то

$$\begin{aligned} \int_0^{r_2} \frac{dz}{c(z)} &= \int_0^{r_2} \frac{dz}{1 - 2M/r} \approx \int_0^{r_2} \left(1 + \frac{2M}{r}\right) dz = \\ &= r_2 + 2M \int_0^{r_2} \frac{dz}{(r_0^2 + z^2)^{1/2}} \approx r_2 + 2M \ln \left(\frac{2r_2}{r_0} \right). \end{aligned}$$

Время распространения светового сигнала в прямом и обратном направлениях уменьшается на величину

$$\Delta t = 2(T - r_1 - r_2) \approx 4M \left[\ln \left(\frac{2r_2}{r_0} \right) + \ln \left(\frac{2r_1}{r_0} \right) \right].$$

Отклонение светового луча, согласно уравнению (6.29), равно $d\theta = (dc/dx)dt$.



Траектория светового луча, проходящего вблизи Солнца.

Поскольку

$$c = 1 - \frac{2M}{(x^2 + z^2)^{1/2}},$$

то

$$\frac{dc}{dx} = \frac{2Mx}{r^3} \approx \frac{2Mr_0}{r^3}.$$

Следовательно, полное отклонение светового луча на пути между точкой V (положением звезды) и точкой E равно

$$\Delta\theta = \int_0^2 + \int_0^1 \left(\frac{dc}{dx} \right) dt = \int_0^2 + \int_0^1 \frac{2Mr_0 dz}{(r_0^2 + z^2)^{3/2}} \approx \frac{4M}{r_0}.$$

В 1964 г. Ирвин И. Шапиро из Массачусетского технологического института предложил эксперимент, который позволил бы оценить эффект замедления электромагнитного сигнала при прохождении его вблизи Солнца. Эксперимент заключался в том, чтобы с помощью радиолокатора послать радиопульс к Венере или Меркурию (когда они находятся вблизи верхнего соединения) и измерить время между моментом послышки импульса и моментом прихода отраженного сигнала. Поскольку фотоны вблизи Солнца замедляются, отраженный сигнал должен прийти с запозданием. В соответствии с произведенными расчетами (см. врезку) для Венеры запоздывание должно быть равно

$$\Delta t \approx 4M \left[\ln\left(\frac{2r_V}{R_\odot}\right) + \ln\left(\frac{2r_E}{R_\odot}\right) \right], \tag{6.27}$$

где r_V и r_E — расстояния от Венеры и Земли до Солнца, а R_\odot — радиус Солнца. Масса Солнца, измеренная в естественных единицах, равна $M = 1,5 \text{ км}/3 \cdot 10^5 \text{ км/с} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Радиус земной орбиты составляет $215 R_\odot$, а радиус орбиты Венеры — около $155 R_\odot$. Следовательно, по расчетам запоздывание должно составить

$$\Delta t \approx 4 \cdot 10^{-5} (\ln 430 + \ln 310) \approx 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \tag{6.28}$$

За это время фотон проходит путь всего 72 км, поэтому, чтобы обнаружить столь незначительную задержку сигнала, нужно знать расстояние до отражающей поверхности Венеры с точностью до нескольких километров. В то время, когда Шапиро и его коллеги из Лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института задумали свой эксперимент, расстояния до планет не были известны с такой высокой точностью; поэтому нельзя было непосредственно сравнить экспериментальное и теоретическое значение интервала времени, затраченного радиосигналом на путь к планете и обратно. Однако ученые нашли выход: они сопоставили результаты многочисленных радиолокационных измерений, осуществленных при различных относительных положениях Земли и Венеры, и чрезвычайно точных теоретических расчетов, в которых учитывалось возмущающее действие других планет на движение Венеры и Земли, а также форма и отражательная способность венерианской поверхности. В конечном итоге эксперименты показали, что измеренные значения задержки радиосигналов, отраженных от поверхностей Меркурия и Венеры, хорошо согласуются с предсказаниями общей теории относительности Эйнштейна.

Ранее мы использовали (оптический) принцип Гюйгенса, чтобы показать, что угловое отклонение светового луча в среде, где скорость света меняется от точки к точке, равно

$$\Delta\theta = \left(\frac{dc}{dx}\right)\Delta t. \quad (6.29)$$

В этом уравнении x — это направление, указанное на рисунке, приведенном во врезке. Чтобы найти полное отклонение, следует просуммировать величины $\Delta\theta$, которые, согласно (6.29), вычисляются вдоль (почти прямого) пути светового луча. В результате этих вычислений (см. врезку) получаем

$$\Delta\theta \approx 4M/r_0, \quad (6.30)$$

где r_0 — расстояние между центром Солнца и световым лучом. Отклонение светового луча, касающегося края Солнца, равно $\Delta\theta \approx 4 \cdot 1,5 \div 7 \cdot 10^5 \text{ км} \approx 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ рад} \approx 1,7''$. В 1919 г. по инициативе А. Эддингтона были организованы две экспедиции для наблюдения солнечного затмения: одна отправилась к островам у побережья Бразилии, другая — в западную часть Центральной Африки; среди прочих исследований они производили фотографирование звезд вблизи края Солнца в период полного солнечного затмения. Полученные результаты согласовались с предсказаниями теории Эйнштейна с точностью до экспериментальных ошибок (равных примерно $0,2''$). Результаты аналогичных измерений, выполненных впоследствии во время других солнечных затмений, подтвердили первоначальные результаты; однако точность измерений осталась той же, поскольку локальные флуктуации плотности воздуха вблизи земной поверхности вносят в измерения среднюю ошибку порядка $0,2''$.

В радиодиапазоне атмосферное дрожание менее существенно. Метод радиоинтерферометрии дает ошибку измерения значительно ниже $0,1''$. Квазар ЗС 279 расположен на небесной сфере на расстоянии менее $0,25^\circ$ от эклиптики и раз в год (в октябре) покрывается Солнцем. Измеряя угловое расстояние ЗС 279 от соседнего квазара ЗС 273, радиоастрономы смогли измерить угловой сдвиг квазара ЗС 279 с точностью до 1%. Относительное различие измеренного отклонения и расчетной величины, полученной из общей теории относительности Эйнштейна, составляет $1,015 \pm 0,011$.

Наиболее убедительное подтверждение эффекта отклонения света в сильном гравитационном поле удалось получить в 1979 г., когда Денис Уолш из Манчестерского университета открыл два квазара, оптические изображения

которых отстояли друг от друга лишь на 6" (см. левое верхнее изображение из трех приведенных на с. 230 рисунков). Уолш обратился за помощью к Роберту Карсуэллу и Рэю Вейману из Национальной обсерватории Китт-Пик, которые, получив спектры этих слабых квазаров, обнаружили, что они идентичны. В опубликованной по результатам исследований статье эти трое ученых высказали предположение, что два видимых оптических изображения на самом деле порождены одним физическим объектом, свет которого искривляется лежащей на его пути массивной галактикой, действующей в данном случае как «гравитационная линза» (см. рисунок на с. 231).

Но почему лежащая на пути света галактика не видна на фотографии? Алан Н. Стоктон из Астрономического института в Гонолулу (Гавайские о-ва) высказал догадку, что свет галактики маскируется одним из изображений квазара. Чтобы проверить это предположение, он электронным способом разделил голубое и красное изображения, выявив таким образом лежащую на пути света галактику (см. нижние рисунки).

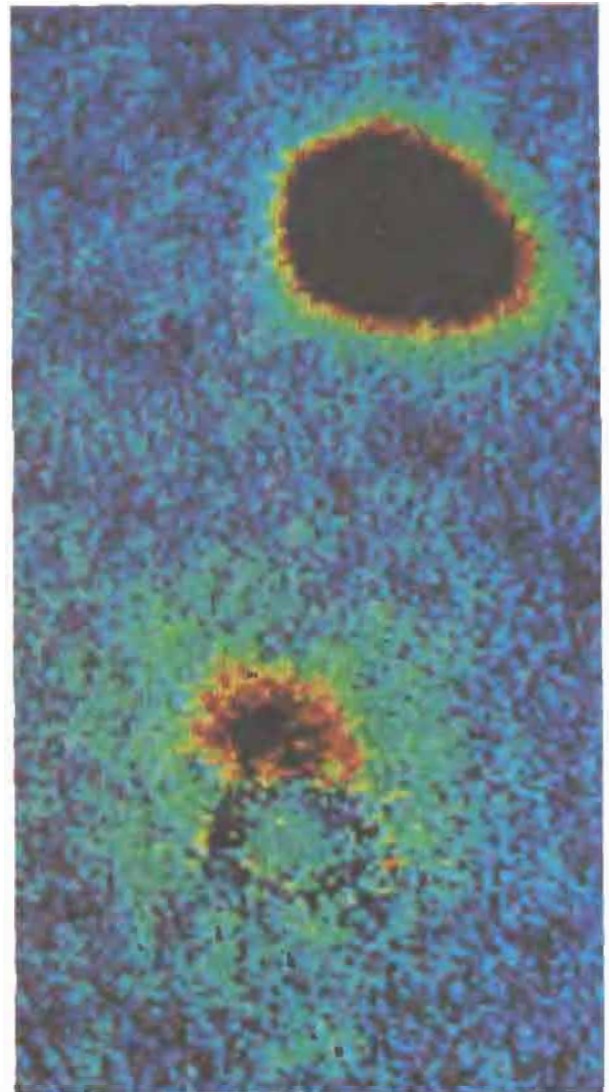
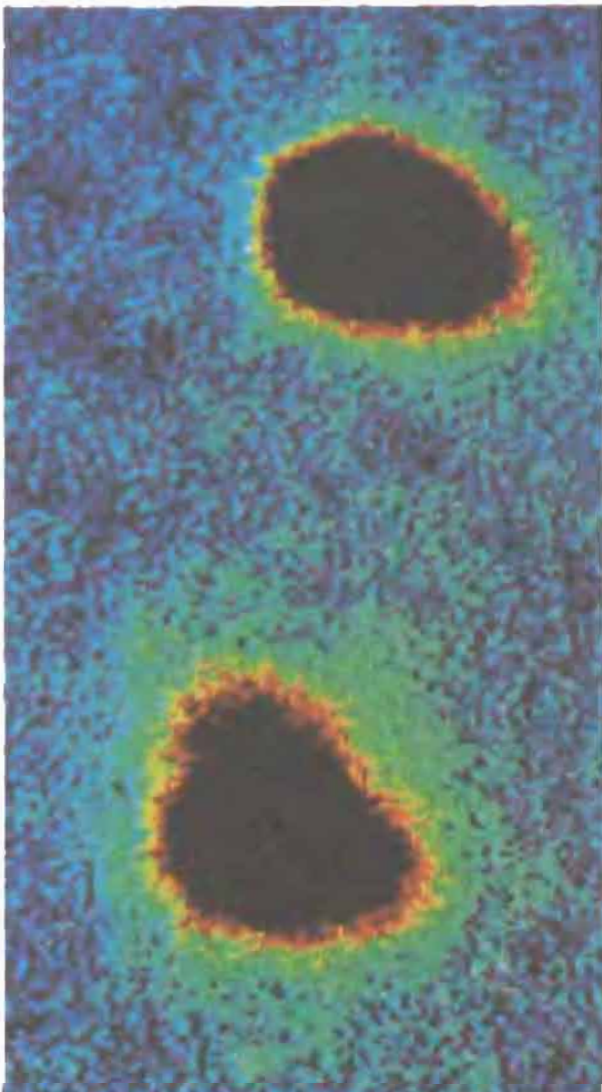
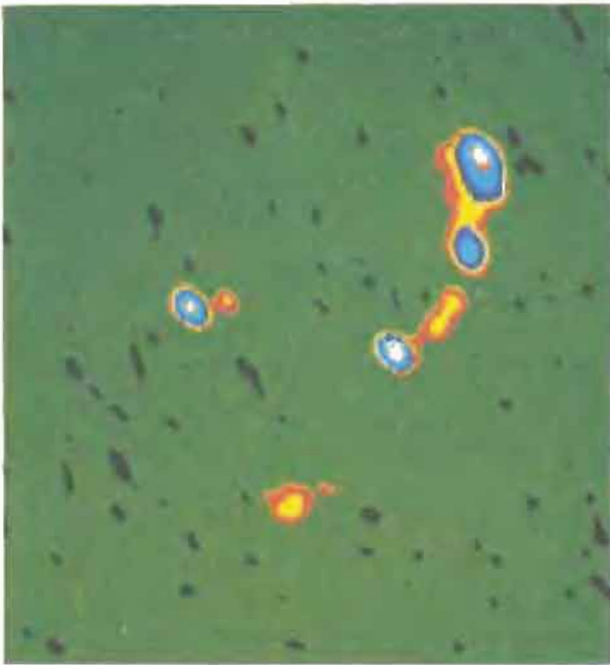
Почему гравитационная линза создает несколько изображений? Согласно уравнению (6.30), световой луч, проходя на расстоянии r от точечной массы M , отклоняется на угол $\Delta\theta = 4M/r$. Световой луч, проходящий через протяженную область со сферически-симметричным распределением массы на расстоянии r от ее центра, будет отклоняться на величину $4M(r)/r$, где $M(r)$ — масса, заключенная внутри сферы радиусом r . Самый прямой способ изучить свойства гравитационной линзы, действующей на световые лучи таким образом, — это изготовить и испытать ее. Марк В. Горенштейн из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра сделал из пластмассы линзы, которые имитируют влияние протяженных галактик и точечных масс на световые лучи. Если смотреть через такую линзу на удаленный источник света, то он действительно распадается на несколько изображений, причем их число и форма меняются в зависимости от относительного положения глаза, объекта и линзы. Результаты наблюдений двойного квазара и двух других кратных изображений квазаров хорошо согласуются с предсказаниями, сделанными на основе общей теории относительности Эйнштейна, разумеется, при подходящем выборе моделей галактик, лежащих на пути света.

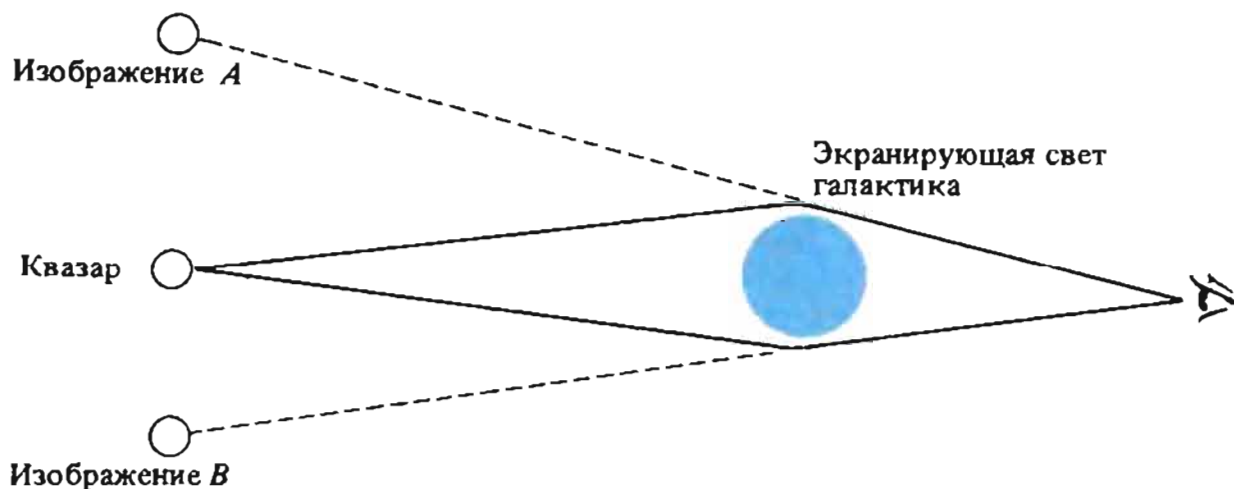
Наконец, из теории Эйнштейна следует, что выведенные Кеплером законы движения планет не выполняются строго даже в случае движения одной пробной частицы вокруг неподвижной точечной массы. Согласно теории Ньютона, орбитой планеты-частицы является эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце; это можно рассматривать как первое приближение описания движения планеты. В следующем приближении форма орбиты зависит от членов *второго порядка* в уравнении, определяющем замедление времени [член $2u^2 = 2(M/r)$ в (6.24)], и членов *первого порядка* $2u = 2M/r$ в выражении для множителя $b(u)$, учитывающего кривизну пространства [см. (6.24) и (6.22)]. Как мы видели, орбита определяется из условия прямолинейности траектории частицы в искривленном пространстве-времени. Используя это условие, Эйнштейн установил, что единственная замкнутая орбита в сферически-симметричном гравитационном поле — окружность. При $M/r \ll 1$ некруговые орбиты по форме близки к эллипсам, но за один оборот частицы оси этих эллипсов поворачиваются в плоскости орбиты на угол

$$\Delta\theta = \frac{6\pi M}{a(1 - e^2)}, \quad (6.31)$$

где M — масса Солнца, a — большая полуось орбиты, e — эксцентриситет орбиты.

Из приведенной формулы, в частности, следует, что большая ось орбиты





На радиокarte, построенной компьютером в условных цветах (вверху слева), квазары-близнецы Q0957 + 561A и Q0957 + 561B изображены в виде цветных эллипсов, оси которых вытянуты по вертикали. Спектры квазаров идентичны; спектральные линии каждого из них сдвинуты в красную сторону на одинаковую величину $\Delta\lambda/\lambda = 1,4136$. На рисунке (вверху) схематически показано, как массивное тело (галактика или скопление галактик), лежащее на пути света квазара к наблюдателю, может создать два изображения. Тщательный расчет хода лучей, основанный на теории Эйнштейна и вполне реалистичном предположении о распределении массы внутри массивной галактики, подтверждает, что два компактных изображения квазара примерно равной яркости действительно могут быть сформированы таким образом. Вычитая (электронным способом) изображение А из изображения В, Алан Стоктон получил на дисплее компьютера изображение (внизу справа), где отчетливо видна «гравитационная линза» — лежащая на пути света галактика, изображение которой ранее маскировалось изображением квазара В (Предоставлено Д. Робертсом.)

Меркурия поворачивается на $43''$ за сто лет. В статье, опубликованной в 1915 г., Эйнштейн писал, что эта величина «в точности соответствует астрономическим наблюдениям (Леверье). Для астрономов, обнаруживших смещение перигелия этой планеты, после учета возмущений со стороны всех остальных планет оставалось необъяснимой как раз эта величина».

Следует подробнее остановиться на том, как был обнаружен и объяснен этот эффект, поскольку данная история проливает свет на роль «аномалий» в развитии науки.

В своей работе «Математические начала натуральной философии» Ньютон показал, что любое малое отклонение в зависимости «сила гравитационного притяжения — расстояние» от закона обратных квадратов приводит к вращению осей планетных орбит. Так, из-за приливного ускорения Луны, обусловленного действием Солнца, большая ось лунной орбиты вращается в направлении движения Луны с периодом около 9 лет. Гравитационное взаимодействие планет также вызывает поворот осей их эллиптических орбит, хотя и гораздо более медленный. Быстрее всего поворачивается ось орбиты у Меркурия: на $532''$ (около $1/6^\circ$) за сто лет. В 1854 г. французский астроном Жан Жозеф Леверье, проводя тщательные расчеты, показал, что теория Ньютона почти полностью объясняет наблюдаемое смещение перигелия Меркурия — расхождение между расчетными значениями и результатами наблюдений составляет всего лишь $35''$. Во многих отраслях науки такое ничтожно малое различие между результатами весьма тонких наблюдений и сложными теоретическими расчетами было бы истолковано как убедительное подтверждение теории. Но в середине XIX в. небесная механика достигла столь высокой точности, что Леверье и другие астрономы с полным основанием могли считать это расхождение существенным. Леверье предположил,

что оно может быть обусловлено какой-то еще не обнаруженной малой планетой (или несколькими планетами), орбита которой лежит между Меркурием и Солнцем.

В 1882 г. Симон Ньюкомб, произведя новые расчеты возможного влияния планет на орбиту Меркурия, уточнил результаты Леверье: вместо 35" он получил величину 43". Поскольку все попытки обнаружить планеты внутри орбиты Меркурия окончились неудачей, Ньюкомб высказал предположение, что остаточное возмущение может быть вызвано крошечными частицами пыли вблизи плоскости земной орбиты. Наличие таких частиц вытекало из наблюдений зодиакального света — слабого свечения ночного неба, которое усиливалось по мере приближения к плоскости земной орбиты. Предполагалось, что это свечение есть не что иное, как отраженный солнечный свет. Однако Ньюкомбу не удалось построить теоретическую модель, которая одновременно объясняла бы как зодиакальный свет, так и не учтенное теорией смещение перигелия Меркурия; чтобы сделать это, требовалось ввести дополнительные изменения в движение Меркурия и Венеры (которые в действительности *не* наблюдались). Наконец, в 1895 г. у Ньюкомба возникла мысль, что, возможно, закон обратных квадратов Ньютона не выполняется точно на малых расстояниях.

Но в следующем году Г. Г. Зеелигер разработал теоретическую модель, которая успешно объясняла зодиакальный свет и остаточное смещение перигелия Меркурия, не приводя при этом ни к каким противоречиям с результатами наблюдений. Модель Зеелигера получила широкое распространение среди астрономов. Ньюкомб сам отказался от своего предположения о неприменимости теории Ньютона на малых расстояниях. К 1915 г., когда Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности, остаточное смещение перигелия Меркурия уже перестало считаться аномальным.

Теория Эйнштейна заставила астрономов изменить свое отношение к модели Зеелигера: теперь она казалась искусственной и неубедительной. Поскольку остаточное смещение перигелия Меркурия вполне укладывалось в теорию Эйнштейна, для объяснения зодиакального света достаточно было более простой и естественной модели. Можно сказать, что теория Эйнштейна восстановила и вместе с тем устранила эту аномалию.

Даже сейчас, глядя на всю эту историю в ретроспективе, трудно обвинить астрономов в том, что они не усмотрели в остаточном смещении перигелия Меркурия настоящей аномалии. В XIX в. астрономы обнаружили, что характер движения Урана, хотя и незначительно, но все же отличается от того, что следовало из теории Ньютона. В 1846 г. Леверье выдвинул смелую гипотезу, объясняющую это расхождение воздействием на Уран какой-то неизвестной планеты, находящейся за его орбитой. Основываясь на теории Ньютона, Леверье вычислил положение неизвестной планеты на небе и сообщил полученные результаты немецкому астроному Галле, работавшему в Берлинской обсерватории. И Галле за сутки обнаружил новую планету примерно там, где указал Леверье; она получила название Нептун. (Несколькими месяцами ранее английский математик и астроном Джон Адамс, используя совершенно иной метод расчета, пришел к подобным же результатам; однако ему повезло меньше, чем Леверье; он так и не смог уговорить астрономов-наблюдателей проверить на практике его расчеты.) Как видим, у астрономов было гораздо больше оснований попытаться объяснить остаточное смещение перигелия Меркурия влиянием ненаблюдаемого вещества, чем усомниться в точности теории Ньютона.

История со смещением перигелия Меркурия не завершилась с публикацией в 1915 г. статьи Эйнштейна по поводу этого явления. Как известно,

Солнце не является идеальным шаром: вследствие вращения вокруг своей оси оно слегка сплюснуто у экватора. Теория Ньютона показывает, что гравитационное поле сфероида на малых расстояниях изменяется не обратно пропорционально квадрату расстояния, а несколько иначе. Следовательно, сплюснутость Солнца должна как-то сказываться на вращении большой оси орбиты Меркурия. Прежде чем утверждать, что теория Эйнштейна объясняет остаточное смещение перигелия Меркурия, нам следует убедиться, что влияние сплюснутости Солнца на движение Меркурия пренебрежимо мало.

Зная скорость вращения Солнца (например, из наблюдений за движением солнечных пятен), можно оценить степень его сплюснутости, если считать, что оно вращается как твердое тело (т. е. его угловая скорость одинакова во всех точках. — *Перев.*). Расчеты показывают, что полярный диаметр Солнца всего лишь на 5 км меньше экваториального — это слишком мало, чтобы сплюснутость Солнца заметно влияла на орбиту Меркурия. А что, если внутренние области Солнца вращаются быстрее, чем внешние? В 1966 г. Р. Дикке и М. Голденберг выполнили тонкий, но простой по замыслу эксперимент, в котором сплюснутость солнечного диска оценивалась с помощью фотоэлектрических измерений. Выяснилось, что полярный диаметр Солнца меньше экваториального на 35 км. Такая степень сплюснутости позволяла объяснить примерно 10% остаточного смещения перигелия Меркурия, что ставило под сомнение согласие теории Эйнштейна с результатами наблюдений.

В 1975 г. Генри Хилл, учившийся в свое время у Дикке, усовершенствовав эксперимент Дикке—Голденберга, пришел к выводу, что в действительности сплюснутость Солнца соответствует результатам, полученным в предположении, что Солнце вращается как твердое тело и со скоростью, определяемой по движению солнечных пятен. Однако проведенные Хиллом измерения и теоретический аппарат, используемый для интерпретации результатов, настолько сложны и утонченны, что даже сейчас нельзя с полной уверенностью утверждать, что предсказываемая теорией Эйнштейна скорость смещения перигелия Меркурия хорошо согласуется с результатами наблюдений.

Нейтронные звезды и черные дыры

Величина гравитационного поля, создаваемого массой M на расстоянии R , определяется отношением M/R , причем в принятой нами системе единиц M и R измеряются в одинаковых единицах. На поверхности Солнца $M/R \approx 2 \cdot 10^{-6}$, а на поверхности белого карлика $M/R \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Ранее мы видели, что дополнительные коэффициенты, введенные Эйнштейном в уравнения Ньютона, пропорциональны M/R . Почти для всех астрономических объектов — от планет до сверхскоплений галактик — величина M/R очень мала, вследствие чего теория Ньютона описывает эти объекты очень точно. Единственное исключение в этом отношении составляют *нейтронные звезды* и *черные дыры*, у которых отношение M/R достаточно велико. И здесь теория гравитации Эйнштейна проявляет себя в полной мере, тогда как теория Ньютона, не пригодна даже в качестве первого приближения.

Белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры представляют собой различные формы конечного этапа звездной эволюции. Молодые звезды черпают свою энергию в термоядерных реакциях, протекающих в звездных недрах; в ходе этих реакций происходит превращение водорода в гелий. После того как определенная доля водорода израсходована, образовавшееся гелиевое ядро начинает сжиматься. Дальнейшая эволюция звезды зависит от ее массы, а точнее от того, как она соотносится с некоей критической величиной,

называемой пределом Чандрасекара. Если масса звезды меньше этой величины, то давление вырожденного электронного газа останавливает сжатие (коллапс) гелиевого ядра, прежде чем его температура достигнет столь высокого значения, когда начинаются термоядерные реакции, в ходе которых гелий превращается в углерод*. Тем временем внешние слои эволюционирующей звезды сравнительно быстро сбрасываются. (Предполагается, что именно таким путем образуются планетарные туманности.) Белый карлик и представляет собой гелиевое ядро, окруженное более или менее протяженной водородной оболочкой.

У более массивных звезд гелиевое ядро продолжает сжиматься вплоть до «загорания» гелия. Энергия, выделяемая в процессе превращения гелия в углерод, предохраняет ядро от дальнейшего сжатия — но ненадолго. После того как гелий полностью израсходуется, сжатие ядра продолжается. Температура вновь возрастает, начинаются другие ядерные реакции, которые протекают до тех пор, пока не исчерпается энергия, запасенная в атомных ядрах. К этому моменту ядро звезды состоит уже из чистого железа, которое играет роль ядерной «золы». Теперь ничто не сможет воспрепятствовать дальнейшему коллапсу звезды — он продолжается до тех пор, пока плотность ее вещества не достигнет плотности атомных ядер. Резкое сжатие вещества в центральных областях звезды порождает взрыв огромной силы, в результате которого внешние слои звезды разлетаются с громадными скоростями. Именно эти взрывы астрономы связывают с явлением *сверхновых*.

Судьба коллапсирующего остатка звезды зависит от его массы. Если масса меньше, чем примерно $2,5M_{\odot}$ (масса Солнца), то давление, обусловленное «нулевым» движением нейтронов и протонов, достаточно велико, чтобы воспрепятствовать дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Объекты, у которых плотность вещества равна (или даже превосходит) плотности атомных ядер, называются *нейтронными звездами*. Их свойства впервые были изучены в 30-х годах Р. Оппенгеймером и Г. Волковым.

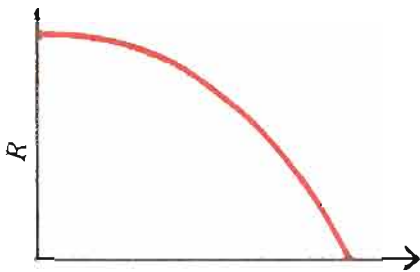
Однако давление вырожденного газа не может препятствовать коллапсу, если масса сжимающейся звезды превосходит примерно $2,5M_{\odot}$. Такой свободно коллапсирующий объект называется *черной дырой*. Из теории Ньютона следует, что радиус $R(t)$ сжимающейся звезды уменьшается со временем с непрерывно возрастающей скоростью (см. левый рисунок). Таким образом, согласно теории Ньютона, радиус коллапсирующей звезды уменьшается до нуля за конечное время, гравитационный потенциал M/R при этом неограниченно возрастает.

Теория Эйнштейна рисует другой сценарий. Структура пространства-времени вне черной дыры описывается уравнениями (6.22) и (6.23). Пространственно-временная траектория фотона определяется из условия $dt = 0$, откуда следует, что скорость фотона равна

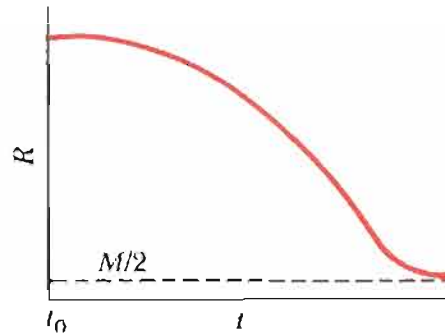
$$c = \frac{dl}{dt} = \left(1 - \frac{M}{2r}\right) / \left(1 + \frac{M}{2r}\right)^3. \quad (6.32)$$

Таким образом, скорость фотона уменьшается по мере его приближения к центру черной дыры, становясь равной нулю при конечном значении радиаль-

* В классической физике давление идеального газа пропорционально его температуре. Но, согласно законам квантовой механики, хаотическое движение свободных электронов в плотном газе не прекращается при температуре, равной абсолютному нулю, причем скорость остаточного, «нулевого», движения возрастает с увеличением плотности. В белых карликах давление, связанное с «нулевым» движением, препятствует сжатию звезды под действием ее собственного веса. При еще больших плотностях, характерных для нейтронных звезд, аналогичную роль играет «нулевое» движение нейтронов и протонов.



Схематическое изображение коллапса холодной невращающейся звезды по теории Ньютона. Сжатие начинается в момент времени t_0 , когда радиус звезды имеет некоторую конечную величину, а заканчивается при $t = t_1$, когда радиус становится равным нулю, что соответствует точечной массе с бесконечной плотностью.



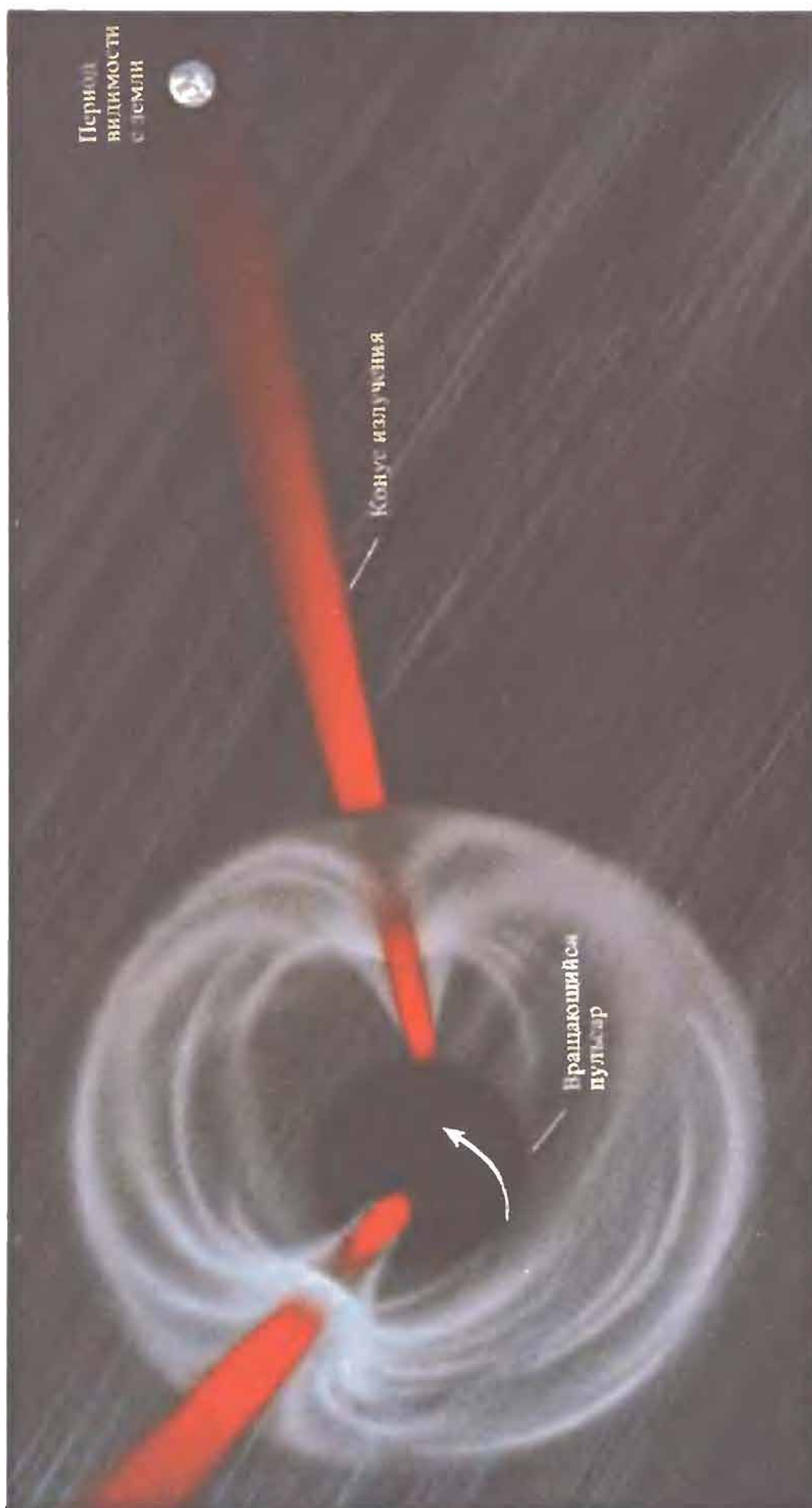
Схематическое изображение коллапса холодной звезды (образование черной дыры) по теории Эйнштейна.



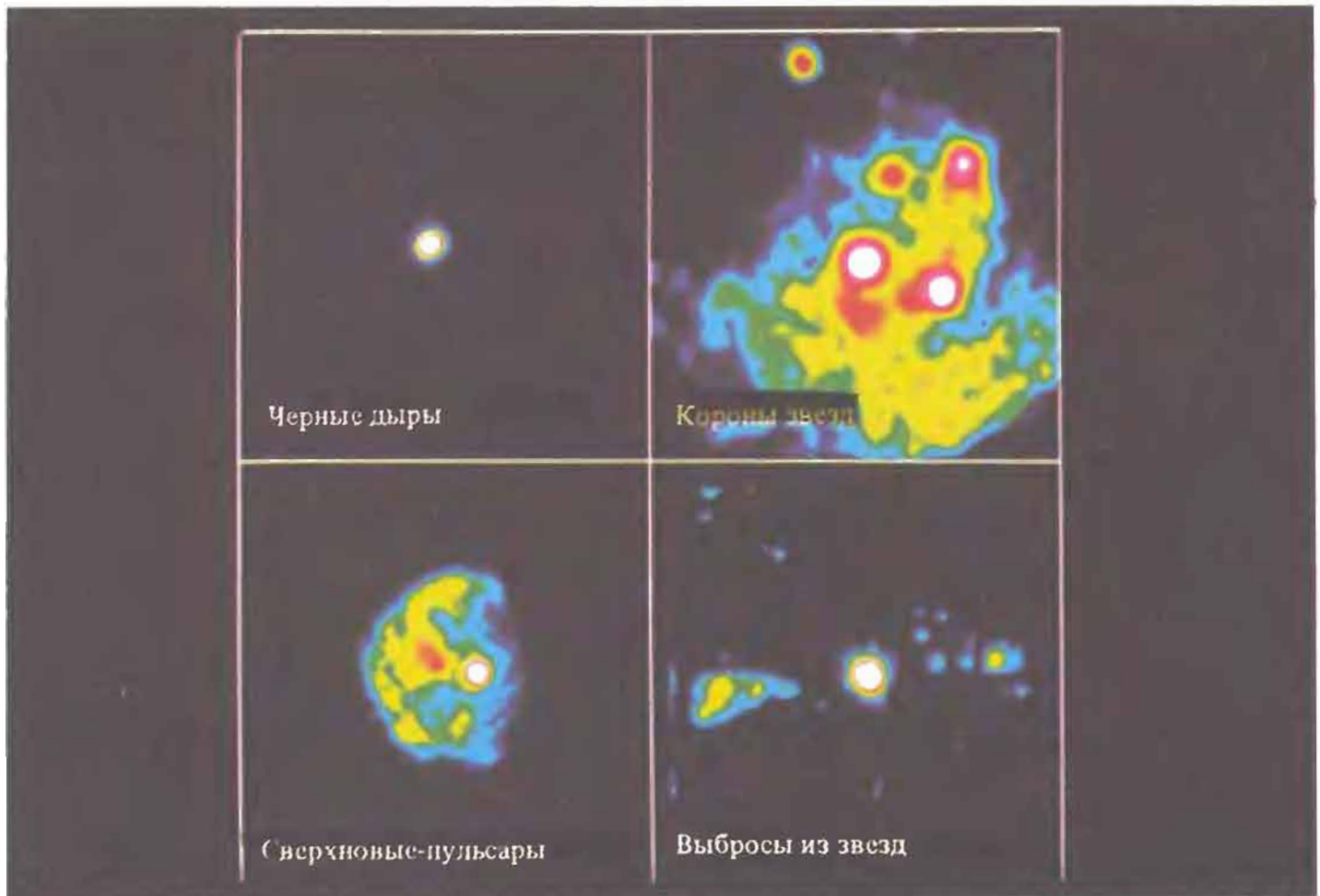
Крабовидная туманность. Остаток взрыва сверхновой, вспыхнувшей в 1054 г. (Коллекция Грейнджера.)

ной координаты $r = M/2$. Это означает, что с точки зрения внешнего наблюдателя фотон, падающий в черную дыру, *никогда* не достигнет ее центра; его радиальная координата всегда будет превосходить конечную величину $M/2$. Поскольку частицы вещества не могут двигаться быстрее фотона, радиус черной дыры достигнет предельного значения за бесконечное время. Более того, фотоны, испускаемые с поверхности черной дыры, на протяжении коллапса испытывают все возрастающее красное смещение. Энергия и частота фотона, излученного или отраженного поверхностью, стремится к нулю по мере приближения радиуса $R(t)$ к величине $M/2$. С точки зрения внешнего наблюдателя, объект, из которого формируется черная дыра, вначале сжимается со все возрастающей скоростью; затем, когда размер объекта приблизится к $M/2$, его радиус начинает уменьшаться все медленнее, асимптотически приближаясь к значению $M/2$ (см. правый рисунок).

Не имея внутренних источников энергии, нейтронные звезды и черные дыры быстро остывают. А поскольку площадь их поверхности весьма мала — всего несколько десятков квадратных километров, — следует ожидать, что яркость этих объектов крайне невелика. Действительно, теплового излучения поверхности нейтронных звезд или черных дыр пока не удавалось наблюдать. Однако некоторые нейтронные звезды являются мощными источниками *нетеплового* излучения. Речь идет о так называемых *пульсарах*, обнаруженных в 1967 г. Джоселин Белл — аспиранткой Кембриджского университета. Белл изучала радиосигналы, зарегистрированные с помощью аппаратуры, разработанной Энтони Хьюишем для исследования излучения осциллирующих радиоисточников. Среди множества записей хаотически мерцающих источников она заметила такую, где всплески повторялись с четкой периодичностью, хотя и менялись по интенсивности. Более детальные наблюдения подтвердили точ-



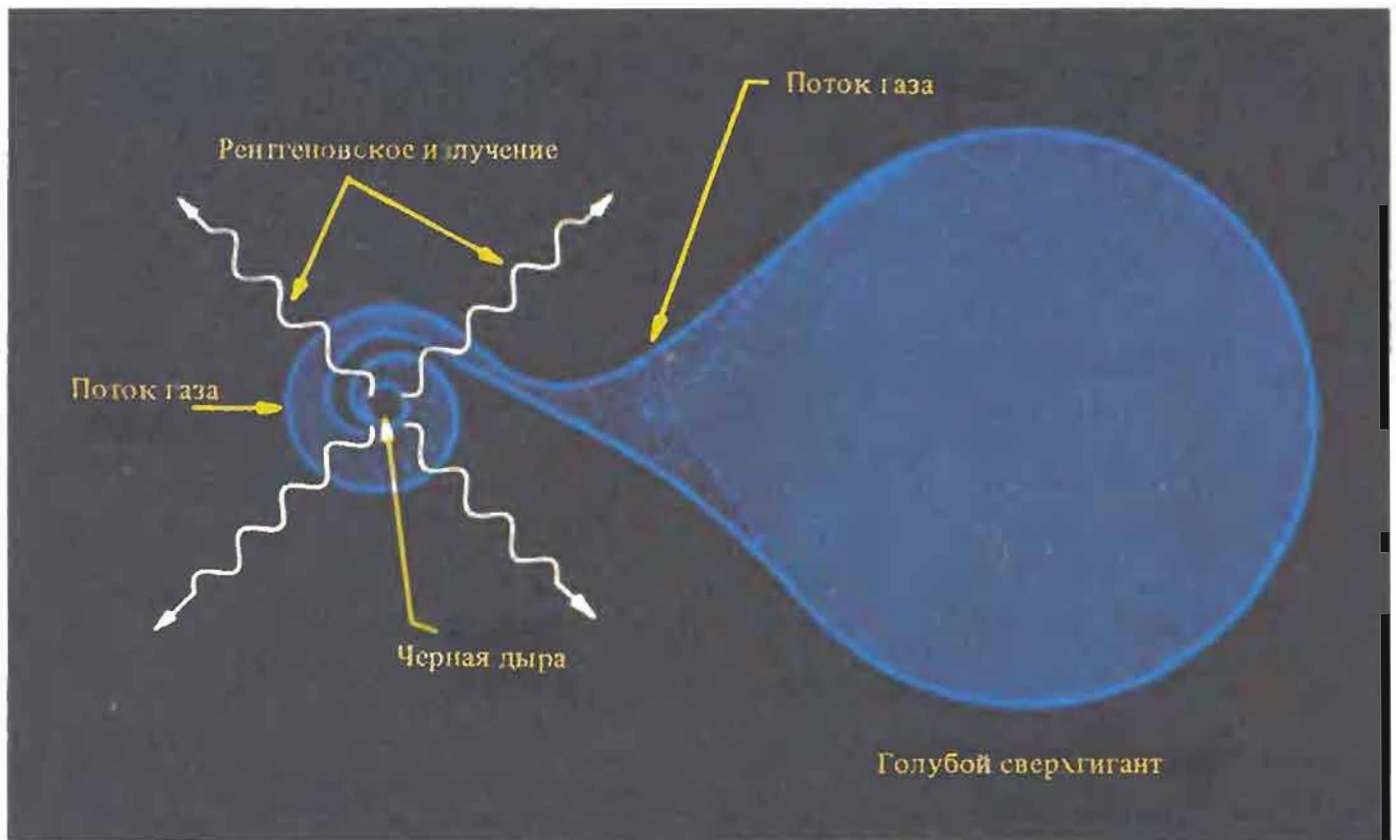
Мы можем наблюдать лишь те пульсары, излучение которых (независимо от его природы) периодически оказывается направленным к Земле.



Четыре типа источников рентгеновского излучения, изображенные в условных цветах. Область в окрестности Лебедя X-1 — одного из компонентов двойной звездной системы (*вверху слева*). Туманность, окружающая звезду η Киля; в оптическом диапазоне это звезда 6 величины, но в 1843 г. ее яркость неожиданно возросла более чем в 100 раз. В туманности обнаружено несколько молодых звезд (*вверху справа*). СТВ 109 — остаток взрыва сверхновой, в центре которой расположен пульсар, входящий в состав двойной системы (*внизу слева*). SS 433 — одна из наиболее замечательных среди известных звезд. Являясь компонентом двойной системы, она выбрасывает две струи вещества, которые движутся со скоростью, сравнимой со скоростью света. (Корпорация ММІ.)

