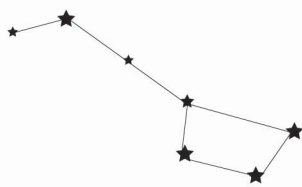


УИЛЬЯМ УОЛЛЕР

ГАЙД ПО АСТРОНОМИИ

Путешествие к границам
безграничного космоса





УИЛЪЯМ УОЛЛЕР

ГАЙД ПО АСТРОНОМИИ

Путешествие к границам
безграничного космоса



УДК 521
ББК 22.62
У63

William H. Waller
ASTRONOMY: A BEGINNER'S GUIDE

Перевод опубликован с согласия Oneworld Press Publications и литературного агентства «Синописис»

Перевод с английского Джульетты Сандросян
Дизайн обложки Виктории Давлетбаевой

Уоллер У.

У63 Гайд по астрономии : Путешествие к границам безграничного космоса / Уильям Уоллер ; [пер. с англ. Дж. С. Сандросян]. — М. : Ко-Либри, Азбука-Аттикус, 2023. — 256 с. : ил. (Научный интерес)
ISBN 978-5-389-23827-5

Изучать астрономию — значит рассматривать самые удивительные явления Вселенной в самых грандиозных масштабах. Когда вы поднимаете голову к небу, видите ли вы мириады звезд, что в 10 раз больше Солнца, черные дыры, метеорные потоки и соседние планеты? В этом авторском гайде бывший ученый НАСА Уильям Уоллер проведет вас сквозь толщу земной атмосферы навстречу бесконечному и невероятному космосу. Начиная с первых звездных карт и заканчивая исследованиями темной материи — автор собрал и объединил самые яркие и выдающиеся открытия из области астрономии в одной книге, которая теперь станет вашим путеводителем по закоулкам Вселенной.

УДК 521
ББК 22.62

ISBN 978-5-389-23827-5

© William H. Waller, 2022

© Сандросян Дж. С., перевод на русский язык, 2023

© Издание на русском языке, оформление.

ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус», 2023
КоЛибри®

*Посвящается Полу Уильяму Ходжу (1934–2019),
доброму наставнику, коллеге и другу*

Оглавление

Предисловие	9
Вступление	13

Часть I. Человек во Вселенной

1. Первые представления	19
2. Дневное и ночное небо	25
3. Космические дали	49

Часть II. Составляющие космоса

4. Знакомство с Солнечной системой	89
5. Звезда по имени Солнце	105
6. Звезды и планеты вне владений Солнца	116
7. Галактика Млечный Путь	138
8. «Бродячий цирк» галактик и их космическая экспансия	162

Часть III. Наш миг во времени

9. Большой взрыв	183
10. Возникновение галактик	198
11. Рождение звезд и планет	206
12. Циклы жизни и гибели звезд	215
13. Загадки материи и энергии	223
14. Наше космическое достояние	246
Рекомендуемая литература и ресурсы	253

Предисловие

Я начал писать эту книгу, устроившись высоко над землей, в уютной операторской четырехметрового телескопа, названного в честь Николаса Ульриха Мейола, — а если быть еще немного точнее, то стоит сказать, что телескоп этот располагался в Южной Аризоне, на вершине Национальной обсерватории Китт-Пик. Подразумевалось, что я проведу там научные наблюдения, но несколько ночей подряд шли дожди, затем все окутал тяжелый туман, а под конец разразилась свирепая буря, поэтому исследования мои больше касались земли, а не неба. К счастью, эту ночную стражу я нес не один, а вместе с давней знакомой по студенческой скамье и подающей надежды аспиранткой. Последняя уже успела доказать свое превосходство в компьютерной науке, оставив нас, маститых астрономов, совершенно не у дел. И пока мы в спешке составляли план наблюдений, рассказывали друг другу свои самые интересные истории и делились видеороликами, я чувствовал, как нас поддерживает дух многих бесстрашных первопроходцев, проторивших нам путь.

За четыре столетия до моих злополучных исследований итальянский математик Галилео Галилей первым применил оптические телескопы для изучения астрономии. Он сам создавал подзорные трубы, постигая с их помощью небо, и послед-

ствия этого были невероятны. Лунные горы и солнечные пятна; Венера, менявшая фазы и видимый размер; крошечные луны, что обращались вокруг Юпитера; Млечный Путь, распавшийся на мириады звезд, — все эти чудеса открылись ему, и его наблюдения окончательно перевернули наше прикованное к Земле представление о Вселенной.

Примерно в то же время немецкий математик, астроном и астролог Иоганн Кеплер размышлял над результатами точнейших наблюдений за положением и движением планет, когда-либо сделанных невооруженным глазом. На основе гелиоцентрической системы мира, предложенной Николаем Коперником, Кеплер разработал математическую модель, согласно которой шесть известных тогда планет (Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн) вращались по круговым орбитам вокруг Солнца. Он полагал, что в основе расстояний, разделивших орбиты, лежали математические соотношения: планеты вращались на хрустальных сферах, а каждая из сфер соприкасалась с правильными многогранниками, один из которых был в нее вписан, а другой — очерчен вокруг, и благодаря этому контакту — как представлял себе Кеплер — рождалась божественная музыка. К сожалению, идее о «музыке сфер» противоречил Марс — он никак не хотел вписываться в схему, и Кеплер не мог закрыть на это глаза, ведь он сам проводил подробнейший анализ перемещений «красной планеты»! В конце концов астроном отказался от своей изящной модели, допустил, что Марс, двигаясь по слегка эллиптической траектории, ускоряется по мере приближения к Солнцу и замедляется при удалении от него, — и в итоге вывел три закона движения планет, впоследствии обоснованные Исааком Ньютоном исходя из понятия всемирного тяготения. Это квинтэссенция того, как истины, постигаемые тяжелым трудом, рождаются в горниле тщательных наблюдений, творческого анализа и должного усердия.

Самоотверженность и гениальность Галилея, Кеплера, Ньютона, Гершеля, Пейн-Гапошкиной, Шепли, Хаббла и многих других астрономов подарили нам возможность созерцать поистине

дивную Вселенную — непредставимо безграничную, изобильную и способную к преобразению. Безусловно, история не стоит на месте, и новые открытия совершаются с головокружительной быстротой. Работая над книгой, я не пытался написать обновленный компендиум, охватывающий все, что познано нами, — я хотел создать путеводитель для начинающих и рассказать обо всем, что есть в нашей Вселенной, а также о том, как она устроена, как появилась на свет и как продолжает развиваться. А это означало, что мне придется умолчать о многих темах, достойных внимания, — ради того, чтобы книга получилась цельной и связной. Иногда я приводил и свои размышления, которые, возможно, внесут нотку человеческого участия в повествование о необъятных космических просторах. И если порой мои рассуждения покажутся немного хвастливыми, то так тому и быть: такие уж мы, астрономы.

Поделиться своими мыслями мне помогли великодушные и чуткая поддержка огромного числа моих коллег, друзей и родственников. Особенно я признателен ученым, профессорско-преподавательскому составу, служебному персоналу и студентам Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики, Вашингтонского и Массачусетского университетов, университета Тафтса и государственных школ Рокпорта, которые на протяжении десятилетий помогали мне находить верный путь в изучении и преподавании астрономической науки. Многие мои коллеги из той «вселенной», которую представляет собой отдел *NASA*, проводящий информационную работу с общественностью в области космических наук, дали мне шанс преодолеть ту пропасть, которая лежит между формальным образованием и более публичными формами общения, принятыми в современной астрономии. Любители из астрономического клуба Глостера и других подобных организаций поддерживали мой энтузиазм, устраивая веселые встречи и вдохновляющие вечера под звездным небом. Коллеги из других стран напомнили мне, что все восхищаются космосом и каждому стоит воспитать в себе этот восторг. А родственники, и ныне здравствующие, и уже покинувшие этот мир, неизменно одобряли мое

стремление к астрономии и созданию научно-популярных проектов, таких как этот путеводитель для начинающих. Именно их благословения — и, конечно же, непреодолимо влекущие чудеса дневного и ночного неба — сыграли в моем стремлении решающую роль.

*Уильям Уоллер,
Рокпорт, штат Массачусетс*

Вступление

Космос — это все, что когда-либо существовало, все, что существует сейчас, и все, что будет существовать в грядущем. Даже при мимолетной мысли о нем мы приходим в волнение, душу пронзает трепет, голос дрожит, и откуда-то приходит чувство падения с высоты, подобное смутному, далекому отголоску памяти, — так мы осознаем, что стоим в преддверии величайшей из тайн.

Карл Сэган. Космос

Сфера астрономии охватывает всю Вселенную и все, что в ней есть. Те, кто стремится ее изучить, в плановом порядке постигают удивительнейшие явления в огромнейших масштабах. Но даже сегодня астрономы-профессионалы — это редчайший род людей. Международный астрономический союз, объединивший астрономов всего мира, насчитывает примерно 11 000 человек. И даже если мы условно удвоим эту цифру, то получим одного астронома на каждые 300 000 человек, живущих на планете, — конечно, это не один на миллион, но, безусловно, близко. Впрочем, сколь бы мизерным ни казалось число специалистов и аспирантов, астрономия — это одна из самых популярных наук, а возможно, и *самая* популярная. Во всем мире сотни миллионов людей интересуются чудесами Вселенной, посещают академические курсы, записыва-

ются в любительские клубы, читают журналы, смотрят шоу в планетариях и телепередачи, заходят на сайты, приобретают книги. И мой путеводитель для новичков призван утолить интерес любопытных читателей и дать им понятное и легкое в изложении руководство, посвященное астрономии и космосу, в котором мы живем.

Сегодня мы сталкиваемся со странным парадоксом. Мы никогда еще не знали так много о Вселенной — и все же мы еще никогда не знали о ней так мало. Мы открыли планеты у других звезд, мы сделали снимки новорожденных галактик на границе пространства и времени, мы с неведомой прежде точностью измерили космические бездны, — и все наши открытия неизменно поражали нас и бросали нам вызов. Каждая планета Солнечной системы обладает своим причудливым характером и совершенно не похожа на другие; Солнце настолько непостоянно, что это внушает тревогу; а наши звездные окрестности в прямом смысле затоплены выбросами от недавних вспышек сверхновых. И более того, настало время, когда нам просто необходимо взглянуть правде в глаза и осмыслить тот факт, что большая часть материи во Вселенной, как ни странно, невидима, — мы называем эту материю темной, — и что всей тканью пространства-времени может управлять некая неосознаваемая действующая сила, которую мы окрестили темной энергией. Эти перспективы настолько ошеломляют, что всех нас — космологов-теоретиков, астрофизиков-наблюдателей, разработчиков программ, водителей такси, работников поддержки и теологов — объединило желание представить и познать ту Вселенную, которая нас окружает.

Главная цель этого путеводителя — позволить читателям яснее почувствовать и осознать то место, которое мы занимаем в космосе. В первой части мы взглянем на небо невооруженным глазом, а во второй углубимся в предмет и познакомимся с необычайно прекрасной иерархией, в которой перед нами предстанут планеты нашей Солнечной системы, Солнце как одна из многих звезд Млечного Пути, сам Млечный Путь как основной игрок в Местной группе галактик — и Местная группа как маленькая пылинка

на бескрайнем галактическом небосводе. По пути мы поговорим о таинственных формах материи и энергии, которые, по большей части, и сейчас ускользают от самых пристальных исследований. Кстати, благодаря этому мы гораздо лучше поймем, как проходит процесс научных изысканий, неизменно ведущий нас вперед, несмотря на всю напряженную полемику и споры, без которых он не обходится.

Когда же мы подготовим космическую сцену и опишем всех чудесных актеров, третья часть книги расскажет нам величественную историю бытия и становления. И может быть, читатели, пускай и опосредованно, сумеют ощутить, какие удивительные преобразования происходили около 14 млрд лет назад, после Большого взрыва. Эти метаморфозы — от рождения галактик из раскаленного хаоса до формирования в них звезд и планетных систем и появления жизни на одной особенно влажной планете — очертят границы космоса, унаследованного нами, и соединят нас со всем, что когда-либо возникало в бытии. И, конечно же, мы будем неустанно обращаться к научным проблемам и загадкам, поскольку история Вселенной далека от завершения.

А в последней главе я приглашу читателей задуматься о нашей космической судьбе и о том наследии, которое мы оставим. Что ждет нас всех или тех, кто вытеснит нас с этой драгоценной планеты? Высока ли вероятность того, что за пределами Земли мы встретим других разумных существ? И как нам вести себя теперь, когда мы стали гражданами Млечного Пути?

ЧАСТЬ I

**ЧЕЛОВЕК
ВО ВСЕЛЕННОЙ**

Первые представления

Самый прекрасный опыт, доступный нам, — это чувство тайны. Именно из него проистекают истинное искусство и наука.

Альберт Эйнштейн. Во что я верю

Небо влекло людей непрерывно — это заметно уже в первых неизгладимых отпечатках, оставленных на камнях нашими далекими предками. Австралийские аборигены и сейчас создают наскальные рисунки с небесной тематикой, причем начали они это делать, как полагают ученые, еще 15 000 лет тому назад. А примерно в 2500 году до нашей эры представители неолитической культуры возвели на Британских островах знаменитую каменную постройку — мегалитический памятник Стоунхендж. Расположение гигантских вертикальных глыб и лежащих на них камней-перемычек, а также круг из пятидесяти шести ям позволили некоторым археоастрономам предположить, что Стоунхендж помогал древним народам, населявшим эти края, отслеживать дни зимнего и летнего солнцестояний и предсказывать солнечные затмения.

Древние египтяне с особенным усердием отображали на камне, дереве и папирусе все, что считали важным. И во многих рисунках, дошедших до нас от их эпохи, видное место занимал бог солнца Ра. С 3000 года до нашей эры, когда начала развиваться иероглифическая письменность, избранные писцы составляли подробнейшие истории о солнечном боге и о том, как он пове-

левает всей земной жизнью, пока продолжается день. Однако и дневное, и ночное небо были владениями богини Нут. Ее изображали в облике женщины, которая, подобно куполу, накрывала землю, олицетворяемую другим богом, Гебом, а в теле богини — проходя по нему, как по небесному своду, — хранились, словно в сосуде, Солнце, Луна, планеты и звезды (рис. 1.1).

Вдали от уличных фонарей и других источников искусственного света мы все еще можем увидеть ночное небо, знакомое и народам неолитических Британских островов, и жителям Древнего Египта, Междуречья, Китая и Мезоамерики, и представителям других древних культур. На нем великое множество звезд, и создается впечатление, что одни соединяются в несовершенный узор, а другие — в тесные группы. В ясные безлунные ночи, если нет светового загрязнения, можно без помощи оптических устройств в любой момент увидеть примерно 4000 звезд.

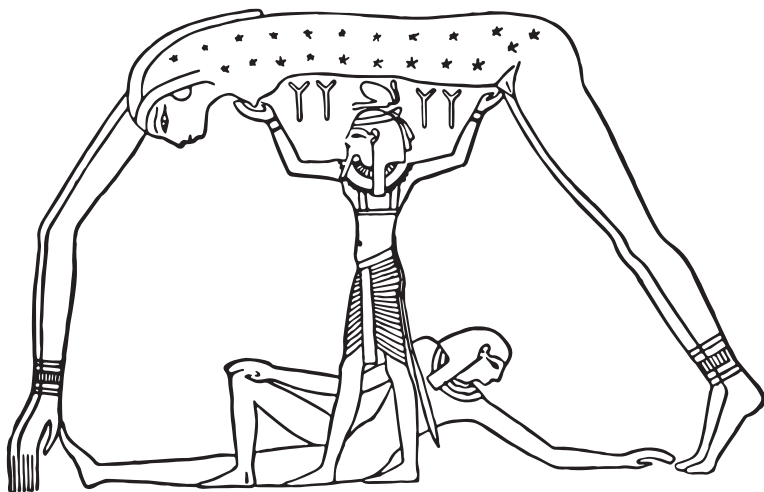


Рис. 1.1. Древнеегипетская богиня неба Нут, словно купол, накрывает собой Геба, бога земли, и Шу, бога воздуха и солнечного света. Ок. 2000 г. до н.э. (На основе материалов из нескольких источников, со ссылкой на: *The Great Goddesses of Egypt*, B.S. Lesko [Издательство Университета Оклахомы, 1999].)

«Звездный купол», унаследованный нами, во многом подобен плавному котлу, соединившему множество самых разнообразных культурных влияний. Скажем, привычные нам названия ярких звезд происходят от греческих корней (Арктур, Сириус, Вега) или напоминают о Риме и латыни (Капелла, Спика), а некоторые, скажем Бетельгейзе и Денеб, — это измененные версии арабских наименований. Признанные узоры созвездий, как правило, восходят к тем, что были приняты у греков, а в именах, присвоенных их звездам, слышны и греческие, и латинские, и арабские голоса. Хорошим примером станет Орион. Очертания этого созвездия определили греки, но в нем много звезд с арабскими названиями, в том числе красная Бетельгейзе (изначально ее имя не совсем верно транслитерировали с арабского как «Бейт аль-Джауза» — «подмышка близнеца» [так арабы называли Ориона]), три голубые звезды в поясе Ориона — Альнитак, Альнилам и Минтака, а также яркий бело-голубой Ригель (левая нога Ориона).

Безусловно, у этих этимологических смешений есть исторические основания. Первые записи о созвездиях появились в Месопотамии в начале II тысячелетия до нашей эры. Примерно в 350 году до нашей эры древнегреческий философ Евдокс отметил сорок восемь созвездий, а около 129 года до нашей эры древнегреческий астроном Гиппарх аккуратно перечислил их в своем каталоге, указав и относительную яркость звезд. В 128 году уже нашей эры египетский астроном Клавдий Птолемей (90—168 гг. н.э.) — римский гражданин, писавший на греческом, — на основе этой системы составил подробный каталог из 1022 звезд, приведенный в его знаменитом трактате «Альмагест». В период, продлившийся с XI века по XVII столетие, астрономы арабского мира и Центральной Азии — в том числе Ахмад аль-Фергани и Абу Рейхан аль-Бируни — внесли свой вклад в астрономию: они исправили ошибки Птолемея, отметили цвета звезд и их вариации, очертили границы созвездий и впервые описали туманные объекты, доступные для наблюдения невооруженным глазом, — те самые, которые, как нам сейчас известно, представляют собой гигантские газопылевые облака.

СРЕДНЕВЕКОВЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ НА БЛИЖНЕМ ВОСТОКЕ

Астрономы Ближнего Востока, жившие до эпохи Николая Коперника, вели наблюдения в больших обсерваториях, построенных в XIII веке в Мараге (современный Иран) и примерно полтора столетия спустя в Самарканде (современный Узбекистан). Телескопов там, конечно же, не было — их еще не было нигде. Но и без них астрономы сумели сделать очень многое и, помимо прочего, составили каталог небесных тел, который оставался одним из самых полных со времен Птолемея до европейского Возрождения и указывал положения 992 звезд.

Современная система созвездий, принятая на Западе, обрела облик благодаря «Уранометрии» («Измерению небесного свода») — атласу звездного неба Иоганна Байера, изданному в 1603 году. В нем на карту впервые были нанесены созвездия и северного, и южного небесных полушарий. А в 1763 году вышел «Каталог звезд южного неба» Никола Луи де Лакайля, где появились созвездия, уже не связанные с мифологией: Печь, Насос, Часы и Микроскоп. Протяженность этих разнообразных созвездий, а порой и их частичное совпадение приводили к серьезной путанице, пока в 1922 году Международный астрономический союз не утвердил окончательный список из восьмидесяти восьми «официальных» созвездий со смежными границами (рис. 1.2).

Впрочем, помимо западной системы, были и другие досконально продуманные картины неба. Китайцы за ту же тысячу лет создали совершенно независимую систему созвездий и наименований звезд. И хотя Запад ее так и не принял, она настолько точно описывала положения светил, что ее применяли астрономы и археоастрономы всего мира, желавшие определить, где в давние эпохи вспыхивали сверхновые, пролегли пути комет и случались иные мимолетные небесные явления. Одна из моих любимых картин ночного неба, возникших за минувшее тысячелетие, пришла от коренных американцев. Если сравнить их созвездия с теми, что

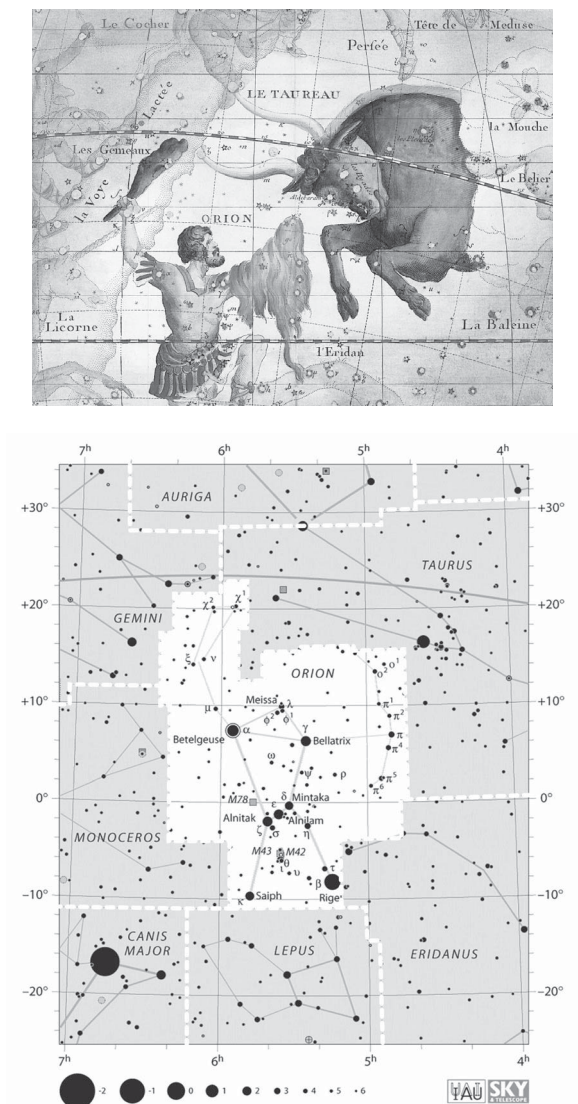


Рис. 1.2. Сравнение образной звездной карты из *Atlas Coelestis* («Атласа звездного неба») Джона Флемстида 1776 года, на которой показаны созвездия Ориона и Тельца, и современной интерпретации той же области неба с очерченными границами созвездий. (Вверху: изображение любезно предоставлено *Wikimedia Commons*. Внизу: материалы любезно предоставлены *constellationguide.com* и *Sky & Telescope*.)

приняты на Западе, мы выявим ряд поразительных сходств и удивительных различий. Например, их версия Большой Медведицы известна как «Три охотника и медведь». «Песьи звезды» Сириус и Антарес обозначены так же у индейцев чероки. А Плеяды и Гиады, звездные скопления, расположенные вдали друг от друга в созвездии Тельца, у племени западных моно были известны как «Шесть жен, наевшиеся лука» и — на безопасном расстоянии — «Их мужья».

Картины дневного и ночного неба меняются и сейчас, по мере того как мы внедряем передовые технологии наблюдения и открываем новые небесные феномены. И точно так же развиваются модели строения Вселенной. Ее иерархическую структуру, принятую в наше время, мы рассмотрим в третьей главе, а разговор о том, как эта структура появилась, отложим до третьей части, в которой совершим необыкновенное путешествие от Большого взрыва к возникновению галактик, звезд, планет и жизни. Но сначала посмотрим, что видно с поверхности нашей родной планеты и как нам во всем этом разобраться. Обычно это занятие называют «астрономией, постигаемой невооруженным глазом».

Дневное и ночное небо

Самое непостижимое во Вселенной — это то, что она вообще постижима.

Альберт Эйнштейн. Мир, каким я его вижу

Если бы мы сумели беспечно воспарить над Землей и улететь в межпланетное пространство, то увидели бы одну и ту же космическую картину: с небесной сферы на нас, и сверху, и снизу, изливался бы, подобно покрову, блистающий звездный свет. Но, к сожалению, в ближайшее время это вряд ли случится, и поэтому нам приходится считаться с тем, что все мы живем на сферической планете, которая каждые 23,93 часа совершает полный оборот вокруг своей оси, а каждые 365,26 суток — вокруг Солнца.

Взгляд с Земли

Поскольку мы «прикованы» к земной поверхности, нашему взгляду в любой момент доступна лишь половина небесной сферы, а вид Земли ограничен линией горизонта, заглянуть ниже которой нельзя. Будь Земля не сферической, а плоской, наш видимый горизонт простирался бы до ее внешнего края, а корабль, удаляющийся от нас, был бы виден всегда, — только пришлось бы следить за судном, которое становилось бы все меньше и меньше, в достаточно сильный бинокль. Но, как известно, корабли, отходящие от причала, уходят за горизонт

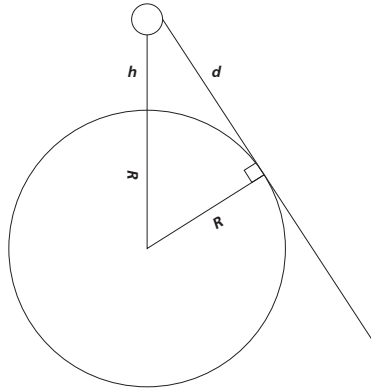


Рис. 2.1. Вид с поверхности Земли, как показано на этой схеме, зависит от высоты, на которой находится наблюдатель (h), и от радиуса Земли (R). Чем больше высота, тем дальше линия горизонта (d).