но периодический характер следования импульсов, а при изучении других записей было обнаружено еще два источника с такими же свойствами. Наблюдения и теоретический анализ показывают, что пульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звезды с необычайно сильным магнитным полем. Пульсирующий характер излучения обусловлен пучком лучей, выходящих из «горячих пятен» на (или вблизи) поверхности вращающейся нейтронной звезды. Детальный механизм этого излучения все еще остается загадкой для ученых.

Было обнаружено несколько нейтронных звезд, входящих в состав тесных двойных систем. Именно эти (и никакие другие) нейтронные звезды являются мощными источниками рентгеновского излучения. Представим себе тесную двойную, один компонент которой — гигант или сверхгигант, а другой — компактная звезда. Под действием гравитационного поля компактной звезды газ может вытекать из разреженной атмосферы гиганта: такие газовые потоки в тесных двойных системах, давно обнаруженные методами спектрального анализа, получили соответствующее теоретическое толкование. Если компактной звездой в двойной системе является нейтронная звезда или черная дыра, то молекулы газа, утекающего с другого компонента системы, могут ускорять-



Так изобразил художник черную дыру, входящую в состав двойной системы. Предполагается, что вещество, истекающее из спутника черной дыры, образует вокруг нее диск, который и является источником рентгеновского излучения системы. (Х. Тэненбаум; рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр.)

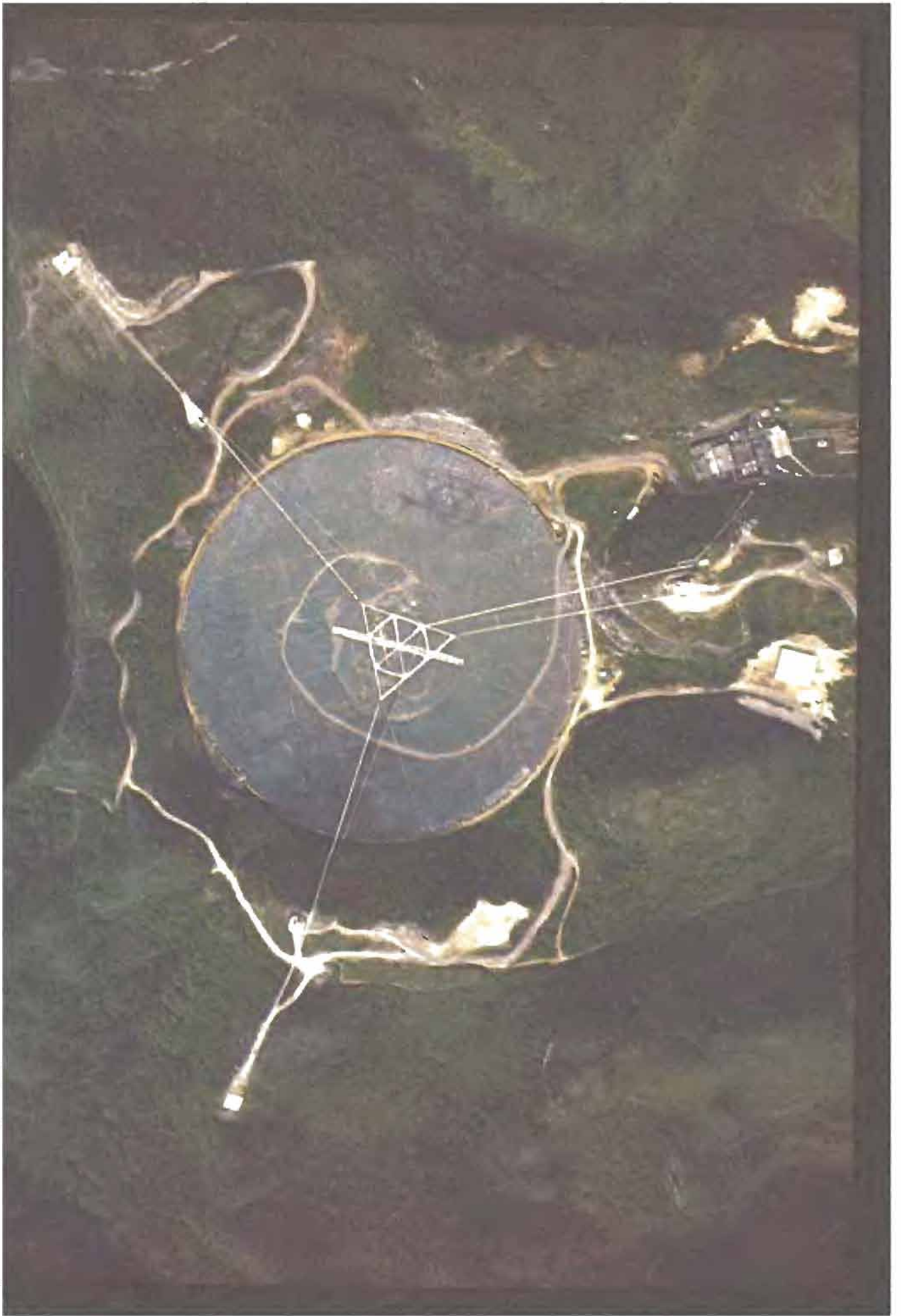
ся до очень высоких энергий. Вследствие столкновений между молекулами кинетическая энергия газа, падающего на компактную звезду, в конечном итоге переходит в тепло и в излучение. Как показывают оценки, выделяемая при этом энергия вполне объясняет наблюдаемую интенсивность рентгеновского излучения двойных систем такого типа.

В первом разделе гл. 4 говорилось, что спектроскопические наблюдения позволяют получить информацию о массах звезд, входящих в состав двойной системы. Во всех случаях (за исключением одного) результаты наблюдений согласуются с предположением о том, что компактным объектом в двойной системе является нейтронная звезда. Единственное исключение составляет рентгеновский источник под названием Лебедь X-1: спектральные наблюдения показывают, что масса компактной звезды у него равна $10M_{\odot}$ *. Столь массивная компактная звезда не может быть нейтронной, она могла бы быть черной дырой. И до сих пор не предложено разумной альтернативы такой интерпретации результатов наблюдений этого объекта.

В общей теории относительности Эйнштейна черные дыры занимают такое же место, как ультрарелятивистские частицы в его специальной теории относительности. Но если мир ультрарелятивистских частиц — физика высоких энергий — полон удивительных явлений, которые играют важную роль в экспериментальной физике и наблюдательной астрономии, то явления, связанные с черными дырами, пока вызывают лишь удивление. Я думаю, что со временем физика черных дыр даст результаты, важные для космологии, но сейчас эта отрасль науки в основном представляет собой «игровую площадку»

* Недавно обнаружена еще одна система такого рода, объект LMC X-3. — Прим. перев.

для теоретиков. Не следует ли из этого, что теория гравитации Эйнштейна дает нам меньше сведений о Вселенной, чем теория Ньютона, хотя в теоретическом отношении значительно превосходит ее? Вовсе нет! В следующей главе мы увидим, что в отличие от теории Ньютона теория Эйнштейна образует фундамент самосогласованной модели реальной Вселенной как целого, что эта теория имеет множество поразительных и доступных проверке предсказаний и, наконец, что она обеспечивает причинную связь между свободно падающими, невращающимися системами отсчета и распределением, а также движением массы в космическом пространстве.



Теория Эйнштейна и Вселенная

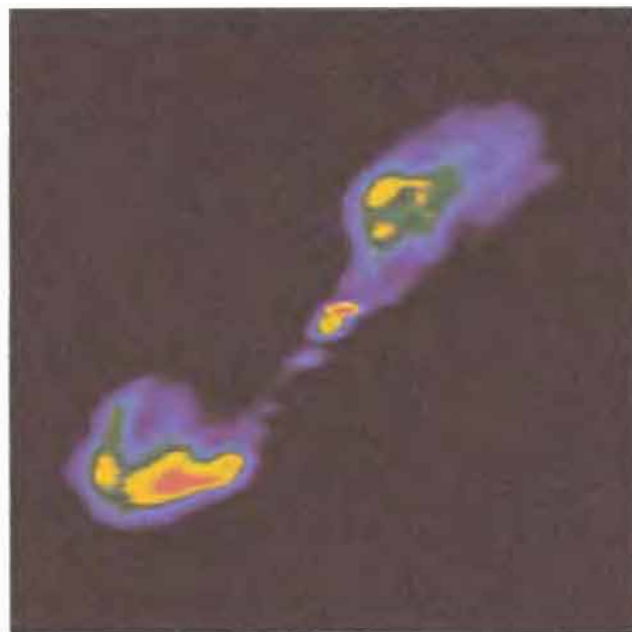
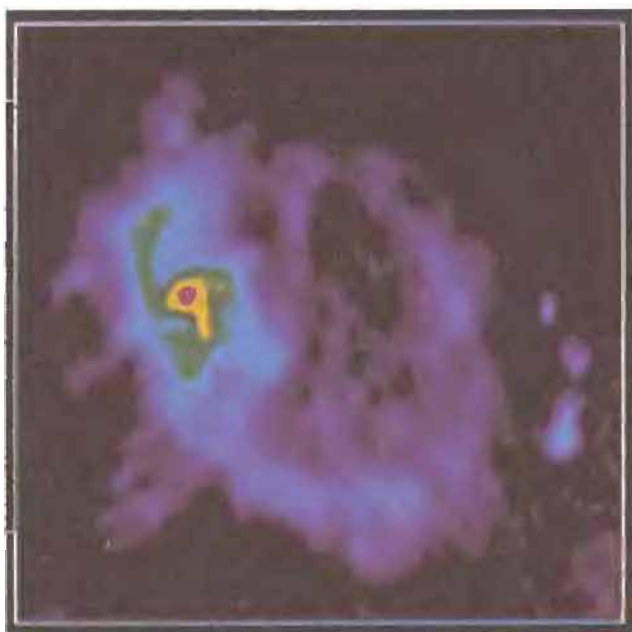
Мы можем со всей определенностью утверждать, что у Вселенной нет центра, или иными словами: центр Вселенной — везде, а граница — нигде.

Джордано Бруно

В своей книге «Механика» Эрнст Мах подверг резкой критике представление Ньютона об абсолютном пространстве. Вращающийся камень, привязанный к концу веревки, испытывает действие центробежной силы не потому, что ускоренно движется относительно фиктивного абсолютного пространства, заявлял Мах, а потому, что ускоряется относительно реальной Вселенной. А поскольку ускорение относительно, можно с тем же успехом сказать, что Вселенная движется с ускорением относительно камня. Эти два способа описания, по мнению Маха, должны одинаково проявляться в наблюдениях, поскольку различие между ними чисто формальное. Эйнштейн задался целью создать теорию гравитации, которая не только устранила бы различие между инертной и гравитационной массами, но и связала распределение массы во Вселенной и ее движение с локально инерциальными системами отсчета. В предыдущей главе мы узнали, как он справился с первой из поставленных задач. В настоящей главе мы расскажем, как Эйнштейн и советский математик А. А. Фридман разработали космологическую теорию пространства и времени, в которой, как это ни парадоксально, удалось совместить фундаментальные воззрения Ньютона и Маха. В этой теории Вселенной время, покой, равномерное и ускоренное движение не менее абсолютны, чем в теории Ньютона, но определение этих понятий зависит от распределения масс и их движения во Вселенной, что согласуется с концепцией Маха.

Космологический принцип

В статье «Космологическое обсуждение общей теории относительности», опубликованной в 1917 г., Эйнштейн постулировал, что *ни одна из усредненных характеристик космической среды не выделяет преимущественного поло-*

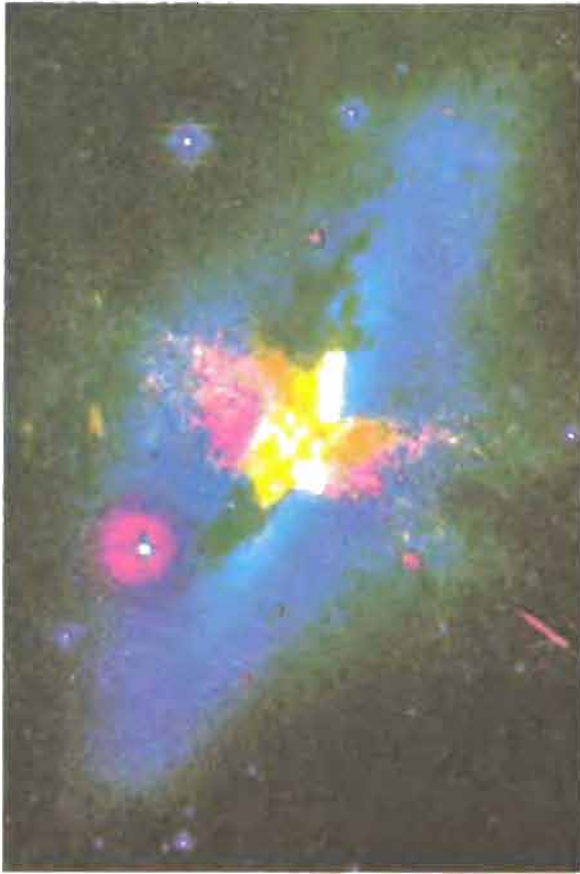


жения или преимущественного направления в пространстве. Эйнштейн назвал эту гипотезу космологическим принципом.

В космологическом принципе нашли свое отражение воззрения на Вселенную, которых придерживались Ньютон и Гюйгенс, а еще ранее — Джордано Бруно, Лукреций и древнегреческие атомисты в V в. до н. э. Эйнштейн понял, что этот принцип позволяет разрешить проблему, поставленную Махом, т. е. показать, что распределение массы во Вселенной и ее движение определяют локально инерциальные системы отсчета. Как было показано в гл. 6, в теории гравитации Эйнштейна структура пространства-времени и распределение энергии (массы) и импульса взаимозависимы, однако эта теория не утверждает, что распределение энергии и импульса *определяет* структуру пространства-времени. Рассмотрим, например, Вселенную, которая представляет собой точечную массу. Как известно, траектория пробной частицы, движущейся вокруг точечной массы, представляет собой медленно вращающийся (кеплеровский) эллипс. Но вращающийся относительно чего? Теория Эйнштейна отвечает на этот вопрос точно так же, как теория Ньютона, а именно: она утверждает, что изолированная точечная масса сама по себе не позволяет определить невращающуюся систему отсчета. Однако если распределение энергии и импульса удовлетворяет космологическому принципу, то открывается возможность дать строгое определение понятию «покоящаяся система отсчета» и указать, как такую систему отсчета выбрать. С точки зрения применения этот локальный стандарт покоя неотличим от абсолютного пространства Ньютона.

Космологи расходятся во мнениях относительно значения космологического принципа. Одни считают его лишь *приближенным методом описания* Вселенной, другие рассматривают как *непреложный закон*. Это различие во мнениях отражает более фундаментальные разногласия, касающиеся взаимосвязи космологии и физики. В физике имеется четкое различие между *законами*, которые выявляют устойчивые, математические закономерности, лежащие в основе природных явлений, и *начальными условиями*, которые отражают случайные, зависящие от обстоятельств аспекты природных явлений. Почти эллиптическая форма планетных орбит — неотъемлемая особенность строения Солнечной системы, поскольку такая форма орбит однозначно следует из закона всемирного тяготения Ньютона. Эксцентриситеты и наклоны

Радиоисточник Стрелец А, расположенный в центре Галактики (*вверху слева*). Красное пятно изображает точечный источник, истинные размеры которого на рисунке должны быть в 1000 раз меньше, чем размеры красного пятна. Предполагается, что этот источник является истинным ядром нашей Галактики. Два спиралевидных рукава, выходящие из центрального объекта, служат источником теплового излучения; подобного рода структуры никогда ранее не наблюдались. Более слабая голубая оболочка — нетепловое излучение, которое, возможно, обусловлено свечением остатка сверхновой. Радиоисточник Центавр А, расположенный на расстоянии 5 Мпк, — ближайшая к нам мощная радиогалактика (*вверху справа*). Расположение выбросов и отдельных пятен внутри их, полученное в радиодиапазоне, близко совпадает с расположением аналогичных деталей в рентгеновском диапазоне (последние исследования проводились орбитальной обсерваторией «Эйнштейн»). Такого типа структуры принято называть внутренними «радиоушами» в отличие от более протяженных структур, характерных для радиогалактик. Радиокарты источников Стрелец А и Центавр А построены в основном на основе наблюдений, которые проводились с помощью радиоинтерферометра VLA, расположенного примерно в 80 км к западу от Сокорро (шт. Нью-Мексико). [Национальная радиоастрономическая обсерватория, «Ассошиэйтед юниверсити инк.», по контракту с Национальным научным фондом. Наблюдатели П. Д. Экерс, У. Й. Шварц, У. М. Госс (фото *вверху справа*); Й. О. Бернс, Е. Шрайер, Е. Фойгельсон (фото *вверху слева*); Джеймс Сагер (*внизу*).]



Изображение активной галактики М 82 в оптическом диапазоне, полученное с помощью компьютера. (Предоставлено Ж. Лорре.)

ния орбит — случайные элементы. Закономерности в таких случайных элементах (орбиты планет по форме близки к окружностям и лежат почти в одной плоскости), по-видимому, обусловлены эволюционными процессами, которые не относятся к начальным условиям. Подобным образом некоторые космологи утверждают, что крупномасштабную однородность и изотропию наблюдаемой части Вселенной также следует объяснять особенностями эволюции, а не начальными условиями.

На это можно возразить, что условия, определяющие свойства Вселенной как целого, качественно отличаются от условий, которые обуславливают свойства обычных астрономических систем. Обстоятельства, под влиянием которых сформировались свойства отдельных звезд, несомненно, случайны. Мы не спрашиваем, например, почему масса Солнца равна $1,991 \cdot 10^{33}$ г, а не $1,992 \cdot 10^{33}$ г. Статистические свойства звездной популяции, к которой относится Солнце, могут быть менее случайными. И хотя пока еще не существует теории, которая ответила бы на вопрос, какая доля массы Вселенной должна быть сосредоточена в звездах массой $0,5\text{--}1,5M_{\odot}$, нет сомнения, что хорошая космологическая теория *обязательно должна* дать этот ответ.

Естественно предположить, что Вселенная в целом характеризуется определенной совокупностью статистических свойств, часть которых предсказуема по крайней мере в принципе, а остальные следует принимать за аксиомы, как и сами законы. Одной из таких аксиом я считаю космологический принцип, предполагающий, что сама Вселенная должна обладать той же пространственной симметрией, что и законы, которые описывают ее строение и эволюцию. По общему мнению, это слишком смелое допущение, но альтернативная гипотеза кажется мне не только спорной, но и невразумительной. Если рассматривать космологический принцип как приближенное описание доступной

наблюдению части Вселенной, то что можно сказать о Вселенной в целом? Отказаться вообще делать какие-либо предположения — это значит отказаться от попыток интерпретировать результаты космологических наблюдений или понять связь между локально инерциальными системами отсчета и удаленным веществом. Предположить, что космологический принцип применим, но лишь как приближение к реальности, — значит предположить, что существуют преимущественные точки и направления. Подобное утверждение было бы еще более сильным допущением, чем космологический принцип, причем таким, которое не имеет никаких доказательств.

И наконец, в отличие от теории Ньютона теория гравитации Эйнштейна не есть только теория гравитационного взаимодействия. Это также теория пространства-времени, а следовательно, и Вселенной в целом.

В чем смысл космологического принципа?

Что говорит космологический принцип о структуре пространства-времени? Поскольку ни одно из средних свойств распределения массы и импульса не выделяет преимущественного положения или направления в пространстве, пространственные и временные координаты событий, по-видимому, можно выбрать таким образом, чтобы, во-первых, средняя плотность $\bar{\rho}$ зависела лишь от временной координаты t и, во-вторых, чтобы уравнение (6.18) — которое выражает интервал собственного времени между двумя близкими событиями через разность координат и десять гравитационных потенциалов — обеспечивало равноправие точек в пространстве и направлений в каждой точке.

Простейшее выражение для пространственно-временного интервала, которое удовлетворяет этим требованиям, есть формула Минковского

$$d\tau^2 = dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (7.1)$$

Однако из уравнений поля Эйнштейна (дифференциальных уравнений, связывающих десять гравитационных потенциалов с десятью величинами, описывающими распределение энергии и импульса) вытекает, что плотность массы в пространстве-времени Минковского должна быть равна нулю. Поскольку средняя плотность вещества во Вселенной, хотя и мала, но конечна, это значит, что пространство-время нельзя описать соотношением (7.1). Таким образом, специальная теория относительности не в состоянии правильно описать равномерное неограниченное распределение гравитирующих частиц.

Возможно ли такое обобщение пространства-времени Минковского, которое одновременно удовлетворяло бы и уравнениям поля Эйнштейна и космологическому принципу? В 1917 г. Эйнштейн опубликовал теорию Вселенной, основанную на смелой и оригинальной гипотезе, предполагающей, что пространство, хотя оно однородно и изотропно, является замкнутым, т. е. представляет собой трехмерный аналог двумерной поверхности сферы. (Более глубоко мы рассмотрим эту гипотезу в следующем разделе.) К сожалению, сама по себе эта идея не снимает отмеченной выше проблемы: уравнения поля по-прежнему не имеют решений ни при какой конечной плотности массы во Вселенной. Тогда Эйнштейн сделал шаг, который впоследствии назвал величайшей ошибкой в своей научной деятельности. Он ввел в свои уравнения поля добавочный член, что позволяло получить их решение при конечной плотности массы. Пять лет спустя (в 1922 г.) Александр Фридман, советский физик-теоретик, работавший в области метеорологии, нашел более радикальный и в то же время более традиционный способ согласовать уравнения

Эйнштейна с космологическим принципом при конечной величине плотности массы. Фридман показал, что уравнения поля в их первоначальной форме согласуются с космологическим принципом и предположением о конечной плотности массы во Вселенной, если пространство не является статическим. Это была поистине революционная идея. Сам Эйнштейн принял ее не сразу, и астрономы, по-видимому, не обращали на нее внимание до тех пор, пока Хаббл не обнаружил явления расширения Вселенной и не вывел зависимость скорость — расстояние. Это случилось через семь лет после публикации работы Фридмана, которая указывала на наличие подобной зависимости.

В простейшей модели Вселенной Фридмана пространственно-временной интервал записывается в виде

$$d\tau^2 = dt - a^2(t) \cdot (dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (7.2)$$

где $a(t)$ — некоторая (пока неизвестная) функция времени. Какому виду пространства-времени соответствует формула (7.2)?

Рассмотрим сначала, что показывают неподвижные часы в различных точках пространства. Для двух близлежащих событий в истории неподвижных часов $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$, так что $\Delta\tau = \Delta t$, т. е. интервал собственного времени между двумя событиями в истории неподвижных часов равен интервалу временной координаты. Таким образом (в соответствии с космологическим принципом), идентичные часы идут с одинаковой скоростью в разных точках.

Рассмотрим теперь структуру пространства, описываемого уравнением (7.2). Собственное расстояние ds между близлежащими одновременными событиями определяется соотношением

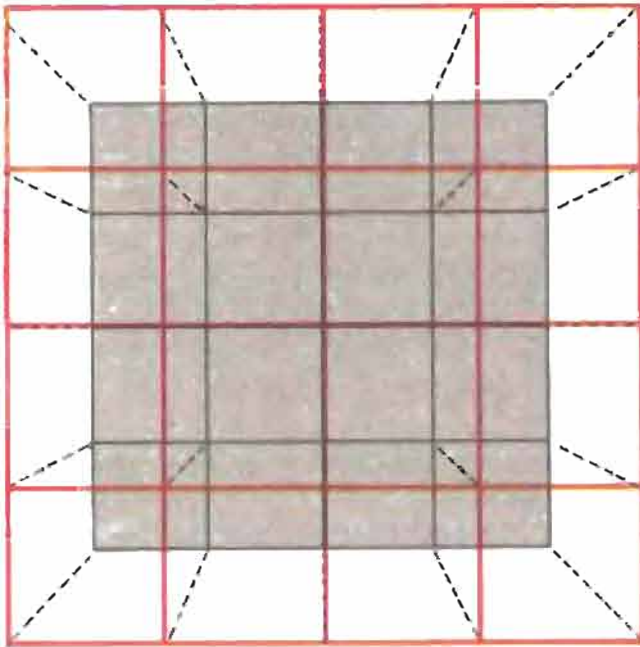
$$ds^2 = -d\tau^2 = a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2). \quad (7.3)$$

Эта формула гласит: чтобы вычислить расстояние ds между соседними точками x, y, z и $x + dx, y + dy, z + dz$, необходимо умножить расстояние, вычисляемое по теореме Пифагора, на масштабный фактор $a(t)$. Поскольку расстояние между соседними точками определяется по формуле Пифагора, то геометрия пространства — евклидова. Но расстояние между двумя любыми точками пропорционально масштабному фактору $a(t)$, и если множитель $a(t)$ возрастает со временем, то это значит, что уравнение (7.3) описывает расширяющуюся декартову координатную сетку (см. левый рисунок).

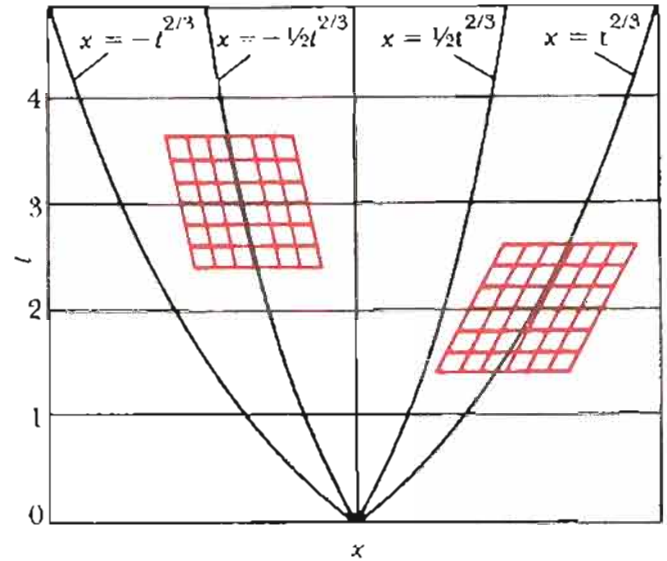
На правом рисунке показано двумерное сечение четырехмерной пространственно-временной сетки, описываемой уравнением (7.2). Истории узлов сетки изображаются кривыми $x = a(t)x_0$ при различных значениях постоянной x_0 . Вид космоса должен быть одинаковым во всех узлах сетки, поэтому любую из этих кривых можно отождествить с осью t . При этом одновременные события соединяются горизонтальной линией, параллельной оси x .

Описывает ли уравнение (7.2) структуру пространства-времени возможной Вселенной? Чтобы ответить на этот вопрос — и таким путем найти, как масштабный фактор $a(t)$ связан со средней плотностью массы $\bar{\rho}(t)$ во Вселенной, — не обращаясь непосредственно к уравнениям поля Эйнштейна, будем рассуждать следующим образом.

Рассмотрим идеализированную жидкость с однородной плотностью $\bar{\rho}(t)$, давление в которой равно нулю. Мысленно выделим малую сферическую область, радиус которой изменяется пропорционально масштабному фактору $a(t)$, так что при изменении со временем масштабного фактора масса, заключенная внутри области, остается постоянной. Чему равно ускорение частицы жидкости на поверхности этой сферической области? Если бы теория Ньютона была применима к бесконечному однородному распределению массы, то для ответа на этот вопрос мы воспользовались бы теоремой о сферически-сим-



Расширяющаяся сетка декартовых координат.



Двумерное сечение четырехмерной сетки пространственно-временных космических координат. Кривые $x = x_0 t^{2/3}$ показывают историю частиц, локально покоящихся в расширяющемся пространстве. Расстояние между произвольной парой таких частиц пропорционально масштабному фактору $a(t) = (t/t_0)^{2/3}$. Красным цветом изображены пространственно-временные координатные сетки локально покоящихся систем отсчета.

метричном распределении массы (см. с. 108 в гл. 3). Но хотя теория Ньютона не способна самосогласованным образом описать однородное бесконечное распределение массы, его теорема о сферически-симметричном распределении масс справедлива и в теории Эйнштейна — факт, еще раз иллюстрирующий основополагающую силу принципов симметрии. Итак, *гравитационное поле внутри произвольной сферической области, выделенной из однородной бесконечной жидкости, имеет точно такую же структуру, как если бы область находилась в пустом пространстве.*

Обозначим через M и R массу и радиус рассматриваемой сферической области. Теория Ньютона применима для описания поведения области, если M/R мало. (Напомним, что в используемой нами системе единиц M и R измеряются в одинаковых единицах). Но M/R пропорционально R^2 , так что, выбрав R достаточно малым, можно сделать сколь угодно малым это отношение. Поскольку в пределе $M/R \rightarrow 0$ теория Ньютона точна, полученное таким путем уравнение для масштабного фактора также должно быть точным.

В теории Ньютона описать поведение однородной и однородно расширяющейся (или сжимающейся) самогравитирующей сферы очень просто. Радиальная координата произвольного элемента жидкости изменяется со временем пропорционально масштабному фактору $a(t)$:

$$r(t) = r_0 \cdot a(t), \tag{7.4}$$

где r_0 — константа. Поскольку масштабный фактор $a(t)$ соответствует расстоянию между двумя произвольными элементами жидкости, его величину в данный момент можно выбрать совершенно произвольно. Как мы увидим, это удобно сделать так, чтобы в современную эпоху, т. е. при $t = t_0$,

$$a(t_0) = 1. \tag{7.5}$$

В этом случае константа r_0 в уравнении (7.4) выражает современное значение радиальной координаты частицы.

Гравитационное ускорение на расстоянии r от начала координат равно $M(r)/r^2$, где $M(r)$ — масса, заключенная внутри объема радиусом r . Таким образом,

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{M(r)}{r^2}. \quad (7.6)$$

Подставив выражение для $r(t)$ из (7.4) и поделив обе части (7.6) на r_0^3 , приходим к уравнению, которое связывает вторую производную от масштабного фактора с плотностью массы $\bar{\rho}$:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi}{3} \bar{\rho} a \equiv -\frac{\mu}{a^2}, \quad (7.7)$$

где через μ мы обозначили постоянную массу, заключенную внутри сферы радиусом $a(t)$. Таким образом, масштабный фактор $a(t)$ удовлетворяет тому же уравнению, что и радиальная координата частицы, движущейся вдоль радиуса по направлению к неподвижной массе μ или от нее (см. рисунок на с. 235 и относящийся к нему текст).

Чтобы решить уравнение (7.7), умножим обе его части на первую производную от $a(t)$. В результате получим

$$\frac{da}{dt} \cdot \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{\mu}{a^2} \cdot \frac{da}{dt}$$

или

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 = \mu \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{a} \right),$$

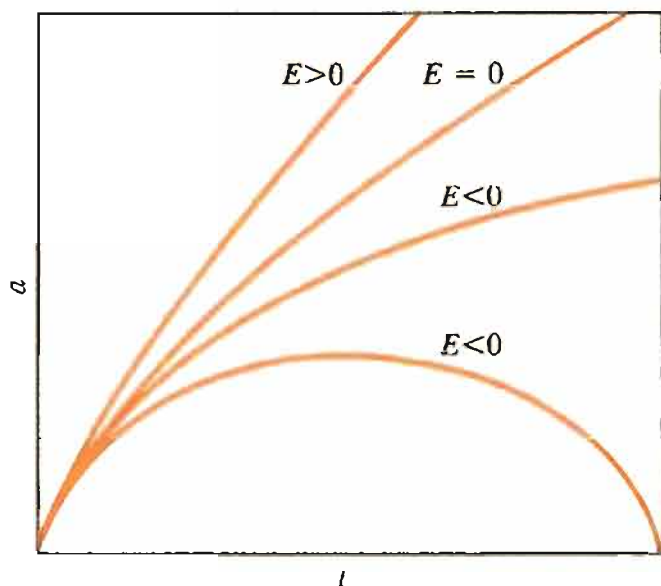
откуда

$$\frac{1}{2} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 - \frac{\mu}{a} = E, \quad (7.8)$$

где E — некая постоянная. Произведение $E r^2$ — это в механике Ньютона энергия элемента жидкости единичной массы, лежащего на поверхности расширяющейся (или сжимающейся) сферы радиусом $ra(t)$, масса которого $\mu = \frac{4}{3}\pi \bar{\rho} a^3 = \frac{4}{3}\pi \bar{\rho} r_0^3$.

Уравнение (7.8) описывает поведение частицы, движущейся по направлению к неподвижной точечной массе или от нее. В какой-то момент времени (в прошлом или в будущем) координаты частицы и точечной массы совпадают. Выберем этот момент за начало отсчета времени, так что $a(0) = 0$. Теперь решение уравнения (7.8) полностью определяется величиной энергетического параметра E . На приведенном далее рисунке представлены различные типы решения, полученные в зависимости от знака E . Если E — отрицательная величина, то $a(t)$ представляет радиальную координату гравитационно связанной частицы, которая удаляется от точечной массы на максимальное расстояние μ/E , после чего возвращается в исходную точку. При $E > 0$ $a(t)$ соответствует радиальной координате частицы с положительной энергией; на больших расстояниях от начального положения скорость частицы асимптотически приближается к постоянной величине $(2E)^{1/2}$. И наконец, при $E = 0$ решение описывает частицу, энергия которой как раз достаточна для того, чтобы она могла улететь на бесконечность, имея равную нулю скорость.

В силу теоремы о сферически-симметричном распределении массы следовало бы ожидать, что уравнения поля Эйнштейна свяжут масштабный фактор $a(t)$ с плотностью массы $\bar{\rho}$ аналогично тому, как это делается в уравнении (7.8). Но уравнения поля Эйнштейна должны установить *однозначное* соответствие между масштабным фактором и плотностью массы, когда структура пространства-времени описывается уравнением (7.2). Это означает, что энер-



Зависимость масштабного фактора a от времени t . При $E = 0$ $a \sim t^{2/3}$. Если $E > 0$, то при больших t зависимость асимптотически стремится к $a \sim t$. При $E < 0$ зависимость $a(t)$ имеет вид циклоид, которые зеркально-симметричны относительно вертикальной прямой, проходящей через точку максимума.

гетический параметр E должен быть равен нулю, поскольку в противном случае его величина задаст характерное время и характерное расстояние: время, за которое масштабный фактор принимает значение $\mu/|E|$, и расстояние, которое пройдет свет за это время. Поскольку уравнение (7.2) не содержит ни характерного времени, ни характерной длины, следует считать $E = 0$.

Уравнение (7.8) при $E = 0$ имеет следующее решение, удовлетворяющее условиям $a(t_0) = 1$ и $a(0) = 0$:

$$a(t) = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{2/3}. \tag{7.9}$$

Соответствующая кривая на рисунке отмечена символом $E = 0$.

Подставляя (7.9) в (7.8) и используя величину μ из (7.7), мы получаем важное соотношение, определяющее плотность массы в произвольный момент времени:

$$6\pi\bar{\rho}t^2 = 1. \tag{7.10}$$

Заметим, что в этом соотношении плотность $\bar{\rho}$ выражена в естественных единицах.

Наконец, выведем соотношение, связывающее скорость расширения со средней плотностью. Дифференцируя уравнение (7.4), получаем

$$\frac{dr}{dt} = r_0 \frac{da}{dt} = r_0 a \cdot \frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt}\right) = r \cdot H, \tag{7.11}$$

где

$$H = \frac{1}{a} \left(\frac{da}{dt}\right) = \frac{2}{3t}. \tag{7.12}$$

Как видно из уравнения (7.11), в произвольный момент времени относительная скорость двух узлов координатной сетки или двух частиц жидкости пропорциональна расстоянию между ними. Соотношение (7.12) показывает зависимость коэффициента пропорциональности, называемого постоянной Хаббла, от масштабного фактора $a(t)$. Поделив уравнение (7.8), в котором $E = 0$, на a^2 и воспользовавшись определением константы μ (7.7), мы получим искомое соотношение между постоянной Хаббла и плотностью Вселенной в произвольный момент времени:

$$H^2 = \frac{8\pi}{3}\bar{\rho}. \tag{7.13}$$

Уравнения (7.9) и (7.13) дают полное описание расширяющейся космической среды и расширяющейся координатной сетки.

Кривизна космического пространства

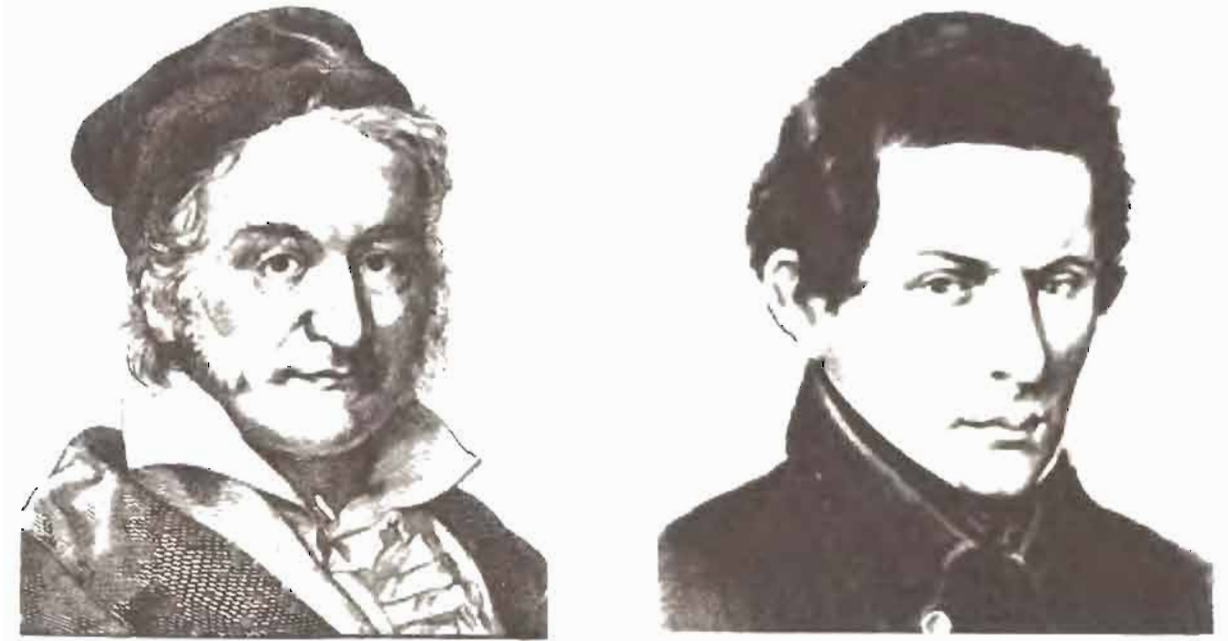
Евклидово пространство удовлетворяет космологическому принципу: свойства треугольников и других геометрических фигур везде одинаковы и не существует преимущественного направления. Справедливо ли обратное утверждение? Обязательно ли пространство, геометрические свойства которого не выделяют преимущественных точек и направлений, является евклидовым?

Сначала рассмотрим этот вопрос применительно к двумерным поверхностям. Евклидова плоскость однородна и изотропна: треугольник или какая-нибудь другая фигура, нарисованная на евклидовой плоскости, может существовать в любой точке и при любой ориентации. Однако сказанное справедливо и в отношении треугольников, построенных на поверхности сферы, а потому она также однородна и изотропна. Существуют ли другие поверхности, по которым геометрические фигуры могли бы перемещаться без искажений?

Интуиция подсказывает, что ответ должен быть отрицательным, и на самом деле математически доказано, что других таких поверхностей построить в евклидовом пространстве нельзя. Однако можно разработать самосогласованное математическое описание двумерного пространства, называемого *неевклидовым*, или *гиперболической плоскостью*, которое, не являясь ни плоскостью, ни поверхностью евклидовой сферы, тем не менее допускает перемещение без искажений любой построенной на ней геометрической фигуры в произвольную точку этой поверхности с произвольной ориентацией. Подобно евклидовой плоскости это пространство бесконечно. Его геометрические свойства удовлетворяют всем аксиомам Евклида, за исключением аксиомы параллельности: если на евклидовой плоскости через точку, лежащую вне прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной, то в этой геометрии параллельных прямых можно провести бесконечное множество.

Неевклидова геометрия, разработанная в начале XIX в. венгром Яношем Бойаи, немцем Карлом Фридрихом Гауссом и русским математиком Николаем Ивановичем Лобачевским, явилась важным событием в истории математики, как и науки в целом. Подобно Платону и Архимеду, большинство математиков считали, что аксиомы, а следовательно, и теоремы евклидовой геометрии дают истинное представление о физическом пространстве. В конце XVIII в. Иммануил Кант высказал несколько иную точку зрения. Соглашаясь с тем, что в нашем восприятии пространство действительно описывается аксиомами Евклида, он одновременно отрицал, что реальный мир на самом деле имеет протяженность в пространстве. Наши органы чувств «навязывают» нам ошибочное представление о пространственном расположении внешней реальности. По мнению Канта, евклидова геометрия — это порождение нашего чувственного восприятия действительности. Создание неевклидовой геометрии показало, что аксиомы Евклида не обязательно должны выполняться как в платоновском, так и в кантовском смысле. Они всего лишь самосогласованны, как, впрочем, и аксиомы неевклидовой геометрии. Утверждение «геометрия физического пространства есть X » в современной интерпретации означает: «Космологическая теория, использующая геометрию X , более точно соответствует наблюдательным данным, чем теории, основанные на альтернативных геометриях».

Существуют трехмерные аналоги как сферической, так и неевклидовой геометрии. Трехмерный аналог поверхности сферы — это однородное и изо-



Основоположники неевклидовой геометрии: Карл Фридрих Гаусс (1777—1855), Николай Иванович Лобачевский (1793—1856) и Янош Бойан (1802—1860). Свою работу с подробным изложением основ неевклидовой геометрии Лобачевский опубликовал в 1829 г. в русском научном журнале. Его труд первоначально не получил достаточного признания среди русских математиков и остался практически незамеченным за границей. Янош Бойан изложил свою теорию двумя годами позже в приложении к книге по геометрии, автором которой был его отец Фаркаш Бойан — известный математик и друг Гаусса. Бойан-старший послал копию своей книги Гауссу, крупнейшему математику того времени. В ответном письме Гаусс, однако, отмечал, что не может похвалить приложенного Яноша Бойана, поскольку «хвалить его значило бы хвалить самого себя: содержание трактата в целом, путь, который Ваш сын избрал, и результаты, к которым он пришел, — все это очень близко моим собственным изысканиям, которые занимали мой ум в возрасте тридцати — тридцати пяти лет». Но Гаусс из осторожности воз-



держался от публикации результатов своих исследований по неевклидовой геометрии — они были найдены среди бумаг ученого лишь после его смерти. (Коллекция Грейнджера.)

тропное трехмерное пространство, имеющее конечный объем (подобно тому как сфера имеет конечную площадь поверхности). Как и на поверхности сферы, сумма углов треугольника в этом пространстве всегда больше 180° . Трехмерный аналог гиперболической плоскости — однородное, изотропное и бесконечное пространство, в котором сумма углов любого треугольника меньше 180° .