неизменно, а Британские острова с побережья Новой Англии не рассмотреть (рис. 2.1).

Даже с Международной космической станции невозможно увидеть всю половину Земли одновременно. Астронавты МКС, пребывая на орбите над нами на средней высоте в 340 км, видят изогнутый горизонт, отдаленный от них на 2110 км. Это примерно треть земного радиуса и двадцатая часть окружности земного шара. Чтобы кривизна стала гораздо более выраженной, потребуется переместиться намного дальше; скажем, при взгляде с Луны облик Земли кажется нам почти идеальной полусферой. Вот почему снимки нашей планеты, сделанные экипажем «Аполлона», вызвали в обществе преобразующий эффект такой огромной силы, — ведь впервые в истории человечества Землю можно было увидеть во всей полноте, и она предстала перед нами, словно драгоценная голубая сфера, окутанная непроглядным космическим мраком.

Важность географической широты

Кривизна земной поверхности не только ограничивает наш обзор — из-за нее различаются даже предстоящие перед нами картины дневного и ночного неба. В зависимости от того,

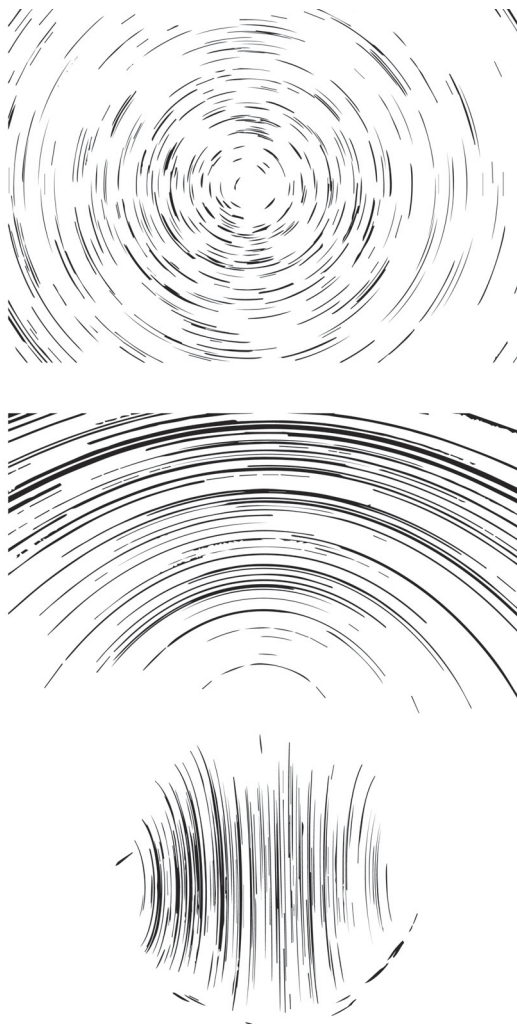


Рис. 2.2. *Сверху вниз.* Ночной вид звездных следов на Северном полюсе при взгляде в зенит, в сравнении со снимком с экватора (вид на север) и аналогичным видом с экватора, если смотреть на запад или на восток. На Северном полюсе все звезды, расположенные к северу от небесного экватора, видны непрерывно — они никогда не восходят и не заходят. На экваторе полюсы мира видны на горизонте и нет постоянно видимых околополюсных звезд; вместо этого наблюдатель видит, что все звезды восходят над горизонтом и заходят за него. (На основе материалов из нескольких источников.)

к северу или к югу от экватора окажется наша географическая широта, мы увидим разные небесные половины. Вот почему на севере можно и невооруженным глазом, и в бинокль любоваться Плеядами и Гиадами в созвездии Тельца, Двойным скоплением в созвездии Персея и туманностью Андромеды в одноименном созвездии, — но не получится восхититься столь же прекрасными видами Южного Креста, туманности Киля и Магеллановых Облаков. Те храбрецы, которые отважатся отправиться на Северный полюс, увидят прямо у себя над головой созвездие Малой Медведицы и Полярную звезду. Все остальные звезды — до небесного экватора — будут каждые 23,93 часа обращаться вокруг Полярной звезды против часовой стрелки (рис. 2.2), а светила с южной небесной широтой неизменно останутся невидимыми.

В северной зоне умеренных широт Полярная звезда все еще видна строго на севере, но уже не в зените. Измерив ее высоту над горизонтом, легко определить широту, на которой вы находитесь, — кстати, вспомните об этом, если вдруг когда-нибудь заблудитесь без *GPS*. В зависимости от широты вы увидите, что некоторые созвездия и их звезды всегда остаются околополярными и не заходят за горизонт, а вот другие звездные группы, с более низкой небесной широтой, как раз будут за ним скрываться. Особенно ярко это проявляется у созвездий, расположенных вдоль небесного экватора; прекрасный пример — Орион. С ноября по март его можно увидеть ночью: он восходит над горизонтом на востоке, поднимается на южное небо (в Северном полушарии) и опускается за горизонт точно на западе.

А на экваторе видно, как почти все звезды поднимаются над восточным горизонтом, описывают дугу по небу по параллельным траекториям и уходят за западный горизонт. Здесь Полярная звезда, расположенная у самой границы северного горизонта, была бы едва заметна, а Орион в своей наивысшей точке находился бы прямо у нас над головой. В Южном полушарии все почти так же, только наоборот: скажем, в Антарктике видна вся южная половина неба, а северная скрыта. И хотя сейчас нет «полярной» звезды, обозначающей Южный полюс мира, мы могли бы увидеть,

что все небесные звезды движутся вокруг него по часовой стрелке. В южной зоне умеренных широт этот «звездный пояс» сместился бы из зенита к южному горизонту, а Орион в своей наивысшей точке выглядел бы «перевернутым» к северу.

ОТКУДА НАМ ИЗВЕСТНО О ВРАЩЕНИИ ЗЕМЛИ?

Вид Солнца, Луны, планет и звезд, день ото дня идущих по небу с востока на запад, привычен многим из нас. Если спросить, почему это происходит, то хотя бы кто-то вспомнит о вращении Земли вокруг ее оси. Но если мы спросим, откуда известно, что вращается именно Земля, а не Солнце, Луна, планеты и звезды, то, возможно, собеседникам будет непросто найти аргументированный ответ. И это неудивительно, ведь доказать вращение Земли не так-то просто. Более того, до Галилея большинство ученых противились самой мысли о подобном, полагая, что если бы Земля вращалась, то все, не закрепленное на ней, улетело бы прочь. Вот несколько неоспоримых доказательств, подтверждающих гипотезу о вращении Земли, и один популярный отвлекающий маневр:

- **Вид Земли с Луны.** Астронавты, впервые высадившись на Луну 20 июля 1969 года, вскоре сделали снимки Земли, ясно подтвердившие ее вращение, совершаемое час за часом. На протяжении веков мы не располагали подобными изображениями, снятыми с другой планеты.
- **Маятник Фуко.** В 1851 году французский физик Жан Бернар Леон Фуко изобрел маятник, впоследствии названный по имени создателя. Он представляет собой груз, подвешенный на тонкой и очень длинной нити. Запущенный маятник совершает колебания и дает нам инерциальную систему отсчета, независимую от движущейся Земли. (По такому же принципу работают и гироскопы.) Земля под маятником вращается, и можно наблюдать за тем, как груз, висящий на нити, мерно колеблется относительно связанных с Землей ориентиров, которые медленно поворачиваются в течение дня. Поскольку маятник — если не прилагать к нему внешних сил — не может изменить направления своих колебаний, получается, что на него влияет вращение Земли.

- **Закономерности атмосферной циркуляции.** Земля оборачивается вокруг своей оси как твердое тело, поэтому линейная скорость, с которой вращается ее поверхность, максимальна у экватора — там ее величина почти вдвое выше, чем у реактивного самолета, а в северных и южных широтах, превышающих 60° , самолет уже оказывается быстрее. Любые воздушные течения, идущие от экватора к полюсам, сперва обладают той же высокой скоростью, с какой вращается на экваторе наша планета. На пути к более высоким широтам они проходят над территорией, которая движется медленнее, и начинают обгонять земную поверхность в ее вращении с запада на восток. Их движение, как отмечают наблюдатели, сравнимо с потоком, который, отклоняясь на восток, идет над Землей. Воздушные массы, направленные от полюсов к экватору, по той же причине отклоняются на запад. Эти два потока создают атмосферную систему, которая циркулирует по часовой стрелке в Северном полушарии и против часовой стрелки в Южном. Кроме того, здесь проявляется эффект Кориолиса, легко объясняющий круговращение воздуха в атмосферных системах высокого давления. Когда воздушный поток устремляется из областей с высоким давлением в области с низким, его суммарное отклонение, вызванное вращением Земли, закручивает его против часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой стрелке в Южном. С этими циркулирующими зонами низкого атмосферного давления связаны наиболее активные и бурные штормовые системы.
- **Аберрация звездного света.** Представьте, что вас застал сильный ливень — и, к счастью, вы предусмотрительно захватили зонтик. Ветра нет, поэтому дождь льет прямо вниз. Пока вы стоите и держите зонтик над головой, он закрывает вас, и ливень вам не страшен. Но если вы пойдете быстрым шагом, то вам покажется, что струи отклонились от вертикали и бьют вам в лицо, — и вы, заслоняясь от них, наклоните зонтик вперед. Тот же самый эффект имеет место при падении звездного света на вращающуюся Землю — и выражается в том, что звезды, которые, согласно расчетам, должны были бы располагаться прямо над головой, кажутся слегка смещенными на восток, по направлению вращения Земли. Это «отклонение» звездного света составляет всего $1/11000^\circ$. Более быстрое орбитальное движение Земли вокруг Солнца приводит к гораздо боль-

шему отклонению, составляющему $1/100^\circ$. Эти смещения не столь существенны, но их достаточно, чтобы подтвердить вращение Земли и ее движение по орбите, — и поэтому астрономы вносят корректировки каждый раз, когда им требуется точно навести свои оптические исследовательские телескопы на определенные точки неба.

- **Скорости самолета.** Пришло время «отвлекающего маневра». На некоторых широтах скорость у самолета, летящего на восток, выше, чем у того, который летит на запад, — и может показаться, что вращение Земли, направленное с запада на восток, ускоряет один самолет и в то же время замедляет второй. Однако эти различия в скоростях можно в полной мере объяснить дующими на восток ветрами — попутными для одного самолета и встречными для другого. И более того, поскольку каждый самолет взлетает с вращающейся Земли, то он разделяет ее движение, и поэтому скорость его полета *относительно* земной поверхности не зависит от вращения планеты.

Небесные долготы и широты

Поскольку наши представления о дневном и ночном небе «привязаны к Земле» и во многом зависят от нашего географического местоположения и времени суток, астрономы, стремясь принять все это во внимание, разработали специальную картографическую систему координат. Она называется экваториальной, и, по сути, это проекция земной градусной сетки с ее координатами долготы и широты на небесную сферу (рис. 2.3). Чтобы увидеть ее в действии, рассмотрим небесный экватор — большой круг, проекцию экватора Земли на космическое пространство. Небесные широты к северу или югу от небесного экватора измеряют в градусах, угловых минутах и угловых секундах (обычно эти единицы сокращенно обозначают символами $^\circ$, $'$, $''$), где 1 градус равен 60 угловым минутам, а 1 угловая минута насчитывает 60 угловых секунд. Небесную широту астрономического объекта, как правило, называют склонением (в астрономии оно обозначается как δ или *Dec*, от латинского слова *declinatio* — «наклон»). Созвездие

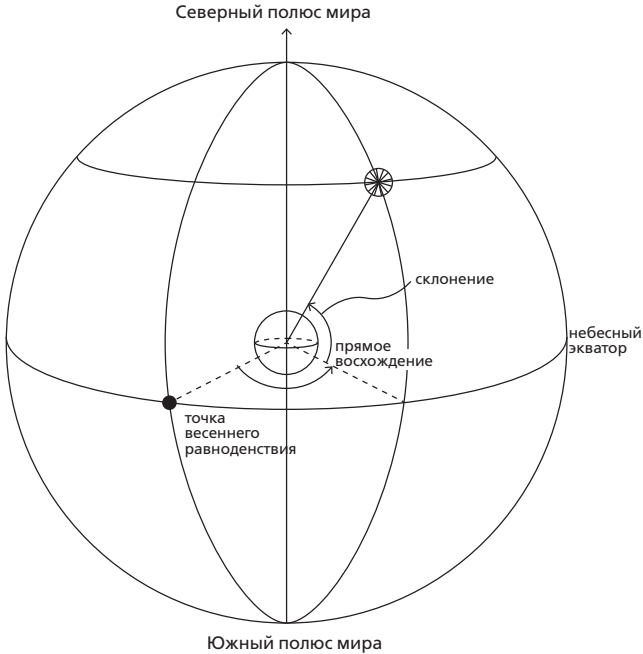


Рис. 2.3. Земная система координат — это основа для экваториальной системы небесных координат, используемой наиболее часто. Здесь внутренняя сфера представляет Землю, а внешняя — небесную сферу. Небесная широта (склонение) измеряется относительно небесного экватора. В северном небесном полушарии склонение считается положительным, а в южном — отрицательным. Небесная долгота (прямое восхождение) измеряется по направлению на восток от линии долготы, пересекающей точку весеннего равноденствия.

Ориона находится на небесном экваторе, и поэтому его склонение близко к 0° . Полярная звезда, напротив, сейчас находится вблизи Северного полюса мира (проекция земной оси на небесную сферу), и поэтому ее склонение очень близко к $+90^\circ$. (Магнитная ось Земли постоянно отклоняется от оси вращения планеты, и Северный магнитный полюс в настоящее время располагается примерно на 86-й параллели северной широты.)

Как и линии постоянной небесной широты, линии постоянной небесной долготы соответствуют проекциям меридианов Земли на небесную сферу. Они очерчивают большой круг, проходящий

как через Северный, так и через Южный полюсы мира. Однако из-за суточного вращения Земли систему координат для расчета небесной долготы необходимо соотносить с определенным местоположением на небесной сфере (а не на Земле). Им стала точка весеннего равноденствия, в которой Солнце пересекает небесный экватор каждый март, когда «выходит» на северное небо. Небесные долготы измеряются в направлении с запада на восток от этой точки в часах, минутах и секундах, при этом полный круг, составляющий 360° , соответствует 24 часам.

Но как же так — ведь эти единицы приняты для измерения времени? Почему мы используем именно их? Причина в том, что каждые 24 часа суточное вращение Земли смещает те линии постоянной небесной долготы, которые определяются в системе координат, связанной с земным шаром. А чтобы установить, где на небе в любой момент появится тот или иной объект, необходимо знать как его небесную долготу, так и время суток, и если обозначить небесную долготу в единицах времени, то можно упростить расчеты. В астрономии для обозначения небесной долготы принят особый термин — прямое восхождение (сокращенно α или RA , от англ. *right ascension*). Часы, минуты и секунды (в которых отсчитывается и часовой угол) обычно сокращаются как h , m , s — от соответствующих английских слов *hour*, *minute*, *second*. Прямое восхождение и склонение небесного тела полностью описывают его положение на небесной сфере. Например, туманность Ориона в Мече Ориона имеет следующие координаты: $RA\ 5^h\ 35^m\ 17,3^s$ и $Dec\ -5^\circ 23' 28''$.

В едином ритме с колебанием Земли

Располагать астрономические объекты в системе координат, связанной с Землей, довольно проблемно, поскольку со временем эти координаты, пусть и медленно, но все-таки меняются. Об этом впервые упомянул около 140 года до нашей эры древнегреческий астроном Гиппарх. Сравнив свои наблюдения с астрономическими записями, сделанными за предшествующие 150 с лиш-

ним лет, он обнаружил, что долготы некоторых ярких звезд, расположенных вдоль зодиака, изменились на эквивалент 2° . Это равняется угловому смещению примерно на $50''$ в год, и по прошествии долгого времени положение может перемениться очень заметно. Например, даже точка весеннего равноденствия за последние 2000 лет сместилась вдоль небесного экватора на 28° . Пять тысяч лет назад, во времена, когда в истории Древнего Египта шел династический период, Солнце пересекало небесный экватор в созвездии Тельца, а сегодня это происходит в созвездии Рыб. Такое смещение влечет всевозможные последствия для астрологии. Скажем, если ваш астрологический «солнечный знак» — Стрелец, это не значит, что Солнце в день вашего рождения непременно находилось в созвездии Стрельца. И более того, все астрологические солнечные знаки смещены примерно на одно зодиакальное созвездие по сравнению с тем расположением Солнца в зодиакальном круге, которое мы наблюдаем сейчас в том или ином месяце.

Как нам теперь известно, это долговременное смещение вызвано тем, что наша планета не только вращается, но еще и покачивается, как волчок. Полный цикл колебания (или прецессии) земной оси занимает примерно 26 000 лет. Сейчас она указывает на Полярную звезду, а также примерно на $23,5^\circ$ отклонена от перпендикуляра, проведенного к плоскости земной орбиты, и со временем прецессирует вокруг него, причем общий угол поворота между ними остается неизменным. Как показано на рис. 2.4, из-за прецессии земной оси Северный полюс мира проходит по окружности, угловой радиус которой равен $23,5^\circ$. Сейчас этот полюс находится в созвездии Малой Медведицы, и его можно найти по Полярной звезде, а 5000 лет назад он был в созвездии Дракона, и северный полюс земной оси указывал на Тубан. Возможно, эта предыдущая «полярная звезда» служила ориентиром творцам древних пирамид — и поможет объяснить, как им удалось выровнять эти памятники точно на истинный север.

Но это еще не все. Прецессионное движение земной оси сместило даже времена года. Представим, что сейчас 21 декабря

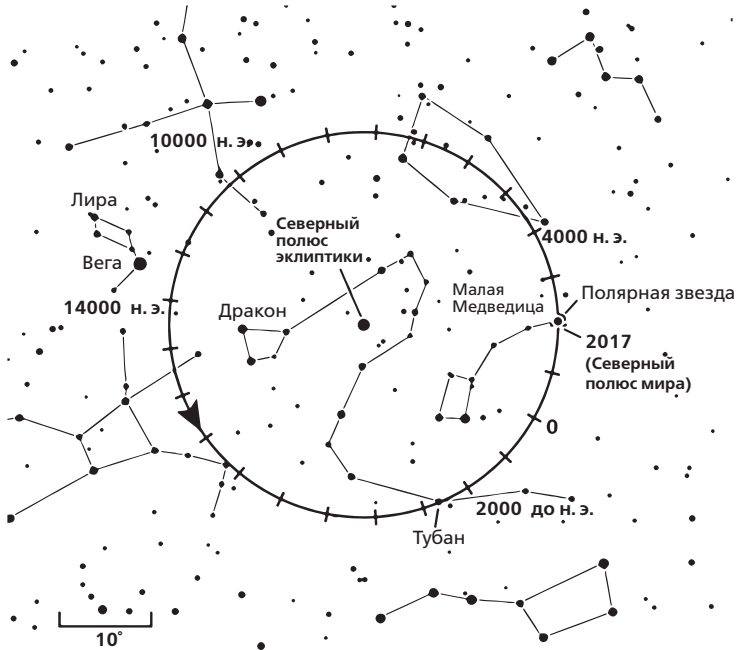


Рис. 2.4. Спроецированная на небесную сферу окружность, которую «чертит» земная ось. Сейчас северный полюс оси указывает на Полярную звезду в созвездии Малой Медведицы. Но 5000 лет назад он был направлен на Тубан, а Дракона, а через 13 000 лет нацелится на Вега, а Лиры. (На основе материалов Roen Kelly, *Astronomy Magazine*.)

и Земля находится в той части своей орбиты, когда Солнце пребывает в южном созвездии Стрельца, а северный полюс земной оси максимально отклонен от Солнца (рис. 2.5). Мы отмечаем это время как зимнее солнцестояние в Северном полушарии и летнее солнцестояние в Южном. А если мы теперь перенесемся на 13 000 лет вперед и вообразим Землю в той же части ее орбиты, то увидим, что земная ось на целых 57° отклонилась от направления, в котором она указывает в наши дни. Северный полюс мира в это время окажется в Веге, и поэтому 21 декабря северный полюс земной оси будет направлен к Солнцу, Стрелец расположится на северном небосклоне, а зимнее солнцестояние в Северном полушарии станет летним (в Южном все будет наоборот).

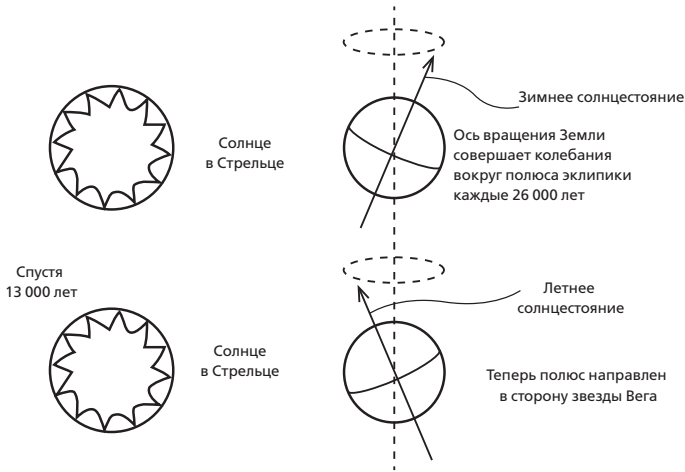


Рис. 2.5. Прецессия земной оси медленно меняет отношения Земли и Солнца. В первом случае Земля находится в той части своей орбиты, которая соответствует зимнему (декабрьскому) солнцестоянию, когда Солнце пребывает в Стрельце. Северное полушарие «отвернуто» от Солнца, и солнечный свет падает на него под малыми углами — а жители севера чувствуют, что пришла зима. По прошествии 13 000 лет земная ось пройдет половину прецессионного цикла, так что Северное полушарие будет обращено к Солнцу, и соответствующие времена года в Северном и Южном полушариях поменяются местами: в декабре на север придет лето, на юг — зима.

Даже когда временные масштабы намного короче, астрономам приходится учитывать прецессионное движение земной оси каждый раз, когда они вычисляют положение объектов в экваториальных координатах. Обычно при этом ссылаются на табличные каталоги, в которых координаты объектов приводятся по отношению к определенной эпохе. Эти каталоги меняются каждые 50 лет. Годы позволяют мне ссылаться и на старые каталоги из эпохи B1950.0, и на более современные, из эпохи J2000.0. Чтобы определить фактическое положение любого небесного тела, необходимо «прецессировать» координаты, указанные в каталоге, на текущую эпоху. Как правило, в наши дни это делают с помощью программного обеспечения телескопа или онлайн-калькуляторов.

Ежемесячное перемещение ночного неба

По мере того как дни превращаются в месяцы, можно заметить, что некоторые вечерние звезды заходят на западе еще до темноты, а перед рассветом на востоке восходят те, что раньше были невидимы, и кажется, будто вся ночная панорама небесной сферы медленно вращается вокруг нас с востока на запад. С тех пор это интуитивное представление сменилось современным, в котором небесная сфера остается неподвижной, а Земля совершает свой путь вокруг Солнца, поэтому теперь перемещение ночного неба с востока на запад понимают как отражение ежегодного орбитального движения Земли. Если смотреть с нашей планеты, то создается впечатление, что Солнце заграждает одни области неба и уступает дорогу другим (рис. 2.6).

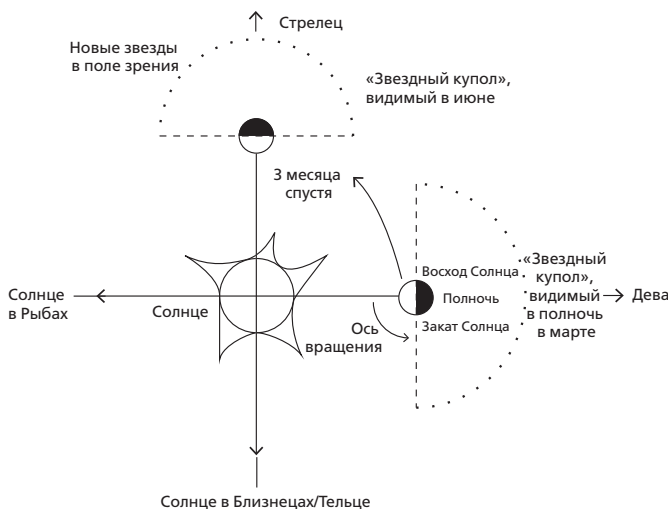


Рис. 2.6. Пока Земля обращается вокруг Солнца, «звездный купол», видимый ночью, медленно перемещается на запад. Рассмотрим ситуацию, когда Солнце пребывает в Рыбах, а «звездный купол» в полночь симметричен относительно Девы. По прошествии трех месяцев Солнце окажется в Близнецах/Тельце, а полуночный «звездный купол» сместится на запад и будет симметричен относительно Стрельца. Из-за орбитального движения Земли на востоке теперь видны новые звезды, а другие исчезают из вида на западе.