Чтобы понять смысл неевклидовых пространств, удобнее всего воспользоваться алгебраическим описанием. Поверхность сферы мы можем определить как совокупность точек, координаты которых удовлетворяют уравнению:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \quad (7.14)$$

где R — радиус сферы. Аналогично трехмерная поверхность сферы в четырех-

мерном евклидовом пространстве образована точками, координаты которых x, y, z, w удовлетворяют уравнению

$$x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = R^2. \quad (7.15)$$

Геометрия двумерной сферической поверхности, описываемой уравнением (7.14), задается уравнением, которое показывает, как вычислить расстояние между двумя соседними точками, — это формула Пифагора:

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (7.16)$$

Точно так же геометрия трехмерной сферической поверхности, описываемой уравнением (7.15), задается уравнением, которое дает рецепт для вычисления расстояний между соседними точками в этом пространстве. Поскольку мы предположили, что четырехмерное пространство, образованное точками с координатами x, y, z, w , евклидово, расстояние между соседними точками задается четырехмерным аналогом формулы Пифагора:

$$dl^2 = dw^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2. \quad (7.17)$$

Возможен ли иной способ задания поверхности или пространства, геометрические свойства которых не зависят от положения точек и направлений? Оказывается, существует еще один подход, который открыл в середине XVIII в. Иоганн Ламберт (1728—1777). Предположим, что мы заменили радиус R в уравнении (7.14) или (7.15) на мнимое число iR , где i — мнимая единица, равная $\sqrt{-1}$. Тогда вместо R^2 в уравнениях (7.14) и (7.15) будет $-R^2$. Но сумма квадратов не может быть отрицательной. Чтобы обойти эту трудность, придется изменить знак одного из слагаемых в левой части (7.14)

$$x^2 + y^2 - w^2 = -R^2 \quad (7.18)$$

и в левой части (7.15)

$$x^2 + y^2 + z^2 - w^2 = -R^2. \quad (7.19)$$

Эти уравнения, кажется, хорошо знакомы. Если преобразовать уравнение окружности таким же образом, то получим

$$x^2 - w^2 = -R^2. \quad (7.20)$$

Соответствующие выражения для расстояния между двумя близлежащими точками имеют вид:

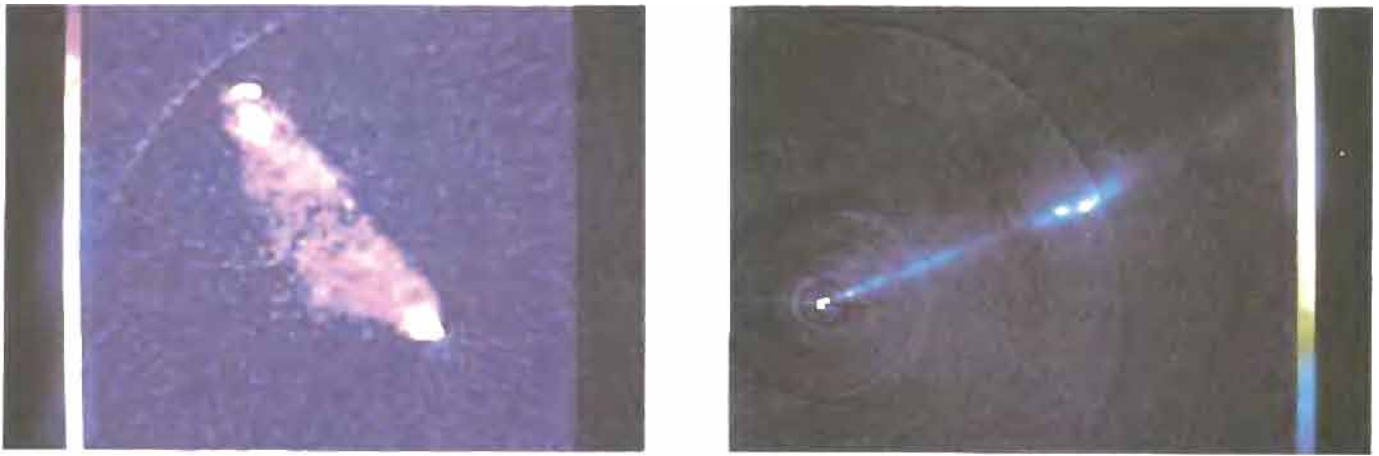
$$dl^2 = dx^2 + dy^2 - dw^2, \quad (7.21)$$

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - dw^2, \quad (7.22)$$

$$dl^2 = dx^2 - dw^2. \quad (7.23)$$

Теперь видно, что пространство большей размерности, т. е. размерности $n+1$, в которое мы вкладываем интересующее нас пространство размерности n , с математической точки зрения тождественно пространству, построенному Минковским с целью формализации специальной теории относительности Эйнштейна! Координата w в уравнениях (7.21—7.23) является аналогом временной координаты; уравнение (7.20) имеет тот же вид, что и уравнение $t^2 - x^2 = k^2$, которое представляет собой геометрическое место точек $t' = k$, $x' = 0$ (см. с. 186); уравнения (7.18) и (7.19) имеют сходную интерпретацию соответственно в трех- и четырехмерном пространстве-времени Минковского.

Разумеется, на самом деле w не является временной координатой — это координата в фиктивном «вмещающем пространстве», как и все другие координаты в этом пространстве. (Вспомните симметрию между x и t на простран-



Изображения, полученные с помощью радиотелескопа: слева — радиогалактика 3C 430, справа — выброс вещества из галактики NGC 6251. (Научная фотобиблиотека. Предоставлено Гуллом и Филденом.)

ственно-временной диаграмме Минковского!) Не существует также никакой физической связи между специальной теорией относительности и гиперболическими пространствами. Так уж случилось, что геометрия калибровочной поверхности* в пространстве-времени Минковского совпала с геометрией гиперболического пространства.

В трехмерном евклидовом пространстве вращения координатных осей вокруг неподвижной точки O не изменяет формы уравнения, которое задает поверхность сферы, описанной вокруг точки O . Роль аналогичных координатных преобразований во вмещающем пространстве-времени Минковского, определяемом уравнением (7.21), играют *преобразования Лоренца*. Они переводят уравнение (7.18), которое задает калибровочную поверхность, в уравнение того же вида, но с переменными x', y', w' вместо x, y, w .

Принято говорить, что трехмерное пространство, заданное уравнениями (7.15) и (7.17), имеет *положительную кривизну*, равную $1/R^2$. Трехмерное пространство, задаваемое уравнениями (7.19) и (7.22), называют пространством с *отрицательной кривизной*, равной $-1/R^2$. Евклидово пространство имеет *нулевую кривизну*. Оно представляет собой общий предельный случай пространств с положительной и отрицательной кривизной при неограниченном возрастании радиуса кривизны R .

Космологический принцип допускает, чтобы пространство имело конечную кривизну. Такая возможность открывается, если заменить выражение (7.2) для интервала собственного времени между близкими событиями в пространстве-времени выражением

$$d\tau^2 = dt^2 - a^2(t)dl^2, \quad (7.24)$$

где через dl обозначено расстояние между соседними точками искривленного пространства. Ранее мы видели, что масштабный фактор $a(t)$ входит в уравнение, которое содержит свободный параметр E . Мы также установили, что если пространство евклидово, то следует положить $E=0$. В 1922 г. А. А. Фридман показал, что если структура пространства-времени описывается уравнением (7.24), то масштабный фактор является решением уравнения (7.8), а энергетический параметр E и кривизна $\pm 1/R^2$ связаны между собой равенством

$$E = -1/2R^2 \quad (7.25)$$

* Такой поверхностью называют геометрическое место событий, отстоящих от начала координат на постоянный интервал собственного времени или собственной длины. В первом случае мы задаем времениподобную «сферу», а во втором — пространственноподобную «сферу».

Таким образом, кривизна пространства и параметр E имеют противоположные знаки.

Если $E < 0$, то пространство имеет положительную кривизну и, следовательно, конечный объем. В этом случае, как мы видели, масштабный фактор $a(t)$ возрастает от нуля до конечного максимального значения, а затем убывает до нуля. Следовательно, если пространство конечно, то продолжительность расширения и последующего сжатия Вселенной также конечна. Если же $E > 0$ ($E = 0$), то пространство имеет отрицательную (нулевую) кривизну, бесконечный объем и расширяется вечно.

Таковы теоретические возможности. К проблеме практического выбора между ними мы вернемся в гл. 8.

Свободные частицы в расширяющейся Вселенной

Первый закон Ньютона, который гласит, что импульс свободной (т. е. не испытывающей действия сил) частицы не меняется со временем, не применим к свободным частицам в расширяющейся однородной Вселенной. В этом случае импульс каждой свободной частицы уменьшается обратно пропорционально масштабному фактору $a(t)$:

$$p \sim 1/a(t). \quad (7.26)$$

Согласно этой зависимости, направление движения свободной частицы не изменяется, но она непрерывно замедляется, если только не движется со скоростью света. Фотоны и другие частицы с нулевой массой покоя должны всегда двигаться со скоростью света, однако в расширяющейся Вселенной их импульс и энергия непрерывно уменьшаются.

Свободная частица не может изменить направление своего движения, поскольку ни распределение массы, ни расширение Вселенной не выделяют преимущественного направления в пространстве. Чтобы понять, почему свободная частица замедляется, представим шайбу, скользящую без трения по однородно расширяющемуся слою льда. Относительно неподвижного пола, на котором лежит слой льда, скорость шайбы должна оставаться постоянной, если трение отсутствует. Следовательно, как видно из рисунка, скорость шайбы относительно участка льда, по которому она движется, непрерывно уменьшается. Обозначим через $v(t)$ скорость шайбы в момент времени t . За интервал времени Δt шайба пройдет путь $v\Delta t$ и окажется в точке, которая удаляется от места, где находилась шайба в момент t , со скоростью $H(t) \cdot v\Delta t$, как это следует из соотношения (7.11), связывающего скорость с расстоянием. Таким образом, в момент $t + \Delta t$ скорость шайбы относительно участка льда, лежащего под ней в этот момент, равна:

$$v(t + \Delta t) = v(t) - H(t) \cdot v\Delta t. \quad (7.27)$$

Выразив H через масштабный фактор, после преобразований получаем:

$$\frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{v(t)} = -\frac{1}{a(t)} \cdot \frac{da}{dt} \cdot \Delta t,$$

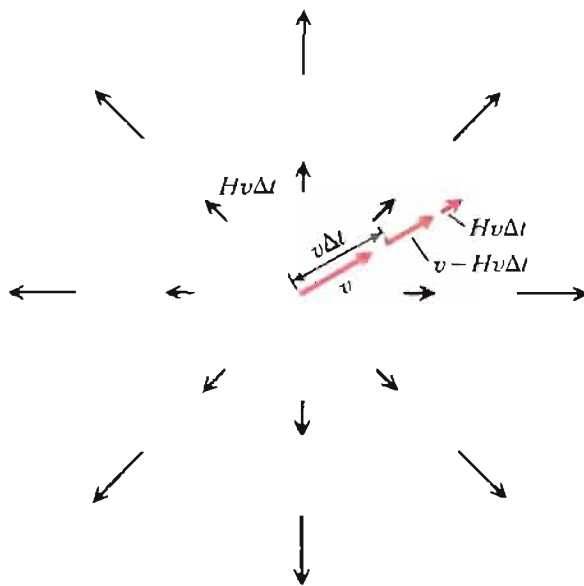
или

$$dv/v = -da/a, \quad (7.28)$$

откуда следует, что

$$v \sim 1/a. \quad (7.29)$$

Итак, скорость шайбы, скользящей по расширяющемуся катку, уменьшается обратно пропорционально масштабному фактору $a(t)$.



Скорость шайбы, скользящей по расширяющемуся катку, должна постепенно уменьшаться.

Чтобы описать замедление ультрарелятивистской шайбы, необходимо заменить уравнение (7.27) законом сложения скоростей, используемым в теории относительности:

$$v(t + \Delta t) = \frac{v(t) - H(t) \cdot v \Delta t}{1 - vH \cdot v \Delta t}. \tag{7.30}$$

После ряда преобразований и упрощений мы вместо уравнения (7.28) получаем:

$$d(\gamma v) / \gamma v = -da/a, \tag{7.31}$$

где (как и в гл. 5) $\gamma = (1 - v^2)^{-1/2}$. В гл. 5 мы видели, что импульс частицы, движущейся с произвольной скоростью, связан со скоростью соотношением

$$\mathbf{p} = \gamma m_0 \mathbf{v} = E \mathbf{v}, \tag{7.32}$$

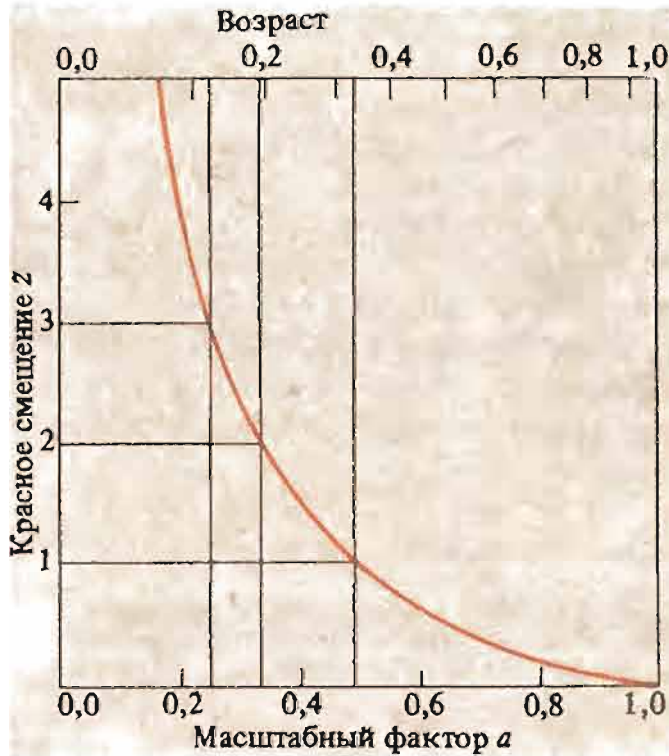
где m_0 — масса покоя частицы, E — ее энергия. И наконец, из этой формулы и уравнения (7.31) следует, что

$$p \sim 1/a. \tag{7.33}$$

Как видим, релятивистский импульс свободной частицы изменяется обратно пропорционально масштабному фактору. Нерелятивистская формула (7.29) представляет собой частный случай уравнения (7.33).

Хотя рассуждения, которые позволили нам установить, что импульс свободной частицы в расширяющейся Вселенной уменьшается, не применимы к фотонам, сама эта зависимость справедлива и в случае фотонов. Как мы уже знаем, энергия, импульс и частота фотона связаны соотношением: $E = p = h\nu$. Следовательно, поскольку импульс уменьшается, частота фотона в расширяющейся Вселенной становится все меньше, а соответствующая ему длина волны (которая в принятых нами естественных единицах равна $1/\nu$) непрерывно возрастает.

Космологическое красное смещение — это прямое следствие уменьшения энергии и импульса фотонов в расширяющемся пространстве. Величину красного смещения легко связать с изменением масштабного фактора $a(t)$ за время, прошедшее с момента излучения фотона до момента его приема. Обозначим через t_1 момент излучения фотона, через t_0 — современную эпоху, и в дальнейшем будем использовать индексы 1 и 0 для обозначения величин,



Кривая зависимости красного смещения z света удаленных объектов от масштабного фактора $a(t)$ в эпоху излучения (нижняя ось абсцисс) и от возраста Вселенной в тот же момент, выраженного в долях современного возраста, принятого равным $t_0 \approx 10^{10}$ лет (верхняя ось абсцисс). Свет с красным смещением $z = \Delta\lambda/\lambda = 2$ был излучен, когда возраст Вселенной составлял около $1/5$ современной величины. Свет с $z = 3$ был излучен, когда возраст Вселенной составлял примерно 0,1 современного. Были обнаружены квазары с красным смещением вплоть до $z = 3,5$.

относящихся к этим моментам времени; так, $a(t_1) \equiv a_1$, $\lambda(t_0) \equiv \lambda_0$ и т. д. Поскольку импульс фотона обратно пропорционален как длине волны, так и масштабному фактору, можно записать

$$\lambda_0/\lambda_1 = a_0/a_1. \quad (7.34)$$

Красное смещение (относительное изменение длины волны) z определяется как

$$z \equiv (\lambda_0 - \lambda_1)/\lambda_1. \quad (7.35)$$

Ранее мы условились принять величину масштабного фактора $a(t)$ в современную эпоху за единицу. Тогда красное смещение фотона z и масштабный фактор a_1 , соответствующий моменту излучения фотона, связаны между собой зависимостью

$$1 + z = 1/a_1. \quad (7.36)$$

По мере того как мы заглядываем все глубже во Вселенную (т. е. во все более ранние эпохи), мы видим свет, излученный при все меньших значениях масштабного фактора. Поскольку $a_0 = 0$, фотоны, испущенные в самом начале космического расширения, будут иметь для нас бесконечно большое красное смещение. На приведенном здесь рисунке представлена зависимость между величиной красного смещения и масштабным фактором, а также между величиной красного смещения и моментом излучения фотона (в предположении, что пространство евклидово).

Зная, как ведут себя свободные частицы в расширяющемся пространстве, можно предсказать поведение идеальной космической среды, которая состоит из невзаимодействующих частиц, однородно распределенных по пространству. Рассмотрим сначала газ, состоящий из частиц, движущихся со скоростью, гораздо меньшей скорости света. Температура такого газа пропорциональна средней кинетической энергии частиц, которая в свою очередь пропорциональна квадрату их импульса:

$$K = mv^2/2 = p^2/2m.$$

Но импульс свободных частиц изменяется обратно пропорционально масштаб-

ному фактору. Следовательно, *температура нерелятивистского газа убывает обратно пропорционально квадрату масштабного фактора.*

Рассмотрим теперь газ, состоящий из ультрарелятивистских частиц. Кинетическая энергия, полная энергия и импульс ультрарелятивистских частиц приблизительно (а для частиц с нулевой массой покоя — точно) равны. Следовательно, *температура ультрарелятивистского газа убывает обратно пропорционально масштабному фактору.*

В следующем разделе мы рассмотрим особенно интересный пример ультрарелятивистского газа.

Микроволновое фоновое излучение в расширяющейся Вселенной

Весной 1964 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон из американской научно-исследовательской фирмы «Белл телефон лабораторис» занимались подготовкой к измерениям интенсивности непрерывного излучения Галактики на длине волны 20 см (что чуть короче длины волны, соответствующей эмиссионной линии атомарного водорода). Программа намеченных наблюдений в принципе была проста: 1) измерить сигнал, поступающий на вход приемника; 2) измерить шумы, связанные с антенной и приемником; 3) вычтя второй сигнал из первого, получить истинное значение интересующего их сигнала. Абсолютные измерения такого рода — технически чрезвычайно сложная процедура. Пензиас и Вильсон решились на эти измерения, поскольку располагали очень чувствительной приемной аппаратурой с предельно низким уровнем шумов (которую первоначально предполагалось использовать для связи со спутниками).

Ожидалось, что сигнал будет очень слабым и по спектру неотличимым от шума, создаваемого антенной и приемником, поэтому шум, вносимый аппаратурой, требовалось учесть с особой тщательностью. Почти все составляющие этого шума можно было с нужной точностью измерить и рассчитать заранее. Лишь уровень шума самой антенны (рупорного рефлектора с апертурой около 6 м) необходимо было уточнить дополнительно.

С этой целью Пензиас и Вильсон настроили приемник на длину волны 7,3 см и направили антенну на участок неба, который, как предполагалось, был почти абсолютно «темным» в этом диапазоне. К своему удивлению, они обнаружили, что принятый сигнал гораздо сильнее, чем ожидалось.

Прошло около года, прежде чем двое ученых окончательно убедились в том, что ни антенна, ни какой-либо другой блок радиотелескопа не ответственны за избыточный сигнал: его источник явно имел внешнее происхождение. По своему характеру сигнал выглядел весьма необычно: его интенсивность была одинаковой во всех направлениях и не зависела ни от положения Солнца, ни от ориентации антенны относительно Земли. Кроме того, сигнал был неполяризован. Аналогичный сигнал могло создать испорченное («шумящее») сопротивление. Однако Пензиас и Вильсон отвергли и эту, и другие подобные возможности. Источник сигнала, по всей вероятности, скрывался где-то вне телескопа. Но где?

Все объекты, которые предположительно могли бы служить источником наблюдаемого излучения, они разделили на четыре группы: источники земного происхождения, объекты Солнечной системы, источники в пределах нашей Галактики и, наконец, внегалактические источники. Чтобы выявить принадлежность источника к одной из первых трех групп, требовалось исследовать, как меняется интенсивность принимаемого сигнала в зависимости от направления.

Интенсивность излучения земных источников должна зависеть от ориентации

антенны; интенсивность излучения объектов, расположенных в пределах Солнечной системы, должна изменяться на протяжении суток или в течение года, тогда как интенсивность галактических источников должна варьироваться в зависимости от галактической широты и долготы. Однако Пензиас и Вильсон не смогли обнаружить такого рода изменений: сигнал имел одинаковую интенсивность во всех направлениях и не менялся со временем.

Оставалась лишь одна возможность — предположить, что сигнал порожден множеством каких-то удаленных радиоисточников. Но такая гипотеза обладала существенным недостатком. Дело в том, что все известные к тому времени внегалактические радиоисточники были гораздо ярче в метровом диапазоне длин волн, чем в сантиметровом. Если бы наблюдаемое излучение было обусловлено совокупностью такого рода источников, то вследствие их высокой яркости в метровом диапазоне они, без сомнения, давно были бы обнаружены радиоастрономами.

Между тем, в Принстоне (шт. Нью-Джерси), всего в нескольких милях от Холмдейла, где Пензиас и Вильсон проводили свои наблюдения, группа ученых, возглавляемая Робертом Дикке, приступила к поискам изотропного фонового излучения на длине волны 3 см; для этих целей специально была сконструирована малозумящая приемная аппаратура. Дикке надеялся обнаружить излучение, по спектру близкое излучению абсолютно черного тела с температурой несколько градусов по шкале Кельвина (в гл. 8 мы расскажем о том, что побудило его к таким исследованиям). Пензиас и Вильсон даже не рассматривали возможность существования излучения такого рода.

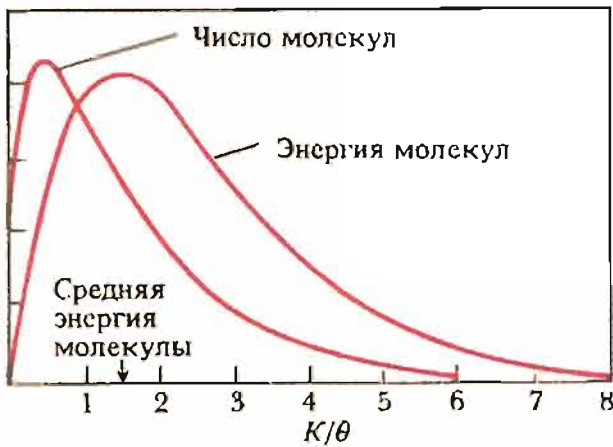
Познакомившись с работами друг друга, исследователи представили в журнал *Astrophysical Journal* две статьи — одну от имени Пензиаса и Вильсона с описанием результатов их измерений, другую — от Дикке и его группы с теоретической интерпретацией этих результатов.

Однако природа, да и сам факт существования излучения, обнаруженного Пензиасом и Вильсоном, оставались под сомнением до тех пор, пока несколько месяцев спустя группа Дикке не осуществила собственные измерения на длине волны 3 см. Их наблюдения полностью подтвердили результаты Пензиаса и Вильсона. Как на волне 3 см, так и на волне 7,3 см излучение имело одинаковую интенсивность во всех направлениях, более того, она соответствовала предсказанной интенсивности излучения абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Дальнейшие наблюдения подтвердили, что спектр обнаруженного излучения соответствует излучению абсолютно черного тела в широком диапазоне длин волн: 0,5 — примерно 50 см.

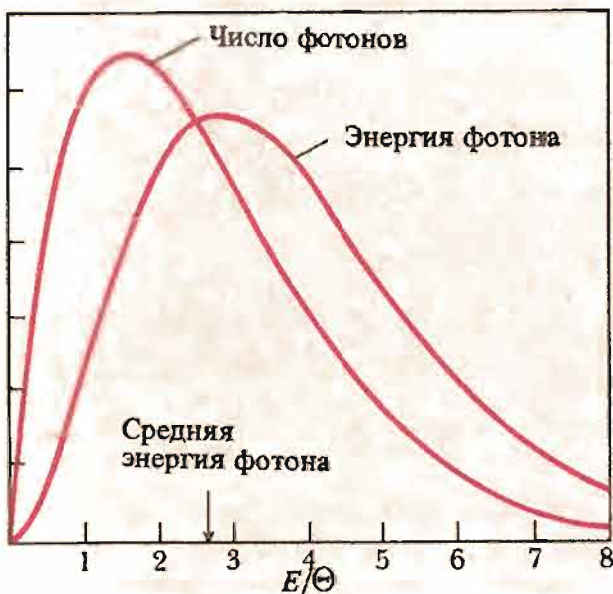
Что представляет собой излучение абсолютно черного тела и почему открытие космического фонового излучения считается самым важным достижением наблюдательной космологии после открытия Хабблом явления разбегания галактик? Ответы на эти вопросы тесно связаны между собой.

Если какое-то количество газа поместить в сосуд, стенки которого поддерживаются при постоянной температуре, то средняя кинетическая энергия частиц постепенно приближается к некоторому предельному значению, а распределение молекул по энергиям приобретает вполне определенный характер. В конечном итоге, когда в газе достигается состояние равновесия, средняя кинетическая энергия молекулы оказывается прямо пропорциональной температуре стенок сосуда, а распределение молекул по энергиям описывается некой универсальной функцией отношения E/Θ , где E — кинетическая энергия молекулы, Θ — абсолютная температура. График этой универсальной функции, полученной Людвигом Больцманом и Джеймсом Клерком Максвеллом, изображен на рисунке.

Если стенки сосуда непрозрачны, то в конце концов сосуд окажется



Распределение Максвелла — Больцмана для кинетической энергии молекул. Относительное число молекул, энергия которых лежит в некотором определенном интервале, пропорционально высоте левой кривой при соответствующем значении K/θ и ширине интервала. K — кинетическая энергия, θ — абсолютная температура, выраженная в энергетических единицах: $\theta = 1,4 \cdot 10^{-16} T$, где T — температура, измеренная по шкале Кельвина. Доля общей энергии газа, переносимой молекулами, энергия которых приходится на данный узкий интервал, пропорциональна высоте правой кривой в точке с соответствующей энергией.



Закон излучения Планка, описывающий распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Относительное число фотонов, энергия которых лежит в пределах данного энергетического интервала (или в соответствующей полосе частот), пропорционально высоте кривой в точке с соответствующей величиной E/θ ($= h\nu/\theta$) и ширине энергетического интервала (или полосы частот). Доля энергии равновесного излучения, приходящаяся на узкий диапазон энергий (или частот), пропорциональна высоте правой кривой в точке с соответствующей энергией (частотой).

заполненным излучением, которое имеет одинаковую во всех направлениях интенсивность и одинаковую во всех точках плотность энергии. Это однородное и изотропное поле излучения можно рассматривать как фотонный газ. Средняя энергия фотонов в конечном состоянии прямо пропорциональна температуре стенок сосуда, а распределение фотонов по энергиям описывается универсальной функцией, аргументом которой служит отношение $h\nu/\theta$. Эта функция, впервые полученная Максом Планком в 1900 г., положила начало квантовой физике. Ее график изображен на нижнем рисунке. Излучение такого рода принято называть излучением абсолютно черного тела (равновесным или тепловым излучением). Отношение средней энергии фотонов к температуре не равно отношению средней энергии молекул к температуре, и функция Планка не совпадает с функцией Максвелла — Больцмана. Однако самое важное различие между равновесным газом фотонов и газом частиц с ненулевой массой покоя заключается в том, что как число фотонов в единице

объема, так и их средняя энергия зависят от температуры. Можно показать, что концентрация фотонов пропорциональна кубу температуры, так что плотность энергии равновесного излучения пропорциональна четвертой степени температуры.

Хотя температура газа может меняться от точки к точке, как, например, в атмосфере Земли, локальное распределение кинетической энергии молекул, как правило, весьма близко к равновесному распределению Максвелла — Больцмана (см. рисунок), поскольку в результате соударений между молекулами кинетическая энергия перераспределяется случайным образом. Распределение молекул по энергиям, описываемое формулой Максвелла — Больцмана, соответствует наибольшей степени беспорядка. В отличие от молекул фотоны не могут обмениваться энергией непосредственно. Излучение, заключенное в сосуд с зеркальными стенками, навечно сохранит свой первоначальный (в общем случае неравновесный. — *Перев.*) спектр. Релаксация или *термализация* излучения происходит лишь при наличии частиц вещества, которые поглощают и переизлучают фотоны. Заметим, что этот процесс, вообще говоря, не очень эффективен. С качественной точки зрения солнечный свет, падающий на поверхность Земли, в видимой области спектра мало отличается от света, излучаемого с поверхности Солнца. Температура внешних слоев солнечной атмосферы (фотосферы), откуда излучение почти беспрепятственно выходит наружу, около 6000 К. Поэтому солнечный свет имеет спектр, сходный со спектром излучения абсолютно черного тела при этой температуре. Однако 1 м³ солнечного света вблизи поверхности Земли, если его преобразовать в равновесное излучение с той же полной энергией, будет иметь температуру всего лишь порядка 300 К. Процесс термализации, увеличив число фотонов в 20 раз, во столько же раз уменьшит среднюю энергию фотона.

Теперь нетрудно понять, почему космическое микроволновое излучение представляет такой огромный интерес. Вселенная — в ее современном виде — почти полностью прозрачна для радиоизлучения в сантиметровом и миллиметровом диапазоне. Следовательно, *это излучение не могло возникнуть при условиях, хотя бы отдаленно напоминающих нынешние*. Наблюдаемое фоновое микроволновое излучение могло возникнуть лишь в ту эпоху, когда Вселенная была гораздо более непрозрачной в соответствующем диапазоне длин волн и, следовательно, значительно более плотной, чем ныне.

Но если Вселенная была заполнена таким равновесным излучением на более ранней стадии, когда она была более плотной, могло ли излучение сохранить свой характер по мере расширения и охлаждения Вселенной? Да, это возможно. Как мы видели, распределение фотонов по энергиям в равновесном излучении описывается универсальной функцией, аргументом которой служит отношение $h\nu/\Theta$. Мы также знаем, что при расширении Вселенной частота фотона изменяется пропорционально $1/a$. Это означает, что распределение фотонов по энергиям по-прежнему должно описываться той же самой универсальной функцией, где температура Θ изменяется по закону $1/a$. Как мы говорили, плотность излучения абсолютно черного тела пропорциональна кубу температуры. По мере расширения Вселенной число фотонов в единице объема убывает пропорционально $1/a^3$, поскольку внутри сферы, радиус которой изменяется пропорционально масштабному фактору, число фотонов остается неизменным. Но именно при такой скорости уменьшения числа фотонов плотность фотонов все время соответствует равновесному характеру излучения, поскольку, как мы только что видели, температура, определяемая по спектру излучения, убывает пропорционально $1/a$. Таким образом, равновесное излучение, которое перестало взаимодействовать с веществом, сохра-



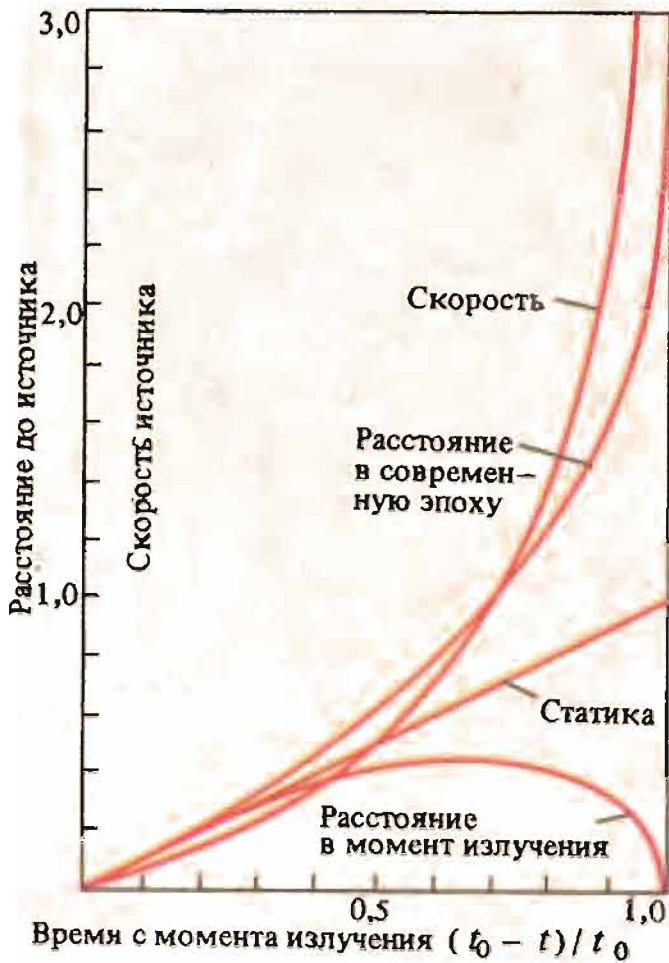
Скопление галактик, наблюдаемое в направлении созвездия Геркулес. Снимок получен с помощью 4-метрового телескопа Национальной обсерватории Китт-Пик, расположенной неподалеку от Тюссона (шт. Аризона). (Национальная обсерватория Китт-Пик.)

няет свой характер по мере расширения Вселенной. Его температура должна падать обратно пропорционально (возрастающему) масштабному фактору, а плотность его энергии — уменьшаться обратно пропорционально четвертой степени масштабного фактора.

Измерения на больших расстояниях

Расширение Вселенной — это расширение самого пространства*, а не систематическое разбегание галактик в статическом пространстве. На первый взгляд такое противопоставление может показаться несущественным. Однако свет по-разному ведет себя в неподвижном и расширяющемся пространстве, а поскольку почти вся информация в космологии основана на анализе света и других видов электромагнитного излучения (часть информации дают космические лучи, которые представляют собой частицы вещества), это различие очень важно. Предположим, что фотон, испущенный удаленным источником в момент t , зарегистрирован наблюдателем, положение которого мы примем за начало отсчета расстояний, в момент t_0 . В статическом евклидовом пространстве расстояние до источника r равно разности $t_0 - t$. (Напомним, что время и расстояние в естественных единицах имеют одинаковую размерность). В расширяющемся евклидовом пространстве радиальная координата r связана с моментами t и t_0 более сложным образом. Установим эту связь.

* Выражение «расширение самого пространства» звучит весьма загадочно. Без него вполне можно обойтись. Как следует из дальнейшего, автор, видимо, хочет подчеркнуть, что распространение света описывается формулой (7.2), т. е. учитывается кривизна пространства-времени (или гравитационное поле). — *Прим ред.*



В расширяющейся Вселенной *современное* расстояние до источника, свет которого мы принимаем сегодня, больше, чем было бы в статической Вселенной, где расстояние прямо пропорционально времени, за которое свет проходит путь до наблюдателя. С другой стороны, в расширяющейся Вселенной *в момент излучения* тот же источник был к нам ближе, чем в статическом пространстве. Эффект расширения не сказывается на малых расстояниях. Заметим, что источник, излучивший свет в начале расширения ($t = 0$), в тот момент находился там же, где сейчас находится наблюдатель; теперь же этот источник расположен от нас на расстоянии, в три раза превышающем время, прошедшее с начала расширения ($3 \cdot 10^{10}$ св. лет, если считать, что $t_0 = 10^{10}$ лет).

Интервал собственного времени между событиями в истории фотона равен нулю. Поэтому из уравнения (7.2) следует, что пространственный и временной интервалы между событиями в истории сферической световой волны, исходящей из начала координат, связаны между собой соотношением

$$0 = dt^2 - a^2(t)dr^2, \tag{7.37}$$

или

$$dr = dt/a(t). \tag{7.38}$$

В статическом пространстве масштабный фактор $a(t)$, современное значение которого мы принимаем за 1, не входит в выражение типа (7.38). Интегрируя (7.38) в пределах от 0 до r и от момента излучения t до момента приема t_0 и учитывая, что $a(t) = (t/t_0)^{2/3}$, получаем

$$r_0(t) = \int_t^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = 3t_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/3} \right]. \tag{7.39}$$

Соответствующая кривая изображена на рисунке. Она совпадает с графиком функции $r = t_0 - t$ при условии $(t_0 - t) \ll t_0$, однако если, заглядывая все дальше в прошлое, приближаться к моменту $t = 0$, то r стремится не к t_0 , а к $3t_0$.

Расстояние от источника света до наблюдателя в момент излучения равно $a(t)r$. Эта зависимость также представлена на рисунке. В отличие от радиальной координаты r данное расстояние не возрастает монотонно по мере того, как мы заглядываем все глубже в прошлое: достигнув максимального значения, оно затем убывает до нуля при $t \rightarrow 0$. Таким образом, источники, которые в данный момент находятся вблизи границы наблюдаемой Вселенной, были расположены близко к нам, когда излучали свет, дошедший до нас только сейчас.

Связь между различными параметрами удаленных источников света в статическом и расширяющемся евклидовых пространствах

Параметры	Расширяющееся пространство	Статическое пространство
Радиальная координата — время	$r = 3t_0[1 - (t/t_0)^{1/3}]$	$r = t_0 - t$
Радиальное расстояние — время	$R = a(t)r = (t/t_0)^{2/3} \cdot r$	$R = r$
Скорость удаления — время	$V = 2 \left[\left(\frac{t_0}{t} \right)^{1/3} - 1 \right]$	—
Красное смещение — скорость	$\frac{\lambda_0}{\lambda} = 1 + z = \left(1 + \frac{1}{2}V \right)^2$	$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \left(\frac{1+V}{1-V} \right)^{1/2}$
Красное смещение — масштабный фактор	$1 + z = \frac{1}{a} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{2/3}$	—
Угловой диаметр — расстояние	$\theta = \frac{D}{r}$	$\theta = \frac{D}{r}$
Угловой диаметр — красное смещение	$\theta = \frac{D}{3t_0} \frac{(1+z)^{3/2}}{(1+z)^{1/2} - 1}$	—
Видимая яркость — расстояние	$l = \frac{a^2 L}{4\pi r^2}$	$l = \frac{L}{4\pi r^2}$
Видимая яркость — красное смещение	$l = \frac{1}{36\pi t_0^2} \times$ $\times \frac{L(z)}{(1+z)[(1+z)^{1/2} - 1]^2}$	—
Поверхностная яркость — красное смещение	$\frac{l}{\theta^2} \sim \frac{1}{(1+z)^4}$	$\frac{l}{\theta^2} = \text{const}$

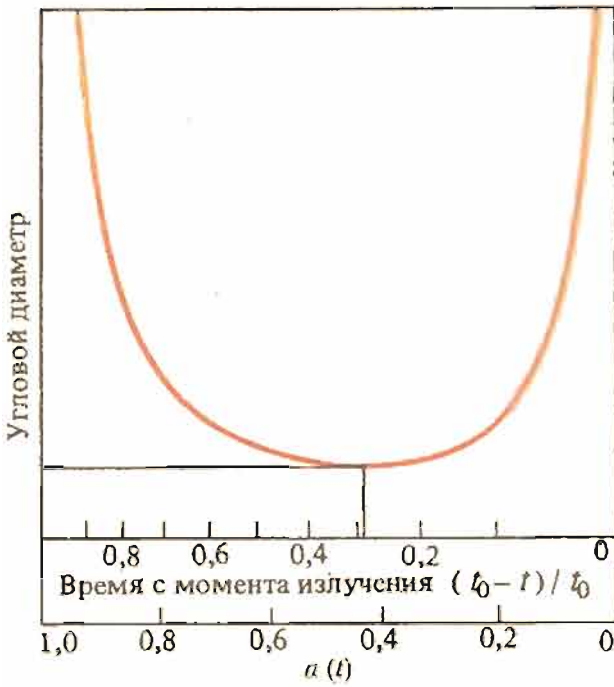
Скорость источника V в момент времени t можно определить из установленной Хабблом зависимости скорость — расстояние:

$$V(t) = H(t) \cdot a(t)r. \tag{7.40}$$

График функции $V(t)$ также приведен на рисунке. Из рисунка видно (и это нетрудно доказать аналитически), что наиболее далекие в момент излучения источники удалялись от нас со скоростью света ($V = 1$). Объекты, удаляющиеся со скоростью выше световой, в момент излучения были ближе к нам. Скорость V неограниченно растет по мере того, как мы заглядываем все глубже в прошлое. (Это утверждение не противоречит специальной теории относительности, поскольку она применима лишь для пространственно-временных областей, внутри которых эффекты космического расширения пренебрежимо малы*.)

Ни одну из рассмотренных величин (радиальную координату r , время излучения t , расстояние в определенный момент времени ar , скорость удаления V) нельзя измерить непосредственно. Простейшими измеримыми характеристиками удаленных источников являются красное смещение z , угловой диаметр θ , видимая яркость l и поверхностная яркость l/θ^2 . В приведенной выше таблице показано, как эти величины связаны между собой в расширяющейся евклидовой Вселенной и в статическом евклидовом пространстве. График

* Вместе с тем на больших расстояниях утрачивает непосредственный смысл скорость и величина $V(t)$, определенная формулой (7.40). — *Прим. ред.*



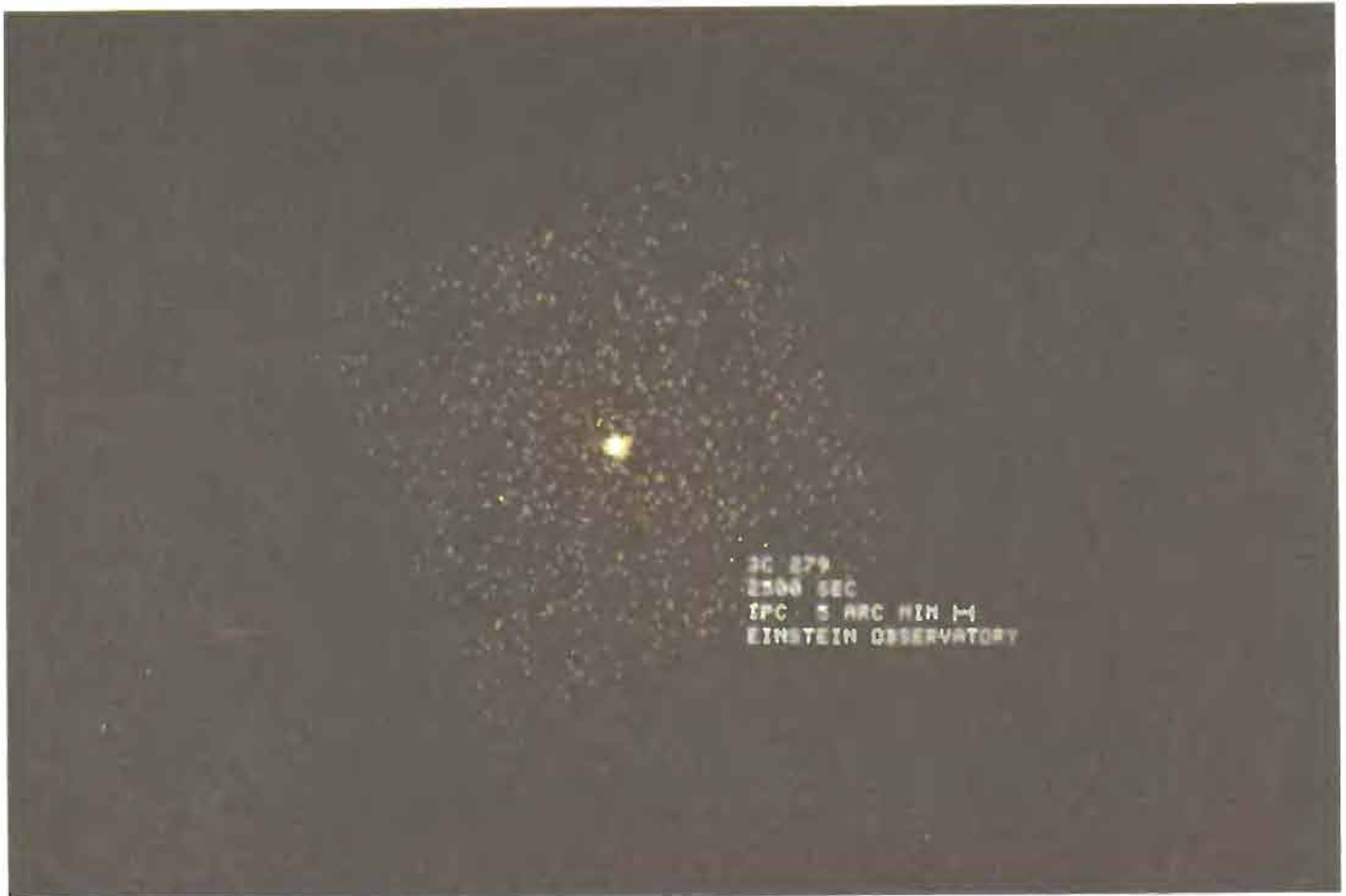
Зависимость углового диаметра (или параллакса) в расширяющемся евклидовом пространстве от масштабного фактора $a(t)$ в момент излучения. Вдоль второй оси абсцисс отложено время $t_0 - t$, за которое свет достигает наблюдателя, выраженное в единицах времени t_0 , прошедшего с момента начала расширения. Минимальный угловой размер (среди объектов с одинаковым линейным размером — *Перев.*) в расширяющемся евклидовом пространстве имеют источники, излучившие свет при $a \approx 1/3$. Источники, излучившие свет ранее, были в момент излучения ближе к нам (см. предыдущий рисунок)



Наблюдаемые фотометрические характеристики видимой величины и поверхностной яркости источника в расширяющемся евклидовом пространстве как функция красного смещения. Видимая величина равна взятому со знаком минус логарифму видимой светимости l . Поверхностная яркость равна логарифму светимости на единицу площади поверхности небесной сферы (или на один квадратный градус). Величина $-lg l$ в 2,5 раза меньше принятой в астрономии единицы измерения блеска — звездной величины. Для сравнения показано поведение величины $-lg l$ в том случае, когда пространство статическое, но расстояние до источника пропорционально красному смещению. Как можно видеть, поверхностная яркость удаленных источников начинает очень быстро падать с увеличением красного смещения с того места, когда влияние расширения Вселенной на величину $-lg l$ становится заметным (там, где кривые $-lg l$ расходятся).

зависимости углового диаметра, видимой яркости и поверхностной яркости от красного смещения приведены на рисунках.

Заметим, что формула, связывающая величину красного смещения излучения галактики со скоростью ее удаления, отличается от соответствующих выражений как в нерелятивистском, так и в релятивистском случае, хотя и совпадает с обоими в пределе малых скоростей. Источник, удаляющийся от нас в момент излучения со скоростью света, характеризуется конечным красным смещением $z = 5/4$. Такой источник имеет наименьшие угловые размеры по сравнению с другими источниками того же линейного диаметра. В частности, источники, удаляющиеся в момент излучения со скоростью, превышающей скорость света, имеют большие угловые размеры. Может показаться странным, что свет от источника, движущегося со скоростью, превышающей скорость света, вообще доходит до нас. Это можно объяснить так. Сначала



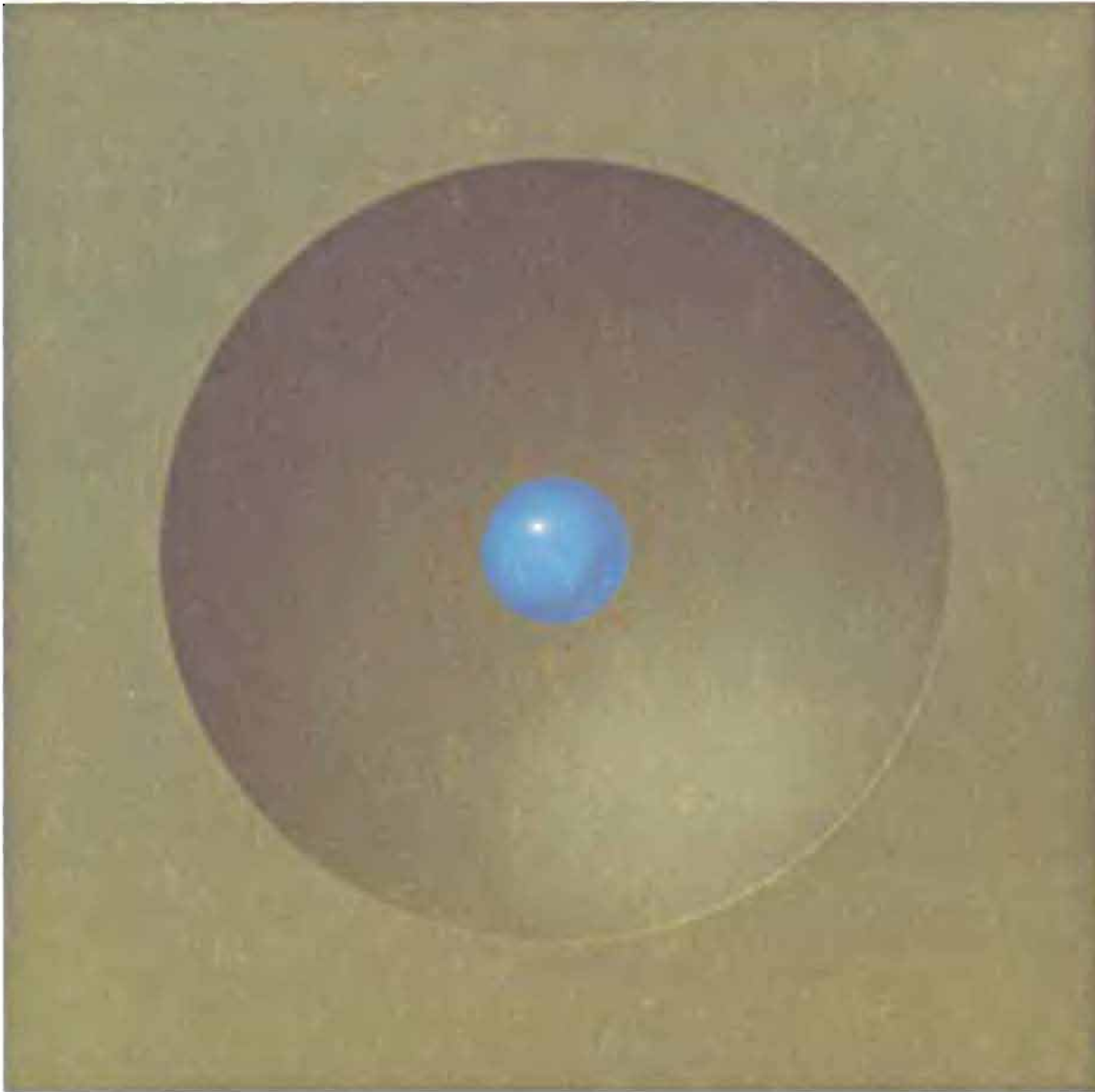
Рентгеновское изображение квазара 3С 279. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. Х. Тэненбаум.)

фронт волны, излученной таким источником, действительно удаляется от нас, но по мере того как скорость расширения Вселенной уменьшается, фронт волны удаляется от нас все медленнее и наконец начинает все быстрее и быстрее приближаться к наблюдателю.

Космические координаты и локально инерциальные системы отчета

Идеализированные модели Вселенной, которые мы рассматривали, не содержали мелкомасштабных структур. Теперь обсудим модель, которая несколько ближе к реальности. Вообразим Вселенную, плотность вещества в которой однородна везде, за исключением сферической области, радиус которой пропорционален масштабному фактору $a(t)$. Предположим далее, что вся масса, необходимая для того, чтобы сделать плотность внутри этой области равной плотности вне ее, сосредоточена в центре полости.

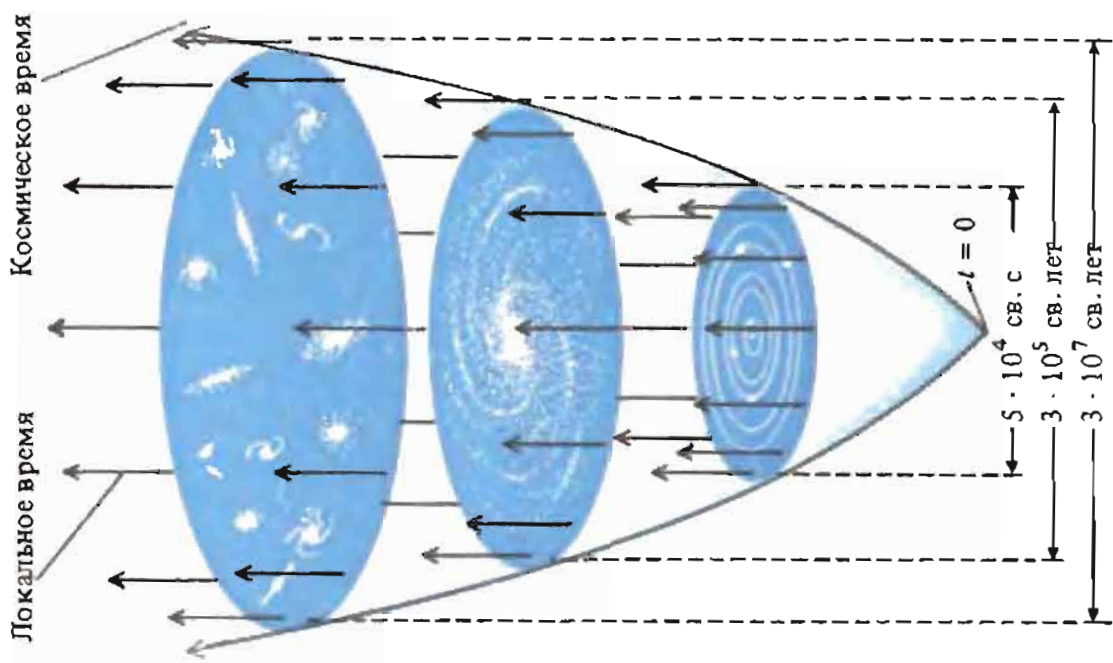
Согласно общей теории относительности Эйнштейна, гравитационное поле вне полости не зависит от того, сосредоточена ли вся масса в центре полости или равномерно распределена внутри нее. Иными словами, полость, в центре которой находится точечная масса, не влияет на расширение остальной части Вселенной. И наоборот, остальная часть Вселенной не влияет на гравитационное поле внутри полости. Вместе с тем по теории Эйнштейна пространственно-временные координатные сетки внутри и вне области должны стыковаться друг с другом плавно, без разрывов. Это условие подразумевает, в частности, что система отсчета, в которой гравитационное поле точечной массы описывается уравнениями Шварцшильда [(6.22) и 6.23)], не вращается относительно остальной части Вселенной (см. левый рисунок на с. 267).



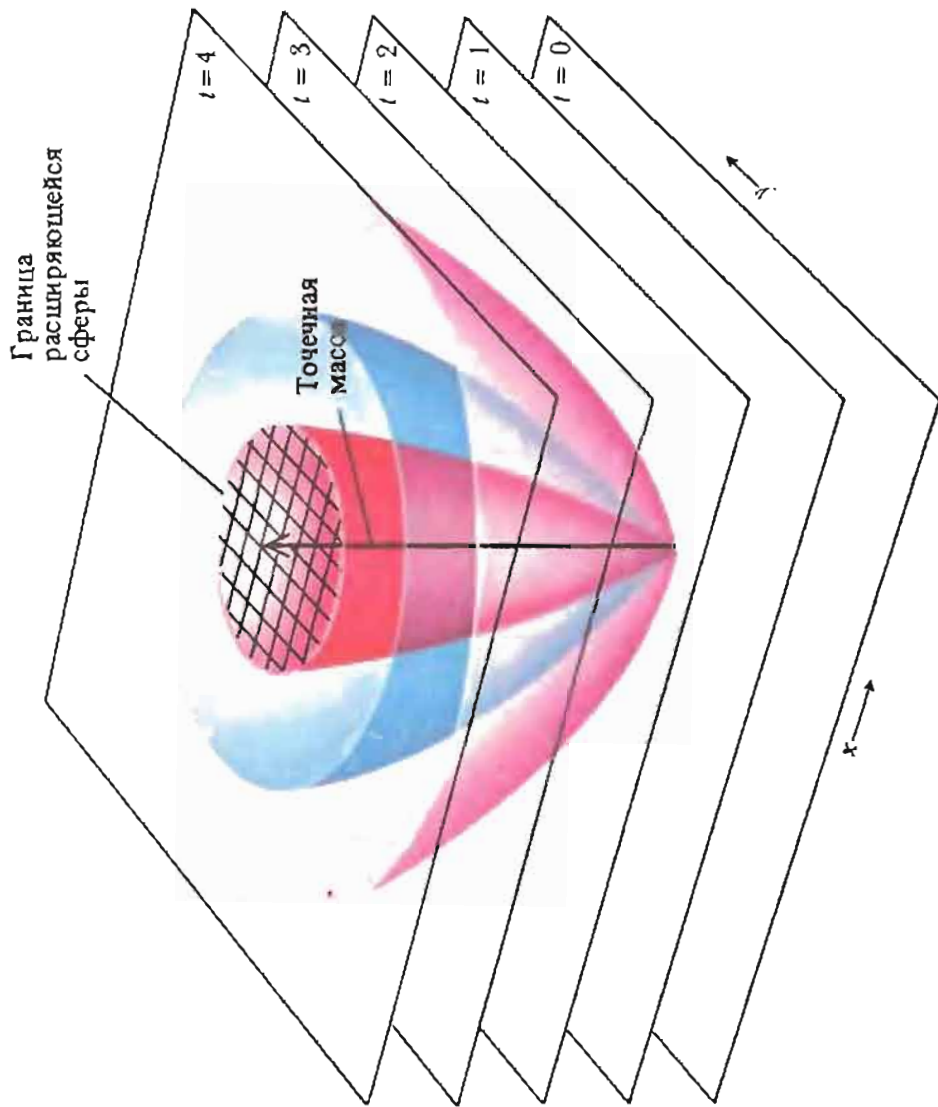
Расширяющаяся сферическая область, вся масса которой сосредоточена в центре, а средняя плотность остается все время равной плотности окружающей ее однородной среды.

Точечную массу можно заменить любой достаточно компактной самогравитирующей системой. Нет также необходимости предполагать, что распределение массы вне выделенной полости гладкое: гравитационные эффекты, обусловленные сгущением, сказываются лишь на расстояниях, сравнимых с размерами неоднородностей. Главное, чтобы локальные координатные сетки непрерывным образом стыковались с координатными сетками расширяющейся Вселенной. Это требование связывает локально инерциальные системы отсчета с распределением массы и законом ее движения во Вселенной (см. последний рисунок). Таким образом, как и раньше, мы можем заключить, что Вселенная в целом не влияет на динамику отдельных компактных самогравитирующих областей, но выделяет класс систем отсчета, в которых теория Ньютона применима в качестве первого приближения. Эти системы движутся без ускорения относительно космической системы отсчета, существование которой гарантируется космологическим принципом.

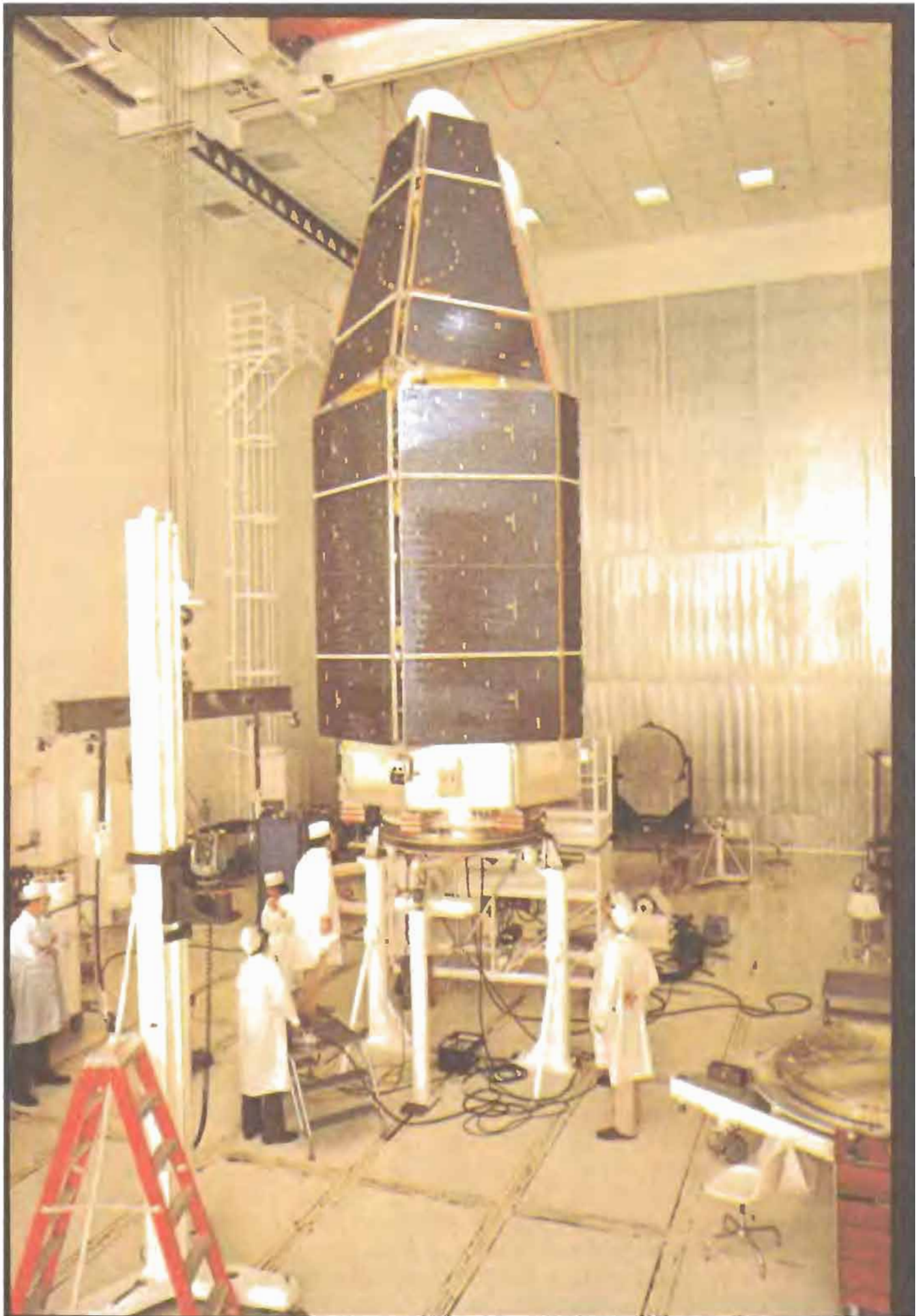
Итак, мы видим, что пространство — это расширяющаяся мозаика, элементами которой служат статические евклидовы пространства, слегка искривленные локальными скоплениями массы. В следующей главе речь пойдет о происхождении отдельных элементов мозаики и связанных с этим проблемах.



Космическое пространство представляет собой расширяющуюся мозаику, состоящую из нерасширяющихся элементов, т. е. из локальных областей, в которых располагаются гравитационно связанные системы. Хотя отдельные элементы и не расширяются, они увеличиваются по мере того, как все более крупные самогравитирующие системы обособляются, возможно, таким образом, как описано в следующей главе.



Для описания пространства-времени, заключенного внутри расширяющейся сферической полости, используются формулы Минковского, а пространства вне полостной — формулы Фридмана. Условие непрерывности пространственно-временных сеток на границе области выделяет локально невращающуюся систему отсчета, начало координат которой совпадает с расположенной в центре полости точечной массой.



Космическая эволюция

Как бытие относится к рождению, так истина относится к вере. А потому не удивляйся, Сократ, если мы, рассматривая во многих отношениях много вещей, таких, как боги и рождение Вселенной, не достигнем в наших рассуждениях полной точности и непротиворечивости.*

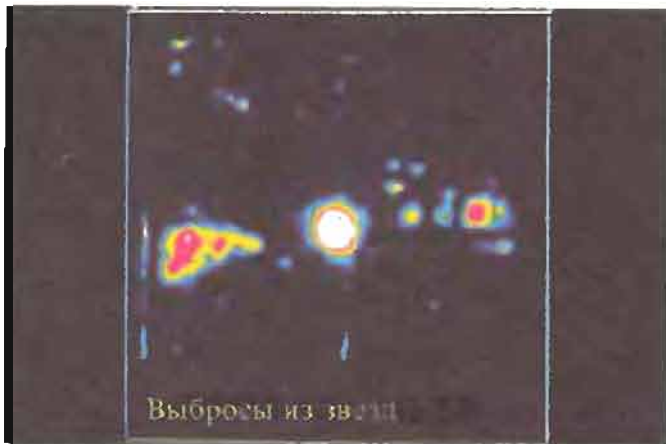
Платон

Какие процессы обусловили существующую иерархию самогравитирующих систем и как начиналось ее формирование? Каково происхождение космического фонового излучения? Эти вопросы качественно отличаются от тех, которые мы рассматривали в предыдущих главах. До сих пор основное внимание мы уделяли физическим законам, а также их проявлению в структуре и динамике астрономических систем. Физические законы обуславливают ряд закономерностей, наблюдаемых в астрономической Вселенной, но далеко не все. Так, закон всемирного тяготения Ньютона позволяет объяснить три кеплеровских закона движения планет, но не объясняет, почему орбиты всех планет близки по форме к окружностям и лежат почти в одной плоскости. Эти особенности строения Солнечной системы связаны с эволюционными процессами. И хотя сами процессы протекают в соответствии с законами, которые, по-видимому, нам достаточно ясны, конечный результат зависит от того, какой была Солнечная система в период ее зарождения. Аналогично из законов физики следует, что фоновое микроволновое излучение когда-то должно было сильно взаимодействовать с веществом; однако эти законы ничего не говорят об источнике реликтовых фотонов.

Вопросы, связанные с происхождением различных астрономических структур, сложны, поскольку они тесно переплетаются между собой. Чтобы понять,

* Платон. Сочинения в 3-х томах. — М.: Мысль, 1971. Т. 3, С. 470.

Рентгеновский телескоп космической обсерватории «Эйнштейн» в процессе установки на космический аппарат. Наблюдения в рентгеновском диапазоне следует проводить за пределами земной атмосферы, поскольку она непрозрачна для коротковолнового излучения. В фокусе телескопа размещена разнообразная аппаратура для регистрации изображений и спектрального анализа. В наблюдениях, продолжительность которых составляла от нескольких тысяч секунд до нескольких недель, принимали участие астрономы всего мира. Приведенные в этой главе фотографии (выполненные в условных цветах) показывают, как выглядит небо в рентгеновском диапазоне при наблюдении с обсерватории «Эйнштейн». (Корпорация TRW.)



Рентгеновское изображение необычного объекта SS 433. Излучение создается ярким центральным источником и двумя струями газа, выбрасываемыми из центра системы. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. М. Уотсон, Р. Уиллингейл.)

почему все планеты движутся в одну сторону по орбитам, которые по форме близки к окружностям и лежат почти в одной плоскости, а орбиты комет сильно вытянуты и ориентированы случайным образом, необходимо знать, как выглядела протосолнечная туманность. Для этого нужна теория звездообразования, которая в свою очередь может быть создана лишь в контексте теории образования и эволюции галактик. А как мы увидим далее, проблема происхождения звезд и галактик неразрывно связана с вопросом о происхождении реликтового излучения.

Возможно, именно по этой причине развитие данной отрасли знаний происходит довольно медленно. По-прежнему не создано ни одной космогонической теории с высокой степенью определенности. Самая распространенная теория ранней Вселенной (так называемая «стандартная модель», которую мы рассмотрим в следующем разделе) сначала получила множество убедительных подтверждений в наблюдениях, но, как мы узнаем далее, впоследствии вступила с ними в противоречие. В заключении главы мы предложим альтернативную теорию ранней Вселенной.

В рамках «стандартной модели» фоновое микроволновое излучение интерпретируется как след первоначального горячего состояния — своеобразного «первичного огненного шара». Предполагается, что фотоны, образующие ныне микроволновый фон, существовали в самые первые мгновения истории наблюдаемой Вселенной, по крайней мере начиная с момента, для описания которого применимы известные физические законы. Поскольку температура фонового космического излучения уменьшается обратно пропорционально масштабному фактору (см. конец гл. 7), можно предположить, что первоначальное состояние характеризовалось очень высокими температурами. Например, когда возраст Вселенной равнялся секунде ($t=1$ с), температура достигла порядка 10^{10} К, а при $t=100$ с составляла около 10^9 К. При столь высоких температурах все частицы, включая фотоны, имеют сравнимые энергии, а поскольку, согласно наблюдениям, на один нуклон (протон или нейтрон) тогда (как и в наше время) приходилось около 10^8 фотонов, можно заключить, что практически вся энергия первичного огненного шара была сосредоточена в излучении.

Более того, протоны и электроны были вкраплены в окружающее излучение, словно изюминка в разбухающее тесто. Лишь после того, как температура упала примерно до 4000 К и протоны смогли соединиться с электронами, образовав (электрически нейтральные) атомы водорода, произошло разделение излучения и частиц вещества, которые тем самым получили возможность собираться в самогравитирующие комплексы.

Как было показано в гл. 4, масса M , размер D и дисперсия скоростей $\langle v^2 \rangle$ самогравитирующей системы связаны между собой простым соотношением $\langle v^2 \rangle = M/D$. Поскольку дисперсия скоростей пропорциональна темпе-

ратуре, а масса и размер определяют среднюю плотность системы, отсюда следует, что *масса M самогравитирующих систем определяется их температурой и плотностью*. Отдельная область охлаждающейся космической среды, масса которой меньше величины M , соответствующей плотности и температуре среды в данный момент, *не может обособиться*, ибо ее тяготение недостаточно велико для того, чтобы уравновесить направленные наружу силы давления. Если масса области больше M , то она *может выделиться* при условии, что ее плотность больше, чем плотность окружающей среды. В тот момент, когда произошло разделение излучения и вещества, масса газового облака, способного отделиться от окружающей среды, должна была составлять примерно не менее $10^6 M_{\odot}$. Это значит, что *одиночные и кратные звезды, а также звездные скопления умеренных размеров должны были образоваться позднее в результате каких-то других процессов*.

Хотя газовые облака с массой свыше $10^6 M_{\odot}$ в принципе могли бы образоваться, когда температура космического излучения упала до нескольких тысяч градусов, в действительности этого бы не случилось, если бы космическая среда к тому моменту уже не содержала начальных неоднородностей соответствующего размера. Однородный космический газ при температурах и плотностях, принятых в «стандартной модели», никогда не смог бы сам по себе фрагментировать на самогравитирующие облака какого бы то ни было размера. Итак, согласно *стандартной модели, Вселенная должна была обладать рядом первичных крупномасштабных неоднородностей плотности*.

Высказывались различные мнения относительно структуры первичных флуктуаций плотности. Однако, если верить расчетам, выполненным в последние годы, предположения, на которых основаны эти суждения, неверны. Эта и ряд других причин, о которых речь пойдет далее, привели к тому, что между сторонниками гипотезы огненного шара возникли разногласия по поводу истории Вселенной.

Космический огненный шар: гипотеза ищет обоснование

В 1946 г. Г. А. Гамов опубликовал свою теорию образования химических элементов, в которой предполагалось, что изначально все вещество состояло из нейтронов. Случайно сталкиваясь, два нейтрона образуют дейтрон (ядро, состоящее из протона и нейтрона) и электрон. Захватывая нейтрон, дейтрон превращается в ядро трития (ядро, содержащее два нейтрона и один протон), которое в свою очередь также может захватить нейтрон и т. д., вплоть до образования ядер с атомной массой порядка 250. Некоторые из образовавшихся таким образом ядер неустойчивы и распадаются с испусканием электрона и антинейтрино (этот процесс называется бета-распадом). Простые расчеты, уточненные впоследствии его коллегами Ральфом Альфером и Робертом Херманом, позволили Гамову оценить температуру и плотность, при которых данная цепочка ядерных реакций может привести к наблюдаемому относительному содержанию тяжелых элементов.

Как выяснилось, соответствующая температура настолько высока, что почти вся энергия должна быть сосредоточена в излучении, тогда как на долю частиц вещества ее приходится крайне мало. (Для сравнения укажем, что в современную эпоху на долю излучения приходится ничтожно малая часть плотности энергии во Вселенной.) Гамов, Альфер и Херман отметили, что по мере расширения Вселенной, излучение должно остывать, оставаясь при этом равновесным (см. гл. 7). По расчетам Альфера и Хермана, космическое



Энрико Ферми (1901—1959), один из основоположников современной ядерной физики. (Архив Беттмана.)

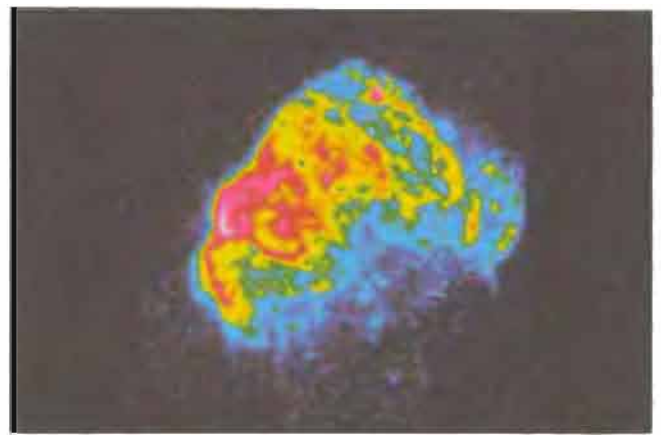
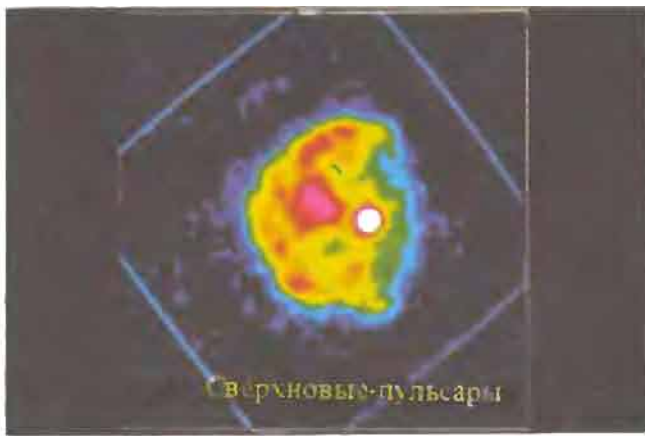
пространство в наше время должно быть заполнено равновесным излучением с температурой 5 К.

В те годы, однако, астрономы не предпринимали попыток обнаружить предсказанное теорией Гамова излучение. И дело не только в том, что в 50-е годы произвести необходимые измерения было чрезвычайно сложно, главное состояло в том, что теория Гамова страдала одним роковым недостатком.

В 1949 г. Энрико Ферми и Джон Туркевич, детально рассчитав несколько начальных этапов процесса образования химических элементов, предложенного Гамовым, обнаружили, что последовательные захваты нейтронов, сопровождающиеся бета-распадом при тех условиях, которые описывал Гамов, действительно могут привести к возникновению ядер дейтерия, трития, гелия-3 и гелия-4 в необходимых количествах. Однако далее процесс резко обрывается. Реакции с участием нейтронов, протонов и ядер с массовым числом 2, 3 и 4 не могут привести к образованию более тяжелых ядер в заметных количествах. Сам Гамов отчетливо понимал, что это обстоятельство делает его теорию уязвимой, но надеялся, что проблема каким-то образом решится. Расчеты Ферми и Туркевича перечеркнули эти надежды.

Кроме того, теория Гамова противоречила результатам наблюдений. В начале 50-х годов анализ звездных спектров надежно подтвердил полученные ранее свидетельства того, что в Солнце и ближайших звездах содержание тяжелых элементов по отношению к водороду в 10—100 раз больше, чем у звезд, удаленных от плоскости Галактики. Если элементы тяжелее гелия (который, как известно, образуется в реакциях термоядерного синтеза, протекающих в недрах звезд) образовались на ранних стадиях эволюции Вселенной, то их нынешнее содержание по отношению к водороду должно быть практически одинаковым во всей Галактике. Однако астрономические наблюдения, бесспорно, показывали, что не менее 90% тяжелых элементов, входящих в состав Солнца и ближайших звезд, имеют вторичное происхождение.

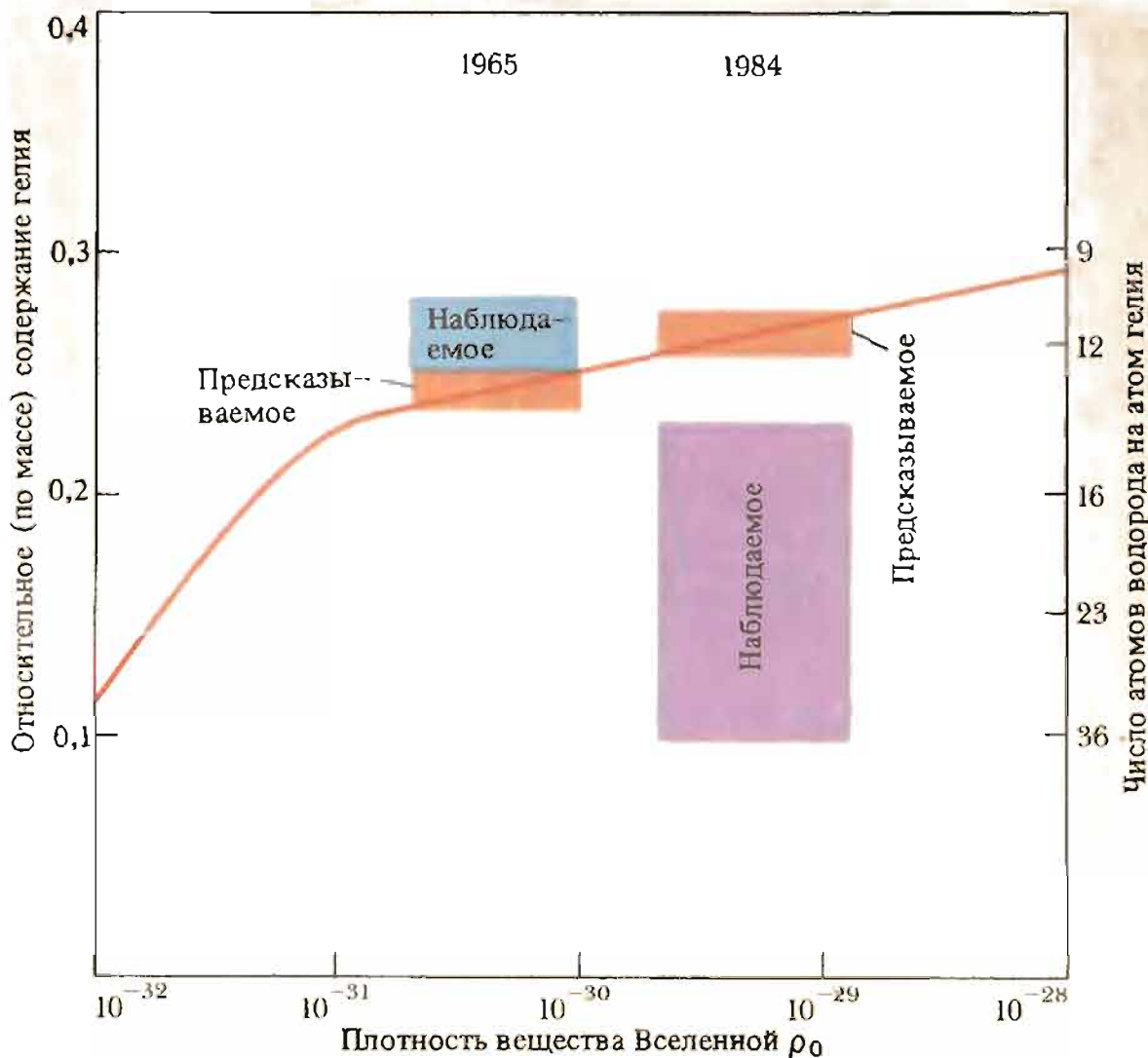
Гипотеза «первичного огненного шара» пережила породившую ее теорию. В 1964 г. два английских астрофизика Фред Хойл и Роджер Тейлер показали, что большая часть гелия во Вселенной была синтезирована вскоре после начала космического расширения при условиях, сходных с теми, которые рассматривали Гамов, Альфер и Херман. Английские астрофизики рассуждали следующим образом. Внутри звезд гелий образуется в ходе ядерных



Объект, расположенный в центре асимметричного остатка взрыва сверхновой, — это пульсар, который входит в состав двойной системы (*слева*). Остаток взрыва сверхновой, расположенный в созвездии Корма, в рентгеновском диапазоне выглядит как множество отдельных источников (*справа*). [Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. П. Грегори и Дж. Фалмэн (левое фото); Дж. Петри (правое фото).]

реакций, при которых четыре протона (ядра атома водорода) сливаются в одну альфа-частицу (ядро гелия). В каждой реакции такого рода происходит «потеря» небольшой части массы, так как сумма масс четырех протонов и двух электронов несколько меньше, чем масса ядра гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов. Большая часть энергии, связанной с упомянутым уменьшением массы, в конечном итоге излучается звездой в виде электромагнитного излучения (оптического и неоптического диапазонов). Хойл и Тейлер предположили, что общая светимость всех звезд Галактики никогда существенно не превышала современную величину. Исходя из возраста Галактики (порядка 10^{10} лет) и ее нынешней светимости, они оценили полное количество энергии, которую Галактика должна была излучить за время своего существования. Далее, зная количество энергии, выделяемой в реакции превращения водорода в гелий, они определили, какое количество гелия образовалось в недрах звезд за время существования Галактики. Как выяснилось, если бы звезды первоначально состояли из одного водорода, то к нашему времени на 100 атомов водорода приходился бы 1 атом гелия. Однако в 1964 г., когда Хойл и Тейлер опубликовали свою работу, было известно, что во всех звездах и в межзвездном газе один атом гелия приходится всего на 10 атомов водорода. Поэтому Хойл и Тейлер заключили, что около 90% гелия образовалось до рождения звезд — вероятно в первичном огненном шаре, о котором говорил Гамов. Затем они оценили количество гелия, которое могло быть синтезировано в огненном шаре. Оказалось, что в широком интервале начальных условий получается наблюдаемая величина: 1 атом гелия на 10 атомов водорода.

Пока Хойл и Тейлер занимались своими теоретическими изысканиями, небольшая группа ученых во главе с Робертом Дикке в Принстонском университете готовилась к экспериментальному и теоретическому штурму той же проблемы. П. Г. Ролл и Д. Т. Уилкинсон конструировали радиометр, чувствительность которого была бы достаточна, чтобы обнаружить фоновое излучение с температурой порядка несколько градусов по шкале Кельвина. П. Дж. Е. Пиблс занимался расчетами, подобными тем, что выполнили Хойл и Тейлер, стремясь вывести соотношение, связывающее температуру космического фонового излучения, среднюю плотность вещества во Вселенной и относительное содержание в ней гелия. Однако еще до того, как Ролл и Уилкинсон приступили к измерениям, в Пристоне стало известно о результа-

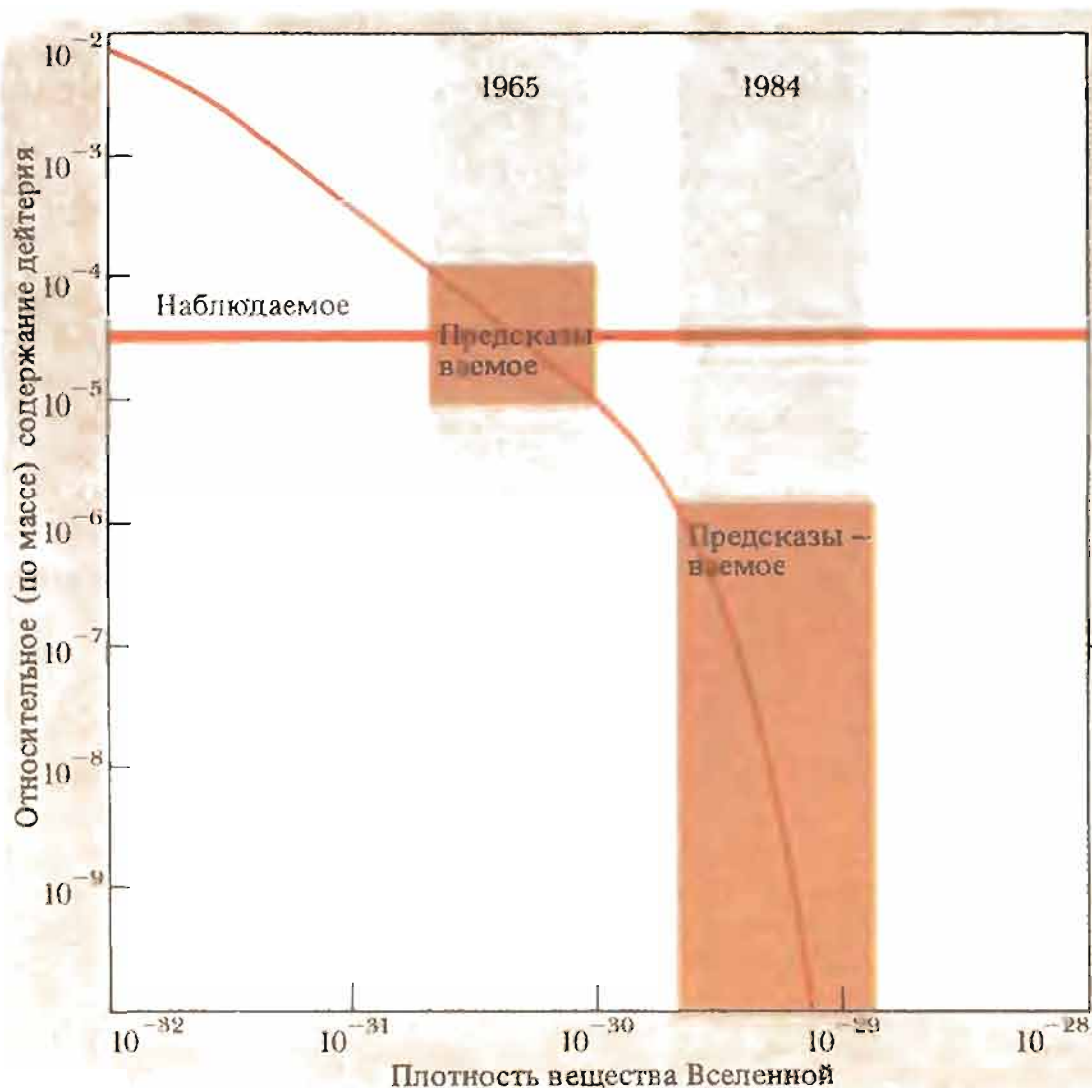


тах Арно Пензиаса и Роберта Вильсона из фирмы «Белл телефон лабораторис» (см. гл. 7).

Пензиас и Вильсон сообщили о своем открытии в короткой заметке, опубликованной в первом июльском выпуске журнала *Astrophysical Journal* за 1965 г. Их статью предваряла несколько более пространная публикация Дикке (с коллегами), в которой открытое излучение интерпретировалось как остаток первичного огненного шара. Большинство астрономов сразу же согласилось с такой интерпретацией. В отличие от кантовской гипотезы островной Вселенной, которая получила признание через 275 лет после ее создания, гипотезу огненного шара астрономы приняли очень быстро. Ситуацию, которая сложилась в период 1965—1980 гг., хорошо охарактеризовал Стивен Вайнберг в своей книге «Первые три минуты»:

На протяжении большей части истории современной физики и астрономии просто-напросто отсутствовали адекватные наблюдательные и теоретические основы, которые позволили бы воссоздать историю ранней Вселенной. Но за минувшее десятилетие ситуация изменилась. Теория ранней Вселенной получила столь широкое признание, что астрономы часто называют ее «стандартной моделью».

Далее мы рассмотрим некоторые из астрономических данных, свидетельствующих в пользу «стандартной модели», и аргументы, которые использовались при ее интерпретации.



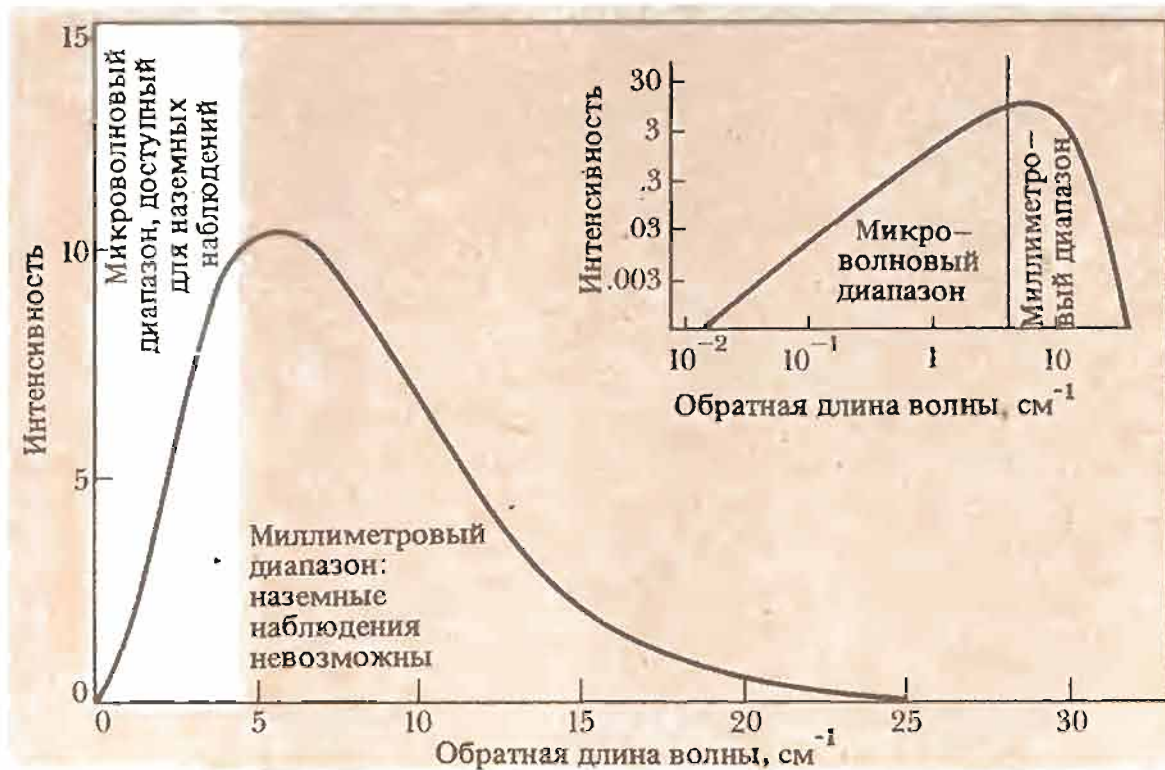
Первичное содержание во Вселенной гелия (*слева*) и дейтерия (*справа*). Так, согласно стандартной модели, выглядит зависимость этих величин от современного значения средней плотности вещества во Вселенной. По данным на 1965 г. первичное содержание гелия и дейтерия, вычисленное исходя из величины плотности, которая в то время казалась наиболее достоверной, совпадало с результатами других, независимых оценок содержания этих элементов в межзвездной среде. Однако, согласно оценкам 1984 г., теоретические и полученные из наблюдений значения названных величин заметно отличаются. (Займствовано из статьи Р. В. Вагонера, *Astrophysical Journal*, vol. 179, p. 343, 1973.)