Скорость смещения можно рассчитать на основе времени, необходимого Земле для завершения полного оборота по орбите. Поскольку наша планета описывает круг в 360° примерно за 365 дней, оно составляет приблизительно 1° в день. Мы столь неотделимы от Солнца, что воспринимаем это смещение как ежедневную смену связанного с Солнцем времени восхода и захода звезд. Этот временной сдвиг можно высчитать, умножив ежедневное изменение угла, выраженное дробью, на полные 24 часа: $(1^\circ/360^\circ) \cdot 24 \text{ часа} = 1/15 \text{ часа}$, или 4 минуты в день. Он объясняет и то, почему время, за которое Земля совершает один оборот вокруг своей оси относительно удаленных звезд, составляет 23 часа 56 минут, а период ее вращения относительно Солнца (т.е. солнечные сутки) на 4 минуты больше и ближе к привычной нам продолжительности в 24 часа.

«Странствующие» планеты

В отличие от звезд, видимое движение которых по ночному небу совершается сложным, но понятным способом, с планетами все сложнее. Вместо того чтобы медленно смещаться на запад вместе со звездами, они, как кажется, перемещаются из одного зодиакального созвездия в другое в течение недель (Меркурий), месяцев (Венера и Марс), лет (Юпитер и Сатурн) и десятилетий (Уран и Нептун). Эти «странствия» объясняются просто: планеты обращаются вокруг Солнца почти в одной и той же плоскости, но с очень разными скоростями.

Меркурий и Венера гораздо ближе к Солнцу, чем Земля, и их орбитальные периоды значительно короче земного. Поэтому мы обычно видим их на западе вскоре после захода Солнца или на востоке незадолго до восхода, из-за чего рождаются ошибочные наименования «вечерняя звезда» и «утренняя звезда». Меркурий никогда не «отходит» от Солнца более чем на 28° , так что его обычно можно заметить в отблесках рассвета или заката. Он появляется то на утреннем, то на вечернем небе, меняя положение каждые четыре месяца. Я видел Меркурий раз десять, не больше, и самый запоминающийся случай произошел в моей юности,

когда я работал охранником и сторожил парковку чайной фабрики «Липтон». Перед самым восходом, когда прибыли рабочие утренней смены, длинноволосый охранник, встретивший их, указывал на восточный горизонт и восклицал: «Смотрите, смотрите, Меркурий!» К сожалению, вряд ли мои призывы внушили им уверенность в своей безопасности.

Венера почти вдвое дальше от Солнца, чем Меркурий, и если наблюдать за ней с Земли, то мы увидим, что от предрассветного восточного горизонта — или от западного горизонта после заката — она отходит намного дальше, на целых 47°. Венера постепенно перемещается между вечерним и утренним небом и каждые девятнадцать месяцев оказывается в одной из так называемых наибольших элонгаций. Поэтому ей можно любоваться на протяжении нескольких часов после заката и до восхода, пока небо полностью темное. Венера выглядит настолько яркой, что часто ее ошибочно принимают за самолет или НЛО.

Орбита Марса в 1,5 раза дальше от Солнца, чем орбита Земли, поэтому можно увидеть, как он перемещается по всему зодиакальному кругу. Примерно каждые два года Земля обгоняет Марс — так атлет, бегущий по внутренней дорожке трека, «обходит» соперника, бегущего по внешней. Когда это происходит, создается впечатление, что Марс прекращает свой путь на восток и меняет курс на противоположный — говорят, что он совершает ретроградное движение, — а по прошествии нескольких месяцев вновь ненадолго останавливается и после снова идет на восток (рис. 2.7).

Наблюдения показывают, что все планеты, орбиты которых пролегают за пределами земной, в какой-то момент прерывают движение на восток и движутся попятно, на запад, причем иногда на протяжении нескольких месяцев, после чего снова возобновляют свой путь на восток. Опять же, эти необычные передвижения можно объяснить тем, что примерно за один земной год Земля «обгоняет» эти медленные планеты. Запомнить, как движется по небу Юпитер, довольно легко. Его орбитальный период почти равен двенадцати годам, и из одного зодиакального созвездия в другое он переходит примерно за год. В тот год, когда я начал писать эту книгу (2015),

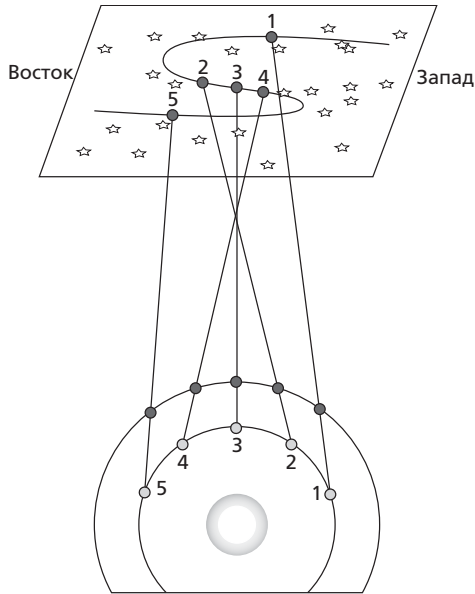


Рис. 2.7. Орбиты, по которым Земля и Марс обращаются вокруг Солнца. Земля на внутренней орбите движется быстрее и «обгоняет» Марс, и возникает впечатление, что Марс меняет курс на противоположный и движется попятно (см. линии 2–4). Только по прошествии нескольких месяцев наблюдатель увидит, что Марс возобновил свое прямое движение на восток через зодиакальные созвездия (см. линию 5). (Материалы любезно предоставлены Brian Brondel, *Wikimedia Commons*.)

а также в следующем году (2016) Юпитер пребывал в созвездии Льва, как и в 2004, 1992 и 1980 годах, когда я впервые начал следить за его продвижением по зодиаку. В 2017 году он пребывал в созвездии Девы, а в последующие годы — в Весах, Скорпионе и так далее. К ретроградному движению Юпитер переходит по прошествии каждых 399 земных суток (у него этот период гораздо ближе к земному году, чем у Марса). У более далеких планет на полный оборот вокруг Солнца уходит еще больше времени, поэтому каждый год они проходят через соразмерно меньшие участки ночного неба, а их крошечные ретроградные «петли» происходят почти ежегодно (и почти точно отражают орбитальное движение «обгоняющей» Земли). В четвертой главе мы еще поговорим о планетах.

Облики Луны

Луна совершает полный оборот вокруг Земли каждые 27,3 суток — это ее так называемый сидерический период обращения. Но с нашей «орбитальной платформы» кажется, будто Луна запаздывает и возвращается в одну и ту же точку неба каждые 29,5 суток. Этот наблюдаемый период обращения, названный синодическим, побудил наших далеких предков установить календарный «месяц», составляющий двенадцатую часть полного земного года. Чтобы обогнуть Землю за считанные дни, Луна движется по ночному и дневному небу с солидной скоростью в 12° в сутки и благодаря этому каждые 2,5 суток проходит через новое зодиакальное созвездие.

Но с Луной происходит не только это! На пути по небу она поразительно меняет свой облик, или видимую форму. Через несколько дней после новолуния (периода, когда Луна практически невидима) перед нами предстанет молодой, или растущий, месяц, отчетливо видный на безоблачном западном горизонте после заката, в наступающих сумерках. По прошествии еще нескольких дней Луна переместится на восток, окажется под углом в 90° к заходящему Солнцу, и можно будет рассмотреть ее сторону, обращенную к Земле, в тот момент, когда эта сторона освещена наполовину, — в так называемой фазе первой четверти. В этот день Луна восходит около полудня, около шести вечера достигает наивысшей точки в своем пути на запад и заходит ближе к полуночи. Еще несколько дней — и Луна начнет прибывать, поскольку Солнце осветит больше половины ее стороны, видимой с Земли. В это время она восходит днем, ближе к вечеру, и заходит перед рассветом. По истечении пятнадцати дней с новолуния, верно рассчитав время, можно застать момент, когда на востоке восходит полная Луна, а на западе, озаряя ее, садится Солнце. Оказавшись между светилами, вы увидите самый совершенный лунный облик, — и поверьте, это потрясающий миг. В полнолуние светло всю ночь, поскольку Луна восходит в час заката, в полночь достигает вершины в своем пути на запад и заходит на рассвете.

После полнолуния освещенная часть Луны, обращенная к Земле, начинает уменьшаться, — и говорят, что Луна «убывает». В этой фазе она восходит после наступления темноты и заходит в середине утра. В последней четверти Луна восходит в полночь, достигает наивысшей точки на восходе и заходит в полдень, — ее легко увидеть днем. Потом наступает фаза «старой» Луны, заметной в предрассветные часы над восточным горизонтом. Все эти фазы — итог «сценического» освещения, создаваемого Солнцем. Поскольку Солнце для Луны — это единственный источник света, их взаимное положение определяет, насколько сильно будет озарена обращенная к Земле половина нашего спутника (рис. 2.8). Когда Солнце и Луна находятся в одной части неба, Солнце, нахо-

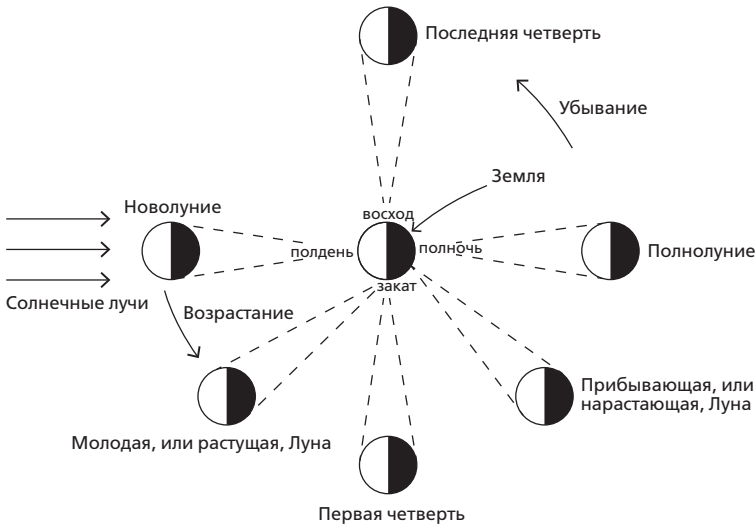


Рис. 2.8. Схематический рисунок Луны во всех ее положениях на орбите. Свет удаленного Солнца озаряет Луну и Землю. Размеры даны условно. На Земле отмечены места восхода, полудня, заката и полуночи. Пунктирные линии, идущие от Земли к Луне, показывают, какие части Луны видны с нашей планеты. Например, в полнолуние обращенная к Земле сторона Луны полностью освещена, и в полночь создается впечатление, что полная Луна располагается на самой вершине неба. Для сравнения: в первой четверти у Луны освещена только половина стороны, видимой с Земли. В этом случае Луна кажется самой высокой на небе тем, кто смотрит на закат.

дьясь дальше от нас, подсвечивает Луну сзади, и при этом сторона Луны, обращенная к Земле, почти не освещена. Именно в это время мы видим серпы полумесяца. Постепенно Луна отходит все дальше от направления, в котором движется Солнце, и ее сторона, обращенная к Земле, освещается все сильнее. А полнолуние знаменует тот идеальный миг, когда Луна располагается напротив Солнца и вся ее половина, обращенная к Земле, светится, словно личико фарфоровой куколки.

Очарование затмений

Если бы Луна обращалась вокруг Земли в той же плоскости, в какой Земля совершает оборот вокруг Солнца, то при наступлении новолуния она неизменно затмевала бы Солнце, а в полнолуние всегда бы скрывалась в тени Земли. Но и солнечные, и лунные затмения не настолько часты — а значит, все немного иначе. На самом деле плоскость лунной орбиты отличается от плоскости земной и наклонена к ней примерно на 5° . Как правило, этого хватает, чтобы в новолуние наш спутник прошел выше или ниже Солнца, не закрывая его от наблюдения с Земли. И этого же углового смещения достаточно для того, чтобы земная тень не коснулась полной Луны. Однако лунная орбита все же пересекается с земной, и когда Луна в новолуние или полнолуние оказывается в точке этих пересечений, происходят затмения. Поэтому примерно каждые 1,5 года в новолуние где-то на Земле видно солнечное затмение, а пятнадцать дней спустя, в полнолуние, — затмение лунное (рис. 2.9).

Полное солнечное затмение — одно из самых захватывающих космических явлений, которое можно увидеть с Земли. Поскольку Луна в новолуние проходит точно между Солнцем и Землей, она отбрасывает тень, которая мчится по земной поверхности со скоростью свыше 1500 км/ч. Ширина полосы тени — чуть больше полутора сотен километров, и она затемняет то или иное место на Земле не более чем на семь минут. Но и за эти мимолетные мгновения вы невольно содрогнетесь, когда тьма стремительно

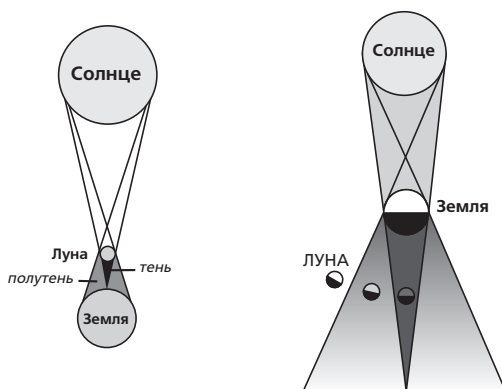


Рис. 2.9. Слева: геометрическая схема полного солнечного затмения. С участков Земли, попадающих в область тени, видно полное затмение, с тех, что находятся в полутени, — частное. Справа: геометрическая схема полного лунного затмения. Здесь область тени, отбрасываемой Землей, шире Луны. (На основе материалов Paul Derrick's Stargazer, www.stargazerpaul.com/s_eclips.htm.)

окутает весь мир и Солнце скроется во мраке. В этот миг Луна находится на таком расстоянии от Солнца, что затмевает его целиком, и в светлом ореоле, окружающем почерневший диск, предстают границы солнечной короны, обычно скрытой за блистающей поверхностью нашей звезды. За пределами короны, на затемненном небе, видны планеты и самые яркие звезды, а вдоль горизонта, на границе лунной тени, небо озарено цветами вечерних зарниц. Но проходит совсем немного времени, и Луна перемещается настолько, что показывается крошечный отблеск солнечной поверхности и Солнце становится похожим на «кольцо с бриллиантом». Самая темная часть лунной тени уходит, полное затмение завершается, — и наблюдателям остается лишь любоваться фазами частного затмения, пока Солнце снова не засияет в полную силу.

Лунные затмения, по сравнению с солнечными, гораздо спокойнее и лучше подходят для того, чтобы ближе к полуночи устроить вечеринку с коктейлями. По размерам Земля превосходит Луну, и полутень, отбрасываемая нашей планетой во время

лунного затмения, намного больше, чем у Луны во время солнечного, поэтому вся сторона Луны, обращенная к Земле, скрывается во тьме и остается в ней дольше. Более того, видеть Луну во время затмения могут все, кто находится на ночной стороне Земли. Незачем тратить огромные деньги и преодолевать огромные расстояния только для того, чтобы оказаться на каком-то особом участке земной поверхности: шансов застать лунное затмение, оставаясь в родном городе, у вас гораздо больше. И, возможно, еще вы увидите, что каждое лунное затмение имеет свои особые черты. Когда солнечный свет проходит через земную атмосферу, его часть рассеивается к затемненной Луне, и если атмосфера полна пыли — скажем, после недавнего извержения вулкана, — то рассеяние будет более выраженным и Луна приобретет красновато-медный цвет. Так перемены в атмосфере Земли меняют у затмеваемой Луны яркость и оттенок.

Времена года: оборот, вращение, наклон

О временах года я решил поговорить лишь в самом конце этой главы, поскольку во многом понять их сложнее всего. Задайте кому-нибудь вопрос, как происходит смена сезонов, и вам, возможно, ответят, что это как-то связано с наклоном земной оси. Хорошо, пусть так. Действительно, мы уже упоминали, что земная ось наклонена на $23,5^\circ$ к плоскости орбиты нашей планеты. Помимо прочего, этот ответ означает, что ваш собеседник отверг идею, согласно которой расстояние от Земли до Солнца меняется настолько сильно, чтобы вызвать смену сезонов. Земная орбита — почти круговая, и перемены в расстоянии до Солнца, на котором оказывается Земля в своем годичном пути, настолько незначительны, что на характер времен года они не влияют. И даже если бы это расстояние изменилось серьезно, это отразилось бы на обоих полушариях, — но все свидетельствует об ином. Большинству людей известно: когда в Северном полушарии зима, в Южном царит лето, и наоборот. Но если мы продолжим задавать вопросы, то выяснится вот что: оказывается, многие часто

полагают, что именно из-за наклона оси вращения Земли одно полушарие оказывается значительно ближе к Солнцу и поэтому нагревается сильнее, чем другое. Вот здесь и пригодятся некоторые простые вычисления. Учитывая наклон земной оси в $23,5^\circ$, максимальное смещение земной поверхности по направлению к Солнцу или от него составляет всего 2543 км. Сравните это с расстоянием в 150 *млн* км от Земли до Солнца, и наибольшая величина эффекта, полученная при расчетах, составит 0,01695 %. Видимо, у столь ярко выраженных изменений климата при переходе между зимой и летом все же иная причина.

Рассмотрим ситуацию, представленную на рис. 2.10. Земля находится в той части своей орбиты, где Северное полушарие максимально отклонено от Солнца, а Южное максимально наклонено к нашей звезде. Теперь посмотрите на солнечные лучи, направленные к земной поверхности. В Северном полушарии они падают под малым углом к горизонту, и «северяне», посмотрев на Солнце, увидели бы, что оно располагается низко на южном небе. Если уподобить лучи параллельным световым потокам, то мы увидим, что каждый из них распространится по значительной площади Земли, и поэтому его способность освещать Землю будет соразмерно слабее. Тусклое освещение земной поверхности приводит к наступлению зимы, причем чем севернее широта, тем суровее условия. А на Южное полушарие солнечные лучи падают одновременно, под большими углами к горизонту, и в небе «южан» солнце стоит высоко. И поскольку угол падения солнечных лучей по отношению к горизонту в данном случае больше, их способность освещать земную поверхность гораздо выше, поэтому и возникают условия лета.

В конечном итоге угловая высота Солнца над горизонтом зависит от местной широты и от угла наклона земной оси к Солнцу или от него. В день летнего солнцестояния угловая высота полуденного Солнца высчитывается так: 90° — широта места + $23,5^\circ$, а в день зимнего — так: 90° — широта места — $23,5^\circ$. Например, мой дом в Рокпорте, штат Массачусетс, располагается на широте + $42,5^\circ$. В день летнего солнцестояния угловая высота Солнца

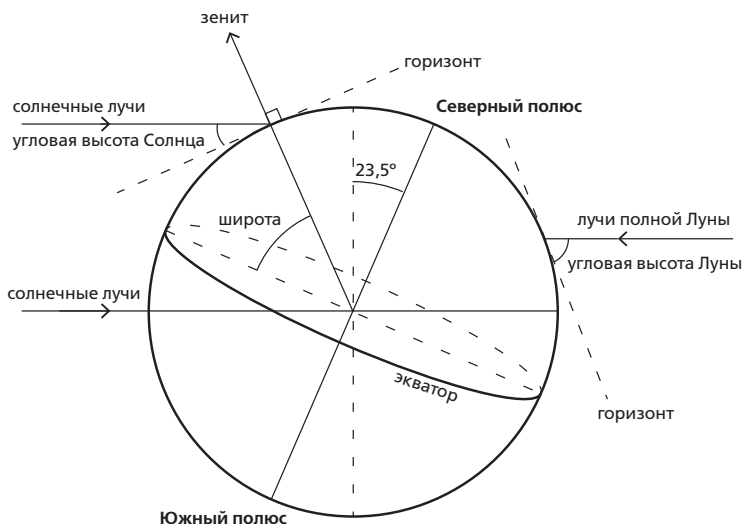


Рис. 2.10. Освещение Земли солнечными лучами 21 декабря. Показаны различия на севере и юге. Разница в угловой высоте Солнца над местным горизонтом — низкое положение в небе для «северян» и высокое для «южан» — приводит к ощутимой разнице в том, как Солнце нагревает поверхность Земли. По воле случая полная Луна, расположенная напротив Солнца, кажется «северянам» самой высокой на небе, и в это время зимние прогулки по заснеженным полям могут быть особенно прекрасны.

в наивысшей точке полуденного неба составляет 71° , и полученного солнечного излучения хватает, чтобы ходить в шортах и футболке. Подождите полгода, когда полуденное Солнце поднимется над южным горизонтом всего на 24° — и настанет время утепляться!

В дни весеннего и осеннего равноденствий Земля, идущая по орбите, достигает такого положения, когда ее ось не наклонена к Солнцу и не отклонена от него. В этом случае, когда наклон оси не играет никакой роли, угловая высота Солнца зависит только от широты, так что для обоих равноденствий она высчитывается так: 90° — широта. В Рокпорте я бы видел полуденное Солнце на средней угловой высоте в $47,5^\circ$ над горизонтом, и мир вокруг меня получал бы достаточно солнечного тепла, чтобы мне было комфортно в легком свитере или куртке.

Завершающий пассаж

Итак, мы представили наше положение на сферической поверхности родной планеты, вращающейся и вокруг себя, и вокруг своей звезды, и попытались осмыслить дневное и ночное небо в его вечном непостоянстве. Когда речь идет о звездах, планетах, Солнце и Луне, то многое из того, что мы видим, можно понять лишь в том случае, если в нашем разуме будет надежная трехмерная модель — неудивительно, что нашим далеким предкам потребовалось так много времени, чтобы во всем разобраться! Важнейший аспект этой пространственной рекогносцировки всегда состоял в том, чтобы измерить расстояния до самых разных объектов, которые в неисчислимом множестве предстают перед нами на небосводе. Если бы мы не сумели высчитать эти расстояния, то с чем бы нам пришлось остаться? Разве что с увлекательным, но непознаваемым «ассортиментом» дневных и ночных небесных светил. Поэтому первейшая задача астрономии заключается в установлении все более точных расстояний до небесных объектов, насколько бы далеко они ни находились. В следующей главе мы исследуем удивительную пространственную иерархию материи, которую мы постигали на протяжении всей нашей истории, всматриваясь в космическую даль. Потом мы кратко изучим Солнечную систему, а дальше отправимся в другие звездные миры — ко Млечному Пути, к иным галактикам, в глубины нашей вечно расширяющейся Вселенной.

Космические дали

Это пространство мы называем бесконечным, потому что нет основания, условия, возможности, смысла или природы, которые должны были бы его ограничить; в нем находится бесконечное множество миров, подобных нашему...¹

Так прославляется совершенство Господа и про-
является величие Его царства; Он воспет не в одном,
а в бесчисленных солнцах; не на одной земле, не
в одном мире, но в тысяче тысяч, говорю я, в беско-
нечности миров.

*Джордано Бруно.
О бесконечности, Вселенной и мирах*

Любой учебник по астрономии для начинающих, достойный прочтения, должен в какой-то мере обрисовать картину Вселенной и всего, что находится в ней. Поставим же себе такую цель и, двигаясь от малого к большому, поговорим об известной нам пространственной иерархии вещества. Затем я предлагаю рассмотреть основные исторические этапы развития астрономии, позволившие нам прийти к современным представлениям о Солнечной

¹ *Джордано Бруно. О бесконечности, Вселенной и мирах* / Пер. с итал. А. Рубина. М.: ОГИЗ, 1936. С. 219.

системе, о Млечном Пути и о более обширной галактической Вселенной. А в завершение мы наконец сможем отправиться в некий аналог космического путешествия с помощью «Степеней десяти», в которых выразим самые разные величины — от размера ребенка до крупнейших структур, познанных в наши дни.

Космический адрес человечества

Сейчас, в мире электронных сетей, мы привыкли общаться с людьми, отправляя свои послания на личную и ведомственную почту. Но чтобы куда-нибудь поехать или отправить кому-нибудь реальную посылку, нам нужны другие адреса — с номерами улиц, с почтовыми индексами, с названиями штатов, регионов или городов, а иногда и целых стран. Такая адресация поможет нам понять, какое место в космосе и в общем расположении материи во Вселенной занимаем мы сами.

В этом смысле, вот мой космический адрес:

Рокпорт, штат Массачусетс
Соединенные Штаты Америки
Северная Америка
Земля — третья планета от Солнца
Система Земля — Луна
Солнечная система
Окрестности Солнца и Сириус
Пояс Гулда
Местный пузырь
Рукав Ориона
Галактика Млечный Путь
Местная группа галактик
Сверхскопление Девы
Галактическая нить сверхскоплений Девы — Гидры — Центавра
Ланиакя
Космическая паутина

Такая адресация показывает, что в космосе, как в матрешке, каждый компонент словно бы вложен в следующий. В дальнейшем мы заполним «пробелы» и опишем иерархическое устройство материи, из которой состоит известная нам Вселенная.

Исторические вехи

Людям потребовалось несколько тысячелетий, чтобы в полной мере определить расстояния до планет, звезд и галактик. Рассказы о том, как мы начинали их постигать, очень увлекательны (рекомендованная литература приведена в конце книги), но они выходят за рамки настоящего путеводителя. Впрочем, он может и должен познакомить нас с «главными вехами» развития астрономии, благодаря которым появилась современная картина Вселенной. Начнем же с нашей родной планеты и шаг за шагом двинемся дальше, подробно обозначая расстояния и величины, а также историческую значимость их открытия.

Планета Земля

Во второй главе мы рассматривали Землю как сферическую планету, чтобы понять, почему ночное небо в Северном и Южном полушарии такое разное. Конечно, представление о круглой Земле не всегда было общепринятой нормой, но мудрецы античного мира довольно быстро поняли это, как только начали документировать свои наблюдения за дневным и ночным небосводом. Одна из первых записей, сделанная примерно в 600 году до нашей эры, принадлежит древнегреческому философу Анаксимандру. Он заметил, что самые южные звезды, заметные в Египте, в Греции не видны. Зато греки могли наблюдать за тем, как Большая Медведица совершает оборот вокруг Северного полюса мира, не заходя за горизонт, — а те, кто следил за ее околополярным вращением в Египте, видели, как она скрывается за песками пустыни. Этих наблюдений Анаксимандру хватило, чтобы сделать вывод о кривизне земной поверхности. Впрочем, в конце концов он решил, что мир подобен цилиндру и что его

поверхность изгибается с севера на юг, но остается плоской с востока на запад.

Примерно век спустя Парменид, последователь Пифагора, привел первый убедительный теоретический аргумент в пользу того, что Земля имеет форму сферы. Он предположил, что тело любой другой формы будет падать само на себя до тех пор, пока не достигнет равновесия, и что только сфера могла поддерживать его без каких-либо дальнейших корректировок. Так Парменид не только предсказал появление современных представлений о самогравитирующих телах, пребывающих в гидростатическом равновесии, — иными словами, таких, которые не расширяются и не сжимаются (см. гл. 5), — но и дал античным ученым возможность объяснить, куда направляются Солнце, Луна и планеты после того, как заходят на западе. Если принять сферическую форму Земли как данность, то эти небесные тела могли бы продолжать свой путь по круговым орбитам вокруг главного тела, расположенного в центре, и день за днем возвращаться на видимый небосклон.

Еще столетие спустя, примерно в 400 году до нашей эры, Платон говорил о том, что из всех возможных тел именно сфера обладает совершенной симметрией, а значит, Земля, как центр Вселенной, должна оказаться сферой. В основе его философских аргументов лежала чистая эстетика, но идея имела большой авторитет благодаря тому, что философ очень активно ее отстаивал.

Более эмпирическое определение дал Аристотель в 350 году до нашей эры после наблюдения за частными фазами лунных затмений. Во второй главе мы уже упоминали о том, что они происходят, когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной линии, так что Солнце, озаряя Землю, создает тень, которая падает на Луну. Форма земной тени, закрывающей Луну во время частного затмения, кажется дугообразной и как будто является частью круга. Аристотель отметил это и верно понял, что он видел только часть полной дугообразной тени Земли.

Главный аргумент в пользу сферической формы нашей планеты примерно в 230 году до нашей эры сформулировал Эратосфен. При помощи геометрических расчетов он вычислил размер

Земли, отследив измерения угловой высоты полуденного Солнца в Александрии и в лежавшей к югу Сиене (современный Асуан). Эратосфен заметил, что в день летнего солнцестояния, находясь в Сиене прямо над головой, полуденное Солнце не отбрасывало тени, а над Александрией его лучи образовали с вертикалью угол в $7^{\circ}12'$, или $1/50$ полного круга (рис. 3.1). Эратосфен предположил, что Земля имеет форму сферы, и заключил, что ее окружность должна быть в 50 раз больше расстояния между Александрией и Сиеной. В пересчете эта величина составит от 39 000 до 42 000 км,

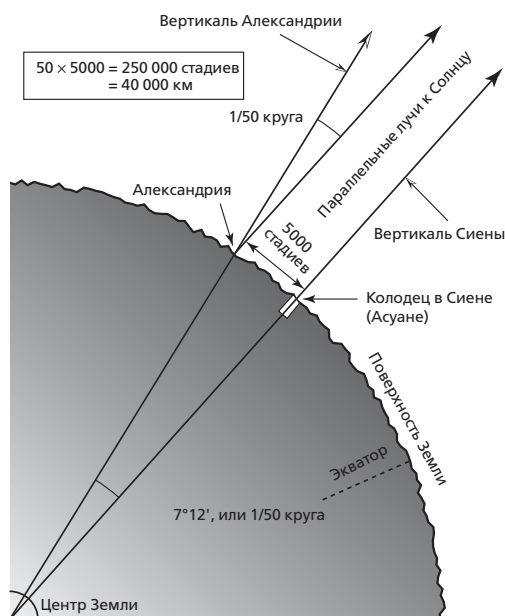


Рис. 3.1. В основе метода, при помощи которого Эратосфен определил длину окружности Земли, лежали наблюдения за полуденной высотой Солнца в день летнего солнцестояния. Если знать, как меняется высота Солнца при наблюдении из Александрии и Сиены, а также расстояние между этими городами, то можно экстраполировать эти данные на длину окружности Земли. На рисунке разница в высоте Солнца и соответствующее расстояние между пунктами наблюдения увеличены, чтобы нагляднее представить характерную геометрическую форму. (На основе материалов Национального управления океанических и атмосферных исследований США.)

в зависимости от того, в каких именно стадиях — древних единицах измерения — выражал свои результаты Эратосфен. Сейчас считается, что длина окружности Земли составляет 40 075 км, так что греческий мудрец был поразительно близок к истине.

Полторы тысячи лет спустя, в дни Христофора Колумба, сохранилась и идея сферической Земли, и даже рассчитанная Эратосфеном длина ее окружности. Однако это не помешало Колумбу использовать в своих вычислениях другую длину, которая была на 40 % меньше. На основе этих подсчетов он уверял Фердинанда и Изабеллу, правителей Испании, в том, что корабли, плывущие на запад, могут найти более короткий океанский маршрут в Индию. Опытные советники короля отклонили его предложение, поскольку считали, что Эратосфен был прав, а Колумб — нет. Но их решение отменила королева Изабелла, а что случилось дальше, вы знаете.

Правоту Эратосфена окончательно подтвердили в XVIII веке, когда группы отважных геодезистов прошли Скандинавию, Англию, Францию и Перу, измеряя длину дуги в 1° в высоких и низких широтах. В среднем она составила около 111 км, но случались и отклонения, указавшие на то, что Земля не была совершенно округлой. И действительно, от центра нашей планеты до экватора примерно на 21 км больше, чем до полюсов; впрочем, экваториальное утолщение составляет не более $1/300$ части земного диаметра. Поверьте, трудно найти шарик для пинг-понга, столь идеально напоминающий сферу.

Солнечная система

Мы долго изучали Солнечную систему. Сначала мы наблюдали за ночным небом и необычными движениями планет, потом, с появлением телескопов, мы поняли, что планеты — это неповторимые миры со своими уникальными чертами, а теперь мы удаленно управляем роботизированными космическими аппаратами, отправленными к этим (и многим другим) мирам, которые движутся по орбитам вокруг Солнца. Наш интеллектуальный и практический прогресс стал возможен, когда мы осознали, что

над всеми небесными телами в Солнечной системе господствует Солнце — в силу его огромной массы и соответствующей способности к притяжению. А первым, кто отвел Солнцу главную роль, был Аристарх Самосский, древнегреческий математик и астроном, живший между 310 и 250 годами до нашей эры.

Аристарх придумал хитроумный метод, позволивший ему триангулировать расстояние от нашей планеты до Солнца на основе расстояния от Земли до Луны, — а последнюю величину удалось вычислить после того, как Эратосфен подсчитал размеры Земли. Как отмечал Аристотель, земная тень, закрывшая Луну во время лунного затмения, имела радиус кривизны, примерно вчетверо превышавший лунный, — а значит, Земля должна была оказаться во столько же раз больше своего спутника (на самом деле она в 3,7 раза больше). Аристарх взял общепринятое значение размера Земли, разделил его на четыре, получил размер Луны, сравнил его с угловым диаметром Луны (около $0,5^\circ$) — и геометрически рассчитал расстояние до нее, удивительно близкое к принятому на сегодняшний день значению в 384 000 км.

А теперь перейдем к самой интересной части. Аристарх заметил, что время от новолуния до перехода Луны в первую четверть составляет чуть меньше четверти синодического периода обращения Луны, равного 29,5 суток и установленного путем наблюдений. Это расхождение можно было устранить, представив, что Солнце находится на конечном — и измеримом — расстоянии от системы Земля — Луна (рис. 3.2). Поскольку Солнце уже не пребывало в бесконечности, его лучи утрачивали свою идеальную параллельность, и можно было считать, что эффект перехода в первую четверть создают именно они — причем в тот момент, когда Луна, идущая по орбите, только минует фазу новолуния. Угол между направлениями, соединившими Луну с Землей и Землю с Солнцем, можно было найти, разделив время, за которое Луна переходила в первую четверть, на общий период ее обращения и умножив результат на 360° . Так Аристарх получил угол в 87° — эта величина примерно на 3° меньше реальной, составляющей $89,83^\circ$. Этот угол, тригонометрически соотнесенный с расстоянием от Земли до Луны, позволял

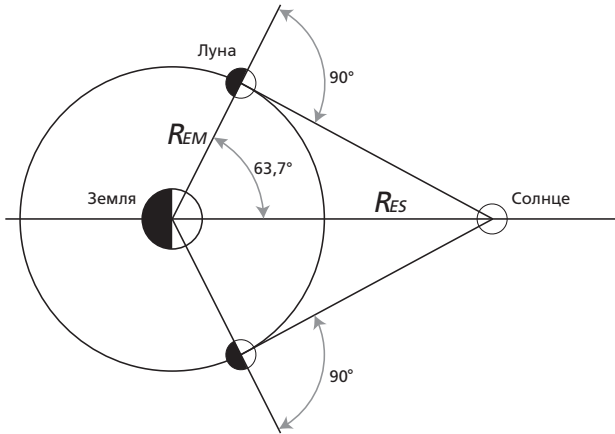


Рис. 3.2. В основе геометрического соотношения, при помощи которого Аристарх определил расстояние от нашей планеты до Солнца, лежат расстояние между Землей и Луной и положение Луны в фазах первой и последней четверти. Здесь R_{EM} — линия, призванная обозначить расстояние от Земли до Луны, а R_{ES} — расстояние от Земли до Солнца. Линии не соответствуют реальному масштабу, — самое главное, что расстояние до Солнца намеренно, но неточно уменьшено, чтобы нагляднее представить углы, имеющие прямое отношение к расчетам. На самом деле Солнце в 400 раз дальше от Земли, чем Луна, и рассматриваемый угол равен $89,83^\circ$. Угол, показанный на рисунке, гораздо меньше. (По источнику: L. E. Murray.)

рассчитать расстояние от нашей планеты до Солнца. До появления тригонометрии оставалось еще более 100 лет, но геометрические методы его эпохи помогли Аристарху высчитать расстояние, которое в 20 раз превышало расстояние между Луной и Землей и составляло примерно 8 млн км. Это почти в 20 раз меньше реального расстояния в 150 млн км, которое в 400 раз больше протяженности пространства, разделившего Землю и Луну, но Аристарху этого хватило, чтобы оценить, насколько далеко находится Солнце — и насколько огромным оно должно быть.

В распространении новостей о своих открытиях Аристарх сильно уступал Эратосфену. К эпохе Николая Коперника (1473—1543) представление о Солнечной системе, в центре которой находится Солнце, практически исчезло из научных кругов. Польскому эрудиту оставалось только одно: строить свою систему мира с нуля.

Он стремился усовершенствовать геоцентрическую систему, разработанную греками и в дальнейшем улучшенную астрономами Ближнего Востока — в первую очередь Птолемеем, изложившим в «Альмагесте» комплексную модель планетарных орбит, по которой астрономы повсеместно предсказывали положения планет на протяжении тринадцати столетий. В птолемеевой системе в центре мироздания находится Земля, и ее окружают Луна, планеты и Солнце. Наблюдаемые ретроградные движения планет, которые впоследствии вновь менялись на прямые, Птолемей объяснял, рисуя «круги на кругах»: планеты двигались по малым кругам — эпициклам, а центры эпициклов — по другим кругам, деферентам, опоясывающим Землю. Вся эта «круговерть» заставляла планету вращаться вокруг Земли, подобно детскому спирографу (рис. 3.3).

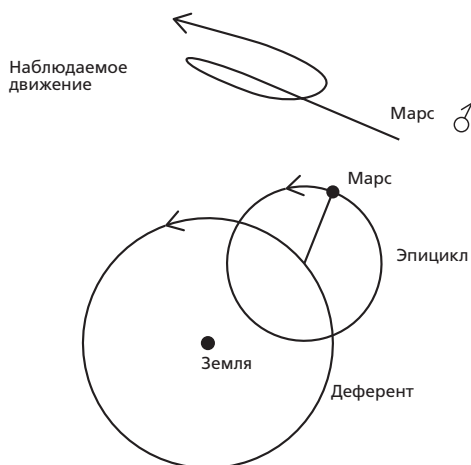


Рис. 3.3. В своем пути по небу Марс, Юпитер и Сатурн периодически меняют движение на ретроградное, отчего создается впечатление, что в течение земного года каждая планета в тот или иной момент разворачивается и на протяжении нескольких месяцев следует на запад, прежде чем вновь направиться на восток. Геоцентрическая система мира, предложенная Птолемеем в 150 г. н.э., объясняла наблюдаемое движение этих планет с помощью сложного комплекса различных круговых движений. В ее основе лежало представление о том, что планеты перемещаются по круговым эпициклам, а центры эпициклов движутся вокруг Земли по другим кругам — деферентам.

А если возникали расхождения, Птолемей менял величину эпициклов, скорость движения планет, начало деферентов — и подстраивал их под результаты наблюдений, полученные в его эпоху.

По мере того как наблюдения, совершаемые невооруженным глазом, становились все точнее, астрономы пытались предсказать, каким окажется положение планет по прошествии более долгих периодов, — и неизменно ошибались в прогнозах на несколько градусов в год. И наконец Николай Коперник создал новую систему мира, при помощи которой надеялся улучшить геоцентрическую систему Птолемея. Возможно, опираясь на труды персидского астронома Насира ад-Дина ат-Туси (1201–1274), он разработал модель движения планет, в центре которой располагалось Солнце. Гелиоцентрическая система Коперника была намного проще, чем запутанные эпициклы Птолемея и его последователей. В ней Луна обращалась вокруг Земли, сама Земля и все другие известные планеты — вокруг Солнца, а ежегодные ретроградные движения внешних планет легко объяснялись тем, что Земля их просто «обгоняла» (рис. 3.4).

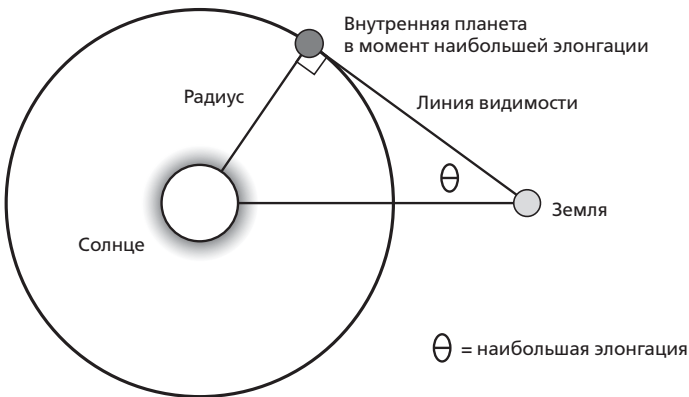


Рис. 3.4. Благодаря системе Коперника удалось вычислить относительные расстояния от планет до Солнца, после чего наибольшее удаление внутренней планеты от Солнца (элонгация) и благоприятные периоды видимости внешних планет позволили установить ключевые геометрические соотношения. (По источнику: David McClung, themcclungs.net/astronomy/concepts/plotinner.html.)

Впрочем, прилагать усилия для того, чтобы о его системе мира узнало как можно больше людей, Коперник не спешил. Во-первых, она устраняла Землю из центра известной Вселенной. Это неизбежно посеяло бы раздор в научном мире и — что еще тревожнее — вызвало бы недовольство религиозных авторитетов той эпохи. Во-вторых, оказалось, что она предсказывает положение планет не намного точнее, чем система Птолемея. Поэтому свой труд *De revolutionibus orbium coelestium* («О вращении небесных сфер») Коперник опубликовал лишь в 1543 году, незадолго до смерти. Он опасался возмездия, и этот страх был вполне обоснован. Спустя полвека, когда в тюрьму был брошен итальянский монах, философ и астроном Джордано Бруно (1548–1600), церковный суд признал его виновным во многих ересьях, в том числе и в поддержке системы Коперника — с небольшой вариацией, допускавшей наличие бесконечного числа солнц и солнечных систем (см. эпиграф). Несмотря на обращения к папе Клименту VIII, Бруно был сожжен на костре в Риме в 1600 году.

В эпоху Возрождения точность наблюдений, совершаемых невооруженным глазом, росла по мере того, как создавались все более крупные секстанты, квадранты и другие устройства для измерения углов на небесной сфере. Особенно точны были инструменты и наблюдения датчанина Тихо Браге (1546–1601), и в 1600 году именно это побудило Иоганна Кеплера (1571–1630) покинуть родную Германию и направиться в обсерваторию Браге, расположенную неподалеку от Праги в современной Чехии. Выдающийся математик, физик, астроном и астролог, при этом глубоко религиозный, Кеплер был особенно заинтересован в том, чтобы досконально изучить движение Марса и согласовать его со своей моделью Солнечной системы. Он полагал, что планеты движутся вокруг «хрустальных сфер», соприкасавшихся с идеальными платоновыми телами, число сторон которых зависело от определенных соотношений. В модели Кеплера, проникнутой мистицизмом, трение сфер о многогранники рождало музыку, ноты которой соответствовали священным пропорциям, о чем он позже писал в книге *Harmonices Mundi* («Гармония мира»). Благо-

даря знакомству с Браге Кеплеру были доступны самые точные на тот момент результаты наблюдений за движением Марса, совершенных невооруженным глазом. Через год после того, как Кеплер прибыл в обсерваторию, Тихо по неизвестным причинам умер, а Кеплер стал его преемником на посту придворного математика в Священной Римской империи, где правил Рудольф II. Позже, вопреки желанию родственников Браге, Кеплер присвоил результаты его наблюдений за планетами и звездами и в 1627 году опубликовал их вместе с собственными расчетами в «Рудольфовых таблицах».

Впрочем, в наше время наибольшим почетом пользуется другая, более ранняя публикация Кеплера — *Astronomia Nova* («Новая астрономия»), вышедшая в 1609 году. В ней он изложил два из трех законов движения планет, выведенных в ходе досконального анализа положений Марса на протяжении долгого времени:

1. Планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим траекториям, и в одном из двух фокусов данного эллипса находится Солнце (рис. 3.5).

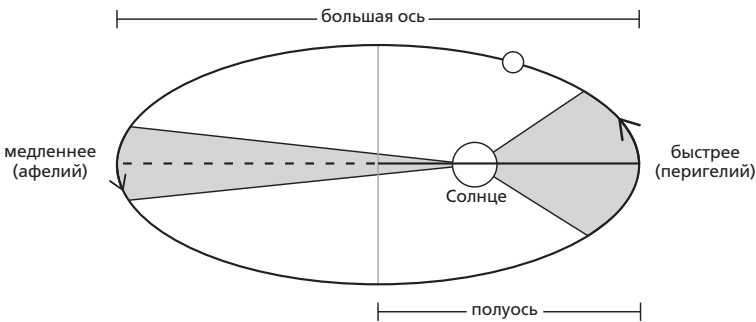


Рис. 3.5. В первых двух законах движения планет Кеплер предположил, что каждая планета движется по эллипсу, причем Солнце находится в одном из его фокусов. Планета меняет скорость, и радиус-вектор, связывающий ее с Солнцем, заметает равные площади за равное время (как показано на затемненных областях, имеющих одинаковую площадь). Обратите внимание, что на рисунке сильно преувеличено удлинение (или эксцентриситет) орбиты. Реальные орбиты планет в Солнечной системе почти круговые.

2. Планеты изменяют скорость на своих орбитах так, что радиус-вектор, соединяющий их с Солнцем, заметает равные площади за равные промежутки времени. Другими словами, скорость планет максимальна в точке, наиболее близкой к Солнцу (перигелий), и минимальна в самой дальней от него (афелий).

Предложив эти два закона, Кеплер отказался от идеи Коперника об идеальных круговых орбитах, по которым планеты вращаются с неизменной скоростью. Под угрозой было и его собственное представление о хрустальных сферах, соприкасавшихся с платоновыми многогранниками: наблюдаемое движение Марса, анализ которого провел он сам, требовало отвергнуть эту идею. Кеплер не стал держаться за вожденный мираж — и добился одного из величайших триумфов в науке.

Третий закон движения планет был открыт после того, как Кеплер проанализировал данные, полученные в ходе наблюдений за другими планетами. В данном случае он сохранил свои священные пропорции, определяющие орбитальные периоды планет. Вот что гласит закон, опубликованный в 1627 году в «Гармонии мира»:

Квадраты периодов обращения планет относятся друг к другу, как кубы их средних расстояний от Солнца. Это означает, что их орбитальные периоды (P) возрастают вместе с увеличением расстояния от планет до Солнца, так что квадрат периода обращения (в годах) равен кубу большой полуоси (a) эллиптической орбиты в астрономических единицах: $(P \text{ [годы]})^2 = (a \text{ [а. е.]})^3$, где астрономическая единица определяется как среднее расстояние между Солнцем и Землей. Орбитальный период можно найти по формуле: $P \text{ (годы)} = a \text{ (а. е.)}^{3/2}$.

Эта взаимосвязь показывает, что планеты движутся вокруг Солнца не синхронно, подобно соринкам на вращающемся компакт-диске, а по мере удаления от него все сильнее замедляются

(рис. 3.6). Вот почему Земля время от времени «обгоняет» внешние планеты (Марс, Юпитер, Сатурн и др.), вызывая наблюдаемые ретроградные движения этих небесных тел.

Одновременно с эпохальными открытиями Кеплера тайны движения планет пытался раскрыть и итальянский математик, физик и астроном Галилео Галилей (1564–1642). Узнав о том, что в Нидерландах создали новый оптический прибор, способный увеличивать вид далеких объектов, он изготовил собственные «подзорные трубы» и направил их в небеса. Четыре маленьких спутника (луны), открытые им у Юпитера, напомнили Галилею миниатюрную Солнечную систему, — и разве теперь нельзя было с большей уверенностью предположить, что и настоящая Солнечная система сосредоточена вокруг Солнца, своего крупнейшего представителя?

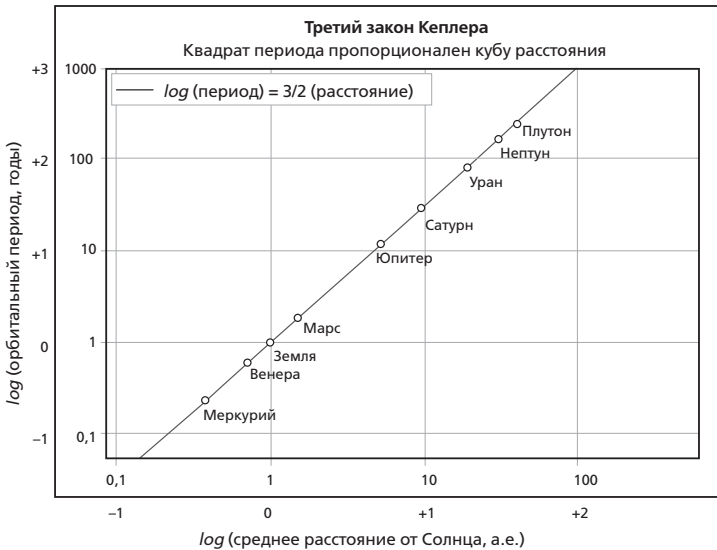


Рис. 3.6. Согласно третьему закону Кеплера, орбитальные периоды планет не равны, а возрастают в степени, равной $3/2$ среднего расстояния от планеты до Солнца (в астрономических единицах [а. е.]). При построении графика в логарифмическом масштабе (со степенями десяти через равные промежутки времени) это соотношение выглядит как прямая линия с наклоном $3/2$.