Проверка гипотезы первичного огненного шара

Из гипотезы первичного огненного шара вытекают три доступных непосредственной проверке следствия. Речь идет о содержании во Вселенной гелия и дейтерия, а также о спектре реликтового фонового излучения. Согласно стандартной модели, эти характеристики зависят всего от двух параметров: температуры равновесного фонового излучения (которая по данным наблюдения равна 3 К) и средней плотности вещества во Вселенной.

На приведенных здесь диаграммах показано, как в стандартной модели содержание гелия и дейтерия во Вселенной зависит от средней плотности вещества. По данным на 1965 г. относительное содержание гелия и дейтерия соответствовало средней плотности вещества во Вселенной равной $5 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Эта величина совпадала с оценками средней плотности *светящегося* вещества во Вселенной, полученными другими способами.

Из стандартной модели столь же недвусмысленно следовало, что *спектр*



Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела (кривая Планка). На основном рисунке по осям отложена интенсивность (или плотность энергии) излучения в условных единицах и величина, обратная длине волны, $1/\lambda$ (см⁻¹), а на врезке — логарифмы этих величин. Выделена область длин волн, в которой возможны измерения с помощью наземных радиотелескопов. Кривая, построенная в логарифмическом масштабе, более удобна для сравнения результатов измерений с кривой Планка, однако на ней труднее видеть, что основная доля энергии фонового излучения сосредоточена в миллиметровом диапазоне. Заметим, что основная кривая и кривая на врезке построены для разных значений температуры: 2,7 и 3,0 К соответственно.

реликтового излучения не должен существенно отличаться от спектра излучения абсолютно черного тела. Это излучение состоит из фотонов, которые в результате взаимодействия с веществом многократно поглощались и переизлучались, что привело к «термализации» излучения и потере фотонами своей «родословной». Интенсивность равновесного излучения одинакова во всех точках и во всех направлениях. Его спектр описывается универсальной кривой, формула которой была впервые получена Максом Планком в 1900 г. Первичный огненный шар должен был представлять собой излучение абсолютно черного тела, поскольку фотоны этого излучения должны были очень интенсивно взаимодействовать с электронами и другими заряженными частицами. После того как взаимодействие излучения с веществом значительно ослабло, спектр излучения должен был остаться планковским.

На диаграмме (вверху) кривая Планка изображена в двух масштабах: линейном и логарифмическом, здесь же отмечена область длин волн (0,5—50 см), доступная измерению с помощью наземных радиометров. В этом диапазоне земная атмосфера прозрачна и спокойна. На длинах волн короче 0,5 см сама атмосфера излучает столь интенсивно, что осуществить точные измерения с поверхности Земли невозможно, а при $\lambda \gtrsim 50$ см реликтовое излучение маскируется излучением других астрономических источников.

По этим причинам доступный проверке частотный диапазон не превышает двух порядков по величине. Результаты измерений, проведенных в пределах названного диапазона, очень хорошо укладываются на кривую Планка. Такое совпадение еще более поражает, если учесть, что равновесное тепловое излу-

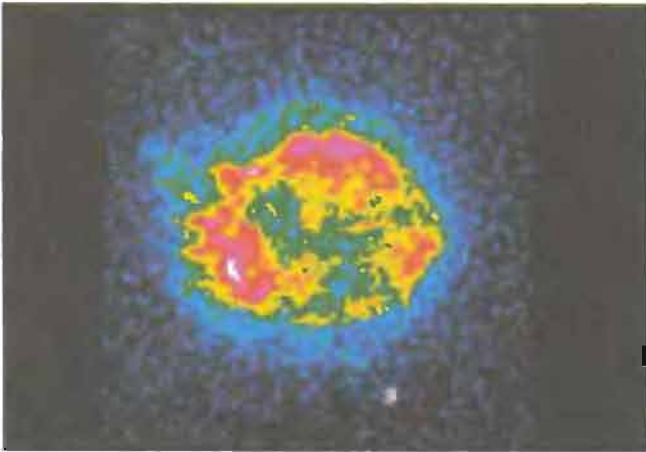
чение — явление, крайне редкое в природе. Спектры звезд аппроксимируются планковской кривой лишь весьма приближенно.

Однако начиная с 1976 г. соответствие между предсказаниями стандартной модели и результатами наблюдений стало ухудшаться. Это объясняется в основном тремя причинами.

Прежде всего, измерения показали, что оценку средней плотности вещества во Вселенной следует увеличить в 10—20 раз. Это было вызвано уточнением шкалы космических расстояний, ростом информации о процессах сгущения галактик в очень больших масштабах, а также новыми данными, свидетельствовавшими о том, что 90—95% массы галактик и скоплений находится в форме несветящегося вещества (так называемая скрытая масса — *Перев.*). Согласно современным оценкам плотности массы (см. рисунок на с. 274), предсказываемое содержание гелия должно быть немногим больше, чем считалось ранее. Но в то же время предсказываемое содержание дейтерия (см. рисунок на с. 275) должно быть по крайней мере в тысячу раз меньше первоначальной оценки.

Сторонники гипотезы первичного огненного шара высказали предположение, что наблюдаемый в межзвездных газовых облаках дейтерий, возможно, имеет вторичное происхождение. Но каков же тогда его источник? В отличие от гелия и более тяжелых элементов дейтерий не синтезируется в звездах, а, наоборот, выгорает. Можно предположить, что он образуется в межзвездных облаках под действием ударных волн, порожденных взрывами сверхновых. Однако теоретические расчеты показывают, что этот процесс должен сопровождаться аномально интенсивным образованием других элементов, а это противоречит результатам наблюдений. Более того, нет доказательств, что отношение дейтерия к водороду в областях, лежащих в направлении на молодые остатки сверхновых, больше, чем в остальной части Вселенной. Как говорил Шерлок Холмс, «если отбросить невозможное, то все, что останется, каким бы невероятным оно ни казалось, должно быть истиной». Следуя этому методу, мы должны предположить, что межзвездный дейтерий был синтезирован на ранних стадиях расширения Вселенной.

Второе противоречие между стандартной моделью и результатами наблюдений возникло в связи с уточнением оценки первичного содержания гелия: оказалось, что один атом гелия приходится не менее чем на 15 атомов водорода, а не на 10, как предполагалось ранее. О более низком по сравнению с предыдущим относительном содержании гелия говорило одновременно несколько соображений. Вот одно из них. На протяжении ряда лет астрофизики разрабатывали все более точные теоретические модели Солнца, учитывая новейшие теоретические и экспериментальные данные о процессах излучения, а также атомных и ядерных процессах. Одновременно производились все более точные измерения основных характеристик Солнца, таких, как масса, светимость, эффективная температура, возраст (на основе определения возраста метеоритов и лунных пород), а в последние годы — интенсивность нейтринного излучения. Теоретические модели согласуются с результатами измерений, если считать, что первоначально в солнечном веществе на один атом гелия приходилось 20 атомов водорода. Однако эти модели также предполагают очень низкое первоначальное содержание тяжелых элементов — более чем в 10 раз меньше, чем следует из спектроскопических наблюдений внешних слоев Солнца. Астрономы, убежденные в правильности этих моделей, высказывают предположение, что внешние слои Солнца могли быть обогащены тяжелыми элементами вследствие аккреции межзвездного газа, в котором содержание тяжелых элементов выше, чем в Солнце. Модели, согласно которым первоначальное содержание тяжелых элементов должно быть равно

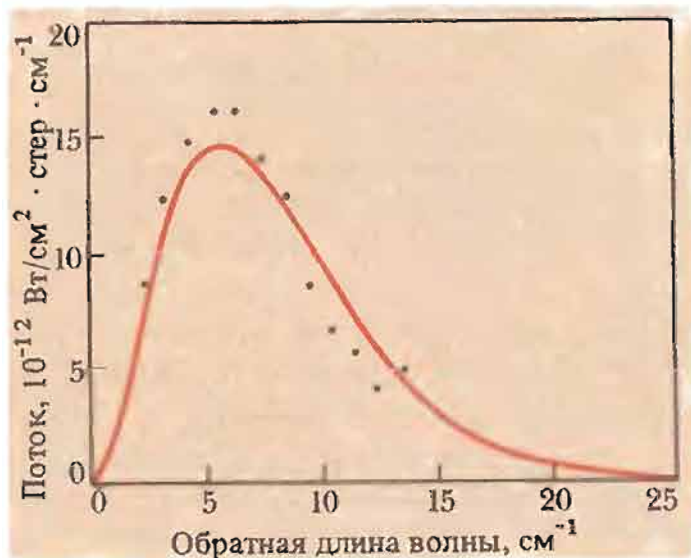


Рентгеновское изображение остатка взрыва сверхновой Кассиопея А, которая, как полагают, вспыхнула примерно 300 лет назад. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. С. Мюррей.)

тому, что наблюдается ныне в поверхностных слоях Солнца, предсказывают гораздо более высокое нейтринное излучение Солнца, чем следует из наблюдений, но даже в этих моделях исходное отношение водород—гелий равно 13:1.

Более того, не весь гелий, согласно этим моделям, имеет первичное происхождение. Возраст Солнца всего лишь 4,6 млрд. лет, что более чем в два раза меньше возраста самых старых звезд Галактики. Тяжелые элементы, входящие в состав Солнца, как и других молодых звезд, расположенных вблизи плоскости Галактики, были синтезированы в других, более массивных звездах. Закончив свой жизненный путь, эти звезды взорвались, выбросив обогащенный металлами и гелием газ в межзвездную среду, из которой впоследствии сформировались Солнце и другие относительно молодые звезды. По оценкам астрономов, выбрасываемый при взрывах сверхновых газ содержит в среднем гелия в три раза больше, чем тяжелых элементов. Поэтому если обозначить через z содержание тяжелых элементов в Солнечном веществе, то для того, чтобы определить, сколько гелия синтезировалось в первичном огненном шаре, необходимо вычесть из первоначального содержания гелия на Солнце величину $3z$. Сделав это, мы получим, что первичное содержание гелия относительно водорода характеризовалось отношением 1:16.

Третье несоответствие между предсказаниями стандартной модели и результатами наблюдений, возможно, самое серьезное. В 1978 г. Д. П. Вуди и П. Л. Ричардс из Калифорнийского университета в Беркли впервые произвели точные измерения спектра реликтового излучения в диапазоне длин волн, где сосредоточена основная часть его энергии. Для этого они использовали охлаждаемый жидким гелием спектрофотометр, который был выведен в верхние слои атмосферы на воздушном шаре. Оказалось, что измеренный спектр значительно отличается от планковской кривой, соответствующей результатам измерения плотности энергии (см. рисунок на с. 279). (Плотность энергии излучения с произвольным спектром равна площади фигуры, ограниченной кривой, описывающей распределение энергии в спектре, и осью абсцисс. Если излучение равновесное, т. е. описывается кривой Планка, то плотность энергии можно вычислить аналитически: она равна четвертой степени абсолютной температуры, умноженной на известную константу. По такой же формуле вычисляются эффективная температура неравновесного излучения. Эффективная температура, вычисленная Вуди и Ричардсом на основе произведенных измерений спектра, равна 3 К). Еще до того, как Вуди и Ричардс опубликовали свои результаты, теоретики установили, какие отклонения от идеального спектра абсолютно черного тела могут наблюдаться, если справедлива стандартная модель. Однако предполагаемое отклонение было гораздо меньше того, которое обнаружили Вуди и Ричардс, и качественно отличалось от него.



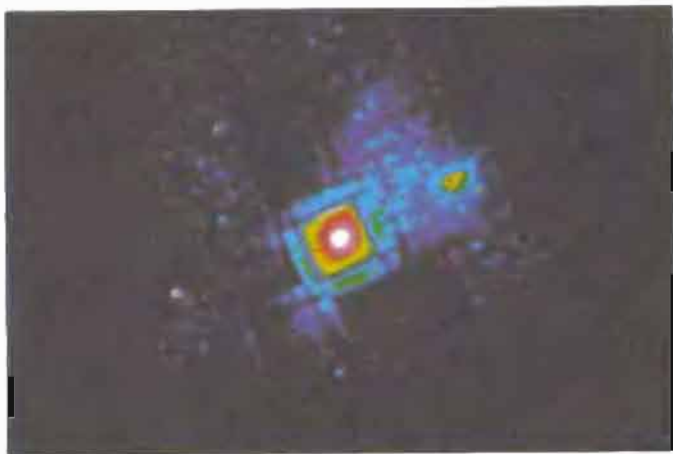
Сравнение кривой распределения Планка с результатами измерений фонового излучения в миллиметровом диапазоне, произведенных Вуди и Ричардсом с помощью радиометра, выведенного на воздушном шаре в верхние слои атмосферы. Теоретическая кривая соответствует температуре, при которой плотность энергии теплового равновесного излучения равна наблюдаемой плотности энергии фонового излучения. Заметно значительное отличие измеренного спектра от спектра абсолютно черного тела: в области максимума ($\lambda \sim 1-2$ мм) экспериментальные точки лежат выше кривой Планка, а в субмиллиметровом диапазоне — ниже ее. Результаты наземных измерений в микроволновом (сантиметровом) диапазоне очень хорошо ложатся на кривую Планка, соответствующую эффективной температуре около 3 К. (Займствовано из статьи Д. П. Вуди, П. Л. Ричардса, *Astrophysical Journal*, vol. 248, p. 28, 1978.)

Несомненно, наблюдения Вуди и Ричардса требуют повторения. Между тем, вполне закономерен вопрос: «А имеют ли эти результаты смысл? Нельзя ли их естественным образом объяснить в рамках какой-нибудь теории?» Артур Стэнли Эддингтон, основатель современной теории внутреннего строения звезд, подразнивая своих коллег, склонных к эмпирической манере мышления, говорил: «Не доверяйте наблюдениям, пока они не подтверждены теорией». Возможно, Пензиас и Вильсон следовали этому совету, когда, ознакомившись с гипотезой первичного огненного шара, пришли в конце концов к заключению, что наблюдаемая ими «избыточная антенная температура» может быть сигналом из глубин пространства и времени, а не загадочной помехой в радиометре. Есть ли какие-нибудь теоретические основания для того, чтобы поверить в результаты эксперимента Вуди и Ричардса? Существует ли альтернативная теория, в рамках которой эти результаты имели бы смысл?

Микроволновое фоновое излучение как термализованный звездный свет

Если фотонов, из которых состоит фоновое излучение, не было в самом начале космического расширения, то они должны были появиться позднее в результате обычных физических процессов. Среди известных процессов, которые могли бы породить фоновое излучение, наиболее подходящим представляется происходящее в недрах звезд превращение водорода в гелий. При термоядерном «сгорании» 1 г водорода возникает излучение, эквивалентное 0,007 г массы. Не может ли микроволновое фоновое излучение возникнуть из света звезд?

Действительно, плотность энергии звездного света в межзвездном пространстве в *нынешнюю* эпоху сравнима с плотностью энергии микроволнового фона (порядка $5 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³). Но в *качественном отношении* свет звезд радикально отличается от микроволнового фона. Свет звезд состоит из фотонов, излученных с поверхности звезд, температура которых меняется от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч градусов. Длины волн, соответствующие этим фотонам, лежат преимущественно в видимой, инфракрасной



Так выглядит в рентгеновском диапазоне ближайшее к нам богатое скопление галактик в созвездии Дева. Эта картина составлена из множества отдельных рентгеновских изображений. Яркий объект в центре — гало вокруг галактики М 87. Другие галактики, звезды, проектирующиеся на эту область, и случайно попавшие в поле зрения квазары кажутся точками различной яркости. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. Д. Фабрикант, П. Горенштейн.)

или ультрафиолетовой областях спектра, тогда как длины волн, соответствующие фотонам микроволнового фонового излучения, в тысячи раз больше. Поскольку энергия фотона обратно пропорциональна длине волны, а плотность энергии звездного света и фонового излучения примерно одинаковы, получается, что плотность числа фотонов микроволнового излучения в межзвездном пространстве в тысячи раз превосходит плотность числа фотонов звездного света. Таким образом, теория, в которой возможным источником фонового излучения считаются звезды, должна объяснить не только наблюдаемую поверхность энергии излучения, но и его *спектр*. Иными словами, она должна объяснить, как произошла *термализация*, т. е. преобразование разреженного звездного света в тепловое излучение.

А как вообще происходит термализация? Вообразите замкнутую полость с идеально отражающими стенками, заполненную разреженным звездным светом. Если внутри полости нет вещества, то спектр излучения никогда не изменится: отражаясь от стенок, фотоны будут изменять направление движения, но не потеряют и не приобретут энергии. Поэтому число фотонов в пределах данного диапазона частот со временем не изменится. Однако наличие в полости хотя бы одной-единственной крохотной пылинки резко изменит ситуацию: эта пылинка будет заимствовать энергию у поля излучения в «крупных купюрах» (их роль играют фотоны звездного света) и разминивать их на «мелочь» (фотоны с гораздо большей длиной волны). После того как фотоны многократно пройдут через эту процедуру обмена, от первоначального спектра не останется и следа. Излучение превратится в тепловое с температурой, зависящей от исходной плотности энергии, которая не меняется в процессе термализации.

Если бы Вселенная была заполнена разреженным светом звезд и *не расширялась*, мог бы происходить такой же процесс. Фотоны поглощались и переизлучались бы до тех пор, пока их распределение по энергиям не стало бы равновесным, т. е. соответствующим тепловому излучению. Но в реальной, расширяющейся Вселенной термализация не является неизбежным и тем более типичным исходом. Так, излучение, испускаемое ныне звездами нашей и других галактик, не термализуется никогда. Межгалактическое пространство в современную эпоху настолько прозрачно, что большинство излучаемых сейчас фотонов никогда не поглотится веществом. Звездный свет мог термализоваться только в гораздо более ранние эпохи, когда Вселенная была непрозрачной для излучения.

Совершенно очевидно, что в ту эпоху средняя плотность вещества во Вселенной во много раз превосходила современную величину. Но во сколько именно? Ответ зависит от того, в какой форме вещество присутствовало тогда во Вселенной. Наиболее эффективно звездный свет «перерабатывают» в тепловое излучение пылинки, размер которых сравним с длиной волны

термализуемых фотонов. Поэтому предположим, что фоновое излучение было термализовано межзвездной пылью. Это предположение, как мы увидим далее, может быть выполнено при наблюдении двух независимых условий.

Зная из наблюдений плотность энергии фонового излучения, можно заключить, что «Большая вспышка» не могла произойти раньше определенного времени. Это нетрудно доказать. Мы уже отмечали, что при превращении 1 г водорода в гелий выделяется энергия, эквивалентная 0,007 г. Таким образом, если во время Большой вспышки из водорода в гелий превратилась некоторая часть (обозначим ее y) полной массы Вселенной, то отношение плотности энергии излучения к плотности массы вещества в то время должно было составлять $0,007y$:

$$(\rho_{\text{изл}}/\rho)_1 = 0,007 y, \quad (8.1)$$

где индекс 1 соответствует моменту Большой вспышки. Последующее расширение Вселенной изменит это отношение в $1 + z_1$ раз, где z_1 — красное смещение фотонов, излученных во время Большой вспышки. В самом деле, отношение числа фотонов к числу частиц вещества в расширяющемся пространстве не изменяется, но энергия каждого фотона уменьшается в $1 + z_1$ раз (см. с. 256). Поэтому можно записать

$$(\rho_{\text{изл}}/\rho)_1 = (1 + z_1) (\rho_{\text{изл}}/\rho)_0; \quad (8.2)$$

здесь и далее индексом 0 отмечены величины, относящиеся к современной эпохе. Обозначим через ρ_* ($= 2 \cdot 10^{-29}$ г/см³) плотность вещества, которую имеет Вселенная в наше время, если пространство евклидово и $H_0 = 100$ км/с · Мпк. Тогда из уравнений (8.1) — (8.2) получим [с учетом того, что $(\rho_{\text{изл}})_0 = 5 \cdot 10^{-34}$ г/см³]:

$$1 + z_1 \approx 300y(\rho_0/\rho_*). \quad (8.3)$$

Поскольку величина y должна быть меньше 1, приближенное равенство (8.3) означает, что красное смещение z_1 фотонов, образовавшихся в момент Большой вспышки, должно быть *меньше* некой определенной величины, пропорциональной современному значению плотности вещества.

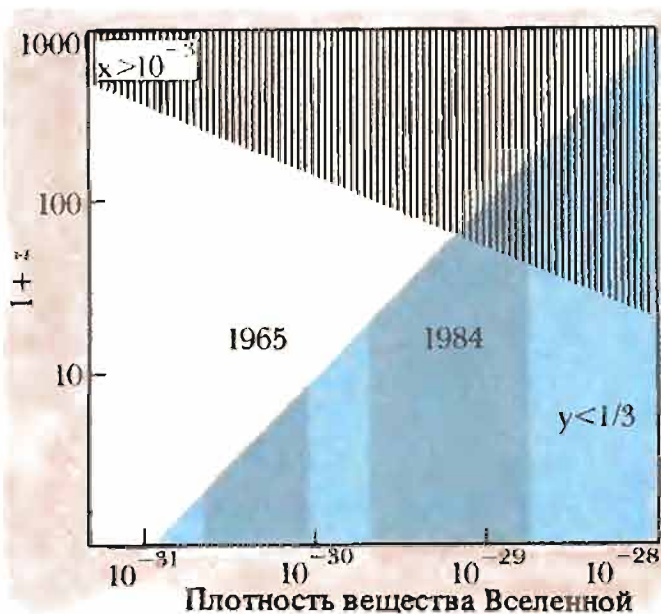
С другой стороны, звездный свет не может эффективно термализоваться до тех пор, пока z_1 не станет больше некоторого определенного значения. В 1972 г. мы с Рэем Хайвели, получив весьма полезные советы от Эдварда М. Парселла по поводу электромагнитных свойств малых твердых пылинок, вывели неравенство, которому должны удовлетворять величина z_1 и современное значение плотности вещества, чтобы фоновое излучение могло термализоваться в диапазоне больших длин волн. Это неравенство имеет вид:

$$(1 + z_1)^{5/2} (\rho_0/\rho_*) x \gtrsim 25, \quad (8.4)$$

где через x обозначена доля массы, сосредоточенной в пылинках.

Графическая интерпретация соотношений (8.3) и (8.4) представлена на приведенном далее рисунке. В области, закрашенной синим цветом, расположены точки, удовлетворяющие соотношению (8.3), а в области с вертикальной штриховкой — точки, удовлетворяющие неравенству (8.4). Совместное решение обоих соотношений представлено точками, расположенными в зоне пересечения указанных областей. (Графический метод позволяет наглядно изобразить процесс поиска подходящих значений z , если они существуют).

В период 1965—1979 гг. многие астрономы полагали, что отношение ρ_0/ρ_* лежит в диапазоне 0,01—0,03. Этот диапазон изображен на рисунке вертикальной полосой (левой), не проходящей через зону пересечения. Поэтому в то время идея о том, что микроволновый фон представляет собой



Если микроволновый фон интерпретировать как результат термализации света звезд, то красное смещение z и плотность вещества во Вселенной в нынешнюю эпоху должны удовлетворять двум неравенствам. Графическое решение этих неравенств показано синим цветом и вертикальной штриховкой. Совокупность точек, удовлетворяющих одновременно обоим неравенствам, находится в области пересечения. Как видим, плотность должна превышать величину порядка 10^{-29} г/см³. Это значение границы согласуется с современными оценками плотности вещества во Вселенной, однако до 80-х годов считалось, что плотность должна быть ниже. Если плотность вещества во Вселенной составляет порядка 10^{-29} г/см³, то Большая вспышка должна была произойти при красном смещении $z \approx 50-100$.

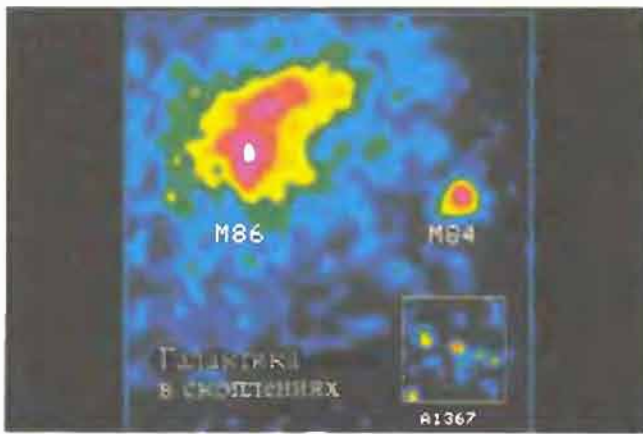
термализованный свет звезд, считалась ошибочной. Однако последние оценки средней плотности вещества показывают, что отношение ρ_0/ρ_* , скорее всего лежит в интервале 0,3—0,7 (хотя пока нельзя исключить возможность и более широкого интервала, 0,1—1). Область допустимых значений плотности вещества, соответствующих этим данным, показана на рисунке вертикальной полосой (правой), которая частично захватывает зону пересечения. В результате получается треугольная область, точки внутри которой удовлетворяют всем трем условиям одновременно. На этом основании мы делаем вывод: *микроволновый фон может быть звездным светом, излученным и термализованным при красных смещениях порядка 100.*

Рождение массивных звезд на ранних этапах?

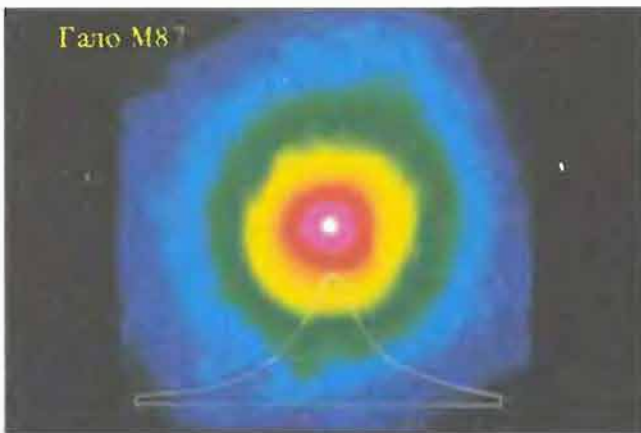
Гипотеза, предполагающая, что микроволновое фоновое излучение представляет собой термализованный свет звезд, более чувствительна к проверке наблюдениями, чем гипотеза первичного огненного шара, поскольку из нее вытекает больше доступных проверке следствий. Остановимся на некоторых из этих следствий и посмотрим, как они согласуются с результатами наблюдений.

1. *Фоновое излучение должно быть обусловлено образовавшимися на ранних этапах звездами, массы которых превышали бы массу Солнца в 10—15 раз.*

Зная красное смещение в момент Большой вспышки ($z \approx 100$) и воспользовавшись соотношением $1+z_1 = (t_0/t_1)^{2/3}$, которое связывает величину z_1 с соответствующей эпохой t_1 и современной эпохой $t_0 \approx 10$ млрд. лет, приходим к выводу, что Большая вспышка произошла спустя примерно 10 млн. лет после начала расширения Вселенной (в стандартной модели эти два события совпадают). Звезды, породившие Большую вспышку, должны иметь время жизни того же порядка. Звезды, которые живут меньше, должны были сжечь водород гораздо быстрее и потому не смогли обеспечить количество излучения, достаточное для того, чтобы объяснить наблюдаемую ныне плотность энергии фонового излучения. Более долгоживущие звезды должны были излучить большую часть своей энергии в тот период, когда плотность пыли была не настолько велика, чтобы термализовать свет. Из теории звездной эволюции следует, что звезды с временем жизни порядка 10 млн. лет должны иметь массу порядка 10—15 M_{\odot} .



Рентгеновское изображение галактик М 86 и М 84, принадлежащих скоплению галактик в созвездии Дева. Рентгеновское излучение обусловлено газом, нагретым до температуры 5—10 млн. К. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. У. Формэн.)

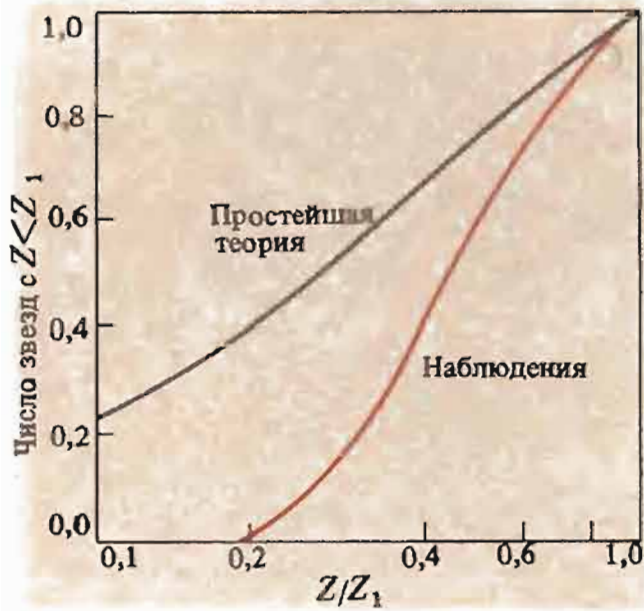


Увеличенное изображение центральной области скопления галактик в созвездии Дева (см. предыдущее фото). На этой рентгеновской карте, окрашенной в условные цвета, показано распределение интенсивности рентгеновского излучения вокруг галактики М 87, находящейся в центре скопления. Масса горячего газа, порождающего это излучение, составляет около 10% массы скопления, т. е. примерно столько же, сколько наблюдаемые в нем галактики. Остальные 80% массы не наблюдаемы ни в рентгеновском, ни в оптическом диапазонах. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. У. Формэн.)

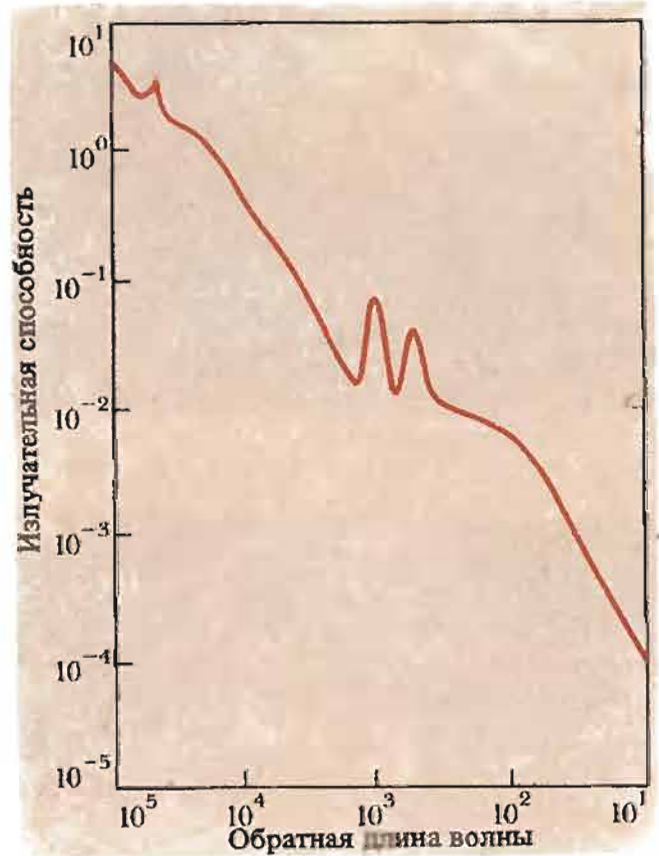
Из этого утверждения вытекают два доступных проверке следствия. Специалисты в области теории звездной эволюции рассчитали содержание тяжелых элементов, синтезируемых в массивных звездах. Оказалось, что оно существенным образом зависит от массы звезды. Зная относительное содержание тяжелых элементов в Солнце и близких к нему звездах, можно оценить массу звезд, в которых должен был синтезироваться соответствующий набор элементов: она получается равной 10—15 M_{\odot} . В звездах, как более массивных, так и менее массивных, также происходит синтез тяжелых элементов, но в другой пропорции. Таким образом, предположение о том, что микроволновое фоновое излучение обусловлено термализацией света звезд, правильно предсказывает относительную распространенность тяжелых элементов. Эта гипотеза также согласуется с наблюдениями в том отношении, что *относительное* содержание элементов тяжелее гелия должно быть одинаковым во всех звездах, подобных Солнцу, в недрах которых синтезируются тяжелые элементы.

2. *Элементы тяжелее гелия (а возможно, и сам гелий) были синтезированы в массивных звездах задолго до того, как началось образование галактик.*

Это предсказание резко расходится с изложенными ниже и широко распространенными представлениями об эволюции нашей звездной системы — Галактики. Принято считать, что Протогалактика представляла собой бесструктурное газовое облако, состоящее из водорода и гелия. На протяжении последующих 100 млн. лет это облако сжималось, постепенно превращаясь в диск в котором началась конденсация звезд. Тяжелые элементы синтезировались в недрах массивных звезд, которые в конце своей жизни взрывались, выбрасывая обогащенный тяжелыми элементами газ в межзвездную среду. Звезды следующих поколений конденсировались уже из обогащенного тяже-



Распространенность тяжелых элементов во Вселенной свидетельствует о существовании догалактической популяции массивных звезд. Элементы тяжелее гелия («металлы») образуются лишь в недрах массивных звезд. Если бы темпы образования массивных звезд всегда были такими же, как сейчас, то более чем в 20% звезд в окрестности Солнца содержание металлов z было бы в 10 раз меньше, чем в межзвездной среде в современную эпоху (см. кривую, помеченную словами «простейшая теория»). Однако в действительности ни у одной из ближайших звезд, исследованных методами спектрального анализа, содержание тяжелых элементов не оказалось настолько низким, чтобы составлять менее $1/5$ содержания тех же элементов в межзвездном газе. Это говорит о том, что даже самые старые звезды в окрестностях Солнца образовались из вещества, уже обогащенного тяжелыми элементами, которые, по-видимому, были синтезированы в недрах догалактического поколения массивных звезд.



Зависимость излучательной способности наиболее распространенного типа межзвездных пылинок от величины, обратной длине волны. Как видно, в целом излучательная способность резко падает с увеличением длины волны (соответственно с уменьшением величины $1/\lambda$). Отметим также наличие двух пиков, соответствующих длинам волн 10 и 20 мкм. Эти пики обусловлены силикатами — химическими соединениями, широко распространенными как на Земле, так и в межзвездном пространстве. (Оба рисунка заимствованы из статьи Дж. Одоуза, Б. М. Тинсли. *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 14, p. 43, 1976.)

лыми элементами межзвездного газа. В наиболее массивных из них повторялся тот же цикл, в результате чего они продолжали насыщать межзвездный газ тяжелыми элементами. Таким образом, звезды каждого последующего поколения оказывались все более богатыми тяжелыми элементами.

В начале 70-х годов появилась возможность сопоставить приведенные выше рассуждения со статистическими данными, полученными из анализа спектров относительно близких звезд галактического диска. Оказалось, что изложенная теория образования тяжелых элементов вообще не согласуется с наблюдательными данными (см. левый рисунок). К тому же она предсказывала слишком большой процент звезд с низким содержанием тяжелых элементов. Исследователи химической эволюции Галактики теперь признают, что значительная доля тяжелых элементов была синтезирована в массивных звездах, образовавшихся на ранних этапах эволюции Вселенной, что согласуется с обсуждаемой нами гипотезой.

3. *Пылевые частицы, термализовавшие фоновое излучение, должны были сконденсироваться из газа, выброшенного первичными звездами при взрывах, которыми заканчивалась их эволюция.*

Эти пылинки должны были состоять из углерода, кремния и железа, т. е. из элементов, которые были синтезированы массивными звездами. Могли ли такие частицы, способные термализовать звездный свет, образоваться достаточно быстро? Современные теории формирования твердых пылинок не противоречат этой возможности, но окончательного ответа дать пока нельзя.

4. *С качественной точки зрения спектр микроволнового фонового излучения должен отличаться от идеального распределения Планка так же, как спектр, измеренный Вуди и Ричардсом.*

Поскольку Вселенная была непрозрачной для звездного света сравнительно короткое время, было бы удивительно, если бы процесс термализации успел завершиться полностью во всем диапазоне длин волн, приведя к формированию идеального планковского спектра. Можно ли предсказать, как будет отличаться спектр не полностью термализованного излучения от кривой Планка?

Назовем *излучательной способностью* тела отношение мощности его излучения (при условии, что температура тела поддерживается неизменной) к мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Излучательная способность реальных пылевых частиц меняется в зависимости от длины волны, как показано на правом рисунке для инфракрасного диапазона, в котором должна быть сосредоточена основная энергия фонового излучения в процессе термализации. Наиболее интересная деталь этой кривой—два широких пика, центры которых приходятся на длины волн 10 и 20 мкм [1 мкм (микрон) = 10^{-6} м = 10^{-3} мм]. Эти пики обусловлены силикатами — соединениями, которые входят в состав стекла и кирпича, а также земных скальных пород. Астрономические наблюдения в инфракрасном диапазоне показывают, что силикаты столь же широко распространены в межзвездном пространстве, как и на Земле, и можно смело предположить, что они входили в состав пылевых частиц, принимавших участие в термализации фонового излучения.

Если фоновое излучение было термализовано частицами пыли, излучательная способность которых аналогична изображенной на правом из приведенных здесь рисунков, то следует ожидать, что излучение в области указанных пиков будет более интенсивным, чем излучение той же плотности абсолютно черного тела, и менее интенсивным — на более длинных и более коротких волнах. Если спектр, полученный Вуди и Ричардсом (см. рисунок на с. 279), сместить в сторону коротких волн, увеличив все частоты в 100 раз, то можно видеть, как спектр должен был выглядеть в эпоху термализации. Тогда мы обнаружим, что измеренный (и смещенный в голубую область) спектр проходит выше кривой Планка как раз в той области, где это и должно быть согласно нашим рассуждениям. Он также опускается ниже кривой Планка в области коротких волн, как и предполагалось. Однако он *не* опускается ниже кривой Планка в длинноволновой области. Эта часть спектра, которая в современную эпоху простирается в интервале длин волн 0,5—50 см, — единственная область спектра, которая доступна для изучения с поверхности Земли. Как мы уже знаем, результаты произведенных в этом диапазоне измерений очень хорошо укладываются на кривую Планка.

Эдвард Л. Райт, работавший в Массачусетском технологическом институте и Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе, следуя совету Эдварда М. Парселла (о нем мы упомянули в связи с нашей совместной с Хейвели статьей 1973 г.), нашел остроумное решение этой проблемы. На протяжении

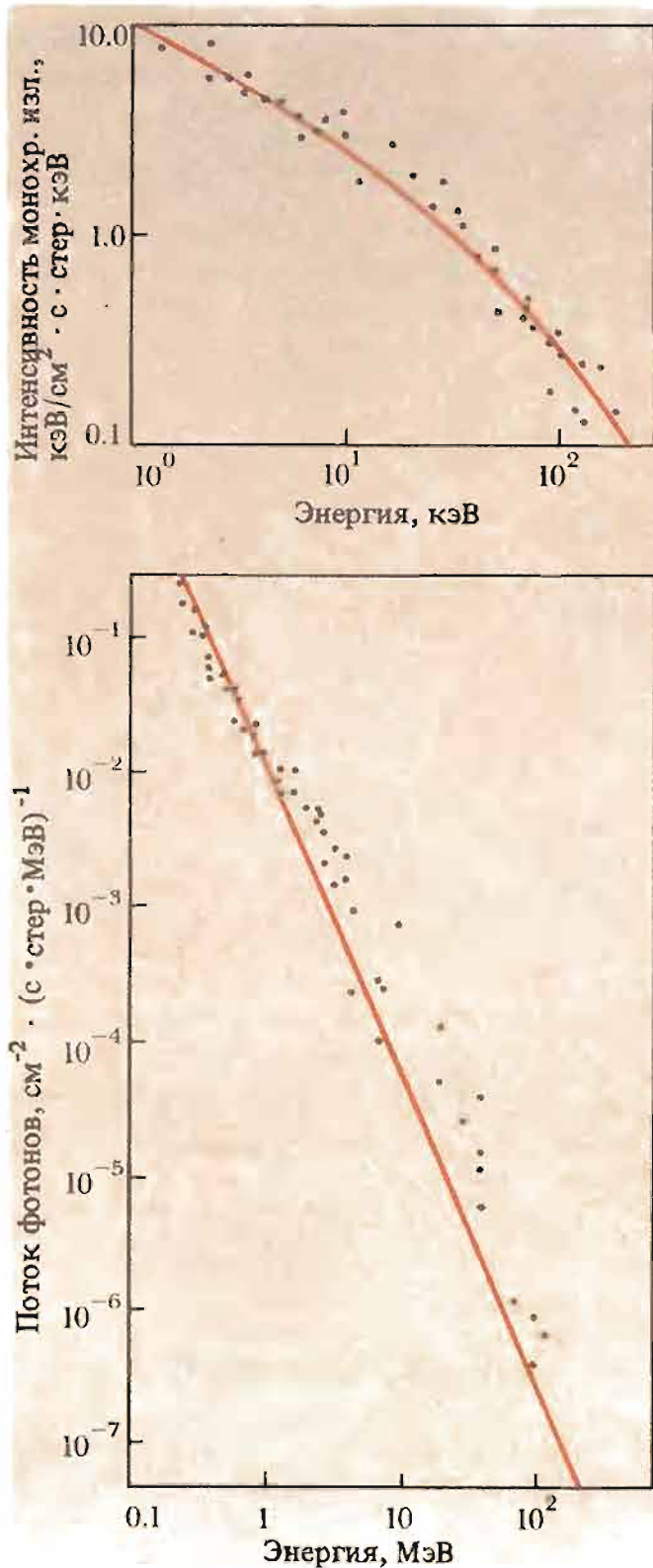
ряда лет Парселл утверждал, что игольчатые, волокнистые структуры межзвездных пылинок могли образоваться по тем же причинам, что и волокнистая структура паутины. (Паутина, как заметил Парселл, создается электростатическими силами, а не пауками.) Парселл указал, что сильно вытянутые пылинки должны служить эффективными «легкими антеннами в диапазоне миллиметровых волн», — а именно это необходимо для термализации излучения, которое составляет ныне микроволновый участок спектра фонового излучения. В 1981 г. Райт, завершив тщательное количественное исследование идеи Парселла, пришел к заключению, что совокупность графитовых игл, содержащих небольшую долю углерода, необходимого для их формирования, должна весьма эффективно термализовать излучение, которое ныне представляет собой микроволновый участок космического фона. Райт также привел теоретические и экспериментальные доводы в пользу того, что иглы с требуемыми свойствами не только могут образовываться при определенных физических условиях, но и на самом деле имеются в межзвездном пространстве.

5. Объяснение рентгеновского фона в рамках гипотезы Большой вспышки.

Рентгеновская астрономия зародилась в конце 40-х годов, когда ученые лаборатории ВМС США приступили к исследованию Солнца в рентгеновском диапазоне с помощью рентгеновских детекторов, установленных на ракетах и воздушных шарах. В 1962 г. Р. Джиакони, Г. Гурский, Ф. Паolini и Б. Росси из Массачусетского технологического института и Американского научно-технического общества решили использовать установленный на ракете детектор для обнаружения рентгеновского излучения Луны. Однако детектор зарегистрировал рентгеновское излучение от источника более мощного, чем Солнце, который был расположен в направлении созвездия Скорпион. После этого случайного открытия рентгеновского источника за пределами Солнечной системы было открыто множество других дискретных источников как внутри нашей Галактики, так и за ее пределами. Но, кроме того, уже в первых наблюдениях был обнаружен диффузный фон, интенсивность которого (с точностью до нескольких процентов) оказалась одинаковой во всех точках неба. Суммарная интенсивность этого высокоэнергетического фона составляет всего 0,02% интенсивности микроволнового фона. Спектр рентгеновского фона, безусловно, был нетепловым: в пределах почти четырех порядков по частоте его интенсивность оставалась пропорциональной длине волны (см. приведенный здесь рисунок).