Затем Галилей стал наблюдать за тем, как двигалась по орбите Венера. У нее были заметны фазы, очень похожие на фазы Луны. В обеих системах мира — и в геоцентрической, и в гелиоцентрической — это можно было объяснить действием солнечных лучей, озаряющих планету. Однако Галилей заметил, что в фазе растущего полумесяца Венера казалась намного больше, чем от второй четверти до «полнолуния». Если бы орбита Венеры (подобно лунной) пролегла вокруг Земли, было бы очень трудно измыслить верный ряд эпициклов и деферентов, чтобы смоделировать такие поразительно изменчивые размеры. А гелиоцентрическая система Коперника и Кеплера, напротив, легко объясняла перемену фаз, поскольку в ней Венера следовала вокруг Солнца по орбите, находившейся внутри орбиты Земли. Незадолго до своего «полнолуния» Венера оказывается дальше всего от нашей планеты, на противоположной стороне от Солнца, и поэтому кажется очень маленькой. Фаза растущего полумесяца наступает, когда Венера ближе всего к Земле, а Солнце с наивысшей яркостью подсвечивает ее сзади, поэтому в это время ее видимый размер оказывается наибольшим. Возможно, именно наблюдения Галилея за Венерой в большей степени, чем любое другое наблюдение или анализ, послужили решающим «неопровержимым доказательством» в пользу гелиоцентрической системы мира.

После того как Кеплер совершил свои три революционных открытия, а Галилей эмпирически обосновал гелиоцентрическую систему мира, появилась возможность гораздо точнее предсказать, в каком положении окажутся планеты по прошествии длительного времени. Оставалось только объяснить, почему они следуют именно этим законам. Теперь наш исторический экскурс переместится в Англию эпохи Просвещения, где были совершены великие открытия во многих дисциплинах. В 1684 году математик и астроном Эдмунд Галлей (1656–1742), посетив в Кембриджском университете своего соотечественника и коллегу Исаака Ньютона (1642–1727), задал ему вопрос: какой будет орбита, если сила, связывающая планету с Солн-

цем, уменьшится пропорционально квадрату расстояния между ними? Ньютон быстро ответил: получится эллипс — он уже давно провел подобные вычисления. Неясно, отыскал ли он впоследствии свои расчеты, но в конечном итоге он расширил эту работу и создал один из величайших научных трактатов всех времен — *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* («Математические начала натуральной философии»). В нем Ньютон ввел понятие силы гравитационного притяжения. Она действовала на расстоянии между любыми двумя телами, возрастала пропорционально увеличению масс, уменьшалась с возрастанием квадрата расстояния, разделившего объекты, и выражалась формулой:

$$F = (G \cdot M_1 \cdot M_2) / r^2,$$

где r — расстояние, M_1 и M_2 — взаимодействующие массы, G — коэффициент пропорциональности (теперь известный как гравитационная постоянная), а F — результирующая сила. Подобно интенсивности звука и света, сила гравитационного притяжения подчиняется закону обратных квадратов и уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Такое поведение можно понять как следствие трехмерности пространства. Еще загадочнее то, что эта сила каким-то образом способна оказывать удаленное действие без необходимости в соприкосновении масс. Вследствие ее проявления массы, приводимые в движение, ускоряются в соответствии с другим знаменитым законом Ньютона — классическим вторым законом движения: $F = M \cdot a$, или, если высчитывать ускорение, $a = F/M$; в данном случае ускорение a — это ускорение массы M , которое создается с помощью силы F . Связав закон всемирного тяготения со вторым законом движения, Ньютон смог показать, что каждая планета обращается вокруг Солнца по эллиптической траектории. Приближаясь к Солнцу и отдаляясь от него, она в зависимости от изменения силы гравитационного притяжения соответственно меняет свою скорость — ускоряется или замедляется. Эти перемены полностью согласуются с тем, что планета

сохраняет свой угловой момент (точно так же, как сохраняет его фигуристка, когда прижимает руки к телу и вращается быстрее). В итоге мы приходим ко второму закону Кеплера, который гласит, что радиус-вектор, соединяющий планеты с Солнцем, заметает равные площади за равные промежутки времени. Кроме того, Ньютон показал, что закон обратных квадратов позволяет рассчитать орбиты, которые различаются по средней скорости движения планет и соответствующему периоду их обращения в соответствии с третьим законом Кеплера. И, как будто этого не хватало, Ньютон продемонстрировал, что выведенные им соотношения успешно объясняют движение любого массивного объекта в присутствии гравитационных сил другого объекта — будь то параболическая траектория пушечного ядра, выпущенного с поверхности Земли, или сильно вытянутая эллиптическая орбита, по которой обращается вокруг Солнца комета Галлея (названная в честь упомянутого Эдмунда).

С помощью своей теории тяготения Ньютон раскрыл устройство Солнечной системы. Однако рассчитать абсолютные значения задействованных гравитационных сил, расстояний и масс все еще было очень трудно. Для определения G — гравитационной постоянной — требовалось успешно завершить эксперимент исключительной точности. В нем гантель из двух маленьких свинцовых шариков, разделенных жесткой переключиной, подвешивалась на тонкой проволоке рядом с другой гантелью, неподвижной и состоящей из двух гораздо более тяжелых шариков. Притяжение и вызванный им поворот легкой гантели к тяжелой оценивались по вращающему моменту на скрученной проволоке — и тем самым измерялась сила гравитационного притяжения между гантелями. Зная величину масс, расстояний и сил, можно было бы определить гравитационную постоянную с помощью закона всемирного тяготения. Окончательно этого удалось достичь в лаборатории Генри Кавендиша в 1798 году. Современное значение G составляет $6,67 \cdot 10^{-11}$ ньютона (или 1 ньютон, деленный на 15 миллиардов) для любых двух взаимодействующих килограммов, разделенных метром. Поскольку

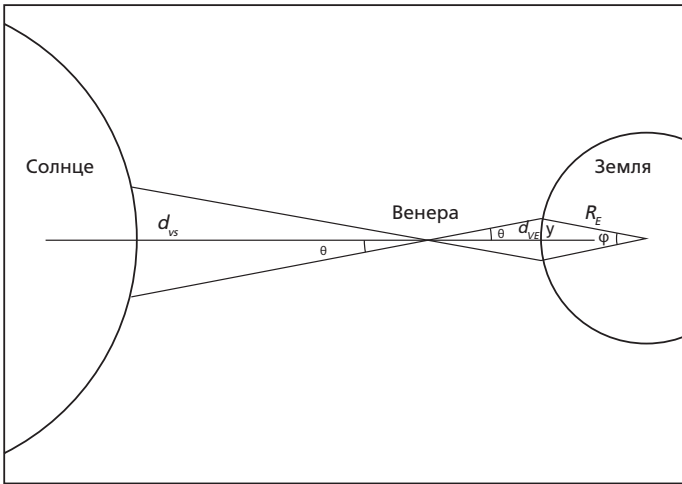
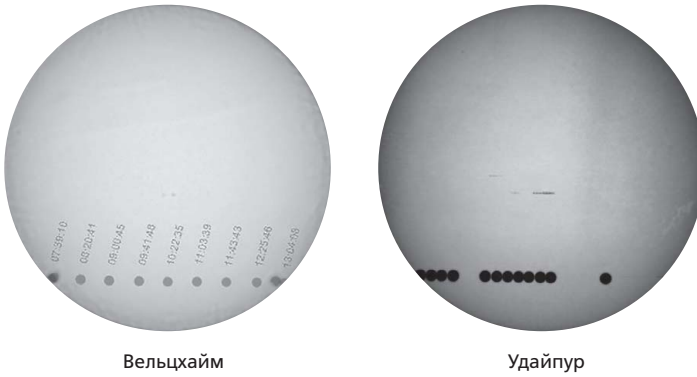


Рис. 3.7. Вверху: телескопические наблюдения за Венерой во время ее астрономического транзита по диску Солнца 8 июня 2004 года. Траектория планеты предстает по-разному в зависимости от земной широты, на которой находится наблюдатель. Данные, полученные из немецкого Вельцхайма (слева) и индийского Удайпура (справа), показывают незначительные различия в траекториях. (Материалы любезно предоставлены GONG/NSO/NSF) Внизу: геометрические соотношения между Солнцем, Венерой и Землей объясняют, что траектории, по которым Венера проходит мимо солнечного диска, меняются сообразно тому, насколько далеко от Солнца находятся планеты и насколько велика дистанция между наблюдателями на Земле. На основе этих соотношений можно рассчитать соответствующие расстояния между Землей, Венерой и Солнцем.

сила в 1 ньютон — это сила, с которой на Землю давит гамбургер, гравитационная постоянная (G) чрезвычайно мала, и ее эффектами можно пренебречь везде, но только не в астрономических масштабах.

После определения гравитационной постоянной G можно было связать закон всемирного тяготения, сформулированный Ньютоном, со вторым законом движения Ньютона — и дать космическим явлениям количественные оценки. Например, измерив ускорение свободного падения на поверхности Земли ($9,8 \text{ м/с}^2$) и радиус Земли (6378 км), удалось высчитать земную массу. Возможно, полученное значение в $5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ (5,97 триллиона триллионов кг) покажется колоссальным, но оно почти ничтожно мало по сравнению с массой Солнца. А чтобы установить ее, астрономам по-прежнему требовалось узнать расстояние до Солнца — ту самую астрономическую единицу (а.е.). Улучшать давно забытый «лунный» метод Аристарха они не стали, а вместо этого, сменяя друг друга, следили с разных широт за редкими прохождением Венеры по диску Солнца и использовали геометрические соотношения, связанные с соответствующими расстояниями между Солнцем, Венерой и Землей (рис. 3.7). Именно на основе этих прохождений, наблюдения за которыми велись в 1761, 1769, 1874 и 1882 годах, наши бесстрашные герои определили астрономическую единицу с точностью, которая находится в пределах 3% от сегодняшнего значения в 150 млн км.

ТЕКУЩАЯ КОНФИГУРАЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Сегодня, благодаря многовековым усилиям многих доблестных ученых, мы можем оценить общее строение и размеры Солнечной системы. Вот несколько главных величин, которые помогут вам запомнить ряд главных расстояний и размеров. Они относятся к текущей эпохе — и, возможно, миллиарды лет назад были другими.

- Солнце примерно в 100 раз больше Земли и, соответственно, в миллион раз объемнее, а также находится приблизительно в 100 солнечных диаметрах от нашей планеты — или, считая иначе, в 10000 диаметрах Земли. Применение законов Ньютона к системе Солнце — Земля позволяет вычислить массу Солнца, равную $2 \cdot 10^{30}$ кг — это поразительная величина в 330000 земных масс.
- Луна в 400 раз ближе к Земле, чем Солнце, и в 400 раз меньше Солнца. Две этих счастливых случайности приводят к тому, что Луна и Солнце имеют одинаковый угловой диаметр ($0,5^\circ$, или $30'$), и поэтому, когда наш спутник проходит по солнечному диску, мы видим такие идеальные солнечные затмения.
- Юпитер в 10 раз больше Земли, в 10 раз меньше Солнца и располагается в 5,2 а.е. от него. Сатурн почти вдвое дальше, в 9,5 а.е. от Солнца, Уран — еще примерно в два раза дальше, в 19,2 а.е. Нептун нарушает традицию и располагается чуть ближе к Солнцу, всего в 30 а.е., а Плутон — почти рядом, в 39 а.е. от нашей звезды. Приблизительное удвоение расстояний от планеты к планете составляет часть правила Тициуса — Боде, которое количественно определяет относительные расстояния между планетами (вместе с поясом астероидов) и Солнцем, причем протяженность большей полуоси их орбит, выраженная в а.е., рассчитывается по формуле

$$a = 0,4 + (0,3 \cdot 2^n),$$

где n — это номер планеты, возрастающий от внутренних планет к внешним, при этом n (Меркурий) = $-\infty$, n (Венера) = 0, n (Земля) = 1, n (Марс) = 2, n (астероиды) = 3, n (Юпитер) = 4, n (Сатурн) = 5, n (Уран) = 6, и вроде бы дальше должен идти Нептун, но в его случае закономерность не соблюдается, и приходится производить замену, так что n («Плутон») = 7 (в данном случае с правилом все в порядке). Это тайное правило остается необъясненным. Некоторые ученые расценивают его как числовое совпадение, а другие полагают, что оно согласуется с орбитальными резонансами, которые, по всей вероятности, свойственны такой эволюционирующей планетной системе, как наша.

Окрестности Солнца и Сириус

Мы уделили немало страниц «переломным моментам» в истории астрономии, благодаря которым нам удалось получить истинное представление о Солнечной системе. Чтобы выйти за ее пределы, пришлось думать над тем, как измерять расстояния до ближайших звезд. Более того, сама идея, согласно которой звезды считались далекими солнцами, а Солнце — нашей родной звездой, во многом зависела именно от определения этих расстояний. Эта задача возникла во времена Галилея, когда ученые пытались понять, что находится в центре известной Вселенной — Земля или Солнце. Если бы в центре всего сущего пребывала Земля, она оставалась бы неподвижной, а Солнце, Луна, планеты и звезды вращались бы вокруг нее — и мы, взглянув на звезды из этого фиксированного положения, не смогли бы увидеть никаких движений, совершаемых ими относительно друг друга. Но если бы Земля обращалась вокруг Солнца, то мы заметили бы, как ближайшие звезды раз в полгода меняют свое положение по отношению к более удаленным. Это смещение видимых положений звезд носит название геометрического параллакса (рис. 3.8).

Вы можете воспроизвести этот эффект, если поднесете большой палец к лицу и посмотрите на дальнюю стену одним глазом. Теперь закройте этот глаз и откройте другой, и вам покажется, что ваш палец сместился по отношению к объектам на стене. Сдвиг окажется тем больше, чем ближе к лицу вы поднесете палец, а чем дальше вы будете его отодвигать, тем заметнее будет уменьшаться угловое смещение. Так и движение Земли вокруг Солнца приводит к тому, что ближайшие звезды кажутся нам смещенными относительно более удаленных — и степень смещения уменьшается по мере того, как увеличивается расстояние до ближайшей звезды.

И Тихо Браге, и Галилей, и другие ученые эпохи Возрождения знали об эффекте параллакса и искали его, отслеживая положение ярких звезд, считавшихся ближайшими, относительно более тусклых — и, предположительно, более удаленных. Однако их попытки ни к чему не привели, как и усилия Роберта Гука,

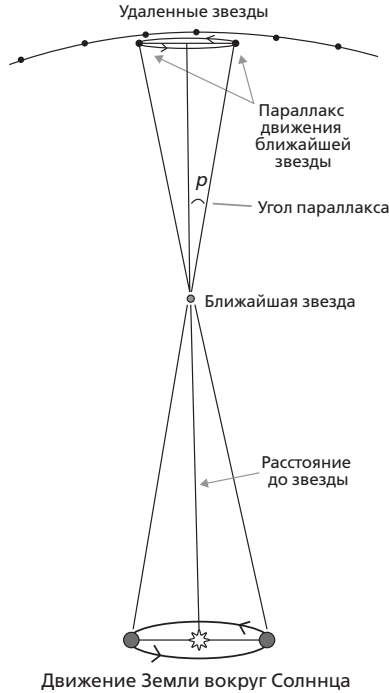


Рис. 3.8. Наблюдения за ближайшей звездой с противоположных точек земной орбиты показывают, что видимое положение этой звезды смещается относительно более удаленных звезд. При помощи этого эффекта параллакса можно определять геометрические расстояния до ближайших звезд.

Джеймса Брэдли, Уильяма Гершеля и многих других последующих наблюдателей. Наконец, в 1838 году, успеха достиг немецкий астроном Фридрих Бессель, который использовал самый лучший телескоп-рефрактор, доступный в то время. На протяжении года он наблюдал за звездой 61 Лебедя и заметил мельчайшие угловые смещения, составившие всего $0,3''$ ($1/12000^\circ$). В сочетании с базисной линией Земля — Солнце столь малый параллактический угол позволил установить, что геометрическое расстояние до 61 Лебедя составляет 3,3 парсека (10,9 светового года) и в 690 000 раз превышает расстояние от Земли до Солнца (в данном случае парсек определяется как расстояние, приводящее к параллактическому смещению в одну угловую секунду). Так он сразу и окончательно

подтвердил, что Земля обращается вокруг Солнца и что даже ближайшие звезды находятся невероятно далеко. И хотя они кажутся намного тусклее, на самом деле они представляют собой далекие солнца и испускают излучение с сопоставимой светимостью.

С тех пор метод геометрического параллакса позволил вычислить расстояния до многих тысяч звезд. Благодаря ему мы создали полную трехмерную карту всех звезд в радиусе 100 световых лет от Земли и Солнечной системы (рис. 3.9). Свет распространяется со скоростью 300 000 км/с, и, таким образом, за один год он преодолевает 10 трлн км. Окрестности Солнца простираются примерно в 200 раз дальше — это поистине большие владения. Подробности мы обсудим в последующих главах, но пока отметим, что большая часть этих просторов состоит из очень-очень пустого пространства. Как правило, расстояния между звездами в 50–100 миллионов раз больше самих звезд. Можно представить автострады в Западном Техасе или австралийскую глушь, но даже эти бес-

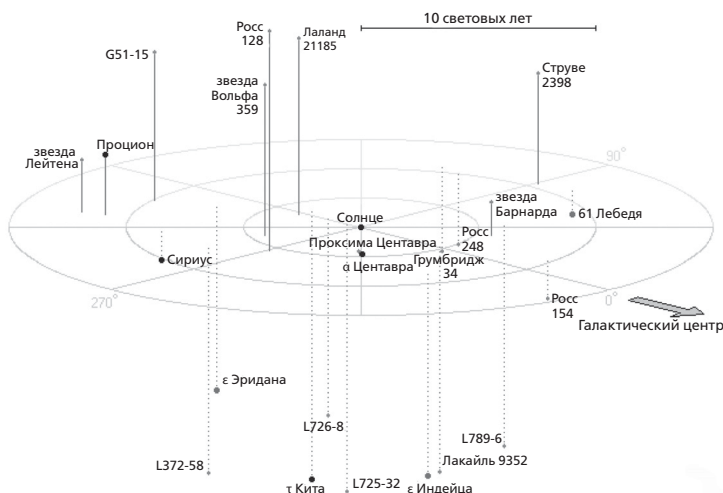


Рис. 3.9. Схема внутренней области окрестностей Солнца; в центре — наша звезда. Первую звезду, расстояние до которой удалось успешно измерить, 61 Лебедя, можно увидеть примерно в десяти световых годах справа от Солнца. (Материалы любезно предоставлены R. Powell, *An Atlas of the Universe*.)

крайние земли бледнеют в сравнении с межзвездной пустотой, присущей окрестностям Солнца.

Кроме того, космическое пространство в окрестностях Солнца, по большей части, едва освещено, поскольку местные звезды — это, в основном, тусклые «лампочки», и в плане «выходной мощности» они намного слабее нашего Солнца. Заметное исключение — Сириус, ярчайшая звезда ночного неба. Он находится в 8,7 световых годах от нас, в созвездии Большого Пса, и его светимость превышает солнечную в 22 раза. Если бы странники с далеких звезд спросили бы у вас, как найти дорогу к вашему дому в Солнечной системе, разумно было бы посоветовать им сперва достичь Сириуса, а затем поискать в окрестностях гораздо более тусклую желтую звезду. Они увидели бы две такие звезды — α Центавра А и Солнце. Затем их требовалось бы направить к желтой звезде, которую не сопровождает никакая другая, поскольку α Центавра А — это часть тройной звездной системы, в которую входят чуть более тусклая оранжевая звезда, α Центавра В, и более удаленная и намного более тусклая красная звезда — Проксима Центавра.

Пояс Гулда

За пределами окрестностей Солнца нас окружит блистающий звездный венец. Здесь можно встретить некоторые из самых ярких звезд небесной сферы. Британский астроном Джон Гершель (1792—1871) впервые обратил на это внимание, когда был в Южной Африке, отметив в 1847 году «зону крупных звезд, в которой выделяются блистающее созвездие Ориона, яркие звезды Большого Пса и почти все наиболее заметные звезды таких созвездий, как Арго [современные Корма, Паруса и Киль], Южный Крест, Центавр, Волк и Скорпион». Бенджамин Гулд (1824—1896) первым проследил это явление во всей полноте и в Северном, и в Южном полушарии и в 1874 году написал: «...создается впечатление, словно огромный круг или зона ярких звезд опоясывает небо, пересекаясь с Млечным Путем в Южном Кресте, и проявляется в любое время года».

Пояс Гулда, наклоненный к Млечному Пути примерно на 20° , пересекает газовый диск нашей Галактики в Южном полушарии вблизи Южного Креста, а в Северном — неподалеку от Лебедя. К нему можно отнести почти половину всех ярких звезд небесной сферы. В их числе — красный сверхгигант Антарес и несколько других юных и «дерзких» звезд, составляющих змеевидное созвездие Скорпиона; «Гранатовая звезда Гершеля» (μ Цефея) — одна из крупнейших и ярчайших звезд в нашей Галактике; желтовато-белый сверхгигант Мирфак (α Персея), указывающий путь к нескольким ближайшим ассоциациям новорожденных горячих звезд в созвездии Персея; а также голубой сверхгигант Ригель и другие блистающие голубые звезды, которые украшают прекрасно знакомое нам созвездие Ориона.

Большинство звезд, составляющих пояс Гулда, находятся слишком далеко, чтобы расстояния до них можно было определить с помощью метода геометрического параллакса; даже сегодня параллактические углы слишком малы, какие бы техники измерения мы ни использовали. Но астрономы пошли другим путем: они тщательно изучили звезды в окрестностях Солнца, где метод параллакса работает, и воспользовались обретенными знаниями при наблюдениях за более удаленными звездами. (О том, как определяются цвета, температуры, размеры, светимость и массы звезд, мы узнаем в шестой главе.) Сравнив предполагаемую светимость этих звезд с их видимым блеском, астрономы высчитали расстояния до них с точностью до нескольких десятков процентов. Оказывается, пояс Гулда представляет собой не идеальный круг, а скорее эллипс протяженностью примерно $2400 \cdot 1500$ световых лет. Центр этого эллипса находится на расстоянии в 500 световых лет от Солнечной системы, направлен к созвездию Тельца и примерно совпадает с областью звездного скопления Плеяды. Таким образом, Солнце находится на полпути от центра эллипса к яркой звездной окраине пояса Гулда. Среди звездных светил в этом небесном венце блуждают пылевые облака, состоящие из атомарного и молекулярного газов. Эти гиганты станут родиной нового поколения звезд — и предвещают ближайшее будущее окрестностей нашей Галактики.

Есть и еще одна причина, по которой пояс Гулда достоин войти в наш космический адрес. Это первая структура с поистине галактическими размерами. Диаметр диска Млечного Пути составляет примерно 100 000 световых лет. Пояс Гулда занимает 2% от этой протяженности — а это немалая величина. Представьте, что эта страница — диск Млечного Пути. Пояс Гулда был бы размером с этот 0 (ноль), окрестности Солнца — примерно с точку, а Солнечная система стала бы субмикроскопической пылинкой, не больше обычных атомов. И если бы кто-то наблюдал за нашей Галактикой извне, им пришлось бы хорошенько присмотреться в свои лучшие космические телескопы. Впрочем, опознать пояс Гулда они бы смогли.

Более поздний расчет расстояний до звезд в поясе Гулда, выполненный космическим телескопом *Gaia*¹, помог ограничить расстояния до ассоциируемых с этой областью облаков, в которых рождаются новые звезды. Здесь пояс Гулда сливается с гораздо более крупной змеевидной галактической нитью, которая, в свою очередь, включает в себе Рукав Ориона — спиральную ветвь Млечного Пути. Впрочем, это заявление спорно, и нам придется подождать его подтверждения.

Местный пузырь

Местный пузырь, ассоциируемый с яркими звездами пояса Гулда, представляет собой лишь один из тысяч пузырьков, которые, как полагают, распространяются по всему диску Млечного Пути. Как и его собратья, Местный пузырь содержит горячий газ, возникший после взрыва массивных звезд. Область, занимаемая им в диске нашей Галактики, меньше, чем у пояса Гулда, а значит, он мог появиться только после одного особенно активного объединения звезд, которое когда-то случилось в поясе. В наше время некоторые астрономы указывают на группу светящихся звезд,

¹ *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics* — Глобальный астрометрический интерферометр для астрофизиков. В русской транскрипции — Гайя или Гея. — *Прим. пер.*

расположенных в направлении созвездий Скорпиона и Центавра, как на место недавнего взрыва одной или нескольких сверхновых, которые могли раздуть Местный пузырь. Астрономы, проводящие наблюдения в радио-, ультрафиолетовой и рентгеновской областях электромагнитного спектра, выяснили, что пузырь состоит из очень разреженного и горячего газа. По-видимому, этот газ температурой в миллион градусов выходит из диска Млечного Пути в так называемое галактическое гало (рис. 3.10). Так что он

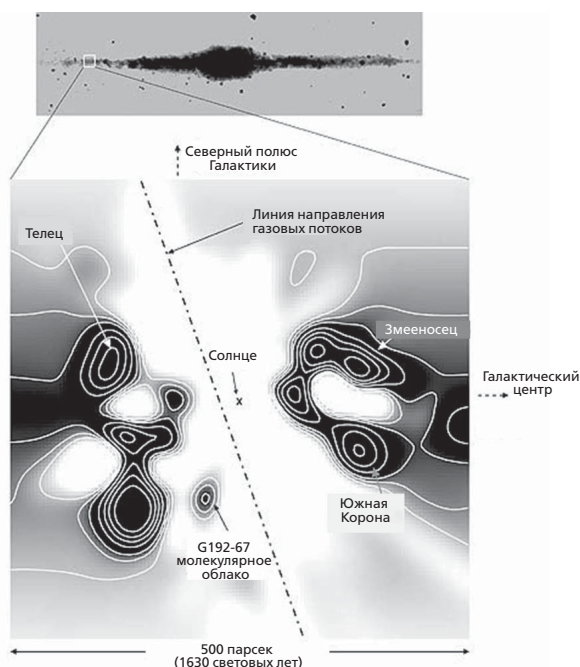


Рис. 3.10. Местный пузырь, впервые обнаруженный в 1970-х годах благодаря радиоволновому излучению, содержит горячий газ, который вытягивается от диска нашей Галактики внутрь галактического гало. Верхнее изображение — инфракрасный снимок диска Млечного Пути, а на нижнем крупном плане показан радиоизлучающий газ, расположенный вблизи Солнца. Обозначения относятся к созвездиям, по направлению к которым нанесены на карту молекулярные облака. Диагональ показывает направление газовых потоков. (На основе пресс-релиза: www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/05/29_space.shtml, авторы оригинального исследования: B. Y. Welsh et al.)

вполне мог бы предстать перед взглядом любого внегалактического наблюдателя, которому посчастливилось бы отчетливо рассмотреть сбоку наш галактический диск.

Рукав Ориона

Возраст нашей Солнечной системы составляет 4,6 млрд лет, в то время как блистающий пояс Гулда и Местный пузырь из раскаленного газа гораздо младше — им всего несколько десятков миллионов лет. Мы странствуем среди этих «младенцев», как дедушки и бабушки, зашедшие в ясли. По всему диску нашей Галактики копится туманное вещество, в котором рождаются новые звезды, а затем извергается газ. По большей части это изначальное вещество структурировано в виде обширных спиральных ветвей, или рукавов. Мы находимся между двумя из них, довольно крупными, в так называемом рукаве Ориона (рис. 3.11). Астрономы впервые сумели

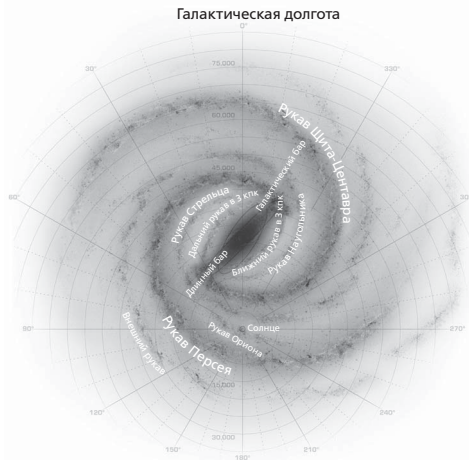


Рис. 3.11. Схема Млечного Пути, основанная на наблюдениях в оптическом, инфракрасном и радиоволновом диапазонах. На этой карте Солнце находится внутри рукава Ориона, между спиральными рукавами Персея и Центавра. На других изображениях получается спиральный узор из четырех рукавов. (Материалы любезно предоставлены R. Hurt, *Spitzer Science Center, Caltech/JPL, NASA.*)

его отследить в 1960-х годах по радиоизлучению, которое испускают его облака, состоящие из холодного атомарного водорода. В дальнейшем на его характерные черты указывали и другие индикаторы недавнего звездообразования, в том числе голубые звезды и розовые туманности, получающие энергию от самых горячих из этих звезд. Считается, что рукав Ориона простирается на 10000 световых лет в длину и на 3500 в толщину. Но стоит сразу предупредить, что определить расстояния до гигантских газопылевых облаков, заполнивших диск нашей Галактики, очень трудно, и к этому нужно подходить с осторожностью. Мы еще увидим, что светимость некоторых звезд приведена к стандарту, и у нас есть возможность, сравнив ее с их видимым блеском, определить их строение и расстояния до них. Однако с газовыми облаками все иначе.

Млечный Путь

Астрономам больше повезло с оценкой расстояния от нас до центра Млечного Пути. О том, что Солнечная система находится на «периферии» нашей Галактики, впервые заговорил в 1920-х годах гарвардский астроном Харлоу Шепли (1885–1972), когда определил расстояние до шаровых звездных скоплений в галактическом гало. Свои расчеты Шепли основывал на блеске переменных звезд, которые он мог опознать в скоплениях. Переменные типа RR Лиры имели постоянную среднюю светимость, которая могла послужить ему в качестве «стандартной свечи» для нахождения расстояний, в то время как у гораздо более ярких звезд-сверхгигантов, так называемых цефеид, просматривалась четкая связь между светимостью и периодами пульсации. Ее впервые обнаружила Генриетта Ливитт (1868–1921), астроном из Гарвардской обсерватории, и это позволило рассчитать расстояния лишь на основе наблюдений за изменением светового потока цефеид (к которым мы вскоре вернемся). Измеряя космические глубины, Шепли выяснил, что сами скопления «копятся» в направлении созвездия Стрельца. Он верно предположил, что ядро их распределения прослеживалось до истинного центра Млечного Пути, но

рассчитанное им расстояние более чем вдвое превышало то, которое мы допускаем сегодня.

После Второй мировой войны, с улучшением технологий, радиоастрономы смогли уточнить расчеты Шепли. Наблюдая за движением облаков из газообразного водорода в пределах прямой видимости, они обнаружили точку симметрии в созвездии Стрельца. С одной стороны от этой точки газовые облака приближались к нам, с другой — удалялись. Хотя оптика не позволит увидеть центр Галактики — его скрывают многочисленные газопылевые облака, — за ним легко наблюдать на радиоволнах. Пристальное изучение радиоизлучающего газа, обходящего по орбите точку симметрии, показало, что удаленность объекта от нас составляет около 28 000 световых лет. Расстояния до звезд, формирующих галактический балдж, дали аналогичные значения. В последнее время радиоастрономы склоняются к мысли, что расстояние от нас до центра Галактики (наш галактоцентрический радиус) меньше и ближе к 26 000 световых лет.

Узнав это главное расстояние с определенной степенью точности, астрономы смогли свести фрагментированный облик Млечного Пути в единую картину. Как и у других подобных галактик, у него есть балдж, диск и гало, а также бар — центральная перемычка — и множество спиральных рукавов, украшающих диск. Самые современные представления о его структуре показаны на рис. 3.11. К сожалению, мы до сих пор не можем понять, как располагается вещество в диске, — сделать это нам мешают пронизывающие его газопылевые облака. Может быть, предстоящие космические миссии сумеют разрешить этот познавательный тупик, так что следите за новостями.

На рис. 3.11 не показано расширенное гало темной материи, которое, как считается, полностью пронизывает и обволакивает Млечный Путь. Это скрытое гало призвано объяснить, почему газ во внешнем диске нашей Галактики движется с загадочно высокой орбитальной скоростью. Должно быть, что-то силой своего притяжения удерживает этот стремительный газ и не дает ему улетучиться. Природа этого «нечто» совершенно неизвестна. И еще

сильнее приводит в замешательство тот факт, что доля этого невидимого вещества, как полагают, составляет более 85 % от общей массы Млечного Пути!

Местная группа галактик

Наш Млечный Путь не одинок (рис. 3.12). Его спутники, имеющие неправильную форму, — Большое и Малое Магеллановы Облака — были заметны на южном небе еще задолго до кругосветного путешествия Фернана Магеллана (1519–1522). Но огромные расстояния до этих галактик удалось рассчитать только тогда, когда появились гигантские телескопы-рефлекторы и фотографические технологии, позволившие отображать отдельные звезды в Магеллановых Облаках. На снимках Малого Магелланова Облака, которые делались на длинной выдержке на протяжении многих дней, Генриетта Ливитт в 1908 году опознала несколько

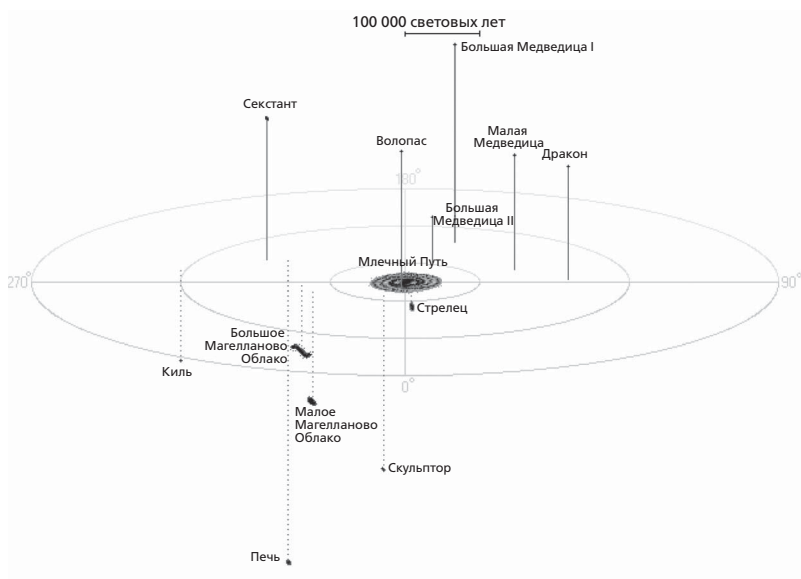


Рис. 3.12. Вокруг Млечного Пути располагаются Магеллановы Облака — Большое и Малое — и примерно десять карликовых галактик, которые гораздо меньше. (Материалы любезно предоставлены R. Powell, *An Atlas of the Universe*.)

цефеид — особенно ярких переменных звезд. Блеск этих сверхгигантов менялся с четкой периодичностью от нескольких дней до недель, благодаря чему удалось установить взаимосвязь между периодом пульсации каждой звезды и ее абсолютной светимостью. Сравнив их с цефеидами в Млечном Пути, Ливитт и шведский астроном Эйнар Герцшпрунг получили расстояние до Малого Магелланова Облака, которое действительно оказалось внегалактическим. Сегодня считается, что от нас до него 200 000 световых лет, а до Большого Магелланова Облака — 160 000 и эти галактики находятся на самом краю обширного гало темной материи, пронизывающей Млечный Путь.

Сверхчеткие снимки, полученные с помощью мощнейших телескопов, позволили обнаружить более десяти галактик, связанных с «большим» Млечным Путем. Большинство из них — маловажные «карлики» неправильной или эллипсоидной формы. Считается, что они остались от изначального периода, когда Млечный Путь сгустился из плотного роя подобных галактик. Еще примерно десять «карликов» снуют вокруг гигантской спиральной галактики Андромеды (М31) — следующей из тех, что ближе всего к нам. Сейчас от нас до нее 2,5 млн световых лет, но ожидается, что через 3–5 млрд лет она и Млечный Путь сольются. Помимо Млечного Пути и М31, досье Местной группы дополняют еще несколько обособившихся небесных объектов. К ним относятся спиральная галактика Треугольника (М33) в одноименном созвездии — небольшая, но поразительно активная «звездная колыбель»; и IC10 — ближайшая к нам галактика со вспышкой звездообразования, где безудержно рождаются и умирают звезды, отчего по всей ее ширине протянулся филигранный узор ионизированного газа.

Сверхскопление Девы

Телескопические исследования космической бездны выявляют одну галактику за другой, и часто они располагаются в пределах широких областей, похожих на Местную группу. Иногда галактик в таких областях довольно много, и их совокупность называют «скоплением». Ближе всего к нам скопление Девы — россыпь

галактик, охватившая все одноименное созвездие. Определить расстояния до них до недавнего времени было непросто. Крупнейшие наземные телескопы не могли различить цефеиды на фоне других звезд, поэтому приходилось задействовать вспомогательные индикаторы, указывающие на светимость и расстояние. В их числе были ярчайшие звездобразующие туманности и шаровые звездные скопления, заметные на фотографиях с длинной выдержкой. Начиная с 1990-х годов космический телескоп «Хаббл» делал снимки галактик и в скоплении Девы, и вне его. Превосходная резкость телескопа позволила найти в этих галактиках цефеиды, пронаблюдать периодические изменения их блеска — и астрономы смогли определить расстояния до них. Согласно недавним расчетам, центр скопления Девы находится от нас на расстоянии в 54 млн световых лет, но в самом скоплении есть и галактики, которые на целых 7 млн световых лет отклоняются от центра. Скопление Девы, содержащее более 1300 ярких галактик и неведомо сколько гораздо более тусклых «карликов», — это прекрасный пример того, что может произойти, когда галактики развиваются в непосредственной близости друг от друга. Во внешней области скопления есть несколько гигантских спиральных галактик, похожих на Млечный Путь. По мере приближения к ядру, границы которого определены очень смутно, галактики уже напоминают не спирали, окружающие диск, а скорее звездные рои, имеющие форму эллипса. Астрономы полагают, что звездные нагромождения, лишенные сколь-либо выразительных черт, возникли после столкновений галактик, которые изменили галактические орбиты звезд и — в некоторых случаях — повлекли за собой крупные слияния.

Скопление Девы — всего лишь одна из ста с лишним галактических групп и скоплений, формирующих сверхскопление Девы. Млечный Путь и его собратья по Местной группе — отдаленные представители этого сверхскопления. Его масштабы огромны, и большинство галактик в нем слишком далеки друг от друга, чтобы выделить в них отдельные звезды и измерить расстояния до них. Астрономы поступили иначе: они воспользовались непре-

станным расширением Вселенной, чтобы оценить, насколько сильно растянулись световые волны, излученные этими галактиками с самого начала их существования. Согласно закону расширения Вселенной, впервые сформулированному Джорджем Леметром в 1927 году, а в 1929 году подтвержденному наблюдениями калифорнийского астронома Эдвина Хаббла, степень растяжения длины световых волн, исходящих от излучающей галактики (часто называемая галактическим красным смещением), прямо пропорциональна расстоянию от нее до Земли. Применив это соотношение для галактик, расстояние до которых уже было известно (благодаря расчетам, проведенным на основе периодов пульсации их переменных-цефеид), астрономы постепенно уточнили закон Хаббла, чтобы измерять расстояния до галактик по всему сверхскоплению Девы и за его пределами.

Им удалось обнаружить слабо связанную совокупность галактических групп и скоплений с условным центром в скоплении Девы. Она простирается примерно на 110 млн световых лет. Тысячи ярких галактик сияют, как 3 трлн солнц, а что касается общей массы, то подавляющее обилие темной материи может увеличить ее до эквивалента примерно 1000 трлн солнц. Относительные скорости различных галактических компонентов составляют порядка 500 км/с. При таких темпах время, за которое галактика пройдет сверхскопление Девы, составит 66 млрд лет — а это в пять раз больше возраста нашей Вселенной. Так что этому сверхскоплению предстоит долгий путь, прежде чем оно отреагирует на собственную гравитацию. Другими словами, эта структура первозданна и все еще остывает после Большого взрыва.

Галактическая нить сверхскоплений Девы — Гидры — Центавра

Начиная с 1980-х годов астрономы-оптики на протяжении тысяч ночей смотрели в телескопы, чтобы определить спектроскопические красные смещения бесчисленного множества галактик по всему небу — и соответствующие расстояния до них. Сначала

необходимые спектрографические наблюдения проводились над одной галактикой за раз, но со временем появились новые технологии, позволявшие одновременно рассеять свет, исходящий от сотен галактик в скоплении, по отдельным спектрам и в полной мере запечатлеть его на электронных матричных детекторах. В итоге мы сумели распределить галактики на трехмерной карте и взглянуть на крупномасштабное строение Вселенной — и то, что мы увидели, поражает и манит, но в то же время приводит в замешательство.

Некоторые астрономы видят обширные галактические поверхности, похожие на пузыри. Другие говорят, что крупномасштабная структура галактик и связанной с ними темной материи подобна космической паутине, которая состоит из тонких «нитей», сходящихся к более плотным «узлам», где и располагаются сверхскопления. Наш Млечный Путь, по-видимому, является частью нити сверхскоплений Девы — Центавра — Гидры. Помимо галактик и неуловимой темной материи, нити содержат сгустки горячего газа, на что намекают результаты наблюдений неба в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. На данный момент мы не знаем, какой смысл в подобном устройении, но нас воодушевляет тот факт, что оно согласуется с расстоянием между пятнами, заметным на недавних картах космического микроволнового фона — послесвечения Большого взрыва. Такое впечатление, что распределение галактик в огромнейших масштабах указывает нам на то, как организовалась материя в мельчайших масштабах в первые наносекунды после возникновения нашей Вселенной.

Ланиакея и запределье

Самая большая структура, к которой мы принадлежим, известна как Ланиакея, в переводе с гавайского — «необъятные небеса». Она охватывает сверхскопления Девы — Гидры — Центавра, Печи — Эридана и Павлина — Индейца. Огромное пустое пространство отделяет Ланиакею от следующей крупной галактической системы, центром которой является сверхскопление Персея — Рыб. Вместе они простираются более чем на миллиард световых

лет. Помимо этих структур, наша выборка галактик слишком мала, чтобы делать какие-то выводы. Мы можем видеть несколько галактик, в которых наблюдаются яркие квазары и гамма-всплески, и немного первозданных «звездных колыбелей» с красным смещением, которое отдаляет их на расстояние до 10 млрд световых лет от нас, — но, конечно, этих «чудовищ» недостаточно для создания подробных трехмерных карт. Впрочем, новые возможности телескопических наблюдений и методов съемки могут восполнить этот пробел в нашей галактической переписи, что позволит нам проследить как структуру, так и эволюцию материи во всей наблюдаемой Вселенной.

Космические масштабы

Почти всю эту главу мы посвятили пространственной иерархии космических «вложений» и тому, как астрономы начали ее измерять. В каком-то смысле сведений слишком много, чтобы облупить все сразу. Тут нам и поможет математика. Удобный способ разобраться с невероятным диапазоном размеров и расстояний во Вселенной — начать с какого-нибудь легко измеряемого масштаба (скажем, метра), умножить его на десять — и повторить этот шаг еще много-много раз. Так мы пройдем всю Вселенную, как в фильме «Степени десяти», и придем к границе всего пространства (и времени) всего за двадцать пять шагов.

10^0 м = 1 метр (четырёхлетний ребенок, широкий шаг взрослого, небольшой удав, крупный метеорит);

10^1 м = 10 м (маленький кит, просторный школьный класс, космический телескоп «Хаббл»);

10^2 м = 100 м (секвойя, футбольное поле, фрагмент Тунгусского метеорита);

10^3 м = 1000 м = 1 км (косяк креветок, университетский городок, ширина Ниагарского водопада Сент-Хеленс [1 км^3]);

10^4 м = 10^1 км (высота вулкана Мауна-Кеа, толщина биосферы Земли, спутник Марса Деймос, ядро кометы, нейтронная звезда);

10^5 м = 10^2 км (штат Массачусетс [с севера на юг], большая часть известных астероидов, спутник Урана Миранда);

10^6 м = 10^3 км (Мексиканский залив, крупнейший астероид Церера, Луна);

10^7 м = 10^4 км (Земля, белый карлик Сириус В);

10^8 м = 10^5 км (расстояние от Земли до Луны [$4 \cdot 10^5$ км], Юпитер);

10^9 м = 10^6 км (Солнце, Сириус А и другие «обычные» звезды, сжигающие водород, кома кометы);

10^{10} м = 10^7 км (водородное гало кометы, голубая звезда-сверхгигант Ригель);

10^{11} м = 10^8 км (хвост кометы, красная звезда-сверхгигант Бетельгейзе, расстояние от Земли до Солнца [$1,5 \cdot 10^8$ км] = 1 а.е.);

10^{12} м = 10^9 км ~ 10 а.е. (расстояние от Солнца до Сатурна: 9,2 а.е.);

10^{13} м = 10^{10} км $\sim 10^2$ а.е. (диаметр орбиты Плутона ~ 80 а.е.)

10^{14} м = 10^{11} км $\sim 10^3$ а.е. (остаточный диск около звезды β Живописца);

10^{15} м = 10^{12} км $\sim 10^4$ а.е. (расстояние от Солнца до кометного облака Оорта: 5000–50 000 а.е.);

10^{16} м = 10^{13} км $\sim 10^5$ а.е. (расстояние, которое свет проходит за один год: 1 световой год [св. год] = $9,5 \cdot 10^{15}$ м = $9,5 \cdot 10^{12}$ км = $6,3 \cdot 10^4$ а.е., расстояние до Проксимы Центавра = 4,2 св. года = $2,6 \cdot 10^5$ а.е.);

10^{17} м ~ 10 св. лет (расстояние до ближайших тридцати звезд в окрестностях Солнца, размер ядра молекулярного облака, размер туманности Ориона);

10^{18} м $\sim 10^2$ св. лет (радиус окрестностей Солнца, расстояние до ближайшего молекулярного облака [$4 \cdot 10^2$ св. лет], размер гигантского молекулярного облака);

10^{19} м $\sim 10^3$ св. лет (расстояние до ближайшего гигантского молекулярного облака [$1,5 \cdot 10^3$ св. лет], толщина диска Млечного Пути);

10^{20} м $\sim 10^4$ св. лет (ширина спирального рукава Млечного Пути);

10^{21} м $\sim 10^5$ св. лет (размер Млечного Пути);

10^{22} м $\sim 10^6$ св. лет (расстояние до галактики Андромеды [$2,5 \cdot 10^6$ св. лет]);

10^{23} м $\sim 10^7$ св. лет (расстояние до большинства других галактик в локальной Вселенной);

10^{24} м $\sim 10^8$ св. лет (размер сверхскопления Девы);

10^{25} м $\sim 10^9$ св. лет (расстояние до квазаров и первозданных галактик);

10^{26} м $\sim 10^{10}$ св. лет (расстояние до видимого «края» Вселенной... до эпохи Большого взрыва).

Иногда передать космические масштабы помогала видеоанимация. Хорошими примерами станут новаторское путешествие по макроскопической и микроскопической Вселенной под названием «Степени десяти» — фильм, который сняли Чарльз и Рэй Имз; интерактивная веб-страница «Масштабы Вселенной»; эпизод из «Симпсонов» и фантастическая концовка первой части «Людей в черном».

А теперь, когда мы добрались до границ известной Вселенной, давайте глубже вникнем в ее миры, начав с нашей Солнечной системы, — единственной звездной и планетной системы, которую мы можем непосредственно исследовать.

ЧАСТЬ II

**СОСТАВЛЯЮЩИЕ
КОСМОСА**

4

Знакомство с Солнечной системой

Разумные существа других систем, изучая солнечную систему с полной беспристрастностью, сделали бы, по всей вероятности, такую запись о Солнце: «Звезда х, спектральный класс G2, четыре планеты плюс обломки»¹.

*Айзек Азимов. «Эссе 16. Клянусь Юпитером!»
из сборника эссе «Вид с высоты»*

Если бы эта книга была посвящена лишь Солнечной системе, а содержание ее распределялось бы по массе, то в ней говорилось бы только о Солнце — на него приходится 99,86 % от общей массы системы. Все остальные планеты, астероиды, плутоиды и кометы уместились бы на половине последней страницы. Но мы поступим по-другому: Солнце и его «компания» предстанут в книге просто как небольшая система среди множества звездных и планетных миров, составляющих наш Млечный Путь. Что же, давайте познакомимся с родной системой — ради нее самой и ради того, чтобы получить ориентиры для познания всего, что скрыто за ее пределами.

Общий план

Общий план нашей Солнечной системы можно представить по-разному. Например, в Вашингтоне, округ Колумбия, на Национальной аллее есть модель, сделанная в масштабе десять миллиардов к одному. Солнце в ней не больше грейпфрута, Земля, рас-

¹ Айзек Азимов. Вид с высоты / Пер. с англ. Д. Жукова. М.: Мир, 1965. С. 209.

положенная в 15 метрах от него — с маковое зернышко; Юпитер, находящийся в 78 метрах — с большую черничную ягоду; а Нептун, отдаленный на 430 метров — с горошинку перца. Такая «линейная» визуализация позволяет ясно увидеть, насколько обширно пространство, разделившее планеты, по сравнению с их размерами. Мысленно увидеть Солнечную систему можно и иначе — для этого лучше всего логарифмически «сжать» расстояния, что поможет воспринять весь их диапазон, охватывающий планеты и внешние кометы. Такая интерпретация показана на рис. 4.1.