В начале 1976 г. я предложил Крэйгу Хогану, в ту пору студенту последнего курса Гарвардского университета, заняться поисками механизма, посредством которого рождение массивных звезд (которым мы с Хейвели предложили объяснить микроволновое фоновое излучение) могло бы также объяснить наблюдаемый фон рентгеновского и гамма-излучения. Отвергнув несколько возможностей, Хоган нашел механизм, который казался вполне подходящим. Известно, что сверхновые, т. е. взрывающиеся в конце своей жизни массивные звезды, выбрасывают облака намагниченного ионизированного газа, содержащего электроны высоких энергий. В 20-х годах нашего столетия Артур Х. Комптон показал, что рентгеновские фотоны при рассеянии на электронах передают им часть своего импульса и энергии. Возможен и обратный процесс: если энергия электронов очень велика, они часть энергии могут передать фотонам. Хоган предположил, что высокоэнергетические электроны — «побочный продукт» взрывов сверхновых, — «сталкиваясь» с фотонами ультрафиолетового излучения окружающей среды, могли бы преобразовывать их в фотоны рентгеновского диапазона.

Теория этого явления хорошо известна, но для проверки идеи Хогана необходимо было знать, какая часть энергии взрыва сверхновых должна

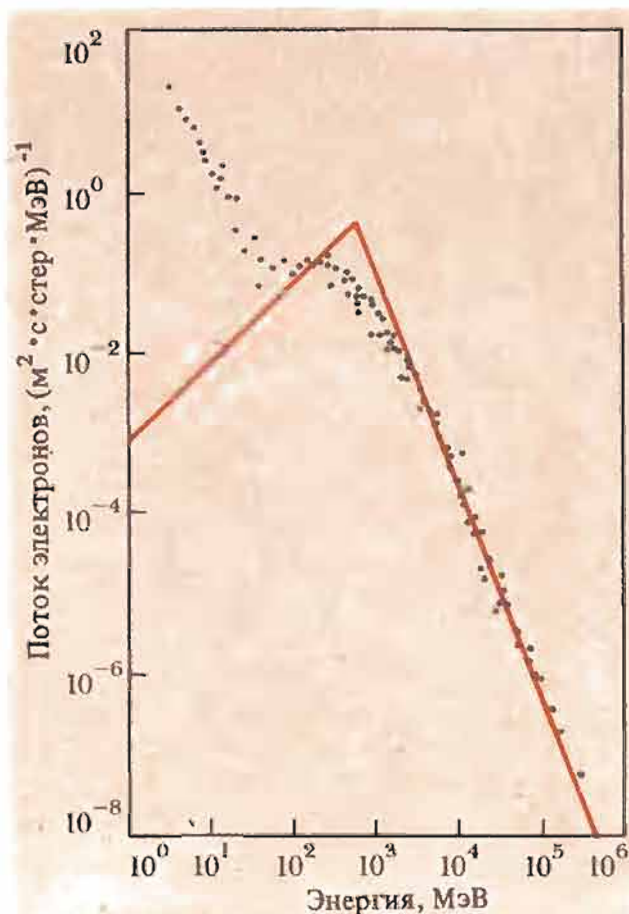


На верхнем рисунке представлен спектр рентгеновского диффузного излучения в диапазоне 1—200 кэВ. Сплошной линией показан спектр $\psi_x(\nu)$, согласно теории Хогана и автора этих строк. Внизу дан спектр γ -фона в диапазоне 0,2—200 МэВ. Сплошная линия представляет продолжение теоретической кривой $\psi_x(\nu)$, показанной на верхнем рисунке. Обратим внимание на «излом» верхней кривой при энергии около 20 кэВ и повышенную интенсивность γ -излучения (нижняя кривая) вблизи 1 МэВ.

быть сосредоточена в релятивистских электронах и каково распределение электронов по энергиям. Информацию можно получить из анализа результатов исследования электронов космических лучей. Предполагается, что эти высокоэнергетические частицы, зарегистрированные детекторами, установленными на спутниках и ракетах, рождаются при вспышках сверхновых в нашей Галактике. Их энергетический спектр, известный с большой точностью, приведен далее на рисунке. Из оценок частоты вспышек сверхновых в нашей Галактике и на основе теории, связывающей наблюдаемую интенсивность космических лучей в межзвездном пространстве с темпом их возникновения, можно легко определить, какая доля энергии типичной сверхновой заключена в релятивистских электронах и каково их распределение по энергиям. Имея эту информацию, можно предсказать спектр рентгеновского фона, предполо-



Артур Х. Комптон (1892—1962). (Архив Бетмана.)



Наблюдаемый энергетический спектр электронов космических лучей. Сплошной линией показан энергетический спектр «первичных» электронов, т. е. электронов, которые возникли в результате первичных процессов в источнике излучения, а не при столкновении протонов космических лучей с ядрами вещества межзвездной среды.

жив, что сверхновые в наше время обладают теми же свойствами, что и в эпоху Большой вспышки.

Результаты этих расчетов представлены на рисунках на с. 287 сплошной линией, которая почти неотличима от прямой, наилучшим образом аппроксимирующей экспериментальные результаты. Несомненно, столь хорошее совпадение следует признать случайностью. Вместе с тем сравнение теоретических расчетов с результатами наблюдений позволяет проверить по отдельности три различных аспекта теории. Во-первых, *наклон* кривой предсказанного спектра определяется наклоном кривой наблюдаемого энергетического спектра электронов космических лучей и теорией комптоновского рассеяния. Во-вторых, *амплитуда* спектра зависит от отношения полной энергии ультрарелятивистских электронов, образующихся при взрыве сверхновой, к энергии, излучаемой звездой за время ее жизни. Теория предсказывает, что это отношение равно отношению полных интенсивностей рентгеновского и микроволнового фонов. И наконец, теория успешно предсказывает *излом* в спектре, т. е. резкое изменение его наклона. Характерное значение энергии, при котором это происходит, зависит от наблюдаемой величины энергии, при которой обрывается низкоэнергетическая часть спектра электронов космических лучей, а также от момента времени, когда произошла Большая вспышка.

6. *Предполагаемая гипотеза может объяснить повышенную интенсивность фонового гамма-излучения при энергиях свыше 1 млн. эВ*.*

Магнитные поля, которые ускоряют электроны в плазме во время вспышек сверхновых, также ускоряют и протоны — основной компонент космических лучей. Столкновения этих протонов с молекулами межзвездного газа порождают наряду с другими короткоживущими частицами нейтральные пионы, каждый из которых вскоре распадается на пару фотонов высоких энергий. Энергия такого фотона выше 70 млн. эВ, что составляет половину энергии покоя пиона. В 1969 г. Флойд Стекер из Центра космических полетов им. Годдарда высказал предположение, что повышенная интенсивность гамма-фона в области энергий свыше примерно 1 МэВ (см. рисунок на с. 287) обусловлена распадом нейтральных пионов. Чтобы объяснить пороговый характер превышения, Стекер постулировал, что в прошлом, при красном смещении порядка 100, произошло резкое увеличение интенсивности протонной составляющей космического излучения. Фотоны, рожденные в результате этого, должны в нашу эпоху иметь энергии свыше примерно 0,7 МэВ. Гипотеза Большой вспышки автоматически создает начальные условия, благоприятствующие процессу Стекера.

7. *Если фоновое излучение обусловлено вспышкой звездообразования в догалактическую эпоху, то основная доля массы Вселенной сейчас должна быть сосредоточена в несветящихся объектах.*

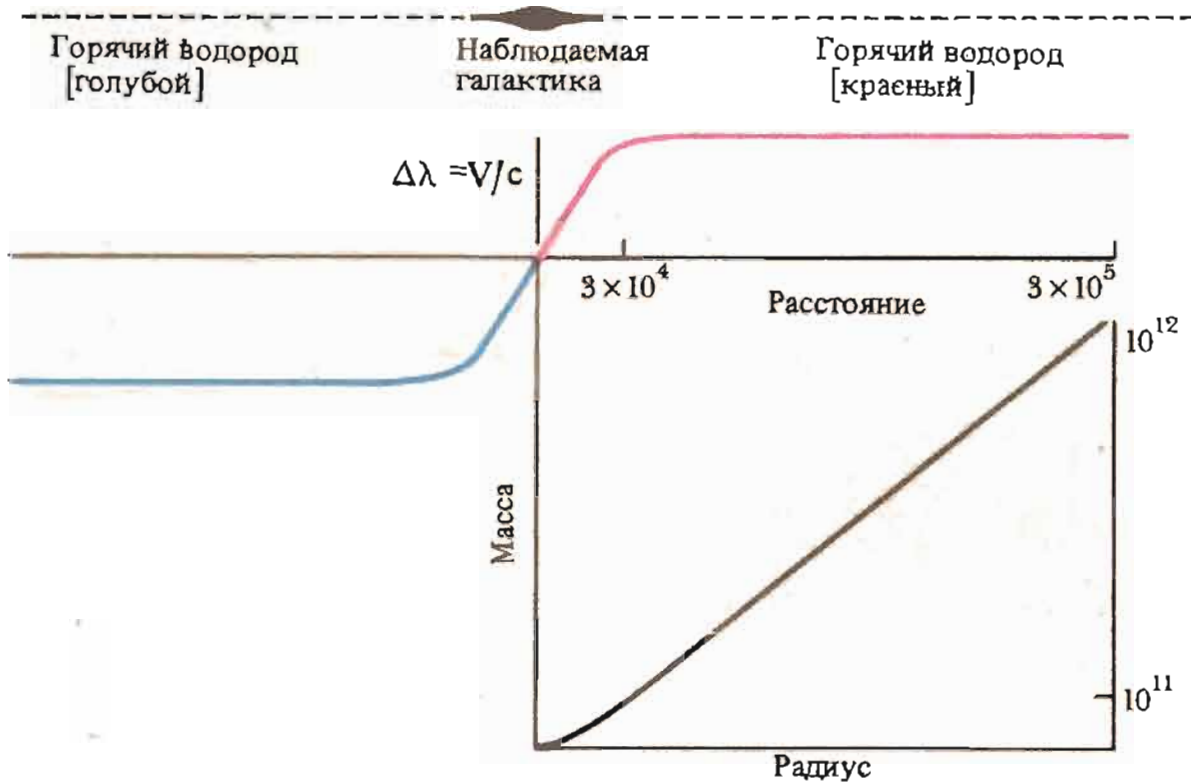
Этот вывод следует из: а) наших предыдущих оценок массы, которой должны обладать первичные массивные звезды, чтоб можно было объяснить ряд количественных и качественных особенностей фонового излучения; б) несомненного теоретического положения, что звезды существуют до тех пор, пока не исчерпают запасы ядерного топлива и в) наблюдений, свидетельствующих, что в видимых звездах содержится не более $1/10$ массы, которая должна быть заключена (согласно нашей гипотезе) в первичных, ныне умерших звездах.

Открытия последних лет явно подтверждают этот вывод, по крайней мере двумя независимыми способами.

Во-первых, в последнее десятилетие было обнаружено, что объекты, называемые «спиральными галактиками», — всего лишь центральные области систем, в 5—10 раз более протяженных и массивных. Эти оценки отчасти основаны на результатах наблюдений в радиодиапазоне ($\lambda \approx 21$ см) облаков атомарного водорода, которые движутся по круговым орбитам в центральной плоскости спиральных галактик, подобно тому как планеты движутся вокруг Солнца. Эти облака наблюдаются на расстояниях, намного превышающих видимые размеры галактик (см. рисунок на с. 290).

Основы второго метода, подтверждающего наш тезис, были заложены швейцарским астрофизиком Фрицем Цвикки. Используя теорему вириала (см. гл. 4), Цвикки в 1933 г. оценил массу богатого скопления галактик в созвездии Волосы Вероники (фотография которого приведена на с. 130), измерив лучевые скорости нескольких галактик, входящих в скопление. Он нашел, что «вириальная масса» скопления примерно в 400 раз превосходит сумму масс звезд, наблюдаемых в скоплении. Сейчас, после уточнения расстояния до скопления, найденное Цвикки отношение массы несветящегося вещества к массе светящегося вещества необходимо уменьшить в 10 раз. Применение того же метода к системам галактик подтверждает наиболее важный вывод

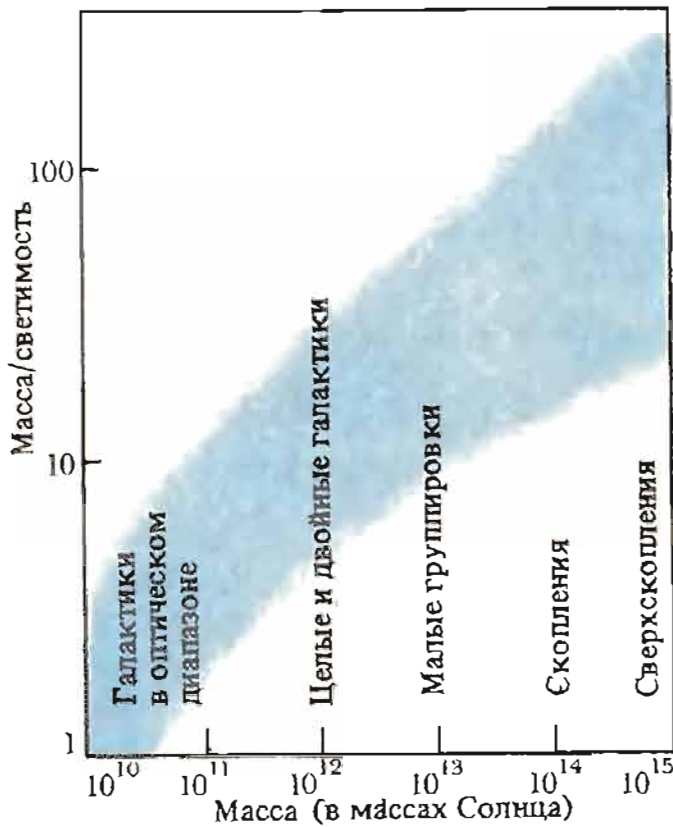
* Электронвольт (эВ) — единица измерения энергии, используемая в физике высоких энергий. Она равна энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов в 1 В ($1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг).



Измеряя доплеровский сдвиг в спектре излучения холодных облаков атомарного водорода в спиральной галактике (видимой сбоку или почти сбоку), можно определить кривую распределения скоростей движения облаков вдоль ее радиуса. Скорость V связана с расстоянием от центра галактики R и массой $M(R)$, сосредоточенной в пределах области радиуса R , соотношением $V^2 = M(R)/R$. Наблюдения показывают, что V не зависит от радиуса при больших значениях R . Отсюда следует, что $M(R) \sim R$ и, следовательно, основная часть массы галактик (90% или более) лежит за пределами видимой части галактик. Эта масса может быть сосредоточена в остатках гипотетических массивных звезд догалактического происхождения.

Цвикки: светящиеся звезды дают лишь малый вклад в массу богатых скоплений галактик. Оказалось также, что величина этого вклада заметно меняется от скопления к скоплению. И наконец, наблюдения свидетельствуют, что отношение массы несветящегося вещества к массе вещества, излучающего свет, систематически возрастает по мере продвижения по иерархии галактических систем: меньше всего оно для отдельных галактик и, увеличиваясь от двойных систем к кратным, а от них — к малым группам в скоплениях, достигает максимального значения в богатых скоплениях и сверхскоплениях, как показано здесь на диаграмме (см. с. 291).

Большинство сторонников гипотез первичного огненного шара ныне признают, что основная масса Вселенной должна быть сосредоточена в несветящемся веществе. Если это вещество представляет собой привычные виды материи — малые твердые частицы, астероиды, планеты, звезды крайне малых масс, остатки звезд, — то, как это видно из рисунка на с. 274, первичное содержание во Вселенной гелия и дейтерия, предсказываемое «стандартной моделью», трудно согласовать с наблюдениями. Некоторые сторонники гипотезы первичного огненного шара высказывают предположение, что скрытая масса сосредоточена не в обычном веществе, а в частицах особого вида — так называемых массивных нейтрино, существование которых предсказывается в некоторых вариантах теории элементарных частиц. Но даже если масса Вселенной в основном сосредоточена в этих гипотетических частицах, гипотеза огненного шара по-прежнему противоречит астрономическим оценкам первичного содержания гелия и дейтерия: если средняя плотность обычных видов



Отношение массы невидимого вещества к массе светящегося вещества в самогравитирующих (гравитационно связанных) системах непрерывно возрастает с увеличением массы систем. Однако при данной массе величина этого отношения варьируется в широких пределах.

вещества недостаточна, чтобы обеспечить первичное отношение водород-гелий на уровне 16:1, то получается, что первичное содержание дейтерия должно быть в 25 раз больше наблюдаемой величины.

Ни один из основанных на наблюдениях аргументов, свидетельствующих, как это сейчас предполагается, против гипотезы огненного шара, нельзя пока считать абсолютно надежным. Возможно, удастся показать, что первичное содержание гелия значительно превышает наблюдаемое ныне значение; быть может, выяснится, что межзвездный дейтерий имеет вторичное происхождение; возможно, измерения Вуди и Ричардса окажутся неверными из-за ошибочной калибровки, а объединенная теория электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий в один прекрасный день предскажет существование нейтрино с массой, в точности соответствующей величине, необходимой для устранения парадокса «скрытой массы». С полной уверенностью мы можем лишь утверждать, что на данном этапе астрономические соображения скорее свидетельствуют в пользу альтернативной гипотезы, согласно которой фоновое излучение представляет собой частично термализованный свет звезд*.

Происхождение астрономических систем

Космическое фоновое излучение не единственный ключ к разгадке тайн ранней истории Вселенной. Столь же важным в этом отношении и наиболее очевидным является другой факт: вещество во Вселенной сосредоточено в отдельных объектах, а не заполняет пространство равномерно.

Ньютон был уверен, что самогравитирующие облака должны образовываться в равномерно распределенном веществе самопроизвольно, однако он ошибался. Сгустки в однородной космической среде образуются не так, как кристаллы в переохлажденной жидкости. Столь же неприемлема и противоположная точка зрения, согласно которой самогравитирующие системы

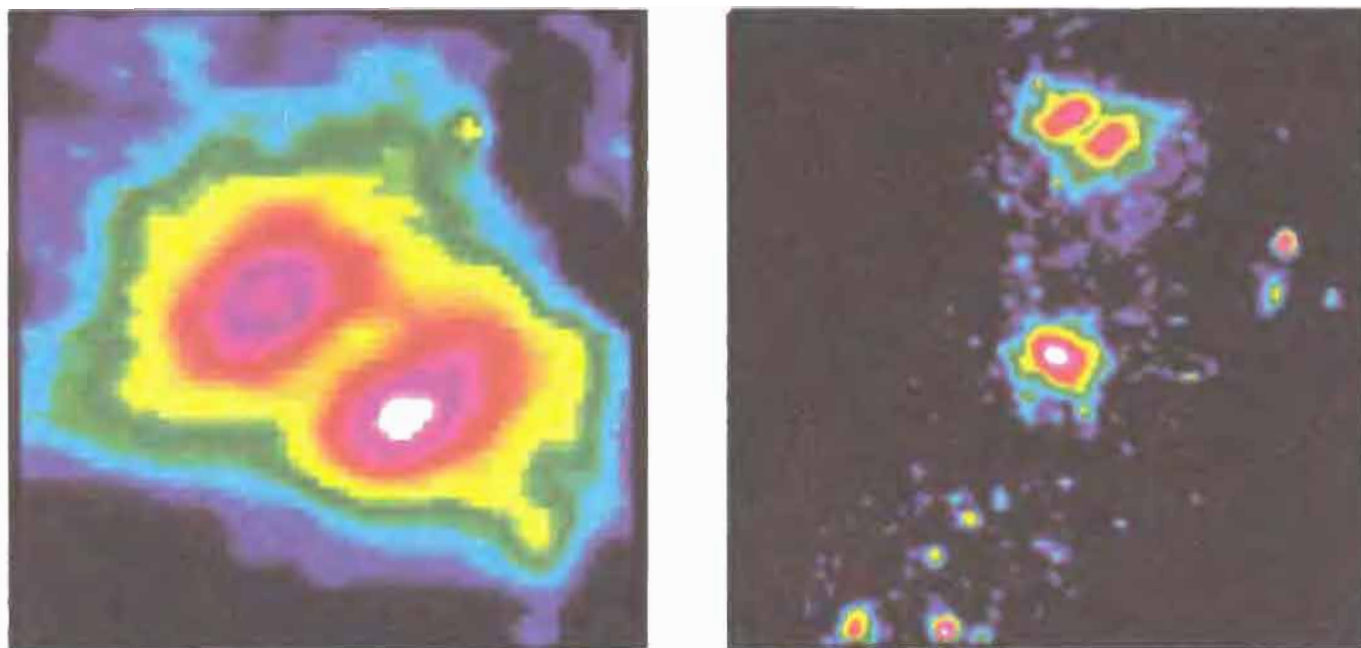
* По этому поводу см. Предисловие редактора перевода. — Прим. ред.

существовали всегда. Ни одна из наблюдаемых ныне астрономических систем не могла существовать на самых ранних этапах, когда плотность вещества Вселенной превосходила плотность атомных ядер. Если пространственная неоднородность вообще имела место в ранней Вселенной, то она должна была выглядеть подобно мелкой ряби на почти зеркальной поверхности моря. По этому поводу космологи едины во мнении. Трудности и разногласия вызывают вопросы о том, какого рода рябь могла через 10 млрд. лет породить наблюдаемые ныне структуры и как возникли первичные флуктуации.

Космологи также единодушны относительно того, что флуктуации плотности, которые впоследствии эволюционировали в самогравитирующие системы, не могли образоваться самопроизвольно ни на какой стадии первичного огненного шара. Первичный огненный шар устойчив относительно дробления на сгустки в силу тех же причин, по которым давление и температура воздуха в комнате всюду одинаковы. Следовательно, если принять гипотезу первичного огненного шара, то придется постулировать, что распределение вещества во Вселенной было неоднородным с самого начала или по крайней мере с того момента, когда Вселенная обрела состояние, для описания которого применимы законы современной физики. Итак, если ранняя Вселенная была горячей, то в ней также должны были быть неоднородности. Но какой величины и какого типа? Начиная с 1965 г. теоретики упорно ищут ответа на эти вопросы. Сейчас они пришли к выводу, что ряд общих допущений, которые большинству космологов казались наиболее естественными, не соответствует действительности. Проведенные с помощью ЭВМ детальные расчеты, основанные на этих предположениях, приводят к структурам, которые не существуют в природе, и в то же время эти расчеты не воспроизводят размеров и масс реально наблюдаемых астрономических систем.

Большинство космологов по-прежнему считают, что объяснение космическим неоднородностям можно найти в рамках стандартной модели, но некоторые ученые начинают исследовать и другие варианты объяснения. При этом космологи сталкиваются с такими же трудностями, как и историки. Они должны разработать сценарий, призванный связать и согласовать разнородные факты, интерпретация которых зависит от самого сценария. Но в таком случае некоторые факты превращаются, по словам историка Барбары Тучмен, в «живописные подробности, назначение которых — придать художественное правдоподобие убогому и неубедительному пересказу событий»; иные факты приходится отбрасывать как не относящиеся к делу, а остальные — как не вписавшиеся в теорию. Один и тот же факт ученый X может считать подтверждением теории, а ученый Y — противоречащим ей. Различные теории космической эволюции отличаются друг от друга прежде всего потому, что они придуманы для объяснения различной совокупности фактов. Мы видели, что гипотеза первичного огненного шара, предложенная первоначально для объяснения относительного содержания тяжелых элементов, затем (когда ее выводы были опровергнуты) возродилась, поскольку позволяла объяснить наблюдавшееся содержание гелия, и в конечном итоге была использована для интерпретации микроволнового фонового излучения. Гипотеза, объясняющая микроволновый фон термализацией света звезд, имеет другую родословную. Она была предложена для спасения выдвинутой ранее гипотезы о природе космической неоднородности — теории космического сгущивания. Далее мы рассмотрим эту теорию и ее следствия.

Из предыдущего раздела мы знаем, что в настоящее время установлен ряд фактов, которые говорят в пользу догалактического рождения массивных звезд. Но когда мы с Рэем Хайвели опубликовали в 1973 г. статью, касающуюся происхождения микроволнового фона, большинство астрономов сочли

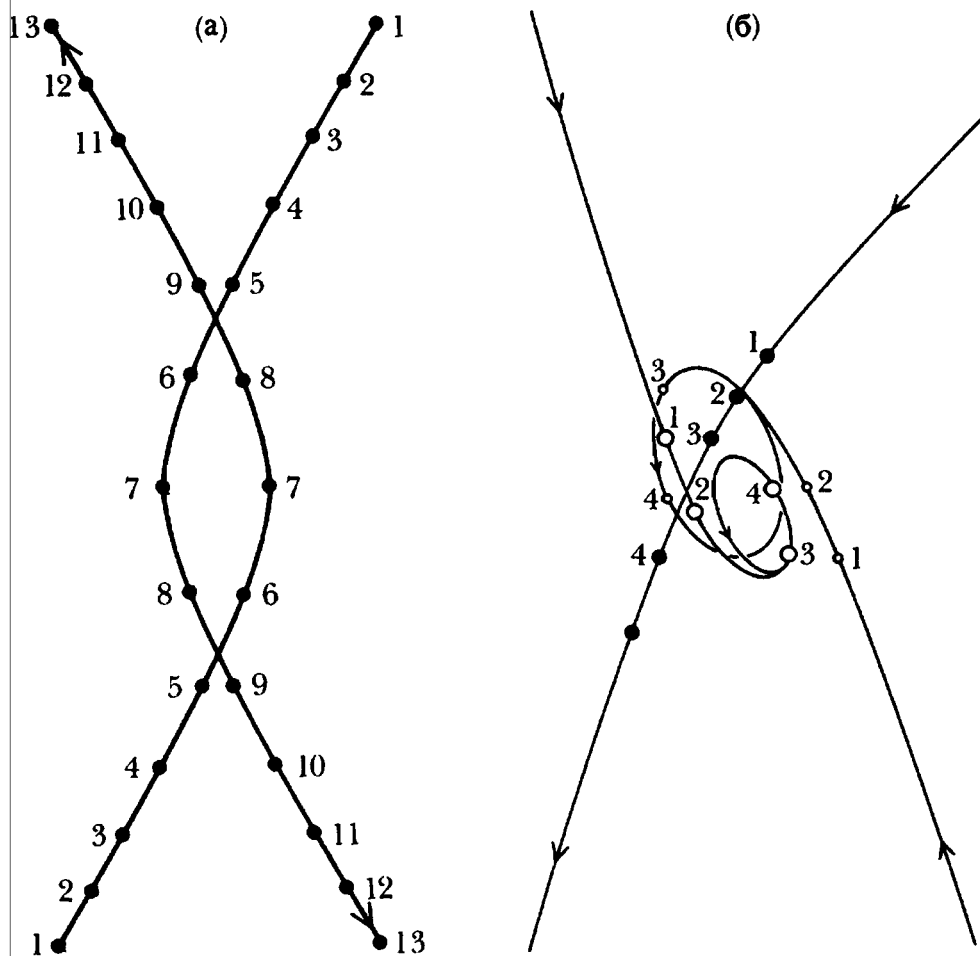


Рентгеновское изображение сверхскопления галактик (*справа*). Каждое из трех наиболее выделяющихся на снимке пятен представляет собой скопление галактик. Рентгеновское излучение обусловлено горячим газом внутри скоплений, температура которого достигает 10—100 млн. К. Два скопления, расположенные в нижней части фотографии, показаны в увеличенном виде на другом снимке (*слева*). Здесь мы видим два взаимодействующие скопления, окруженные общей оболочкой газа, который излучает в рентгеновском диапазоне. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. К. Джоунс)

нашу идею эксцентричной и неприемлемой. В то время казалось очевидным, что галактики возникли в виде бесструктурных газовых облаков, а звезды сконденсировались внутри их позднее. Сомнения на этот счет зародились у меня еще в 1951 г. — после того как выяснилось, что по крайней мере половина звезд в ближайших окрестностях Солнца входит в состав двойных систем, компоненты которых отстоят друг от друга на расстояния, сравнимые с диаметром Солнечной системы. Можно подумать, что двойные звезды образуются при близком прохождении одиночных звезд; однако, как показывает анализ, для этого необходимы *тройные* столкновения (см. приведенную далее диаграмму). В самом деле, энергия двойной системы отрицательна, тогда как начальная энергия звезд, проходящих мимо друг друга, положительна, поэтому третий партнер необходим, чтобы унести избыточную энергию. Однако в современную эпоху тройные столкновения происходят крайне редко и, следовательно, не могут объяснить столь высокий процент двойных систем. Можно предположить, что двойные системы образуются в результате деления быстро вращающихся одиночных звезд, но эту гипотезу также невероятно трудно подкрепить как теоретически, так и путем наблюдений.

Осознав, что двойные звезды, по-видимому, не могут образовываться при современных условиях, я задался вопросом: «А не могли ли они образоваться раньше, когда условия были более благоприятны для этого?». Мне стало ясно, что двойные и кратные звездные системы вполне могут возникнуть, если звезды конденсируются непосредственно из расширяющейся космической среды, когда ее средняя плотность была сравнима с современной плотностью Солнечной системы. Гипотеза, предполагавшая, что выделившиеся из космической среды протозвезды должны стремиться к образованию самогравитирующих систем, выглядела вполне правдоподобно и позволяла объяснить наличие столь большого числа таких систем в нынешнюю эпоху.

Но как только группировки протозвезд выделились из расширяющейся



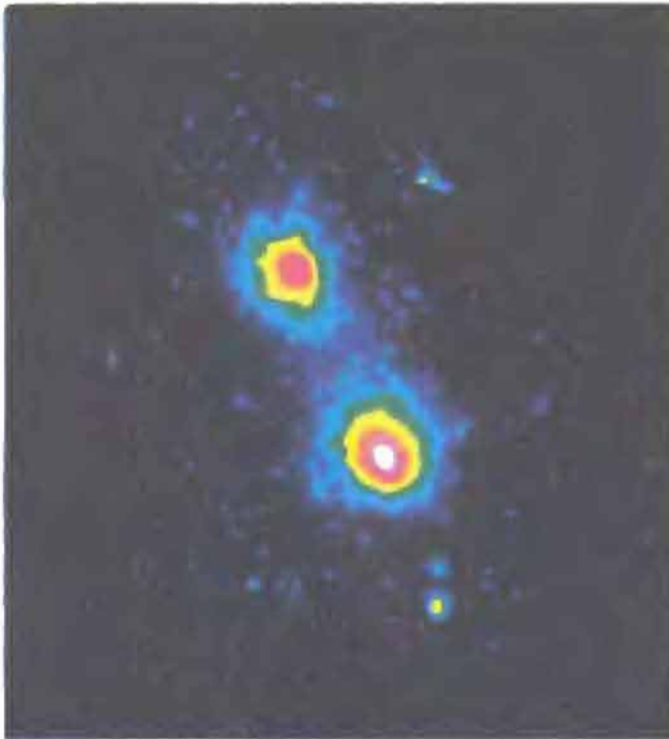
При близком прохождении двух звезд каждая звезда движется по гиперболической орбите (слева). Такое взаимодействие не приводит к образованию двойной звезды. При близком прохождении трех звезд одна из них, забрав значительную часть энергии, может улететь, а две оставшиеся звезды образуют гравитационно связанную систему (справа).

космической среды, они оказались в тех же условиях, что и отдельные прото-звезды ранее. В отличие от других сил гравитация действует в астрономических системах любых масштабов. Если вновь родившиеся прото-звезды объединились в группы, то последние сами должны объединяться в более крупные самогравитирующие комплексы на фоне продолжающегося расширения Вселенной, а те в свою очередь должны объединяться в еще более крупные системы. Таким образом, в результате повторения единого, независимого от масштабов процесса «гравитационного сгущения» шаг за шагом должна была возникнуть иерархия самогравитирующих систем. Эта картина, однако, противоречила распространенным в то время и сохранившимся до наших дней представлениям, согласно которым звезды образовались путем конденсации первоначально бесструктурных сжимающихся облаков газа, которые сами сформировались в результате фрагментации и сжатия первоначально бесструктурных сжимающихся газовых облаков большего размера.

Свою картину иерархической эволюции, обусловленной гравитационным сгущением, я изложил на заседании Американского астрономического общества в декабре 1952 г. Однако долгие годы это была всего лишь качественная картина, а не стройная теория. Оставались без ответа три основных вопроса:

1. Как возникли первые газовые облака?
2. Почему образовавшиеся группировки облаков стремятся объединиться, в то время как космическая среда расширяется? Иными словами, каков физический механизм гравитационного сгущения?
3. Каковы свойства результирующей иерархической системы в количественном отношении?

Ответ на первый вопрос дал в 1962 г. советский астрофизик академик Я. Б. Зельдович. Предположим, рассуждал Зельдович, что Вселенная начала расширяться из начального состояния при температуре, равной абсолютному нулю. Несмотря на низкую температуру, вещество Вселенной должно оста-



Два богатых скопления галактик, А 399 и А 401. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский центр. К. Джоунс.)

ваться газообразным до тех пор, пока его плотность превышает 0,1 плотности воды — лишь после этого оно начнет затвердевать. При дальнейшем расширении Вселенной вещество будет растрескиваться, дробясь на отдельные фрагменты. Используя сложную теорию роста трещин в напряженном твердом теле*, Зельдович оценил размеры фрагментов. Ниже мы изложим соображения, позволяющие оценить размер фрагментов более простым и, возможно, более надежным путем.

Силы, обуславливающие сцепление обычных твердых тел и жидкостей, связывают каждый атом (или молекулу) с их ближайшими соседями. Поэтому энергия, которую необходимо затратить, чтобы отделить от тела фрагмент, пропорциональна площади S и, следовательно, квадрату характерного размера фрагмента. Но масса фрагмента пропорциональна кубу размера, следовательно, чем больше фрагмент, тем меньшая энергия (на единицу массы) должна быть затрачена, чтоб он выделился. Подобно мыльному пузырю или мыльной пене, площадь поверхности фрагментов стремится уменьшиться до минимума, величина которого зависит от внешних условий. Единственное очевидное ограничение на размер фрагментов обусловлено тем, что предел прочности на разрыв должен быть достаточно большим, чтобы удержать фрагмент от разрушения. Образовавшийся фрагмент продолжает расширяться. Кинетическая энергия, связанная с расширением, почти точно равна гравитационной энергии в случае, когда фрагмент находится в пустоте. Если фрагмент сохраняет целостность, энергия сцепления должна превышать кинетическую энергию расширения — в противном случае фрагмент распадется по крайней мере на две части. И наоборот, фрагменты, у которых энергия связи значительно превосходит энергию расширения, будут, подобно мыльным пузырям, уменьшать свою общую площадь путем слияния. Из сказанного следует, что основная доля массы Вселенной будет сосредоточена во фрагментах, энергия расширения которых сравнима с энергией связи.

* В 1965 г., после открытия микроволнового фонового излучения, Зельдович отказался от такого подхода к космогонии. Подобно подавляющему большинству своих коллег, он расценил микроволновое фоновое излучение как *prima facie* (основное доказательство) справедливости теории первичного огненного шара.

Механизм гравитационного сгущивания

После того как космическая среда раздробится на твердые фрагменты, ее можно рассматривать как холодный, расширяющийся «газ», «молекулы» которого притягивают друг друга силами гравитации. Однако взаимодействие «молекул» космического газа отличается от взаимодействия молекул обычного газа. Молекулярные взаимодействия в обычном газе короткодействующие: они происходят, лишь когда расстояние между молекулами не превышает определенной величины (порядка 10^{-7} — 10^{-8} см), которая характерна для расстояний между молекулами в жидкостях и твердых телах. В «газе», состоящем из гравитационно взаимодействующих «молекул», нет характерного выделения расстояния. Радиус и интенсивность гравитационных взаимодействий зависят от размера и амплитуды крупномасштабных флуктуаций плотности в космическом «газе». Поскольку межмолекулярные силы в обычном газе имеют неизменный и ограниченный радиус действия, макроскопические свойства газа, хотя и зависят, но не прямо от его микроскопических свойств. При описании космического «газа» «микроскопические» и «макроскопические» подходы не делимы. Например, плотность жидких капель в паре зависит от структуры молекул, но не зависит от плотности пара, из которого они сконденсировались. Самогравитирующие группировки в расширяющемся космическом «газе», напротив, могут обособиться, как только их плотность слегка превысит среднюю плотность «газа», какой бы она ни была.

Космический «газ» отличается от обычного пара и еще одной важной особенностью. Каждое состояние пара, как видно из рисунка, характеризуется определенным давлением и плотностью. При этом часть молекул находится в виде газа, а часть входит в состав жидкой фазы. Однако существует одно особое состояние, соответствующее так называемой *критической точке* на диаграмме давление — плотность; это состояние не является ни жидкостью, ни газом, ни их смесью. Когда пар достигает этого своеобразного состояния, наблюдается явление, называемое «критической опалесценцией»: среда приобретает мутный молочный цвет, обусловленный крупномасштабными флуктуациями плотности. Согласно рассмотренной ниже теории, космический «газ» постоянно находится в критическом состоянии, а разбиение вещества на фрагменты — это результат наличия неустойчивостей, аналогичных тем, которые порождают критическую опалесценцию в обычном паре.

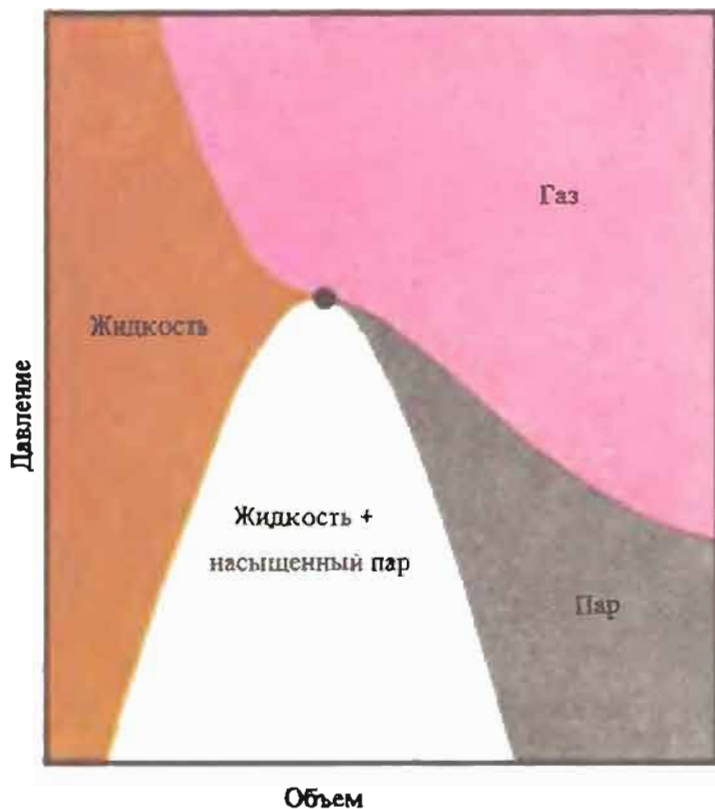
Рассмотрим для начала газ, молекулы которого представляют собой частицы одинаковой массы, притягивающие друг друга с силой, пропорциональной межмолекулярному расстоянию в некой отрицательной степени β . Предположим, что такой газ заключен в сосуд объемом V . Уравнение (8.5), выведенное Рудольфом Клаузиусом в 1870 г., связывает полную кинетическую энергию молекул K , потенциальную энергию молекулярного взаимодействия U , давление p и объем V :

$$2K + (\beta - 1)U = 3pV. \quad (8.5)$$

В идеальном газе молекулы совсем не взаимодействуют, следовательно, $U = 0$ и $2K = 3pV$. Давление, объем и температура идеального газа связаны соотношением

$$pV = N\Theta, \quad (8.6)$$

где N — число молекул в сосуде, Θ — абсолютная температура, измеренная



Фазовая диаграмма пара обычного вещества наглядно демонстрирует, при каких значениях давления и плотности (которая обратно пропорциональна объему) вещество существует в той или иной фазе. В критической точке пар неустойчив относительно возникновения крупномасштабных флуктуаций плотности, которые приводят к явлению, называемому критической опалесценцией.

в энергетических единицах*. Поделив уравнение (8.6) на (8.5), получим:

$$\Theta = \frac{2}{3} \frac{K}{N},$$

т. е. абсолютная температура идеального газа равна $2/3$ кинетической энергии одной молекулы. То же соотношение можно использовать для определения температуры и в том случае, когда молекулы взаимодействуют друг с другом.

Рассмотрим теперь заполненный газом цилиндр, снабженный движущимся поршнем. Если при малом изменении объема на величину ΔV отсутствует приток или отток тепла к газу, то энергия $K+U$ изменится на величину, равную работе, совершенной поршнем под действием давления: $\Delta(K+U) = -p\Delta V$ или

$$\frac{d(K+U)}{dt} + p \frac{dV}{dt} = 0. \quad (8.7)$$

Выразив p из уравнения (8.5) и подставив полученное выражение в уравнение (8.7), получим:

$$\frac{d(K+U)}{dt} + \frac{1}{3} \frac{2K + (\beta-1)U}{V} \frac{dV}{dt} = 0. \quad (8.8)$$

Теперь можно приступить к описанию расширяющегося космического «газа», состоящего из взаимодействующих друг с другом частиц. Обозначим через v скорость частицы относительно стандарта покоя в точке пространства, в которой находится частица в данный момент. В гл. 7 мы видели, что скорость медленно движущейся свободной частицы обратно пропорциональна

* Общепринятая единица измерения температуры — градус по шкале Цельсия или Кельвина — равна 0,01 температурного интервала между точками кипения и замерзания воды на уровне моря. Отношение энергии, равной 1 эрг, к этой единице называется постоянной Больцмана и обозначается символом k . Таким образом, $\Theta = k \cdot T$, где T — абсолютная температура, измеренная в градусах, а $k \approx 1,4 \cdot 10^{-16}$ эрг/град = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

космическому масштабному фактору $a(t)$. Поэтому уравнение движения свободной частицы в расширяющемся космическом «газе» отлично от соответствующего уравнения механики Ньютона ($dv/dt = 0$) и имеет вид:

$$\frac{d(av)}{dt} = 0, \quad (8.9)$$

что эквивалентно

$$\frac{dv}{dt} = -Hv, \quad (8.10)$$

поскольку постоянная Хаббла H равна \dot{a}/a .

Что служит аналогом *второго* закона Ньютона при движении частиц в расширяющемся космическом «газе»? Отклонение от равнозамедленного движения, описываемого уравнением (8.10), обусловлено наличием *неоднородностей (флуктуаций)* в распределении плотности, величину которых характеризует разность между локальным и средним значением плотности:

$$\rho'(x, y, z, t) \equiv \rho(x, y, z, t) - \bar{\rho}(t). \quad (8.11)$$

Заметим, что величина ρ' может принимать как положительные, так и отрицательные значения и не дает вклада в массу области, размеры которой велики по сравнению с размером локальных неоднородностей. Флуктуации плотности порождают флуктуации гравитационного поля, которое связано здесь с распределением массы точно так же, как в теории Ньютона. Таким образом, аналогом второго закона Ньютона, будет уравнение

$$\frac{dv}{dt} = -Hv + \mathbf{f}, \quad (8.12)$$

где \mathbf{f} — флуктуирующая сила тяготения, отнесенная к единице массы (т. е. гравитационное ускорение).

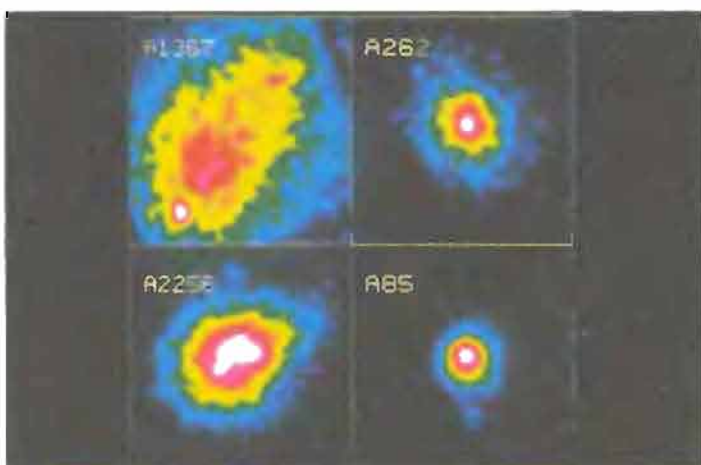
Поскольку положительные и отрицательные флуктуации плотности дают одинаковый вклад в поле, величина \mathbf{f} практически целиком определяется распределением массы внутри сферы радиусом, в несколько раз превышающим максимальный линейный масштаб флуктуаций плотности. Вклады в гравитационное поле, вносимые более удаленными областями, взаимно уничтожаются. Это значит, что *флуктуирующее поле тяготения имеет конечную область действия*, а следовательно, его проявление сходно с проявлением межмолекулярных сил в обычном газе.

Уравнение (8.12) играет ту же роль при описании расширяющегося космического «газа», что и второй закон Ньютона при описании поведения обычного газа. Продолжая эту аналогию, мы с Уильямом Ирвином в 1960 г. вывели уравнение, описывающее сохранение энергии расширяющегося космического «газа». Это уравнение имеет тот же вид, что и уравнение (8.8) при $\beta = 2$ (поскольку гравитационное взаимодействие описывается законом обратных квадратов); K теперь означает кинетическую энергию движения относительно локального стандарта покоя, а U — потенциальную энергию флуктуирующего поля тяготения. K выражается, как и прежде:

$$K = \Sigma \frac{1}{2} m_i v_i^2, \quad (8.13)$$

где индекс i относится к частице с номером i , причем суммирование ведется по всем частицам, имеющимся в выделенном (расширяющемся) объеме V . Чтобы получить выражение для U , мысленно разобьем объем V на малые ячейки одинакового объема ΔV и введем понятие «избыточной массы» ячейки:

$$m' = (\rho - \bar{\rho}) \Delta V \equiv \rho' \Delta V. \quad (8.14)$$



Четыре скопления галактик. Скопления, показанные в левой части рисунка (A 1367 и A 2256), выглядят более «размытыми», чем скопления A 262 и A 85, в центральной области которых находятся гигантские галактики, подобные галактике M 87 в скоплении Девы (см. рис. на с. 283). Скопления, изображенные в верхней части рисунка (A 1367 и A 262), в динамическом отношении находятся на более ранней стадии эволюции, чем два другие, на что указывает ряд факторов, а именно: температура газа, дисперсия скоростей галактик, относительная численность спиральных галактик и наличие небольших газовых корон вокруг отдельных галактик. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. К. Джоунс.)

Тогда U выразится соотношением (ср. с уравнением (4.14)):

$$U = \sum_i \sum_j - \frac{1}{2} \cdot \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}}. \quad (8.15)$$

Суммирование здесь производится по каждой паре ячеек. И, наконец, заменив в уравнении (8.8) V на a^3 , получим

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{a^3} \frac{da^3}{dt} = \frac{3\dot{a}}{a} = 3H. \quad (8.16)$$

В результате энергетическое уравнение (8.8) для расширяющегося космического газа принимает вид:

$$\frac{d}{dt} (K + U) + H(2K + U) = 0, \quad (8.17)$$

причем величины K и U выражаются формулами (8.13) и (8.15).

Наиболее очевидное отличие уравнения (8.17) от аналогичного уравнения для изолированной системы гравитационно взаимодействующих частиц заключается в том, что полная энергия частиц $K + U$ в расширяющемся объеме, вообще говоря, не остается постоянной во времени. Но, кроме того, уравнение (8.17) отличается от своего классического аналога и еще в одном не менее важном отношении. Потенциальная энергия изолированной системы, которая фигурирует в классическом уравнении, пропорциональна квадрату массы и обратно пропорциональна размеру системы. Поэтому если мы удвоим массу изолированной системы, сохранив неизменной ее среднюю плотность, то увеличим потенциальную энергию системы более чем в два раза. Напротив, потенциальная энергия U , описываемая уравнением (8.15), прямо пропорциональна массе расширяющейся области, если ее размеры велики по сравнению с наибольшим линейным масштабом флуктуаций плотности. Это связано с тем, что флуктуирующее гравитационное ускорение f в произвольно выбранной точке пространства почти целиком зависит от распределения флуктуирующей компоненты плотности внутри сферы, диаметр которой в несколько раз превосходит наибольший линейный масштаб вариаций плотности. В этом важном отношении гравитационное взаимодействие, обусловленное флуктуациями плотности, напоминает взаимодействие между частицами в обычном газе. Как и в обычном газе, потенциальная энергия, связанная с этим взаимодействием, пропорциональна объему области, к которой она

относится, если размеры последней велики по сравнению с характерным радиусом взаимодействия.

Потенциальную энергию U можно выразить в виде, который подчеркивает зависимость ее от объема V области и масштаба L локальных флуктуаций плотности:

$$U = -2\pi G\bar{\rho}\alpha^2 L^2 \cdot \bar{\rho}V. \quad (8.18)$$

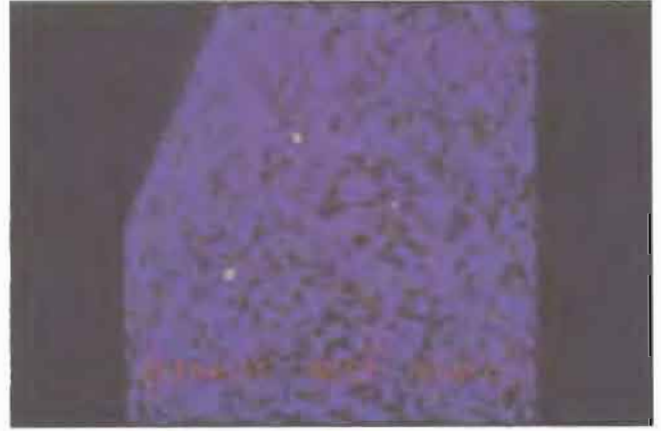
Здесь L обозначает среднюю величину масштаба флуктуаций плотности, а α — относительную амплитуду этих флуктуаций. Это уравнение показывает не только то, что потенциальная энергия пропорциональна объему, но и что она всегда отрицательна.

Какую информацию относительно эволюции расширяющегося «газа» мы можем получить из уравнения (8.17)? Предположим для начала, что кинетическая энергия K численно много больше, чем потенциальная энергия U . Согласно уравнению (8.17), в этом случае космический «газ» ведет себя подобно обычному газу, который при расширении выталкивает поршень: при этом он просто-напросто охлаждается.

Теперь допустим, что K и U примерно равны по величине. В этом случае возникает любопытная ситуация. Из уравнения (8.17) следует, что космическое расширение приводит к уменьшению энергии $K + U$, пока величина $2K + U > 0$. Если бы $2K + U$ было больше нуля, а $K + U$ — меньше нуля, то по мере расширения сумма $K + U$ становилась бы все более отрицательной, т. е. ее абсолютная величина должна возрастать. Следовательно, величина U возрастала бы по модулю, а это означает, что распределение массы становится все более неоднородным и компактным. Таким образом — по крайней мере с формальной точки зрения, — в холодном расширяющемся космическом «газе» мог бы происходить непрерывно нарастающий процесс скупивания. Попробуем разобраться, что же происходит на самом деле.

В момент своего возникновения космический «газ», состоящий из вновь образовавшихся фрагментов, имеет нулевую энергию: хаотический компонент скорости каждого фрагмента еще равен нулю, а распределение плотности в пространстве пока однородно. По мере обособления фрагментов появляется флуктуирующее гравитационное поле, которое приводит к ускоренному (хаотичному. — *Перев.*) движению фрагментов. Давление, пропорциональное $2K + U$, становится положительным, вследствие чего энергия области, размеры которой велики по сравнению с характерным размером фрагментов, уменьшается, принимая отрицательное значение. Излагаемые ниже соображения позволяют предположить, что космический «газ» отныне будет неустойчив относительно роста крупномасштабных возмущений плотности.

От чего зависит устойчивость или неустойчивость газа относительно самопроизвольного роста флуктуаций плотности? Классическая термодинамика дает простой ответ на этот вопрос. Рассмотрим малую сферическую область в газе. Если сжать эту область, не меняя ее температуры, и давление газа внутри области возрастет, то газ устойчив относительно роста флуктуаций плотности любого размера, поскольку возросшее давление будет стремиться вернуть газ к исходному состоянию. Если же давление внутри области, наоборот, уменьшится, то газ неустойчив относительно роста возмущений плотности любого масштаба. В обычном газе небольшое уменьшение объема при постоянной температуре всегда приводит к возрастанию давления. В водяном паре вблизи критической точки увеличение давления, обусловленное некоторым уменьшением объема при постоянной температуре, очень мало и обращается в нуль в критической точке. Упомянувшееся выше явление критической опалесценции показывает, что газ стал неустойчивым



Изображение одной и той же области неба в оптическом и рентгеновском диапазоне. Оптическая фотография позволяет отождествить источники рентгеновского излучения. Один из источников — звезда, а два других — квазары. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. Р. Джаккони, С. Мюррей.)

относительно самопроизвольного роста крупномасштабных возмущений плотности.

Подставляя в уравнение (8.5) $\beta = 2$ и заменяя U выражением (8.18), получаем выражение для давления космического «газа»

$$p = \frac{N\Theta}{V} - \frac{2\pi}{3} G\alpha^2 \bar{\rho}^2 L^2. \quad (8.19)$$

Если сжать область, размеры которой значительно превышают величину L , то отношение плотностей α останется неизменным, а относительные изменения V , $\bar{\rho}$ и L будут связаны соотношением

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = 3 \frac{\Delta L}{L}. \quad (8.20)$$

Используя (8.20), получаем из уравнения (8.19) соотношение, связывающее изменение давления в газе с изменением объема при постоянной температуре:

$$\Delta p = \left(\frac{N\Theta}{V} - \frac{4}{3} \frac{2\pi}{3} G\alpha^2 \bar{\rho}^2 L^2 \right) \left(-\frac{\Delta V}{V} \right) = \left(p - \frac{1}{9} 2\pi G\alpha^2 \bar{\rho}^2 L^2 \right) \left(-\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (8.21)$$

Таким образом, изменение давления и изменение объема имеют противоположный знак в том и только том случае, когда давление превосходит некоторую положительную величину:

$$p_{\text{крит}} = \frac{1}{9} \cdot 2\pi G\alpha^2 \bar{\rho}^2 L^2. \quad (8.22)$$

Если давление меньше $p_{\text{крит}}$, то «газ» будет неустойчив относительно роста флуктуаций плотности. Возникающее при этом движение приводит к возрастанию давления до сверхкритического значения, подавляя тем самым неустойчивость. С другой стороны, вследствие расширения Вселенной давление стремится уменьшиться, поскольку при этом первый член уравнения (8.19) убывает быстрее, чем второй. Действуя противоположным образом, эти факторы удерживают давление вблизи критического значения.

Из условия $p = p_{\text{крит}}$ и уравнения (8.19) следует, что кинетическая и полная энергии составляют постоянную долю потенциальной энергии газа:

$$K = -\frac{2}{3} U, \quad E \equiv K + U = \frac{1}{3} U. \quad (8.23)$$

Подставляя эти соотношения в энергетическое уравнение (8.17) и учитывая, что $H = \dot{a}/a$, мы в конечном итоге приходим к важному заключению: *кинетическая, потенциальная и полная энергии любой большой расширяющейся области возрастают с одинаковой скоростью, которая пропорциональна масштабному фактору:*

$$K, U, E \sim a(t). \quad (8.24)$$

Этот результат означает, что процесс сгущивания вещества во Вселенной непрерывно нарастает. Но каким образом? В уравнении (8.18) произведение $\bar{\rho}V$ не зависит от времени, так что $\bar{\rho} \sim a^{-3}$. Поэтому произведение $\alpha^2 L^2$ должно возрастать пропорционально четвертой степени масштабного фактора. Когда амплитуда возмущений становится порядка единицы, группировка неоднородностей размером L начинает выделяться в самогравитирующую систему, после чего ее энергия сохраняется примерно постоянной. Таким образом, при расширении Вселенной α остается постоянной величиной, близкой к единице. Отсюда следует, что масштаб сгущивания L возрастает пропорционально квадрату масштабного фактора

$$L \sim a^2. \quad (8.25)$$

Масса образующейся самогравитирующей системы $M \sim \bar{\rho}L^3$, и поэтому

$$M \sim a^3. \quad (8.26)$$

Уравнения (8.24)—(8.26) описывают наиболее важные аспекты процесса сгущивания. По мере расширения Вселенной появляются все более массивные системы. Этот процесс противоположен общепринятым ныне представлениям, согласно которым сжимающиеся газовые облака распадаются на отдельные фрагменты, которые в свою очередь распадаются на еще более мелкие фрагменты и т. д.

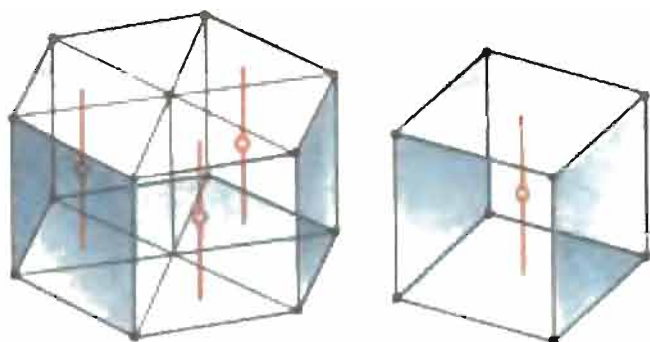
Масса самогравитирующих систем, которые только начали выделяться из окружающей среды, возрастает пропорционально кубу масштабного фактора, а их размер — пропорционально квадрату масштабного фактора, т. е. пропорционально массе в степени $2/3$. Энергия ε , приходящаяся на единицу массы группировок, пропорциональна масштабному фактору, т. е. корню кубическому из массы группировки:

$$D \sim M^{2/3}, \quad \varepsilon \sim \frac{M}{D} \sim M^{1/3}. \quad (8.27)$$

Чтобы вычислить коэффициенты пропорциональности в этих соотношениях, необходимо знать величину ε в начальный момент процесса сгущивания.

В тот момент, когда космическая среда распадается на фрагменты, кинетическая энергия K и потенциальная энергия U области, размер которой существенно превышает размер типичного фрагмента, одновременно равны нулю. После того как фрагменты выделились, появляется флуктуирующее гравитационное поле, которое их ускоряет. Энергия $K + U$ уменьшается от исходного нулевого значения, становясь отрицательной, в результате чего «газ», состоящий из твердотельных фрагментов, делается неустойчивым относительно сгущивания. По моим оценкам, в момент возникновения неустойчивости энергия единицы массы $(K + U)/\bar{\rho}V$, которую мы обозначили ε , равна

$$\varepsilon_1 = -\frac{1}{3}QR_j^2\left(\frac{Gm_j}{R^3}\right), \quad (8.28)$$



В кристалле молекулярного водорода ячейка решетки состоит из плотно упакованных гексагональных элементов (слева), каждый из которых занимает одна молекула водорода. Кристалл металлического водорода состоит из объемноцентрических кубических ячеек (справа), в центре каждой из которых расположен протон, тогда как электроны могут свободно перемещаться по кристаллу.

где m_f — масса типичного фрагмента, R — радиус сферы массой m , а R_f — размер типичного фрагмента. Величина R_f связана с массой m_f и плотностью твердой среды в момент фрагментации ρ_* соотношением

$$m_f = \frac{4}{3} \pi R_f^3 \rho_* \quad (8.29)$$

Q — малое число, величину которого трудно оценить, но, вероятно, оно лежит в диапазоне от 0,1—0,01.

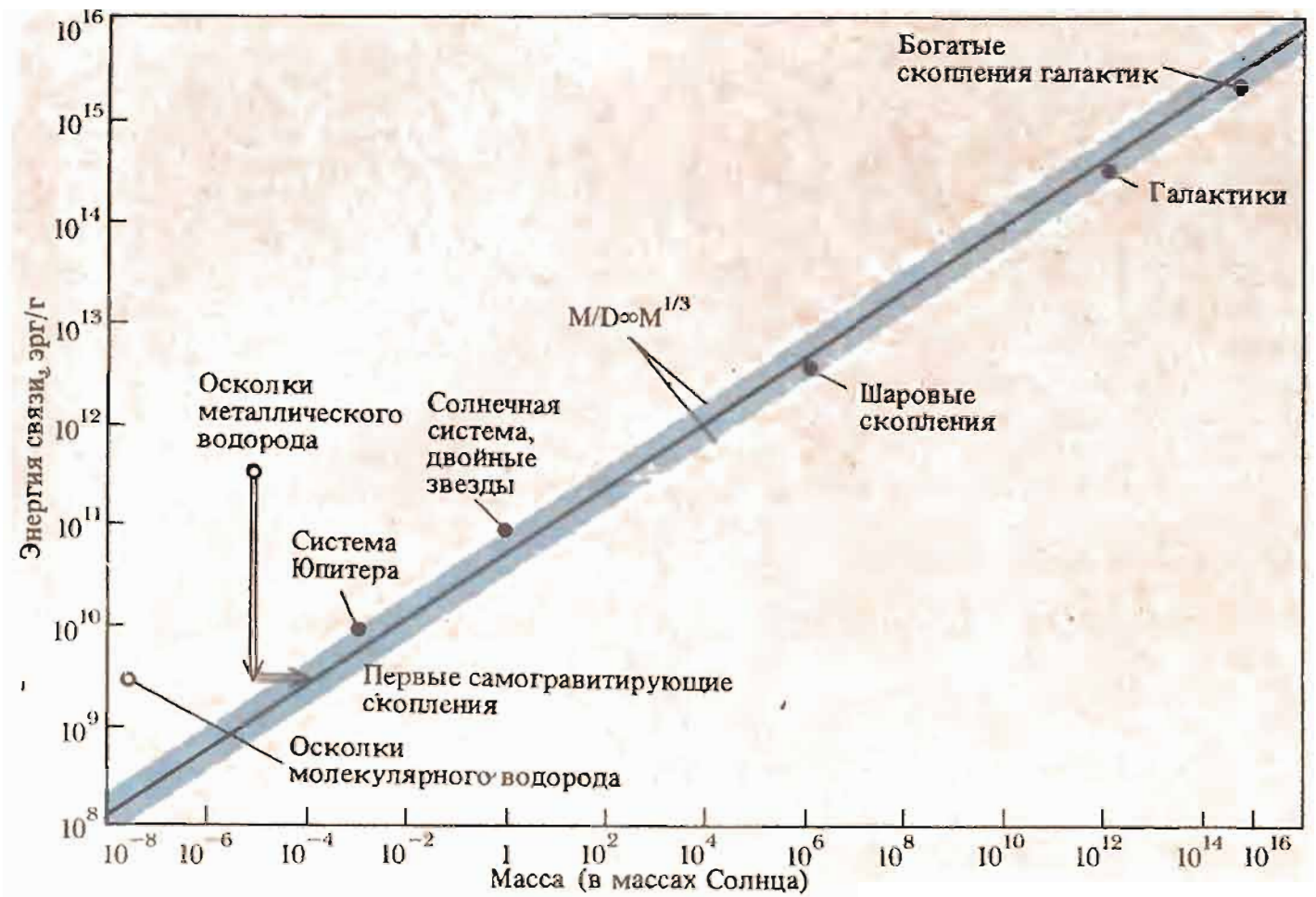
Ранее мы уже видели, что гравитационная потенциальная энергия единицы массы типичного фрагмента должна быть сравнима с энергией связи единицы массы твердотельной среды ϵ_* :

$$\epsilon_* \approx \frac{3}{5} \frac{G m_f}{R_f} \quad (8.30)$$

Уравнения (8.29) и (8.30) можно использовать для оценки массы и радиуса типичного фрагмента, если бы нам была известна плотность ρ_* и энергия связи единицы массы ϵ_* твердотельной среды.

В работе, опубликованной в 1963 г., Я. Б. Зельдович высказал предположение, что холодное вещество Вселенной, почти полностью состоящее из водорода, при кристаллизации образует молекулярную решетку, подобную той, что показана на левом рисунке. В 1970 г. Рэй Хайвели, в ту пору аспирант Гарвардского университета, выполнил тщательные квантовомеханические расчеты, из которых следовало, что кристаллизация водорода может приводить не только к образованию молекулярной решетки, но и к возникновению так называемого металлического водорода, свойства которого сходны со свойствами металлического натрия. В ту пору, когда Хайвели писал свою диссертацию, существование устойчивой металлической фазы водорода было под сомнением. Позднее физикам удалось получить металлический водород, хотя и на короткое время*, а открытие магнитного поля Юпитера навело астрономов-планетологов на мысль о том, что ядро этой планеты состоит из металлического водорода. Выполненные Хайвели расчеты дают основание предположить, что на ранних этапах эволюции Вселенной водород мог перейти в твердое состояние, а затем, будучи в металлической фазе, раздробиться на фрагменты, хотя нельзя полностью игнорировать и возможность кристаллизации с образованием молекулярной решетки. Не исключено также, что сначала образовался металлический водород, а затем, после фазового перехода, появились молекулярные кристаллы. Согласно оценкам Хайвели, плотность твердой среды ρ_* в момент начала фрагментации и энергия связи на единицу массы ϵ_* в случае металлического водорода равны соответственно: $\rho_* = 0,65 \text{ г/см}^3$, $\epsilon_* = 4 \cdot 10^{11} \text{ эрг/г}$. Аналогичные величины для молекулярных кри-

* Эксперименты, в результате которых был якобы получен металлический водород, ныне рассматриваются как недостоверные. — *Прим. перев.*



Представленная в логарифмическом масштабе зависимость удельной энергии связи от массы согласно теории гравитационного сжатия. Точками изображены различные типы самогравитирующих систем.

сталлов равны $\rho_* = 0,089 \text{ г/см}^3$, $\epsilon_* = 4 \cdot 10^9 \text{ эрг/г}$. Из уравнений (8.29) и (8.30) вычислим массы фрагментов:

$$m_f = \begin{cases} 2 \cdot 10^{28} \text{ г} = 10^{-5} M_\odot & (\text{металлический водород}), \\ 5 \cdot 10^{25} \text{ г} = 2,5 \cdot 10^{-8} M_\odot & (\text{молекулярный кристалл}). \end{cases}$$

Фрагменты с молекулярно-кристаллической структурой соответствуют по массе наиболее крупным спутникам Юпитера и Сатурна, а фрагменты, состоящие из металлического водорода, превосходят по массе Землю и на один-два порядка менее массивны, чем планеты-гиганты.

С учетом уравнения (8.30) выражение (8.28) для первоначальной удельной энергии сжатия можно записать в виде:

$$\epsilon_1 = -\frac{5}{9} Q \left(\frac{R_f}{R} \right)^3 \epsilon_* \quad (8.31)$$

Отношение R_f/R , вероятно, лежит в интервале $1/2 - 1/3$, а величина Q — в интервале $0,1 - 0,01$.

На приведенном здесь графике представлена зависимость энергии связи ($-\epsilon_1$) самогравитирующих систем от их массы m , начиная с систем типа Юпитера и Сатурна, и кончая богатыми скоплениями галактик. Для сравнения проведена линия, соответствующая теоретической оценке величины отношения $\epsilon/\epsilon_1 = (m/m_f)^{1/3}$, где ϵ_1 находится из (8.31). Результаты наблюдений во всем диапазоне (18 порядков!) хорошо согласуются с теоретической зависимостью, полученной в предположении, что первичные фрагменты

состояли из металлического водорода, плотность и энергия связи которого были приняты равными значениям, полученным Хайвели.

Изложенная выше теория гравитационного сгущения основана на предположении о том, что пространство Вселенной евклидово и бесконечно. Ранее мы видели, что оценки средней плотности массы в космосе (сделанные в предположении, что отношение масс невидимого и светящегося вещества во Вселенной в целом такое же, как в Местном сверхскоплении) дают значение, которое по крайней мере вдвое меньше величины, соответствующей нулевой кривизне пространства. Теория гравитационного сгущения позволяет оценить кривизну пространства более прямым путем, не делая предположений об относительном вкладе светящегося и несветящегося вещества в массу Вселенной.

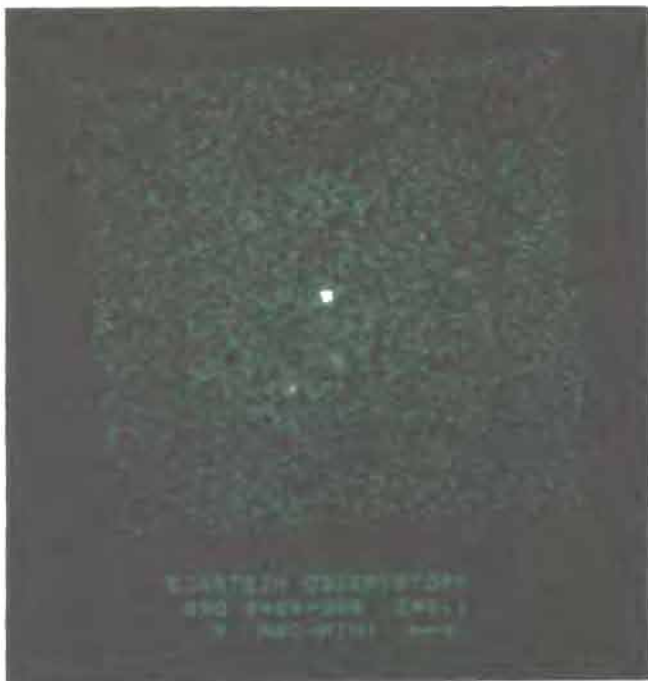
Предположим, что кривизна пространства отрицательна, т. е. средняя плотность Вселенной меньше, чем величина, соответствующая нулевой кривизне. В этом случае каждая сферическая область, если ее рассматривать как ньютоновскую систему, будет иметь положительную полную энергию. Теорию гравитационного сгущения легко видоизменить, чтобы учесть это обстоятельство. Энергию связи на единицу массы скопления, которое образовалось в момент, когда масштабный фактор был равен a , нужно дополнительно умножить на величину

$$1 - 3[(1/\Omega_0) - 1]a, \quad (8.32)$$

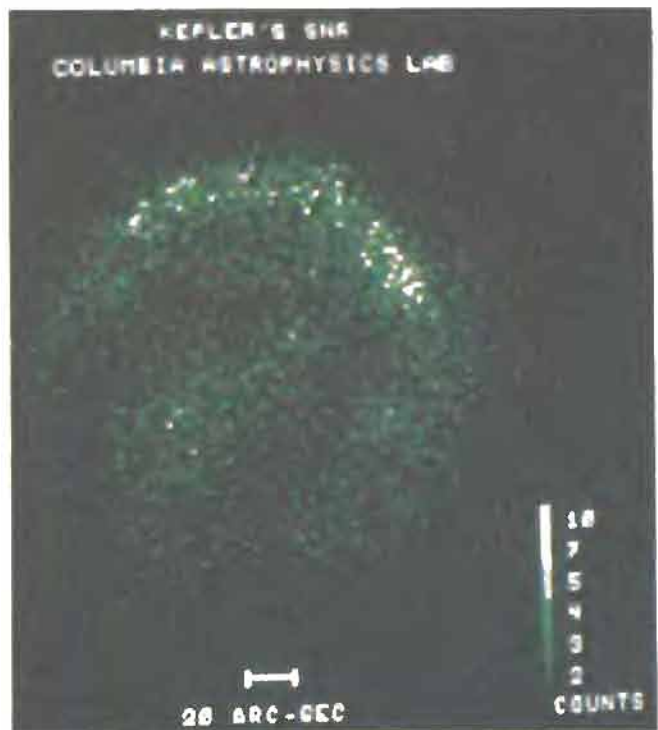
где Ω_0 обозначает отношение плотности Вселенной в современную эпоху к плотности, которую ныне имела бы Вселенная, если бы ее кривизна была равна нулю. Средняя плотность в Местном сверхскоплении, по-видимому, отличается от средней плотности вещества во Вселенной не более чем вдвое; следовательно, эта система либо сформировалась совсем недавно, либо процесс формирования еще продолжается. Кроме того, удельная энергия связи удовлетворяет теоретической зависимости, полученной для пространства с нулевой кривизной (см. приведенный выше рисунок). Это, по-видимому, означает, что множитель (8.32) близок к единице, а следовательно, близка к единице и величина Ω_0 . Простейшая возможность, которая одновременно согласуется с современной теорией и наблюдениями, — считать $\Omega_0 = 1$, т. е. предположить, что кривизна Вселенной равна нулю. Это означает, что пространство бесконечно и расширение Вселенной будет длиться вечно, как и процесс сгущения. Если же $\Omega_0 < 1$, то пространство также бесконечно и расширение будет продолжаться вечно, но процесс сгущения прекратится, когда множитель (8.32) станет равным нулю, т. е. когда $a^{-1} = 3(\Omega_0^{-1} - 1)$.

Вселенная видимая и невидимая

Та теория микроволнового фонового излучения, которую мы рассмотрели в начале этой главы, основана на предположении о том, что значительная доля массы Вселенной была сосредоточена в догалактическом поколении массивных звезд. Теория гравитационного сгущения, описанная в предыдущем разделе, согласуется с этой гипотезой (тогда как теория первичного огненного шара — нет), оставляя, однако, открытым вопрос о том, почему значительная часть массы во Вселенной должна быть сосредоточена в звездах и почему массы этих звезд должны превышать массу Солнца в десять, а, скажем, не в сотни или десятки раз. Кроме того, мы до сих пор не объяснили загадочную зависимость между видимым, светящимся, веществом и скрытой массой. Видимое вещество составляет лишь небольшую часть массы Вселенной и сосредоточено в сравнительно компактных уплощенных системах,



Рентгеновское изображение квазара, красное смещение которого $z = 3,1$. Свет, который мы наблюдаем ныне, квазар излучил, когда Вселенная была в восемь раз «моложе», чем сейчас. (Рентгеновская обсерватория «Эйнштейн», Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр. Х. Тэненбаум.)



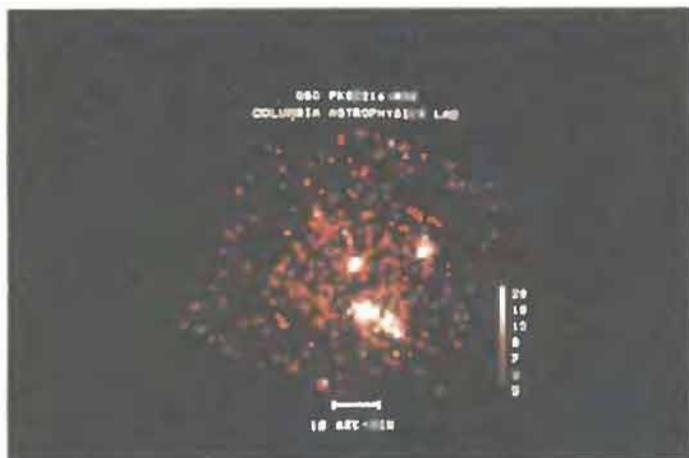
Рентгеновское изображение остатка взрыва Сверхновой Кеплера. (Предоставлено У. Х. Ку.)

которые представляют собой ядра гораздо более крупных сферических систем, состоящих из невидимого вещества. Далее мы попробуем восполнить эти пробелы, изложив собственную точку зрения.

Членами первых скоплений были осколки, состоящие из твердого водорода. Удельная энергия связи (т. е. энергия связи на единицу массы) этих скоплений гораздо меньше удельной энергии связи самих осколков, поэтому столкновения между осколками вряд ли приводили к их разрушению. С другой стороны, сами скопления, по-видимому, разрушались в процессе объединения в более крупные комплексы, поскольку удельная энергия связи возрастает с увеличением массы группировок. Таким образом, возникали все более крупные и более связанные скопления, состоящие из твердотельных осколков. Наконец, удельная энергия связи очередной группировки сравнялась с удельной энергией связи составляющих ее осколков. На этом этапе столкновения между осколками привели к тому, что значительная доля их массы перешла в газообразное состояние.

Газовые облака сопротивляются разрушительному действию приливных сил. Они излучают энергию, становясь еще более связанными. Поэтому вполне возможно, что значительная доля массы Вселенной сконденсируется в протозвезды, которые продолжают свое существование на последующих этапах процесса сгущения. В принципе можно теоретически предсказать, сколько и какой массой протозвезд должно было образоваться. Если соответствующие расчеты будут выполнены, то это даст возможность проверить излагаемую теорию.

Предположим теперь, что, скажем, 90% скоплений, образовавшихся на определенном этапе процесса сгущения, не распадется на следующих стадиях, а сконденсируется в массивные звезды, тогда как остальные 10% разрушатся на следующих стадиях. Сформировавшиеся на этом этапе скопления должны быть двух видов: скопления, состоящие из протозвезд, и скопления,



Рентгеновское изображение квазара PKS 2216-038. (Предоставлено У. Х. Ку.)

состоящие из газовых облаков с массой, в сотни раз превышающей массу Солнца. Часть массивных облаков может сконденсироваться в звезды. Допустим, однако, что внутренняя динамика некоторых облаков не позволит им сконденсироваться в одиночные массивные протозвезды. (В ряде своих работ я показал, что магнитные поля и передача углового момента доминируют во «внутренней динамике» таких газовых облаков.). Что произойдет в таком случае?

Образование массивных газовых облаков приводит к разветвлению эволюционного процесса Вселенной. Основной путь эволюции мы уже обсудили. Он порождает фоновое излучение и иерархию самогравитирующих систем, состоящих в основном из невидимого вещества. Может ли второй путь, отправной точкой которого являются массивные газовые облака, привести к существованию светящегося компонента галактик?

Газовые облака принимают участие в процессе сгущения наряду со звездами и другими объектами, но судьба их отлична от судьбы звезд. При столкновениях облака стремятся слиться, при этом кинетическая энергия относительного движения преобразуется в тепловую энергию, которая затем излучается в пространство. Таким образом, можно ожидать, что в процессе сгущения будут образовываться комплексы облаков. Поскольку эти объекты намного массивнее звезд, они станут оседать к центру родительского скопления (по той же причине, по которой тяжелые частицы стремятся осесть на дно в жидкой суспензии). Это объясняет, почему звезды, которые в конце концов образуются в облаках, сконцентрированы в центральных областях гораздо более крупных несветящихся систем.

Поскольку облака и комплексы облаков диссипируют (излучают) в процессе слияния кинетическую энергию, а не угловой момент, они должны формировать более или менее плоские системы. Итак, теперь можно понять, почему массивные облака газа, обнаруженные в последние годы, наблюдаются либо в протяженных дисках, либо в компактных областях вблизи центров галактик.

В заключение нашего крайне схематического обзора космической эволюции рассмотрим еще одну теоретическую идею. Астрономические наблюдения свидетельствуют, что возраст звезд колеблется от 10 млрд. лет до менее чем 1 млн. лет. Накопленные за последнее десятилетие факты дают веские основания полагать, что в нашей Галактике звезды рождаются в компактных газовых комплексах с массой в миллион и более масс Солнца, причем возраст этих массивных облаков может превышать 1 млрд. лет. Эти выводы резко противоречат традиционным представлениям об образовании и эволюции звездных систем, но хорошо вписываются в нарисованную нами картину. Если предположить, что облака достаточно стары и имеют примерно одинаковый возраст, то в соответствии с предсказаниями нашей теории и современ-

ными наблюдениями, продолжительность периодов формирования в них звезд должна быть различной. Другими словами, промежуток времени между образованием облака и рождением звезд внутри него может варьироваться в широком интервале значений — вплоть до нескольких миллиардов лет у отдельных облаков.

Как наблюдательные факты, так и теоретические соображения указывают, по меткому замечанию Вальтера Бааде, что звездообразование — «заразная болезнь». После начала звездообразования этот процесс быстро распространяется во все стороны. Облако превращается в скопление звезд, которые нагревают газ, препятствуя его дальнейшей конденсации. Нагретый газ расширяется и улетает, превращаясь в часть межзвездной среды. Облака, в которых периоды формирования звезд сравнимы, мы можем рассматривать как члены *галактической подсистемы*, характеризующейся длительностью этого периода. Следовательно, возраст *звездной подсистемы* равен разности $t_0 - t$ между возрастом системы t_0 и длительностью периода формирования звезд t . Таким образом, можно ожидать корреляции между возрастом галактических подсистем и степенью их сплюснутости. Самые молодые звездные подсистемы, которые прошли максимальный период формирования, должны быть наиболее уплощенными, а самые старые — наименее уплощенными. Такая корреляция действительно наблюдается.

Чтобы сделать наш разговор на эту тему более конкретным, предположим, что распределение облаков по длительности периода формирования звезд описывается в некоторой галактике экспонентой. Доля облаков, у которых этот период лежит в интервале от t до $t + \Delta t$, в этом случае будет равна $e^{-t/T} \cdot \Delta t / T$, где T — средняя продолжительность периода. Не исключено, что величина T может быть разной у различных галактик. Каковы наблюдательные следствия такого различия?

Пусть $T_{\text{диск}}$ — минимальное время, за которое в результате диссипативных столкновений система облаков формирует диск. Из наблюдений следует, что $T_{\text{диск}} \approx 5 \cdot 10^9$ лет. Средняя продолжительность периода T может быть либо много меньше $T_{\text{диск}}$, либо сравним с $T_{\text{диск}}$, либо значительно больше $T_{\text{диск}}$. Остановимся вкратце на наблюдательных следствиях каждой из трех возможностей.

Если $T \approx T_{\text{диск}}$, то средний возраст звезд, родившихся в облаках, должен быть сравним с возрастом Вселенной. Эти звезды образуют слегка сплюснутые системы, которые можно отождествить с эллиптическими галактиками.

Если $T \approx T_{\text{диск}}$, то в диске и сфероидальной подсистеме должно содержаться сравнимое число звезд. Основная доля света диска в таком случае обусловлена звездами, возраст которых превышает 10^8 лет. Такого рода системы можно отождествить со спиральными галактиками «ранних» типов, т. е. с галактиками класса Sa и Sb по классификации Хаббла.

И наконец, если $T \gg T_{\text{диск}}$, то большинство родившихся звезд образуют диск. Чем больше T , тем менее развитой будет сфероидальная подсистема, тем меньше будет ее масса по сравнению с дисковой составляющей и тем меньше средний возраст звезд в диске. Эти системы внешне должны выглядеть как спиральные галактики поздних классов в классификации Хаббла или как неправильные галактики.

Ретроспектива и перспектива

Теория космической эволюции должна объяснить следующие основные явления: существование самогравитирующих систем; гравитационное сгущение и его спектр (т. е. наблюдаемую связь между массой и размером самограви-

тирующих систем); роль звезд и галактик в иерархии самогравитирующих систем; преобладание скрытой массы; существование различных типов звездного населения; наблюдаемое содержание во Вселенной химических элементов; рентгеновский и гамма-фон и, наконец (но не в последнюю очередь), фоновое микроволновое излучение. С самого открытия в 1965 г. микроволнового фонового излучения его справедливо рассматривали как единственный и наиболее важный ключ к пониманию физического состояния ранней Вселенной. Большинство космологов интерпретируют микроволновый фон как остаток первичного огненного шара. Но мы видели, что такая интерпретация, хотя она проста и естественна, сталкивается с рядом трудностей. Каждое из трех доступных проверке следствий этой теории (содержание во Вселенной гелия и дейтерия, а также форма спектра фонового излучения в миллиметровом диапазоне) противоречит современным астрономическим данным. Кроме того, теоретики до сих пор не смогли убедительным образом согласовать теорию первичного огненного шара с наличием неоднородностей в космосе.

Гипотеза холодной Вселенной первоначально была выдвинута с целью объяснить наличие клочковатой структуры вещества во Вселенной. Согласно этой гипотезе, Вселенная начала расширяться из состояния с однородным распределением плотности массы и с нулевой температурой. Несмотря на это, вещество Вселенной находилось в газообразном состоянии до тех пор, пока его плотность не упала примерно до плотности воды, после чего вещество перешло в твердое состояние. Поскольку вещество продолжало расширяться, оно раздробилось на отдельные обломки с массой, примерно равной массе небольшой планеты. Холодный расширяющийся «газ», состоящий из твердых осколков, был неустойчив относительно самопроизвольного роста группировок, подобно тому как обычный пар в критической точке неустойчив относительно роста крупномасштабных возмущений плотности. Неустойчивость вела к образованию все более крупных группировок осколков, в результате чего происходило выделение все более крупных самогравитирующих систем. Простейшая теория этого процесса указывает на линейную зависимость между логарифмом массы и логарифмом размера самогравитирующих систем. Наклон кривой, представляющей указанную зависимость, хорошо согласуется с результатами наблюдений. Более того, разброс точек также невелик, если в соответствии с расчетами Рэя Хайвели предположить, что, затвердевая, космическая среда образовывала кристаллы металлического водорода. Тот факт, что определенные из наблюдений масса и размер Местного сверхскопления укладываются на кривую теоретической зависимости, означает, что плотность вещества во Вселенной не может быть значительно меньше величины, соответствующей нулевой кривизне пространства.

Теория гравитационного сгущения в изначально холодной Вселенной согласуется с гипотезой о том, что значительная часть массы Вселенной сконденсировалась в массивные звезды, которые породили Большую вспышку, когда возраст Вселенной достиг примерно 10 млн. лет. Этот свет, частично термализованный твердыми частицами пыли, образовавшимися из элементов, синтезированных в недрах тех же звезд, превратился в микроволновое фоновое излучение. Такая теория происхождения фона подкрепляется измерениями его спектра в миллиметровом диапазоне. Звезды, обусловившие фоновое излучение в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, взрывались в конце своей эволюции, генерируя мощный поток ультрарелятивистских электронов и протонов, а те в свою очередь создали рентгеновский и гамма-фон в ходе процессов, о которых говорилось ранее в этой главе.

Значительная часть вещества, которое не превратилось в массивные догалактические звезды, образовала массивные клочковатые газовые облака.



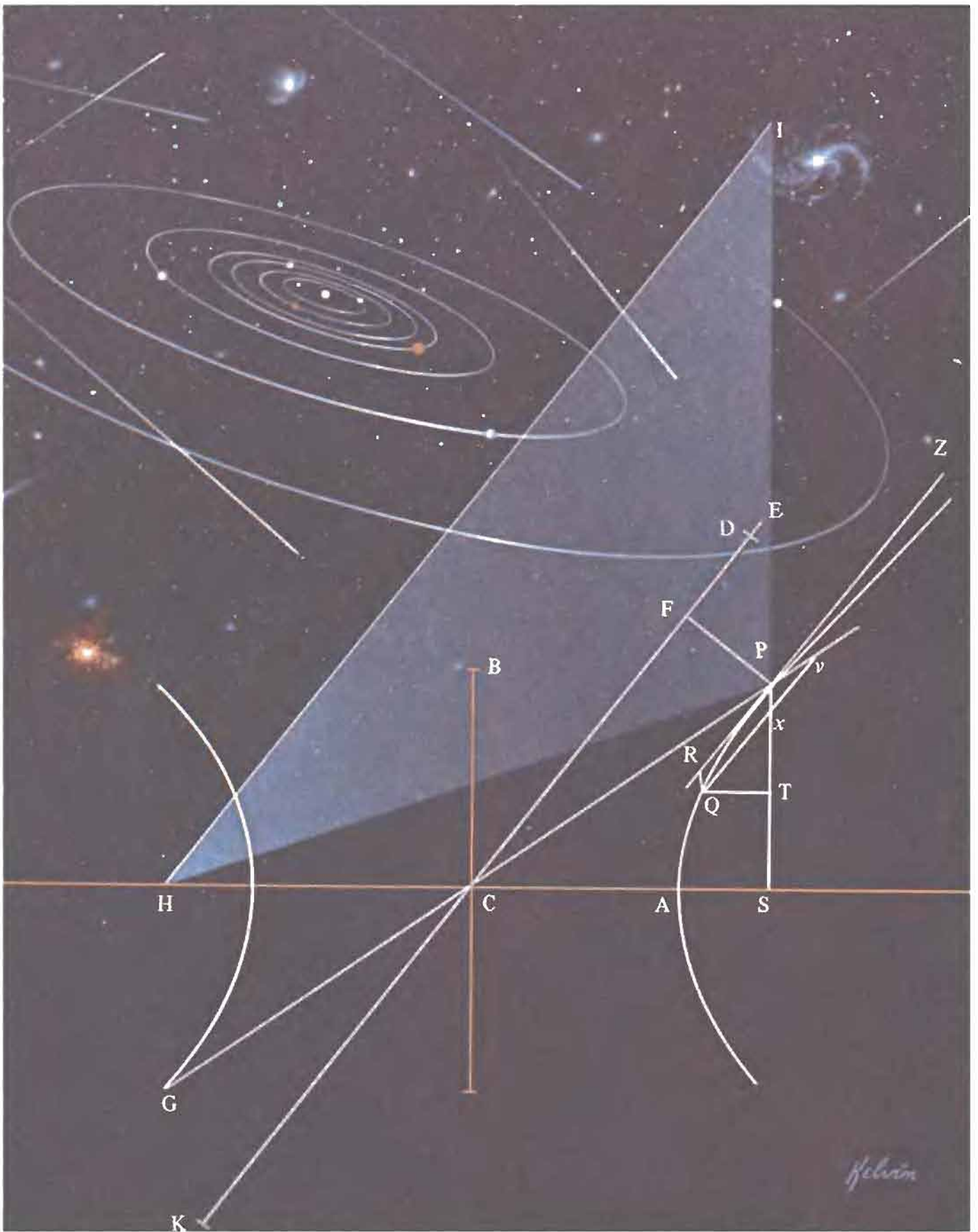
Так, по мнению художника, выглядит обсерватория «Эйнштейн» в космическом пространстве. (Корпорация TRW.)