Рис. 4.1. «Пространственное распределение планет, астероидов и комет по логарифмической шкале расстояний, разделенной на равные промежутки разными степенями числа 10. Логарифмическое масштабирование позволяет сжать огромный динамический диапазон расстояний в единую карту. Приблизительное удвоение расстояний между планетами в соответствии с правилом Тициуса — Боде проявляется здесь в виде равномерно распределенных пространственных интервалов. Пояс астероидов, состоящий из каменных объектов, наиболее заполнен в зоне между Марсом и Юпитером. Пояс Койпера — это множество ледяных небесных тел, расположенных за пределами орбиты Нептуна: к ним относится Плутон, родственные ему плутоиды и гораздо меньшие кометы. За пределами пояса Койпера Солнечная система простирается к ближайшей звездной системе (α Центавра) и преодолевает половину расстояния до нее. Эту самую отдаленную часть Солнечной системы занимает кометный рой — облако Оорта. Вас впечатляет, что Сатурн в 10 раз дальше от Солнца, чем Земля? Облако Оорта — в 5000–50 000 раз дальше! (Изображение любезно предоставлено *Wikimedia Commons*.)

ВЗГЛЯД НА СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ

Большинство небесных тел в Солнечной системе играют с нами в прятки, но очень многое можно увидеть, просто взглянув вверх. И кроме того, нет ничего лучше, чем видеть эти чудеса своими глазами.

Смотреть на Солнце, не соблюдая мер предосторожности, достаточно опасно. Один из самых безопасных способов — проекция. Простая камера-обскура получится из картонной коробки: нужно вырезать с одной ее стороны, прямо посередине, отверстие диаметром 5 см и накрыть его кусочком алюминиевой фольги, а в нем проколоть маленькую дырочку. Если направить это отверстие в сторону Солнца, на другую сторону коробки спроецируется изображение. Кроме того, за Солнцем можно наблюдать через майларовые фильтры с отражающими покрытиями — они продаются как в виде «солнцезащитных штор», так и в форме специально подобранных фильтров для телескопа. Наконец, есть автономные телескопы, которые отфильтровывают весь свет, кроме особого красного излучения, производимого хромосферой, — бурным внешним слоем Солнца.

Меркурий и Венера не просто так названы «утренними звездами» и «вечерними звездами». Их часто можно увидеть на востоке перед самым восходом Солнца и на западе сразу после заката. За Меркурием лучше всего наблюдать, когда он находится в своей наибольшей элонгации и удален от Солнца максимально далеко. Степень удаления не превышает 28° , поэтому Меркурий всегда находится на довольно ярком небе. Венера намного щедрее: ее максимальное удаление — 47° , поэтому ее можно увидеть и тогда, когда стемнеет. Если смотреть в небольшой телескоп, Меркурий почти не раскрывает своих тайн, а вот Венера гораздо более приветлива, так что можно различить ее фазу.

Марс, Юпитер и Сатурн обращаются вокруг Солнца значительно дальше земной орбиты, и поэтому степень их удаления от Солнца, если смотреть с Земли, не ограничена ничем. За этими планетами лучше всего наблюдать, когда они находятся напротив Солнца, — тогда в полночь по местному времени кажется, что они поднимаются на вершину небосвода. Такое противостояние случается у Марса примерно раз в 780 дней, у Юпитера — раз в 399 дней, а у Сатурна — раз в 378 дней. Угловые размеры этих планет максимальны именно во время противостояния, поскольку

ку и они, и Земля в этот момент находятся по одну сторону от Солнца и, следовательно, располагаются ближе всего друг к другу на своих орбитах. При наблюдении невооруженным глазом Марс имеет красноватый оттенок, Юпитер гораздо белее, а Сатурн приобретает желтовато-коричневый цвет.

Если посмотреть на Марс в бинокль, возможно, вы лучше увидите его ржавый цвет, но не более того. Верно сфокусированный телескоп — рефлектор или рефрактор, — как правило, позволит рассмотреть одну или обе полярные шапки и ряд затемненных объектов, таких как Большой Сирт. В хорошо настроенный бинокль виден значительный объем Юпитера и четыре галилеевы спутника. В любительские телескопы хорошо заметны прекрасные темные пояса и светлые зоны исполинской планеты, а также объекты поменьше, в том числе красочные завитки, яркие и темные участки и само Большое красное пятно.

Сатурн вдвое дальше Юпитера и в бинокль виден значительно хуже — разве что становится более заметным его желтовато-коричневый цвет и бросается в глаза Титан, его самый крупный спутник. Возможно, кто-то даже увидит в Сатурне асимметрию, подобно Галилею, который более 400 лет назад рассмотрел в свою подзорную трубу странные выпуклые «ушки». А чтобы они предстали в виде изящных колец, которыми по праву славится Сатурн, нужен приличный телескоп.

Уран и Нептун невооруженным глазом не увидеть. Достойный бинокль и подробная карта неба позволят найти Уран, но Нептун виден исключительно в телескоп, и в любом случае вы увидите только мерцающие точки, причем Уран будет казаться зеленоватым, а Нептун — более голубоватым. Учитывая, что эти крупные планеты были совершенно неизвестны во времена Американской революции, возможно, любая возможность их увидеть вас воодушевит.

Каждое десятилетие в Солнечную систему залетает несколько **комет**, которые приближаются к ее внутренним областям и устраивают великолепное шоу. Недавний «демонстрационный полет», видимый невооруженным глазом, исполнила в 2020 году комета *NEOWISE*. У самых впечатляющих кометных явлений есть характерные особенности — блистающее ядро, из которого исходят прямой плазменный хвост и изогнутый пылевой шлейф. Телескопы позволяют увеличить изображение ядра и комы, и можно будет увидеть изогнутые потоки — при условии, что вы достаточно далеко от источников светового загрязнения.

Планеты земной группы

Ближайшие к Солнцу планеты (Меркурий, Венера, система Земля — Луна и Марс) имеют среднюю плотность, которая согласуется с тем, что они почти полностью состоят из камня. Кроме того, они намного меньше газовых гигантов (Юпитера и Сатурна) и ледяных гигантов (Урана и Нептуна), пребывающих во внешней Солнечной системе. Возможно, их самая характерная черта — это их непосредственная близость к нашей звезде. Обильно согретые солнечным светом в самом начале своего формирования, планеты земной группы, по всей видимости, не могли накапливать и удерживать водород и гелий, на которые приходится основная масса Юпитера и Сатурна — эти газы слишком летучие, чтобы оставаться на месте под активным влиянием Солнца. В итоге возникли восхитительные уникальные миры — совершенно несхожие и непредставимо загадочные. На рис. 4.2 показано внутреннее строение планет земной группы. У Меркурия аномально большое металлическое ядро, размеры которого составляют 75 % его радиуса и 42 % его объема. А металлическое ядро Луны, напротив, очень маленькое. Считается, что Венера и Земля по внутреннему строению похожи друг на друга: на ядра приходится примерно 55 % их радиусов и 16 % их объемов. Марс по размерам находится между Меркурием и «сестрами-близнецами» — Венерой и Землей.

Магматическая активность на поверхности этих небесных тел возрастает с увеличением их размера. Например, Луна, Меркурий

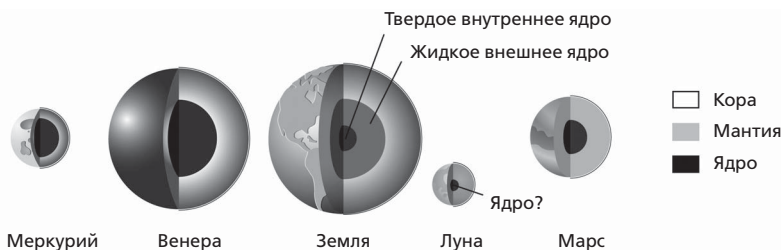


Рис. 4.2. Изображения планет земной группы и Луны в разрезе. У каждой планеты есть металлическое ядро (разного размера), мантия и кора. (Источник: NASA.)

и Марс некогда были активны, но уже примерно миллиард лет на них почти ничего не происходит. Земля и Венера, напротив, продолжают активно преобразовать свой внешний облик. Атмосфера, по всей видимости, тоже зависит от массы. На Луне и Меркурии имеются лишь малейшие следы атмосферных газов. Марс занимает промежуточное положение: в его атмосфере преобладает углекислый газ, но давление на поверхности составляет всего $1/157$ от земного. А вот Венера скрыта облаками углекислого газа, количество которого в 93 раза превышает уровень, свойственный Земле, поэтому парниковый эффект нагревает ее поверхность до 477°C — такая температура достаточно высока, чтобы расплавить свинец и испарить серу.

Газовые гиганты

Юпитер и Сатурн, подобно уличным хулиганам, наводят свои порядки по всей Солнечной системе. В частности, Юпитер когда-то помешал сформироваться настоящей планете — она могла появиться в зоне, занятой в наши дни астероидами. Его гравитационное воздействие вытеснило большую часть субпланетных обломков, некогда занимавших эту кольцевую зону, за пределы Солнечной системы или к Солнцу, и осталась лишь горстка астероидов, которую мы видим сегодня. Сурово Юпитер обошелся и с кометами — вытеснил их с «родных земель» вблизи орбиты Нептуна и перенаправил во внутреннюю Солнечную систему или к кометному облаку Оорта, расположенному в 5000—50 000 а.е. от Солнца. Конечно, эти гигантские миры по праву вызывают наш интерес, а их системы колец и группы спутников поистине поразительны.

Юпитер

Юпитер, названный в честь верховного бога древних римлян, содержит более трех четвертей всего планетарного вещества в Солнечной системе. Нам это известно, поскольку мы можем отслеживать орбитальные движения его спутников и знаем, как далеко от них до Юпитера, а закон всемирного тяготения Ньютона помогает нам определить гравитационную массу, ответственную за поддер-

жание этих движений. Расчетная масса, в 318 раз превышающая земную, и объем, в котором поместилось бы 1405 таких планет, как наша, дает среднюю плотность $1,34 \text{ г/см}^3$. Эта величина примерно равняется трети средней плотности каменной Земли и очень близка к плотности воды в земных океанах (1 г/см^3). Если честно, Юпитер лучше было бы назвать не «газовым гигантом»,

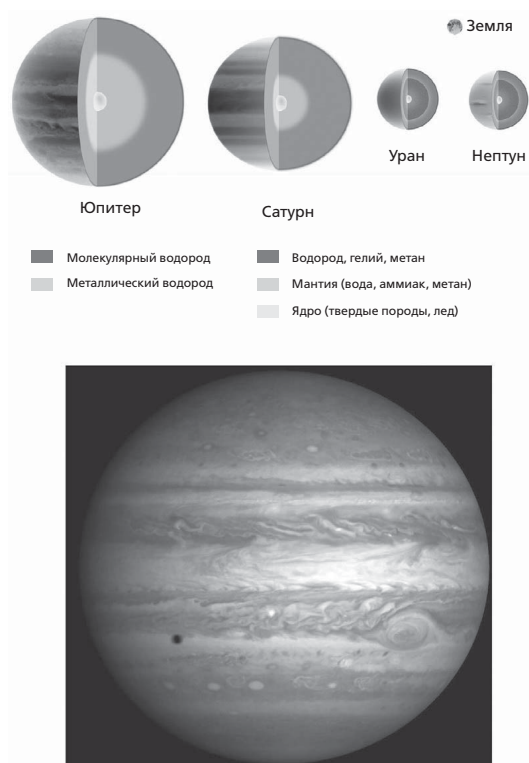


Рис. 4.3. *Вверху:* схематичное изображение газовых гигантов в разрезе. Различные слои основаны на физических моделях. В каждом случае природа ядра наименее определена. *Внизу:* снимок Юпитера, сделанный космическим аппаратом «Кассини». Видны темные пояса, более яркие зоны, белые овалы и Большое красное пятно. Черная точка — это тень Европы, спутника Юпитера, второго по отдаленности из четырех, открытых Галилеем. (*Вверху:* материалы любезно предоставлены NASA / Лунно-планетный институт; *внизу:* материалы любезно предоставлены NASA / JPL / Аризонский университет.)

а «жидким». Его внутреннее строение остается довольно неопределенным, но считается, что он содержит относительно плотное ядро неизвестного состава, окруженное последовательными слоями жидкого атомарного водорода — настолько плотного, что он проводит электричество подобно металлу, — а дальше идут слои жидкого молекулярного водорода, газообразного молекулярного водорода, аммиака и воды (рис. 4.3). Со всем этим богатством Юпитер совершает полный оборот вокруг своей оси за каждые 9,8 часа, отчего в атмосферных поясах, зонах и пятнах планеты рождаются сильные ветры. Вокруг этого гиганта, охваченного вихрями, обращаются по меньшей мере семьдесят девять спутников, включая четыре галилеевых — это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто, — каждый из которых сам по себе может рассматриваться как удивительный мир.

Сатурн

При взгляде в хороший телескоп вид прославленных колец Сатурна поражает воображение (рис. 4.4). Многим кажется, что перед ними предстает невозможное явление — как если бы кто-то подвесил перед телескопом модель. Сатурн во многом напоминает Юпитер: во-первых, по составу он подобен Солнцу, причем почти весь его объем приходится на водород (а вот гелия, как ни странно, очень мало). Во-вторых, он быстро вращается: одни сатурнианские сутки занимают всего 10,6 земного часа, и это стремительное вращение превратило планетную атмосферу в полосчатые циркуляционные системы, похожие на параллельные темные пояса и яркие зоны Юпитера. В-третьих, Сатурн, как и Юпитер, до сих пор излучает энергию, высвобожденную при гравитационном коллапсе его родительского облака. А кроме того, обе планеты излучают больше тепла, чем получают от Солнца.

Считается, что кольца Сатурна состоят из различных льдов, объединенных в неимоверно тонкие концентрические полосы. Возможно, сами кольца недолговечны и появляются и исчезают в масштабах примерно 100 млн лет. За их пределами вокруг

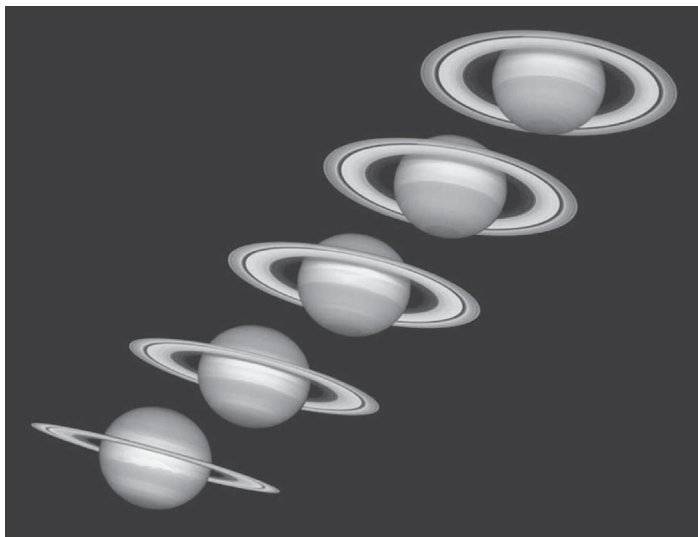


Рис. 4.4. Сатурн и его ледяные кольца — одно из самых потрясающих зрелищ в Солнечной системе. Поскольку ось его вращения на 27° наклонена к плоскости его орбиты, Сатурн, если смотреть с Земли, меняет свой внешний вид в течение одного сатурнианского года (29,5 земного года). Как показано на этом снимке, сделанном космическим телескопом «Хаббл», с 2000 по 2006 год система колец Сатурна из почти закрытой стала почти открытой, а в его южном полушарии настало лето. (Материалы любезно предоставлены NASA / Проект «Наследие Хаббла» / STScI.)

планеты вращается более шестидесяти спутников, в том числе Титан — единственный спутник в Солнечной системе, обладающий плотной атмосферой, — и Энцелад, с поверхности которого извергаются жидкие гейзеры.

Ледяные гиганты

Люди античного мира знали о Меркурии, Венере, Марсе, Юпитере и Сатурне, поскольку эти планеты можно увидеть и отследить невооруженным глазом. Но лишь после того, как был создан телескоп, удалось дополнить шесть главных планет (считая и Землю) более удаленными и гораздо более тусклыми мирами. Ими стали Уран и Нептун, самые удаленные крупные планеты в Солнечной

системе. Плутон гораздо меньше, и в 2006 году он был официально понижен до второстепенного статуса «карликовой планеты», в то время как поиски другой крупной «планеты X» пока ни к чему не привели.

Уран

Уран обращается вокруг Солнца на расстоянии 19,2 а.е. — в четыре раза дальше, чем Юпитер, и вдвое дальше, чем Сатурн. Поэтому он получает 1/16 излучения, получаемого Юпитером, и 1/4 того, которое доходит до Сатурна. При равновесной температуре -208°C аммиак и вода, присутствовавшие в атмосфере Урана, полностью замерзли и «выпали снегом». В атмосфере остался лишь избыток молекулярного водорода и газообразного метана. Метан преимущественно поглощает красный свет Солнца, отражая при этом зеленый и голубой свет, и из-за этой «пристрастной» отражательной способности видимая атмосфера Урана кажется зеленоватой.

Масса планеты (в 14 раз больше земной) и размер (в 4 раза больше земного) дают среднюю плотность $1,3 \text{ г/см}^3$. Исходя из этих объемных свойств, планетологи заключают, что Уран содержит ядро из металла и камня, толстый промежуточный слой ледяной взвеси, внешний слой жидкого молекулярного водорода и разреженную атмосферу (рис. 4.5), так что прозвище «ледяной гигант» ему вполне подходит. Однако эти выводы сделаны совсем недавно, а до 1995 года в книгах, посвященных планетам, утверждалось, что во внутренних слоях Урана и Нептуна преобладает жидкий водород.

Об Уране мы знали очень мало, пока в 1986 году мимо него не пролетел космический зонд «Вояджер-2». Во время краткого сближения зонда с планетой удалось подтвердить, что ось вращения Урана наклонена на 98° — так, что он почти лежит на боку. Такой экстремальный наклон приводит к самым аномальным временам года в Солнечной системе. Когда северный полюс планеты направлен к Солнцу, ее северное полушарие непрерывно освещено дневным светом, а южное пребывает в постоянной

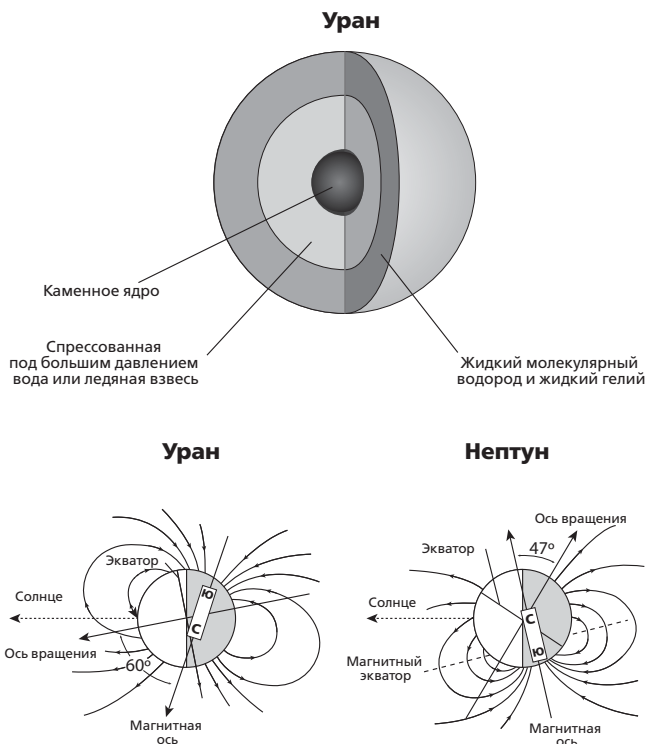


Рис. 4.5. Схема внутреннего строения Урана (в равной степени применимая к Нептуну) и необычные конфигурации осей вращения и магнитных полей у этих «ледяных гигантов». (Вверху: по источнику *Astronomy*, C. J. Peterson; внизу: по источнику NASA's *Cosmos*.)

темноте. Эти экстремальные периоды солнцестояния в каждом полушарии меняются местами по прошествии половины уранианского года (42 земных года). Как именно Уран перевернулся «с ног на голову», остается неясным, но многие астрономы подозревают, что его ориентацию могло изменить сильное столкновение с неким блуждающим телом размером с планету.

Магнитное поле Урана ведет себя еще более странно. Во-первых, его магнитная ось в направлении с севера на юг наклонена на 60° к оси вращения планеты. У Земли это смещение намного меньше — всего 11° . Напрашивается вывод, что внутренняя часть

Урана, формирующая магнитное поле, циркулирует в противоположном направлении по сравнению с его внешней поверхностью. Во-вторых, магнитная ось даже не проходит через центр планеты, а значительно смещена к одной стороне Урана. Как это может происходить, остается загадкой.

Вокруг Урана обращается свыше двадцати семи спутников, большинство из которых названы в честь вымышленных персонажей пьес Уильяма Шекспира.

Нептун

Я с теплотой вспоминаю 25 августа 1989 года, когда «Вояджер-2», проведя 12 с лишним лет в путешествиях по межпланетному пространству, наконец добрался до Нептуна. В те дни я преподавал астрономию в Вашингтонском университете в Сиэтле. Интернета тогда еще не было, а телеканалы посвящали эпохальному облету очень мало эфирного времени. К счастью, в рамках своих аудиовизуальных услуг университет предоставлял доступ к телевизионному монитору, который принимал передачи от Лаборатории реактивного движения *NASA*, как только Сеть дальней космической связи транслировала по радиоантеннам сигналы с «Вояджера-2».

В компании приятелей-астрономов я устроился на ковре в маленькой комнате без окон — и там своими глазами увидел первые снимки Нептуна, переданные с *Нептуна*. Пока они медленно, строка за строкой, выстраивались на телевизионном мониторе, черно-белые изображения показывали серую планету с отчетливым темным пятном и яркими полосами (рис. 4.6). Становилось очевидно, что Нептун напоминал Юпитер с его Большим красным пятном, только полос на нем было поменьше. Я не спал до рассвета, пока шесть часов спустя на мониторе не начали прокручиваться изображения Тритона, крупнейшего спутника Нептуна. Ого! Я даже и не мыслил увидеть нечто подобное. Сморщенную, словно дыня, поверхность Тритона испещряли мириады темных прожилок, протянувшихся там, где когда-то давно извергались ледяные гейзеры. Это было невероятно.

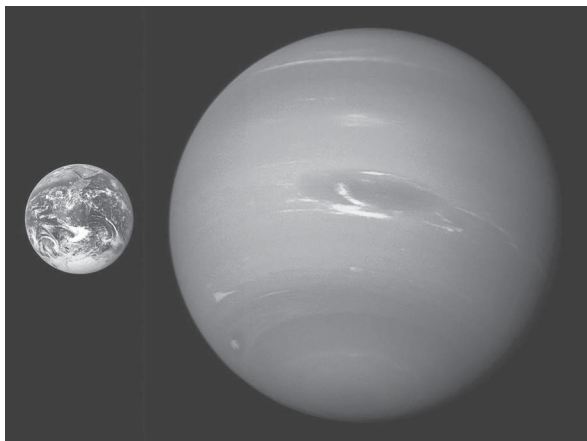


Рис. 4.6. Снимок Нептуна с «Вояджера-2». Видны атмосферные полосы и Большое темное пятно. Рядом, для сравнения, помещена Земля. (Материалы любезно предоставлены NASA / Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института [NASA/JPL-Caltech].)

Многоволновые изображения, спектроскопия и зондирование системы Нептуна *in situ* по-прежнему дают нам «львиную долю» всех наших сведений об этом далеком мире. Так мы узнали, что планета обладает сильным магнитным полем, а ее магнитная ось, как и у Урана, значительно наклонена и смещена от центра (рис. 4.5). Кроме того, Нептун напоминает Уран по размеру и массе, и поэтому, по всей видимости, сходен с ним как по внутреннему строению — камень, слякотная вода, жидкий водород, — так и по составу атмосферы, в которой присутствуют газообразный водород, гелий и метан. По виду Нептун определенно более голубоватый, чем Уран, — возможно, из-за того, что на нем выше концентрация атмосферного метана, или по причине иного, неизвестного атмосферного эффекта. Также Нептун излучает значительно больше тепла, чем получает от Солнца, и этот тепловой избыток объясняет наличие сильных ветров и циклонической активности, которое обнаружил «Вояджер-2». После того как мы получили с зонда первые снимки Нептуна, наблюдения за планетой велись с помощью космического телескопа «Хаббл», и мы

увидели, что темные пятна, яркие облака и различные полосы появляются и исчезают. И более того, к середине 1990-х годов, когда «Хаббл» начал получать снимки Нептуна, Большое темное пятно, запечатленное «Вояджером-2», уже исчезло.