Последующие стадии гравитационного сгущения приводят к образованию крупных газовых комплексов, которые сформировали сравнительно компактные и уплощенные подсистемы, состоящие в основном из остатков массивных звезд первого поколения. В конечном итоге эти подсистемы превратились в наблюдаемые ныне галактики.

Таков, вкратце, путь, по которому могла эволюционировать первоначально холодная и бесструктурная Вселенная. Хотя эта «альтернативная модель», по-видимому, лучше согласуется с результатами наблюдений, чем сценарии, основанные на гипотезе первичного огненного шара, она требует дальнейшего развития. Ее предсказания должны быть более точными, менее расплывчатыми. Картина Вселенной, полученная из наблюдений, также нуждается в уточнении. Когда теоретические и построенные на наблюдениях представления станут более четкими, может оказаться, что они не совпадут. Несомненно, намеченный нами «эскиз» эволюции подвергнется существенному пересмотру. Но именно для того и создается модель, чтобы, выполнив расчеты, эксперименты и наблюдения, уточнить ее или от нее отказаться. Прежде чем понять, как устроен мир, мы должны представить, каким он мог быть.

В этой главе мы рассмотрели три возможных основных периода космической эволюции: начальный, промежуточный и современный. Предполагается, что на протяжении начального периода космическая среда была почти непрерывной и бесструктурной, на промежуточном этапе возникла иерархия самогравитирующих астрономических систем и, наконец, на последнем, современном этапе структура Вселенной изменялась лишь в самых крупных масштабах. Но в нашей книге мы совсем не касались вопросов, которые особенно волнуют многих теоретиков. Речь идет о чрезвычайно коротком периоде в самом начале космического расширения, когда частицы были настолько плотно упакованы, что современная физика оказывается неприменимой для описания того состояния. Очень молодая Вселенная — это предел, при исследовании которого необходимо объединение космологии и физики элементарных частиц. Это своего рода «полигон» для проверки объединенных теорий фундаментальных взаимодействий, существующих в природе, и может случиться, что эти теории коренным образом изменят наши представления о ранней Вселенной. Они могут спасти гипотезу первичного огненного шара или заменить ее другой гипотезой, столь же новой и плодотворной, какой была гипотеза Фридмана о расширении пространства.

Можно с полной уверенностью сказать, что будущие открытия и теории обогатят, а не отвергнут Вселенную, которую открыли нам Пифагор, Аристарх, Кеплер, Ньютон и Эйнштейн, — Вселенную столь же гармоничную, как Вселенная Платона и Пифагора, но построенную на гармонии, заключенной в математических законах; Вселенную не менее совершенную, чем Вселенная Аристотеля, но черпающую свое совершенство в абстрактных законах симметрии; Вселенную, в которой безграничная пустота межгалактических пространств залита мягким светом, несущим из глубин времени еще до конца непонятные нам сообщения; Вселенную, у которой есть начало во времени, но нет ни начала, ни конца в пространстве, которая, быть может, будет расширяться вечно, а возможно, в один прекрасный момент, прекратив расширение, начнет сжиматься. Эта Вселенная совсем не похожа на ту, которая рисовалась в смелых умах тех, кто первым отважился задать вопрос: «А каков же наш мир на самом деле?» Но я думаю, что узнав об этом, они бы не огорчились.



Helium

Векторная алгебра

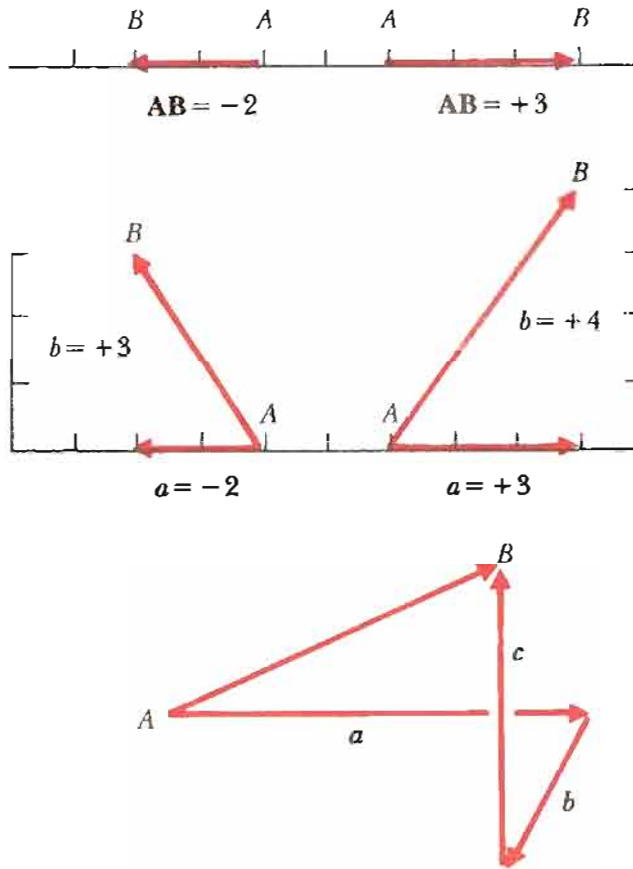
Смещение из точки A в точку B вдоль заданной прямой линии характеризуется *величиной*, т. е. длиной отрезка AB , и *направлением*, которое указывает, где лежит точка B например, справа или слева от точки A . Таким образом, смещение можно выразить с помощью чисел. допустим, положительные числа будут соответствовать смещению вправо, а отрицательные — влево. Справедливо и обратное: каждое положительное или отрицательное число описывает определенное смещение. Мы будем изображать смещение от точки A в точку B символом \vec{AB} . Заметим, что смещение \vec{AB} не зависит от положения точки A , а определяется лишь длиной и направлением (верхний рисунок на с. 314).

Точно так же смещение на плоскости можно представить с помощью пары действительных чисел (a, b) , причем первое число описывает смещение по оси x , второе — по оси y . Вообразите город, улицы которого вытянуты с востока на запад и с севера на юг так, что образуют квадратную сетку. Мы можем попасть с перекрестка A на перекресток B , пройдя a кварталов на восток и b кварталов на север в любой последовательности. (При этом предполагается, что пройти -3 квартала к востоку — это все равно, что пройти 3 квартала в западном направлении, а пройти -5 кварталов к северу — это то же самое, что пройти 5 кварталов в направлении на юг.) Само смещение мы изображаем стрелкой, проведенной от A к B . Длина стрелки (согласно теореме Пифагора) равна $AB = \sqrt{a^2 + b^2}$, а ее направление определяется отношением b/a .

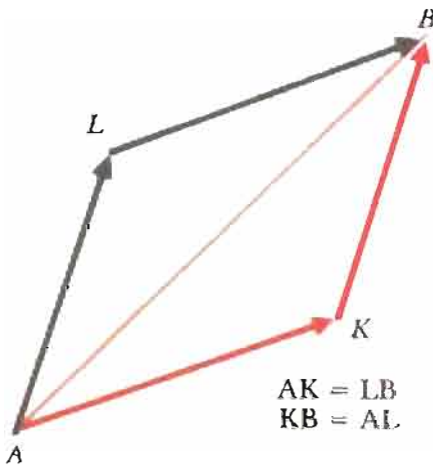
Аналогичным образом можно задать смещение в трехмерном пространстве с помощью трех компонентов (запад — восток, север — юг, низ — верх) или указав длину отрезка AB и его направление, которое характеризуется двумя отношениями, скажем a/b и a/c .

Когда мы перемещаемся из одной точки в другую — по какому бы пути мы ни шли, — наше смещение зависит лишь от положения начала и конца маршрута. Предположим, мы движемся сначала из точки A в точку K , а затем из точки K в точку B . Результирующее смещение, как видно из рисунка, равно \vec{AB} . Таким образом, получается следующее правило для сложения смещений: *чтобы сложить два смещения, необходимо совместить острие стрелки, описывающей первое смещение, с началом стрелки, изображающей второе смещение. Стрелка, соединяю-*

Вселенная глазами художника. Чертеж в правом нижнем углу взят из книги Ньютона. Пользуясь им, ученый доказал, что закон всемирного тяготения (закон обратных квадратов) допускает движение тел по гиперболической орбите вокруг силового центра, расположенного в удаленном фокусе.



Смещение в одном, двух и трех измерениях.



щая свободные концы, показывает результат сложения. Из приведенного рисунка видно, что перестановка слагаемых не влияет на результат суммирования.

Математическая величина, которую мы обозначили символом \vec{AB} , называется *вектором*. Связь между векторами и смещениями в трехмерном пространстве точно такая же, как между действительными числами и смещениями вдоль прямой линии. И подобно тому, как смещения по прямой представляют собой частный случай смещения в пространстве, действительные числа являются частным случаем векторов. Вектор — это обобщенное число, которое кроме величины характеризуется также и направлением.

Утверждение «сумма смещений \vec{AK} и \vec{KB} равна смещению \vec{AB} » можно записать в привычном виде:

$$\vec{AK} + \vec{KB} = \vec{AB}.$$



Естественно, что знак плюс в этом равенстве имеет другой смысл, чем в равенстве $2 + 3 = 5$ (см. приведенное выше правило сложения векторов). Но «векторное сложение» включает в себя обычное сложение чисел как частный случай. Если векторы \vec{AK} и \vec{KB} параллельны друг другу, величина их суммы \vec{AB} равна обычной сумме их длин: $AK + KB = AB$. В произвольном случае $AK + KB \geq AB$.

Сказанное означает, что разность двух векторов $(\vec{AB} - \vec{BA})$ — вектор нулевой длины, изображением которого является точка A (см. рисунок). Из того же правила следует, что сумма двух смещений, одно из которых нулевое, равна ненулевому слагаемому. Таким образом, смещение нулевой длины в векторном сложении соответствует 0 при сложении чисел. Нулевое смещение принято обозначать символом 0, хотя более последовательным было бы обозначение $\vec{0}$. Таким образом, в рассматриваемом случае $\vec{AB} + \vec{BA} = 0$.

Представление о смещении нулевой длины позволяет дать определение отрицательному смещению, точно так же число 0 позволяет ввести понятие об отрицательных числах. Равенство $\vec{AB} = -\vec{BA}$ означает то же самое, что и $\vec{AB} + \vec{BA} = 0$. Аналогично, запись $\vec{BC} + \vec{CD} = \vec{BD}$ равнозначна $\vec{BC} = \vec{BD} - \vec{CD}$.

Операцию умножения чисел можно обобщить на случай векторов. Назовем произведением числа k на вектор \vec{AB} новый вектор $k\vec{AB}$, длина которого в k раз больше длины вектора \vec{AB} , а направление совпадает с направлением вектора \vec{AB} , если $k > 0$, и противоположно направлению вектора \vec{AB} , если $k < 0$. В частности, $\vec{AB} + \vec{AB} = 2\vec{AB}$, $\vec{AB} + n\vec{AB} = (n + 1)\vec{AB}$ и т. д.

Здесь и далее векторы обозначены буквой, набранной жирным шрифтом: $\mathbf{a} = \vec{AB}$, а величина (длина) вектора — той же буквой, но набранной курсивом.

Существуют два вида произведения векторов. Первое называется *скалярным произведением*:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \theta, \tag{1}$$

где θ — угол между векторами \mathbf{a} и \mathbf{b} . Работа, которую совершает сила \mathbf{F} по перемещению частицы на расстояние Δr , равна

$$\Delta A = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r} = F \Delta s \cos \theta, \tag{2}$$

где $\Delta s = |\Delta r|$ — длина вектора смещения. Гравитационный потенциал ϕ связан с силой тяготения \mathbf{F} подобным же соотношением:

$$\Delta \phi = -\mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}. \tag{3}$$

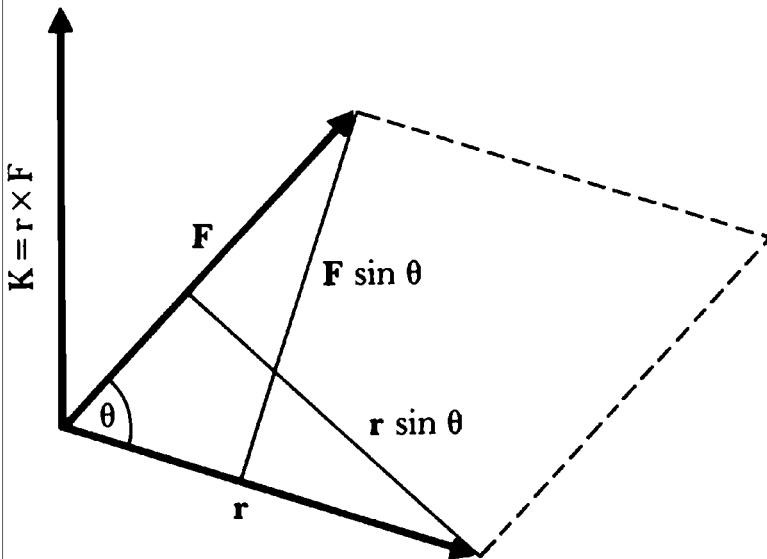
Чтобы отразить связь между приложенной силой \mathbf{F} , радиусом-вектором \mathbf{r} , соединяющим начало отсчета (неподвижный центр вращения) с точкой приложения силы, и вращающим моментом, используется так называемое *векторное произведение*:

$$\mathbf{K} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}. \tag{4}$$

Величина вектора \mathbf{K} равна площади параллелограмма, сторонами которого служат векторы \mathbf{r} и \mathbf{F} :

$$K = r \cdot F \cdot \sin \theta. \tag{5}$$

Вектор \mathbf{K} направлен перпендикулярно плоскости параллелограмма, причем так, чтобы поворот вектора \mathbf{r} к вектору \mathbf{F} на угол θ (минимальный из двух смежных углов между векторами) происходил против часовой стрелки, как показано на рисунке.



Геометрическое изображение векторного произведения $\mathbf{K} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$

В некоторых отношениях векторное произведение обладает теми же свойствами, что и произведение двух чисел. Так, $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$ и $k(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \mathbf{a} \times k\mathbf{b} + (k\mathbf{a}) \times \mathbf{b}$. Отсюда следует правило вычисления производной от векторного произведения:

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\mathbf{a} + \Delta \mathbf{a})(\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}) - \mathbf{a} \times \mathbf{b}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{a}}{dt} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \frac{d\mathbf{b}}{dt} \quad (6)$$

С другой стороны, в отличие от произведения обычных чисел векторное произведение существенно зависит как от порядка сомножителей:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a}, \quad (7)$$

так и от порядка выполнения умножения:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \neq (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c}. \quad (8)$$

Если к телу приложить момент силы, оно начнет вращаться. Подставив в уравнение (4) выражение силы \mathbf{F} из второго закона Ньютона $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$, мы с помощью уравнения (6) найдем, какие величины и как изменяются при наличии вращающего момента:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} &= \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt} (\mathbf{r} \times \mathbf{p}) - \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{p} = \\ &= \frac{d}{dt} (\mathbf{r} \times \mathbf{p}) = \frac{d\mathbf{J}}{dt}. \end{aligned} \quad (9)$$

При выводе мы учли, что $d\mathbf{r}/dt = \mathbf{V} = \mathbf{p}/m$ и $\mathbf{p} \times \mathbf{p} = 0$, так как в этом случае $\sin \theta = 0$ [см. (5)] Величина

$$\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{V}) \quad (10)$$

называется *угловым моментом*. Уравнение (9), таким образом, гласит, что скорость изменения углового момента равна моменту приложенной силы. В таблице, приведенной на с. 145, отмечалось, что это правило является аналогом второго закона Ньютона, согласно которому скорость изменения импульса равна приложенной силе.

ГЛАВА 1

- 1 Einstein A Ideas and Opinions — N Y: Bonanza Books, 1954 [Эйнштейн А Собрание трудов в 4-х томах — М.: Наука, 1965]
- 2 Feynman R P The Character of Physical Law — Cambridge: MIT Press, 1967 [Фейнман Р. П Характер физических законов — М.: Мир, 1968]
- 3 Галилео Галилей. Избранные труды в 2-х томах. Т 1 — М.: Наука, 1964.
- 4 Коперник Н О вращениях небесных сфер Серия «Классики науки». — М.: Наука, 1964
- 5 Stebbins G L The Basis of Progressive Evolution — Chapel Hill University of North Carolina Press, 1969
- 6 Koyre A From the Closed World to the Infinite Universe — Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1957.
- 7 Koestler A The Sleepwalkers — N Y.: Macmillan, 1959
- 8 Kuhn T The Structure of Scientific Revolutions — Chicago. University of Chicago Press (2-nd ed), 1970 [Кун Т Структура научных революций — М.: Прогресс, 1977 (2-е изд).]
9. Quine W V O Two Dogmas of Empiricism, in: From a Logical Point of View — Cambridge: Harvard University Press, 1980 (2-nd ed)

ГЛАВА 2

- 1 Галилей Г Диалог о двух главнейших системах мира: Птолемеевой и Коперниковой. Избр труды в 2-х томах Т I, С. 97—562 — М.: Наука, 1964
2. Koyre A. The Astronomical Revolution. — Ithaca, N. Y.: Cornell University Press, 1979
- 3 Heath T Aristarchus of Samos — L.: Clarendon Press, 1913.
- 4 Dreyer J L E (first publ 1906) A History of Astronomy from Thales to Kepler — N Y: Dover, 1953 (2nd ed)

ГЛАВА 3

- 1 Галилей Г. Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки Избр труды в 2-х томах Т 2 С 109—412 — М.: Наука, 1964
- 2 Newton I Philosophiae naturalis principia mathematica, 1686 (1st ed) [Ньютон И Математические начала натуральной философии В собр трудов акад А Н. Крылова Т 7 — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1936]
- 3 Мах Э Механика Историко-критический очерк ее развития — СПб, 1909

ГЛАВА 4

- 1 Кант И. Всеобщая естественная история и теория неба Собр. соч в 6-ти томах. Т. 1, С 124—276. — М.: Мысль, 1963.
2. Hubble E. The Realm of the Nebulae. — N. Y.: Dover, 1958.
- 3 Abell G Exploration of the Universe. — Philadelphia: Saunders, 1982.

ГЛАВА 5

- 1 Einstein A. Relativity: the Special and General Theory — N. Y.: Crown, 1952 (1st ed., 1917). [Эйнштейн А. О специальной и общей теории относительности — общедоступное изложение Собр. трудов. Т. 1, с. 530—600. — М.: Наука, 1965].

2. Lorentz H. A., Einstein A., Minkowski H., Weyl H. *The Principle of Relativity* — N. Y.: Dover, 1923. [Принцип относительности Сб. трудов: Лоренц Г., Пуанкаре А., Эйнштейн А., Минковский Г. Сборник работ классиков релятивизма. — Л.: ОНТИ, 1935.]
3. Einstein A. *The Meaning of Relativity* — Princeton: Princeton University Press, 1953 (5th ed.) [Эйнштейн А. Сущность теории относительности. Собр. трудов. Т. 2, С. 5—82 — М.: Наука, 1965.]

ГЛАВЫ 6, 7

1. Einstein A. *Articles in The Principle of Relativity* (см. [2] в литературе к гл. 5).

ГЛАВА 8

1. Silk J. *The Big Bang*. — N. Y.: W. H. Freeman and Co., 1980. [Силк Дж. Большой взрыв: рождение и эволюция Вселенной. — М.: Мир, 1982.]
2. Weinberg S. *The First Three Minutes*. — N. Y.: Basic Books, 1977. [Вайнберг С. Первые три минуты. — М.: Энергоиздат, 1982.]

Предметно-именной указатель

- Аберрация света 114,
191—194
Адамс Дж. 232
Азот 151
Аквинский Ф. 23
Альбе́до 112
Альфа-частицы 273
Альфвен Х. 153
Альффер Р. 271, 272
Ампера закон 180
Андромеды галактика (ту-
манность) 131, 153, 157
Анимизм 23
Антинейтрино 271
Аполлоний 30
Аристарх 30, 33, 43, 51—
55, 61—63
Аристотель 16, 46, 73, 75,
82
Аристотеля
космология 16—19, 23,
41
последователи 46, 73,
76, 82
субстанции 21
«Физика» 73, 170, 174
философия 24, 30, 32,
43, 58—59, 73
Арнхейм Р. 104
Архимед 30, 33, 51, 73—
75, 251
Архимеда
весы 73—75, 144
статика 34, 36, 73—75,
101, 144
теория простых меха-
низмов 135—139
Атомизм 21—23, 209, 243

Бааде У. 133—134, 308
Белл Дж. 235
Белые карлики 210, 233
Бергсон А. 109
Беркли Дж. 27, 90, 92, 224
Бернулли Д. 220
Бета-распад 271—272
Бойаи Я. 251

Больцмана
константа 297
— Максвелла распреде-
ление 258—260
Браге Т. 20, 28, 38, 43,
59, 60—63
Брадлей Дж. 114, 193
Бруно Дж. 23—24, 112,
241
Брунс Г. 117
Бэкон Ф. 26

Вайнберг С. 274
Вейман Р. 229
Вектор 95, 314—315
Венера
движение 16, 45—50
фазы 47, 48
Вессо Р. 211
Видимая яркость (блеск)
112—114, 161—163, 263,
264
Водород
газ 151, 233, 272, 277,
278, 279
твёрдый (металличес-
кий) 303—305, 309
Водородный мазер 211
Волков Г. 234
Волосы Вероники 289
Вуди Д. 278, 279

Газ
в двойных системах 237
взаимодействие молекул
296—302
идеальный 234, 256, 296,
297
межзвездный 128, 134,
278
облака 128, 152, 271,
293, 302, 306—308
ультрарелятивистский 257
Галактика (Млечный
Путь)
возраст 273

- вращение 131
 непрерывное излучение 258—260
 спутники 161
 строение по Канту 125—131, 133
 эволюция 283—284
- Галактики**
 классификация 132—134
 распределение в пространстве 154, 157
 распределение на небе 154—155
 распределение яркости 133
 расстояния 133, 161—166
 скопления 129, 163, 261, 277, 304
 скрытая масса 289—291
 спектры 157—158
 спиральные 132—134, 308
 структура 132—134
 типы населения 133—134
 эллиптические 132—134, 308
- Галилей Г.** 15, 32, 33
Галилея
 космология 24, 58, 59, 84
 метод 75—78
 наблюдения 21, 30, 71
 преобразования 187
 принцип относительности 182
 теория движения 33, 34, 35, 78—82
 трактат «Диалог о двух главнейших системах мира» 24—25, 75—78, 82
- Галле Дж.** 232
Галлей Э. 113, 114
Гамма-излучение 286, 289
Гамов Г. А. 271, 272
Гармония 15, 17, 19—20, 28—30, 59, 67, 68, 181, 311
Гаусс К. 181, 224, 251
Гелий 151, 234, 272—275, 281
- Геометрия неевклидова** 250—254
Геоцентрическая модель 16, 55—57, 63
Гераклит 30, 44, 48
Герман Р. 271, 272
Гермес Трисмегист 17, 23
Герц Г. 181, 182
Герцшпрунг Э. 162
Гершель У. 113, 114
Гиады 134
Гипотеза огненного шара 271—279, 290—291
Гиппарх 29, 111
Голденберг М. 233
Гравитационного сгущения теория 291—295, 308—310
Гравитационный потенциал 144, 210, 213, 214, 221—222
Гравитация
 закон обратных квадратов 86—88, 97—98
См. также **Ньютон И.**
Поле гравитационное
Ускорение гравитационное
Эйнштейн А.
- Грегори Дж.** 112
Гурский Г. 286
Гюйгенс Х. 83
Гюйгенса
 космология 30, 112, 125, 243
 механика 83—86, 135—136, 141—142, 169—170
 оптика 178, 215—216, 228
- Дальнодействие** 22, 86, 104—105
Данте А. 23
Дарвин Ч. 33
Движение
 в гравитационном поле 216—219
 вечное 138
 затухающее 150, 254—257
 «нулевое» 234
 по окружности 27, 62, 82—85
- равномерное** 142, 169—203
равноускоренное 76—85, 93, 140, 170—171
свободное по горизонтали 78, 96—97, 142
снарядов 81—82
Дейтерий 271—272, 275, 290—291
Дейтроны 271
Декарт Р. 22, 24, 25, 31
Демокрит 21, 209
Джиакони Р. 286
Диггс Т. 112
Дикке Р. 208, 233, 258, 273
Дирак П. 117
Дисковые системы 134—135, 152, 307
Дифференциальное исчисление 69, 89—93
Добжанский Т. 31
Донн Дж. 58
Доплер Х. 196
Доплера эффект 157, 158, 196—200, 211—212
- Евдокс** 16, 46, 48, 62
Евклид 30, 32, 90
Естественные единицы 209, 225, 227
- Железо** 234, 285
Жидкость идеальная 246—250
- Затмения** 42, 53, 228
Звездные скопления 129
Зеелигер Г. 232
Зельдович Я. 294, 303
Земля
 атмосфера 123, 157—159, 276
 внешние силы 100—104, 117—125
 гравитационное поле 107
 орбитальная скорость 194
 ось вращения 118—119, 123, 147—150

- размеры 41
 форма 150
 Зодиак 127
 Зодиакальный свет 232
- Излучение**
 абсолютно черного тела 257—261
 пылинок 285—286
 термализация 260, 279—282
 фоновое (реликтовое) 257—261, 269—291
- Импульс**
 закон изменения 103, 222—224
 закон сохранения 102—103
 нерелятивистский 102
 релятивистский 202
 частиц в расширяющейся Вселенной 254—257
- Инвариантность интервала** 187
- Интерференционные полосы** 172, 177
- Ио (спутник Юпитера)** 196—198
- Ирвин У.** 298
- Калибровочная поверхность** 253
- Каллипус** 16
- Кант И.** 26, 111, 126, 250
Канта гипотеза островной Вселенной 33, 125—132, 162, 274
- Квazarы** 228—229, 230
- Квантовая механика** 141, 172—174, 181, 234
- Кеплер И.** 16, 17, 19, 27, 30, 33
- Кеплера**
 законы движения планет 59—71, 96—100, 113, 116, 119, 207, 229, 269
 книга «Космографическая тайна» 59
 — «Новая астрономия» 59, 61, 67
- космология 16, 17, 43, 58, 59—71, 86, 112, 113, 121
- Кинг И.** 133
- Кислород** 151
- Клаузиус Р.** 151
- Клейн О.** 153
- Койр А.** 23, 30, 75
- Кометы** 133, 270
- Комптон А.** 286, 288
- Конт О.** 26
- Коперник Н.** 16, 33
- Коперника**
 космология 16, 27—28, 55—59, 111
 книга «Об обращениях небесных сфер» 16, 17, 27—28, 30, 58
- Космические лучи** 187—189, 287—288
- Космогония** 269—311
- Космологический принцип** 241—250, 266
- Красное смещение**
 гравитационное 210—212
 космологическое 256
- Кремний** 285
- Критическая точка** 296, 300
- Критическое давление** 301
- Кун Т.** 27, 28
- Лагранж Ж.** 117, 118
- Ламберт И.** 252
- Лебедь X-1** 258
- Леверье Ж.** 231, 232
- Левитт Г.** 161, 162
- Левкипп** 21, 23
- Лейбниц Г.** 31, 91, 205, 224
- Лейн Х.** 152
- Лобачевский Н. И.** 251
- Локк Дж.** 224
- Лонгомонтанус** 69
- Лоренц Г.** 182, 187
- Лоренца**
 преобразования 187, 191, 253
 сокращение длины 181, 221
- Луcreций** 23, 243
- Луна**
 внешние силы 86, 96, 117—124
 движение 16, 42—43, 44, 117—124
 линия узлов (узлы) орбиты 118, 147—150
 расстояние до Земли 52—53, 86—87
- Лютер М.** 27, 58
- Магеллановы Облака** 153, 161
- Майкельсон А.** 175, 176
Майкельсона-Морли эксперимент 175—178, 180
- Максвелл Дж.** 180—181
- Марс** 16, 45—50, 59—69
- Масса**
 инертная и гравитационная 100—101, 151, 206, 209
 скрытая 108, 289—291
- Масштабный фактор** 246—250, 253—257, 261—265
- Мах Э.** 26, 208, 241
- Меркурий**
 движение 16, 45—50
 орбита 47—49, 230—233
 радиолокация 227—228
- Местная группа** 153
- Местное сверхскопление** 305, 309
- Метагалактика** 153
- Мильтон Дж.** 23
- Минковский Г.** 32, 202—203
- Момент**
 инерции 144—145
 силы 144—145
- Мопертюи П.** 127
- Морли Э.** 175
- Музыка сфер** 15, 19—20
- Мэйр Э.** 31
- Наука Древней Греции** 16—21, 23, 39—55, 73—75, 111—112, 170, 209, 243
- Научная революция** 21, 25, 33

- Небесная сфера 39
 Небесный свод 16
 Нейтрино 202, 290, 291
 Нейтронные звезды 233—238
 Нейтроны 270, 271—272, 273
 Нептун 232
 Новые звезды 163
 Ньюкомб С. 232
 Ньютон И. 21, 25, 30, 31, 32, 33, 69, 71, 73
Ньютона
 книга «Математические начала натуральной философии» 89, 96, 111, 112—113, 117, 231
 космология 25, 34, 35, 96—100, 113, 127, 239
 математика 69, 89—93
 теория гравитации 31, 86—88, 96—100
 теория движения 85, 88—100, 140, 144—145
- Обсерватории**
 Маунт-Вилсон 153
 Маунт-Паломар 168, 204
 Пулковская 114
 Оппенгеймер Р. 234
 Орем Н. 170
 Осиандер А. 27
- Павел III 27
 Паолини Ф. 286
 Парадокс близнецов 189—191
 Параллакс вековой 162
 Параллактическое смещение 50, 51—52, 114, 194
 Парселл Е. 285, 286
 Паунд Р. 211, 212
Паунда—Рибки опыт 211—212
 Пензиас А. 257, 258, 274, 279
 Пиблс П. 273
 Пионы 289
 Пифагор 19
Пифагора
 космология 43, 111
- последователи 19, 30, 43, 59
 теорема 19, 26, 184, 217, 246, 252, 313
 теория гармонии 19—20, 30, 36, 74
 Планета-экран 44
 Планк М. 259
Планка
 постоянная 173, 210
 универсальная функция 259, 276, 285
 Платон 16, 17, 23, 59, 250
Платона сочинения
 «Тимей» 19
 «Государство» 20
 Плеяды 129, 134
 Плотность вещества во Вселенной 249, 260, 270, 271, 274, 275, 279, 280—282
 Позитивизм 26
 Поле
 гравитационное 104—109, 210—225
 магнитное 180—181
 электрическое 180—181
 Полюс мира 39—41
 Прецессия 35, 147—150
 Приливы 117—125
 Принцип
 симметрии 141—142, 169, 175, 181, 190, 195, 205
 однородности 25, 157, 158—160, 166, 241—242
 Проблема трех тел 116—117
 Пространство
 абсолютное 241, 243
 бесконечное 254, 305
 вложенное 252
 гиперболическое 250—253
 евклидово 32, 217, 218, 250, 252, 261, 263, 305
 конечное 245, 254
 кривизна 250—254
 неевклидово 250—254
 расширение 166, 261—267
 Пространство-время
 диаграммы 170—172,
- 174—175, 182—187, 190—192, 198, 213, 217—219
 интервал 186—187
 кривизна 250—254
 Минковского 216—220, 223
 структура 223, 241—254
 Протоны 270, 271, 289
 Прямая линия 217—218
 Птолемей К. 43, 55, 56, 62, 63, 64, 65, 68
 Пуанкаре А. 117, 118
 Пульсары 235
 Пыль межзвездная 134, 280—281, 285—286
- Равноденствие** 42, 64
Радиолокатор 227
 Райт Т. 126
 Райт Э. 285, 286
Расстояние
 кратчайшее в пространстве-времени 190—191, 217—218
 собственное 156—157
 Ребка Г. 211, 212
 Ремер О. 196
 Рентгеновское излучение нейтронных звезд 237
 фоновое 286—288
 Риман Б. 224
 Риттер А. 132
 Ричардс П. 278, 279
 Ролл П. 273
 Росси Б. 286
 Рош Э. 125
- Сатурн**
 движение 16, 45—50
 диаметр 125
 кольца и спутники 35, 124—125
 светимость 112—113
 Сверхновые 20, 234, 277, 286, 287, 289
Силы
 гравитационные 83—84
 приливные 132—133, 149
 фиктивные 206, 208

- центробежные 82—86
 Синхротрон 195
 Сириус
 спутник 210
 расстояние 112—113
 Системы отсчета
 вращающиеся 84, 197, 206
 инерциальные 102, 142, 169—203, 206
 неинерциальные 205—206, 212
 преимущественные 181—182
 свободно падающие 119, 214, 222, 238
 Скорость 91, 95, 170, 187, 191
 света 175—182
 Слайфер В. 157, 164
 Собственная длина и время 156—157
 Солнцестояние 41, 64
 Сохраняющиеся величины
 см. Импульс; Масса; Угловой момент; Энергия
 Стеббинс Г. 31
 Стевин С. 138, 139
 Стекер Ф. 289
 Стокман 229
 Стокс Дж. 181
 Струве В. 114
 Сутки
 звездные 82, 147
 продолжительность 41, 64, 147

 Тарталья Н. 75
 Тейлер Р. 272, 273
 Теорема вириала 151, 289
 Типы звездного населения 134
 Триангуляция 54, 55
 Троянцы (астероиды) 117
 Туманности
 внегалактические см.
 Галактики
 газовые 128
 планетарные 234
 Туркевич Дж. 272
- Углерод 151, 234, 285, 286
 Угловой диаметр 29, 263—264
 Угловой момент
 закон сохранения 133, 144—146, 152
 определение 144—145, 315
 перенос 307
 Уилкинсон Д. 273
 Уолш Д. 228, 229
 Упругие столкновения 139, 202
 Ускорение
 гравитационное 86—88, 140, 207, 249
 дифференциальное (приливное) 119—124
 и сила, связь 85, 205
 линейное 144
 мгновенное 95
 центробежное 86, 125, 207
 см. также Движение равноускоренное; Системы отсчета
- Фарадей М. 104, 105
 Ферма П. 22, 220
 Ферми Э. 272
 Филолай 30
 Фицджеральд Г. 181, 191
 Флюксии см. Дифференциальное исчисление
 Фотоны 172—174
 Фридман А. А. 167, 241, 245—246, 253, 310
- Хаббл Э. 10, 54, 132, 168
 Хаббла закон 164—167, 246, 249, 254, 298
 Хаггинс У. 128
 Хилл Г. 233
 Хойл Ф. 272, 273
 Хьюиш А. 235
 Хьюмсон М. 164
- Цвикки Ф. 289
 Центр масс 101—102, 114—116, 135, 146, 147, 211
 Цефеиды 134, 161—163
 Цицерон 19
- Чандрасекара* предел 233—234
 Часы
 атомные 211—213
 в гравитационном поле 210—213
 движущиеся 214—215
 неподвижные 212—214
 Черные дыры 233—239
- Шапиро И. 227, 228
 Шарлье К. 154
 Шварцшильд К. 225, 226, 265
 Шекспир У. 15, 16
 Шепли Х. 25, 54
- Эволюция
 биологическая 32—34
 Вселенной 150—153, 233—238, 269—311
 Эддингтон А. 29, 131, 228, 279
 Эйлер Л. 178, 180
 Эйнштейн А. 206
Эйнштейна
 квантовая теория 172—174
 космологический принцип 241—250, 266
 принцип эквивалентности 84, 208—209, 212
 специальная теория относительности 36, 169—203
 теорией проверка наблюдениями 202—203, 211—212, 225—233
 теория гравитации (общая теория относительности) 32, 35, 36, 105, 169, 205—239, 241, 245, 265
 уравнения поля 220—226, 245, 248

- Эквант 64—66
 Экватор небесный 39—43
 Эклиптика 41—43
 Эксцентрические орбиты 63—70
 Экфант 30, 44
 Электромагнетизм 104, 180—182, 202
 Электроны 23, 180—181, 270
 ультрарелятивистские 288
 Элементы химические
 распространенность во Вселенной 271—273, 275, 282—283, 292
 происхождение 271—273, 282—283
 Энергия
 гравитационная 140—144
 закон сохранения 23, 135—143, 169, 202—203, 223
 и импульс 222—224
 и масса 200—202, 209
 кинетическая 137, 138, 141, 151—152, 200—201, 238, 256—260, 296—303, 307
 механическая 152
 потенциальная 137, 140—144, 151—152, 296—302
 связи 151, 303—306
 Энтропия 152
 Эпикур 23, 24
 Эпициклы 18, 56
 Эратосфен 41
 Этвеш Л. 207—208
 Эфир
 Аристотеля 21—22
 Декарта 22
 Ньютона 22, 178
 электромагнитный 22, 178, 180—182
 Юм Д. 25—26, 224
 Юпитер
 движение 16, 45—50, 64, 69, 117
 кольца 119
 магнитное поле 303
 спутники 71, 304
 Ядерные (термоядерные) реакции 271, 272, 277

Дэвид Лейзер

СОЗДАВАЯ КАРТИНУ ВСЕЛЕННОЙ

Заведующий редакцией В. С. Власенков

Научный редактор А. Н. Кондрашова

Младший редактор И. Б. Ильченко

Художник Е. П. Илатовский

Художественный редактор Н. М. Иванов

Технический редактор И. И. Володина

Корректор Т. И. Стифеева

ИБ № 6233

Сдано в набор 18.03.87. Подписано к печати 30.06.88. Формат $70 \times 100^1 /_{16}$. Бумага офсетная № 1 Печать офсетная. Гарнитура таймс. Объем 10,25 бум. л. Усл. печ. л. 26,65. Усл. кр.-отт. 105,87. Уч. изд. л. 27,90. Изд. № 9/5374. Тираж 50 000 экз. Зак. 1341. Цена 2 р. 30 к.

Издательство «МИР» В/О «Совэкспорткнига» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2

Набрано на Ярославском полиграфкомбинате Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97

Отпечатано на ордена Трудового Красного Знамени Калининском полиграфическом комбинате Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 170024, г. Калинин, пр. Ленина, 5

В 1988 году
в издательстве «Мир»
в серии «В мире науки и техники»

выходит книга

Н. Хоровица

ПОИСКИ ЖИЗНИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Книга известного американского биолога Нормана Хоровица посвящена одной из интереснейших проблем естествознания — проблеме происхождения жизни и поискам ее за пределами Земли. В 70-е годы Хоровиц был одним из руководителей американской программы экзобиологических исследований, проводившихся в рамках изучения Солнечной системы с помощью космических аппаратов. Под руководством Хоровица осуществлялись эксперименты, направленные на поиск микроорганизмов на Марсе. Методам проведения этих исследований и анализу полученных результатов уделено большое внимание.

Экзобиологические исследования невозможны без разработки общей концепции происхождения жизни. Страницы книги, рассказывающие о развитии этих представлений на протяжении многих веков, написаны особенно живо и увлекательно.

Книга адресована читателям, интересующимся достижениями современного естествознания.

В 1988 году
издательство «Мир»

выпускает книгу

Л. Дотто

ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ В ОПАСНОСТИ

Книга канадской журналистки Лидии Дотто, известной своими работами по популяризации науки, знакомит с различными аспектами комплексного международного исследования экологических последствий ядерной войны. Результаты этого исследования, проведенного по заданию Международного научного комитета по охране окружающей среды (СКОПЕ), были изложены в двухтомной монографии «Последствия ядерной войны» (перевод ее также выходит в 1988 году в издательстве «Мир»). Моделируя на ЭВМ различные сценарии ядерной войны, ученые убедительно доказали, что ее последствия для климата и всей экологической системы Земли будут катастрофическими и необратимыми.

Книга Л. Дотто представляет собой краткое популярное изложение монографии; она адресована всем, кто озабочен будущим нашей планеты и человеческой цивилизации.

В 1988 году

в издательстве «Мир»

выходит книга

М. Клайна

МАТЕМАТИКА. ПОИСК ИСТИНЫ

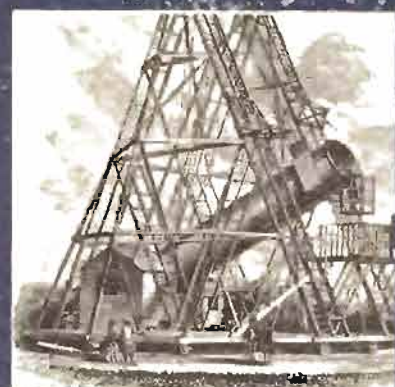
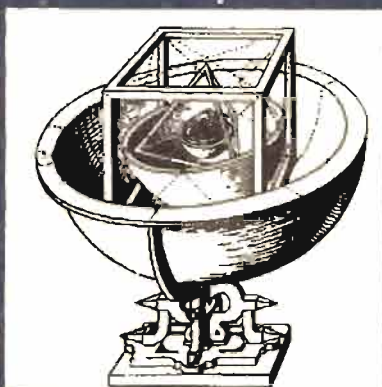
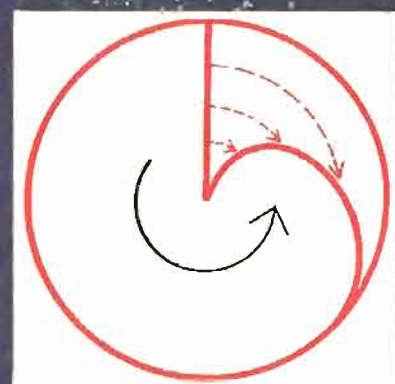
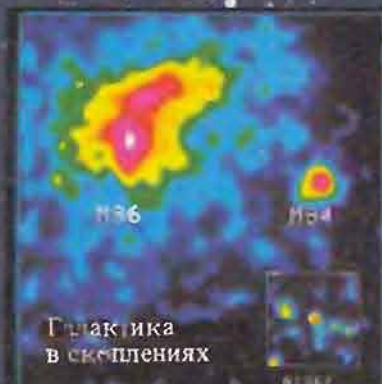
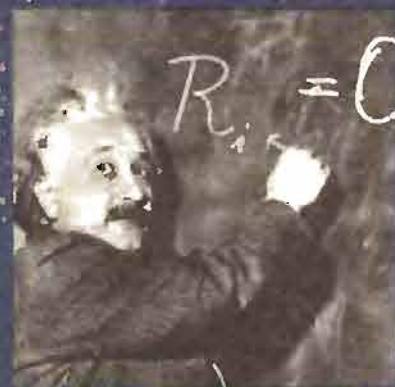
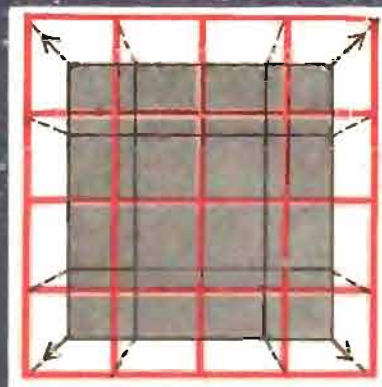
Имя американского историка математики профессора Мориса Клайна хорошо известно советскому читателю: в 1984 году издательство «Мир» выпустило его книгу «Математика. Утрата определенности», рассказывающую о многовековой истории математики, ее становлении как науки, различных направлениях и школах, существующих в ней.

Новая книга Клайна посвящена математике как инструменту познания окружающего мира, ее роли в развитии естественных наук, прежде всего физики и астрономии.

Высокая эрудиция автора, широта рассматриваемых проблем, историчность подхода, яркий и образный стиль делают книгу Клайна прекрасным образцом научно-популярной литературы. Предназначена для читателей, интересующихся историей и методологией науки.

Д. Лейзер

Создавая картину Вселенной



Издательство «Мир»