Сейчас известно, что вокруг Нептуна обращаются четырнадцать спутников, названные в честь второстепенных водных божеств из греческой мифологии. Шесть из них обнаружил «Вояджер-2», а о самом недавнем открытии объявили в 2013 году, спустя двадцать четыре года после той эпохальной встречи. Безусловно, самый крупный из спутников — Тритон. Приборы на борту «Вояджера-2» показали, что его поверхность покрывают различные виды снега, в том числе замороженный азот, вода и углекислый газ. Если бы Титан, спутник Сатурна (имеющий схожий размер), можно было перенести на орбиту Нептуна, его плотная атмосфера (имеющая схожий состав), вероятно, кристаллизовалась бы и выпала на поверхность в виде снега. А поэтому Тритон, скорее всего, лишен атмосферы: на нем просто слишком холодно, чтобы ее поддерживать.

Плутон

До самого недавнего времени считалось, что Тритон, спутник Нептуна, — это приемлемый аналог Плутона с точки зрения размера, массы и состава. Однако все изменилось в 2015 году, когда миссия «Новые горизонты», пролетев мимо ледяной карликовой планеты, сделала яркие снимки ее неоднородной поверхности. Оказалось, что у Плутона, проецируемая площадь поверхности которого ненамного выше, чем у Бразилии, много интересных особенностей, указывающих как на древнюю, так и на более близкую к нашему времени криогенную активность, совершенно непохожую на ту, что наблюдается на Тритоне.

Космический мусор

В Солнечной системе много небесных объектов, которые гораздо меньше восьми главных планет. Они занимают три отчетливых кольца, окружающих Солнце. Большинство каменных тел рас-

полагаются между орбитами Марса и Юпитера, в так называемом поясе астероидов. Их сотни тысяч, но их общая масса не превышает 4 % массы Луны. Около половины этой массы содержится в четырех крупнейших объектах — это Церера, Веста, Паллада и Гигея. В начале XIX века, когда их впервые удалось обнаружить, им присвоили статус планет, что увеличило общее число последних в Солнечной системе. Но позже, когда таких небесных тел стало еще больше, знаменитые астрономы решили понизить их статус до малых планет или просто астероидов — и сделали это в 1850-х годах.

Аналогичное понижение статуса Плутона произошло в 2006 году по той же причине. Подобно многим малым планетам, составляющим пояс астероидов, Плутон и его многочисленные карликовые родственники, расположенные за орбитой Нептуна, занимают общее кольцо — пояс Койпера. Считается, что в этой ледяной бездне рождаются все кометы. Однако основное «хранилище» комет сегодня находится гораздо дальше — это облако Оорта. Мы знаем это, поскольку скорость многих комет, проходящих на наших глазах через внутренние области Солнечной системы, позволила бы им в самой дальней точке пути отдалиться от Солнца на 5000–50 000 а.е. и оказаться далеко за пределами пояса Койпера.

Как астероиды, так и кометы порой обретают такую орбиту, что проходят тревожно близко к Земле. Их мощные удары оставили на нашей планете не только множество кратеров, но и железные и каменные метеориты, которые можно найти в музеях естественной истории.

Завершающий пассаж

Уже на протяжении 60 лет мы отправляем к планетам космические аппараты, и за это время мы своими глазами увидели невероятные миры, каждый из которых поразительно отличается от других и рассказывает свою волнительную историю. Однако описания, приведенные выше, следует воспринимать как наи-

лучшие современные оценки, которые могут радикально обновиться в любой момент. Карл Саган, планетолог и популяризатор науки, когда-то выразился так: «Где-то далеко своего открытия ждет нечто невероятное». И действительно, изучать Солнечную систему в XXI веке — значит возвести эти слова в рабочий принцип.

За пределами Солнечной системы нас ждет головокружительное разнообразие звезд. Но прежде чем отправиться к ним, нам следует получше познакомиться с нашей родной звездой — Солнцем.

Звезда по имени Солнце

Даже повелевая столькими планетами, что обращаются вокруг него, Солнце все же питает зреющую виноградную гроздь, как будто в целой Вселенной оно не имеет иных занятий.

Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира

Наша звезда властвует над остальными планетами и осколками, как Бог над смертными людьми. Неудивительно, что во многих пантеистических древних культурах Солнце почиталось как главное божество. Сегодня астрономы знают, что оно в 109 раз больше, в 1,3 миллиона раз объемнее и в 333 000 раз массивнее Земли. Озаряя космическое пространство, Солнце излучает в верхние слои земной атмосферы 1350 Вт/м^2 энергии, причем около двух третей от этого излучения доходит до поверхности нашей планеты. Проследив за этим излучением на протяжении 150 млн км, разделивших Землю и Солнце, астрономы подсчитали, что абсолютная светимость нашей звезды составляет около $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ — это 400 триллионов триллионов ватт. За одну секунду Солнце вырабатывает достаточно энергии, чтобы удовлетворить все текущие потребности человечества на следующие 845 000 лет.

Строение Солнца

Согласно лучшей модели, которую нам удалось создать, Солнце представляет собой шар из перегретых газов, который сам поддерживает свою деятельность. В каждом слое внутренней части Солнца вес вышележащего вещества в точности уравнивается внешним давлением, которое в этом слое оказывают горячие газы (рис. 5.1). Этот идеальный баланс между гравитацией, направленной внутрь, и давлением, направленным наружу, известен как гидростатическое равновесие. Чем глубже слой, тем больше

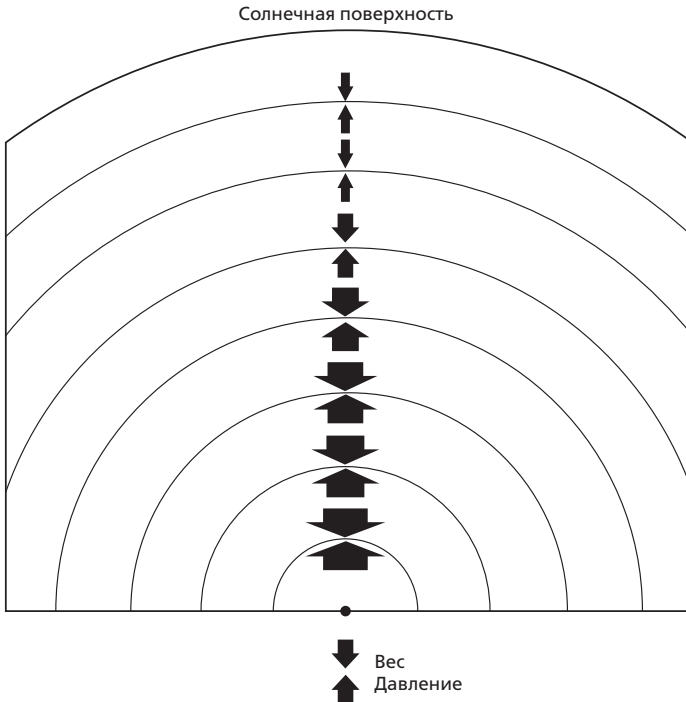


Рис. 5.1. Благодаря гидростатическому равновесию Солнце не сжимается само по себе и не расширяется бесконтрольно. В каждом слое вес вещества, давящего сверху, противостоит равное давление, оказываемое на этот слой нагретыми газами. В самых глубоких слоях сила гравитационного притяжения и сила давления достигают огромных значений. (По источнику: *Horizons: Exploring the Universe*, Michael Seeds, Cengage Learning [2002].)

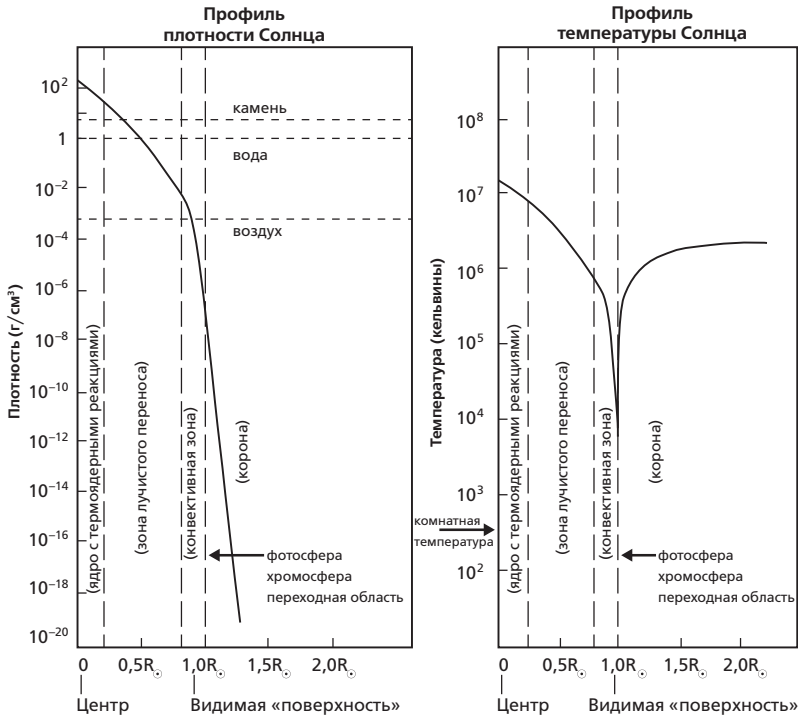


Рис. 5.2. Радиальные профили плотности и температуры газа внутри Солнца, рассчитанные исходя из основных законов ньютоновского тяготения и классической термодинамики. Первичный источник энергии находится в ядре Солнца, высокая температура и плотность которого позволяют совершаться термоядерным реакциям. Энергия, выделяемая в ходе этих реакций, восполняет энергию, излучаемую в космическое пространство с поверхности Солнца.

вес вышележащего вещества — и тем выше давление, необходимое для противодействия этому весу, а возрастает оно благодаря сочетанию большей плотности газа и более высоких температур. Объединив основные законы термодинамики с гравитационной физикой, астрофизики смогли вычислить радиальные профили плотности и температуры, которые, по всей видимости, характерны для Солнца (рис. 5.2).

Плотность в ядре Солнца превышает плотность любого земного вещества. Преодолев половину пути от ядра до видимой

поверхности Солнца, газы разрежаются на два порядка, достигая значений плотности, близких к таковым у воды (около 1 г/см³). Примерно на 90 % пути к поверхности плотность эквивалентна плотности земной атмосферы на уровне моря, а затем она «входит в крутое пике» и в конечном счете стремительно падает, понижаясь более чем на десять порядков (в 10 миллиардов раз) по мере того, как мы удаляемся от видимой поверхности в разреженную атмосферу Солнца — корону.

Энергия Солнца

Температура в ядре Солнца оценивается примерно в 15 млн кельвинов. Шкала Кельвина начинается с абсолютного нуля (−273 °C). Температура наших тел примерно равна 37 °C, что эквивалентно 310 К. Солнечное ядро намного-намного горячее. Наряду с несколькими квантовыми эффектами этого хватает, чтобы четыре атомных ядра водорода (4 протона) слились в одно атомное ядро гелия (2 протона + 2 нейтрона), а возникающий при этом избыточный заряд выделился в форме двух позитронов. Масса четырех сочетающихся протонов превышает массу одиночного атомного ядра гелия, причем излишек составляет 0,007 от изначальной массы протонов (просто подумайте о Джеймсе Бонде). Он преобразуется в энергию в соответствии со знаменитым уравнением Эйнштейна $E = mc^2$, где E — излишек энергии в расчете на реакцию, m — излишек массы (0,007 от реакционной), а c — скорость света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Поскольку скорость света — невероятно большая величина, даже небольшой излишек массы может привести к огромному излишку энергии. По ходу термоядерной реакции избыточная энергия высвобождается в виде гамма-квантов и нейтрино (рис. 5.3). Солнечное ядро, в котором протекают термоядерные реакции, обладает достаточной массой, чтобы подпитывать себя энергией в течение 10 млрд лет. Поскольку Солнечной системе не более 5 млрд лет, Солнце, по всей видимости, будет ярко светить еще в течение такого же срока.

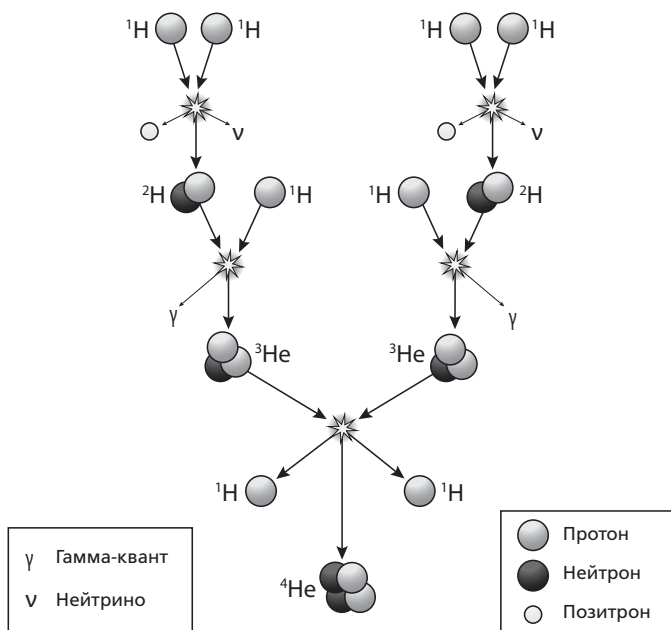


Рис. 5.3. Цепочка протон-протонных термоядерных реакций, которая, как полагают, питает Солнце. Четыре протона (атомные ядра водорода) в конечном счете сливаются в одно атомное ядро гелия, содержащее два протона и два нейтрона. Избыточная энергия высвобождается в виде гамма-квантов и нейтрино. (Материалы любезно предоставлены *Wikimedia Commons*.)

Этот чудесный источник энергии, питающий Солнце, не появился бы, если бы на субатомном уровне не произошли некоторые поистине таинственные явления. Вы можете подумать, что температура в ядре Солнца, доходящая до 15 млн °С, крайне высока — но даже этого пекла недостаточно, чтобы протоны соединились и преодолели взаимное отталкивание, которое их электрические поля оказывают друг на друга. Впрочем, еще не все потеряно, поскольку протоны иногда могут обойти электростатическое отталкивание при помощи процесса, называемого квантовым туннелированием. Проще говоря, если протон сталкивается с другим протоном достаточное количество раз (скажем, 10^{10} раз), вероятность того, что один из них преодолеет электростатический барьер другого, становится значительной. Вероятности кванто-

вого туннелирования как раз хватает для того, чтобы в плотном ядре Солнца, с его «мизерной» температурой в 15 млн °С, протекал термоядерный синтез.

Перенос энергии

Гамма-кванты, которые высвобождаются в ходе термоядерных реакций, проходящих на Солнце, в конечном счете нагревают остальную его часть и заставляют солнечную поверхность ярко светить и излучать энергию в космическое пространство. Построив модель передачи этой энергии, гелиофизики установили наличие ряда особых зон с уникальными физическими свойствами (рис. 5.4). Эти зоны состоят из заряженных «ионов» водорода и гелия, у которых внешние электроны были сорваны с орбит, а также из свободных электронов. Вместе они составляют так называемую плазму. В зону лучистого переноса входят те слои, где энергия передается посредством взаимодействий между фотонами и атомами, из которых состоит газ. В каждом последующем слое нагревается все больше атомов, и они испускают все больше фотонов, а энергия каждого повторно излученного фотона уменьшается. В итоге во все более высоких слоях внутренней области Солнца происходит понижающее преобразование гамма-квантов в рентгеновские фотоны, обладающие более низкой энергией, и в фотоны ультрафиолетового излучения. Можно сравнить этот процесс с тем, как перекупщики конвертируют одну стодолларовую банкноту в сумму чуть меньше 10 000 центов и забирают свою «справедливую долю». Отдельные взаимодействия между фотонами и веществом случайны, и, если попытаться усмотреть в них хоть какую-то последовательность, она будет напоминать «прогулку пьяницы». Впрочем, мы все же можем проследить медленное движение к внешним областям, которое следует за радиальным градиентом понижающейся температуры Солнца. В целом на то, чтобы энергия, заключенная в исходных гамма-квантах, прошла через зону лучистого переноса, требуется около миллиона лет.

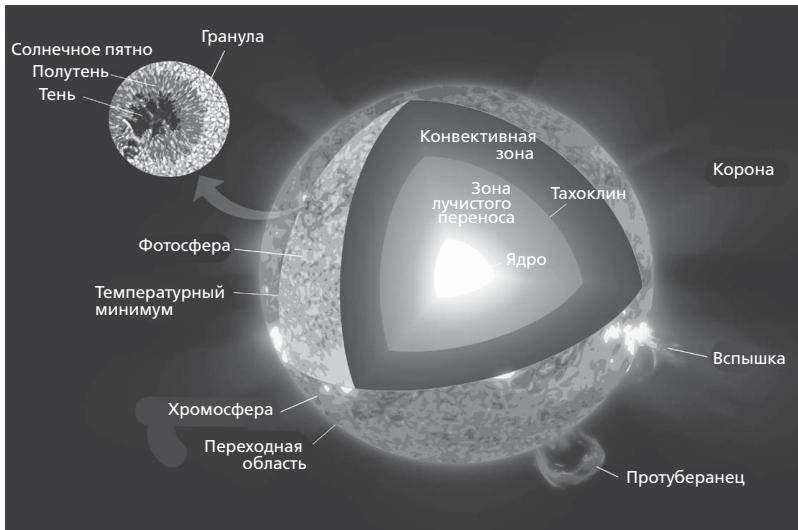


Рис. 5.4. Внутреннее строение Солнца: теоретические модели, основанные на радиальных профилях внутренней температуры и плотности Солнца, выявили различные зоны, обладающие особыми физическими свойствами. Если перечислять от внутренних областей к внешним, то это зона термоядерных реакций (ядро), зона лучистого переноса и конвективная зона. Попытки установить глубину последней ограничены гелиосейсмическими измерениями, с помощью которых на поверхности вздымающегося Солнца можно зафиксировать и проанализировать предпочтительные колебания и соответствующие длины волн. За пределами видимой поверхности (или фотосферы) солнечную плазму разграничивают хромосфера, переходная область и корона. При этом температура постоянно растет, а плотность уменьшается.

Примерно по прошествии двух третей пути от центра Солнца к его внешним областям зона лучистого переноса сменяется конвективной зоной, где энергия передается наружу за счет объемного кипения газообразного вещества. Фотосфера — это видимая поверхность, откуда исходит большинство фотонов, которые мы можем зрительно воспринимать. Непосредственно над ней располагается хромосфера — более горячий и разреженный слой. Ее рубиново-красное излучение (от ионизированного водорода) видно всегда, когда Луна затмевает яркую фотосферу. Прозрачную корону можно считать внешней атмосферой Солнца, поскольку

она простирается далеко за пределы Земли и даже проникает во внешнюю Солнечную систему. Корона более разрежена, чем любой вакуум, который можно создать в лаборатории. Но все же, вопреки ожиданиям, основанным на классических законах термодинамики, это не низкотемпературная окраина Солнца. И более того, астрономы обнаружили, что корона даже горячее, чем самые сокровенные области солнечного ядра!

Пока неясно, как корона может быть настолько раскаленной, при этом находясь так далеко от основного источника солнечной энергии. Недавние исследования, проведенные с помощью наземных телескопов и космических солнечных обсерваторий, показывают, что магнитные поля, пронизывающие фотосферу, хромосферу и солнечную корону, содержат огромное количество энергии. Как полагают астрономы, именно эта магнитная энергия каким-то образом ответственна за повышение температуры короны.

Солнечная активность

Солнце — это умеренно переменная звезда. На его поверхности есть пятна, число которых время от времени начинает возрастать от минимума, при котором их почти не видно, до тревожащего максимума, на достижение которого уходит 5,5 года, а затем снова снижается до «спокойного» минимума — и так завершается 11-летний цикл, за которым мы следили в телескопы сотни лет. Даже те, кто жил до Рождества Христова и наблюдал за Солнцем невооруженным глазом, отмечали большие пятна и их постепенные изменения. Эти астрономы, еще до появления телескопов проводившие свои исследования в Китае, на Аравийском полуострове и в Европе, полагались на туманные атмосферные условия, которые достаточно затемняли Солнце и делали наблюдение за ним хотя бы минимально «безопасным».

Сегодня мы уже понимаем, что солнечные пятна очерчивают границы относительно прохладных областей Солнца, магнитные

поля которых в тысячи раз интенсивнее, чем у окружающей среды. По мере того как солнечных пятен становится все больше, они вызывают общее магнитное поле Солнца в узлы нестабильной магнитной энергии. В конце концов магнитные поля, расположенные над солнечными пятнами, вновь соединяются и перестраиваются до более низких энергетических состояний, и при этом в космическое пространство в виде вспышек выбрасываются залпы заряженных частиц и рентгеновских фотонов. Иногда они уносят прочь от Солнца огромное количество вещества. Эти «корональные выбросы массы» мчатся со скоростью 500 км/с, и если они направлены в сторону Земли, то по прошествии нескольких дней они взрывают нашу магнитосферу (рис. 5.5). Возникающие при этом полярные сияния могут быть поразительно прекрасны, а вот выход из строя силовых трансформаторов, телекоммуникационных спутников и других электронных технологий — это не столь приятные последствия солнечного «гнева». Можно лишь пожа-



Рис. 5.5. Считается, что горячая солнечная корона получает энергию за счет внезапной перестройки магнитных полей. Слева солнечная вспышка, снятая в рентгеновском диапазоне, становится ярче, что отмечает особенно интенсивное высвобождение магнитной энергии. Справа эруптивный протуберанец вызывает огромный корональный выброс массы. (Материалы любезно предоставлены Обсерваторией солнечной динамики NASA.)

леть того бедного астронавта, которому пришлось бы во время коронального выброса масс оказаться на Луне или отправиться на Марс или какой-нибудь относительно близкий астероид. Без оберегающей магнитосферы Земли этот бесстрашный путешественник подпал бы под сильнейшее излучение. Эта уязвимость — одна из ключевых проблем для долгосрочного исследования внутренних областей Солнечной системы.

Солнце меняется и в других, более длительных временных масштабах. Его магнитное поле меняет знак раз в 11 лет, возвращаясь к первоначальной конфигурации каждые 22 года. Скорее всего, 22-летний цикл магнитного поля и 11-летний цикл солнечных пятен имеют причинно-следственную связь. Как гласит теоретическая модель, благосклонно воспринимаемая учеными, каждый максимум активности солнечных пятен сводит на нет общее магнитное поле. Затем появляется новое глобальное магнитное поле, ориентированное в противоположном направлении, а вслед за этим солнечных пятен становится меньше. В дальнейшем это обращение магнитного поля повторяется, как только активность солнечных пятен достигает нового максимума. В основе всей магнитной активности лежат сдвиговые течения проводящей плазмы, протекающие глубоко внутри Солнца. Относительные движения плазменных сгустков и последствия этих движений определяют конфигурацию магнитных полей, возникающих на солнечной поверхности. Астрофизики окрестили сдвиговые течения «солнечным динамо» и полагают, что подобные силы действуют в недрах большинства солнцеподобных звезд, где конвективные внешние слои являются нормой.

В масштабах столетий максимальное количество солнечных пятен может увеличиваться и уменьшаться. Особенно спокойный период продолжался с 1645 по 1715 год. Он назывался минимумом Маундера и ассоциировался с особенно холодной погодой в Европе и Северной Америке. Измерения различных показателей, свидетельствующих о температуре, скажем, толщины древесных колец и обилия углерода-14 в растениях, подтвердили что она снижалась по всему миру не только в годы минимума Маундера,

но и на протяжении других глобальных похолоданий, имевших место за последние 2000 лет и ассоциируемых с минимальным проявлением солнечных пятен. Могут ли эти колебания солнечной активности в такой степени влиять на климат Земли, остается спорным. Однако мы знаем, что высокая активность нашей звезды до сих пор крайне губительна для многих наших технологий. И неизвестно, как еще захочет «пошалить» Солнце в ближайшие годы, века и тысячелетия.

6

Звезды и планеты вне владений Солнца

Блаженны кроткие, ибо они наследуют землю.

Евангелие от Матфея, 5:5

За пределами Солнечной системы находится бесчисленное множество других систем из звезд, планет и «мусора», странствующих по диску Млечного Пути в орбитальной синхронности с гравитацией нашей Галактики. Больше всего мы знаем о ближайших к нам звездных системах, поскольку можем с уверенностью определить надежные расстояния до их звезд-хозяек. Мы уже говорили о том, что эти системы, расположенные в пределах примерно 100 световых лет от нашей звезды, составляют так называемые окрестности Солнца. Как оказалось, в них преобладают тусклые звезды с малой массой, и еще в них невероятно много планет.

Звездный рог изобилия

Как мы уже видели на рис. 3.9, в число звезд, составляющих внутреннюю область окрестностей Солнца, входят само Солнце (это очевидно), α Центавра А и В, Прокцион и Сириус. В цветах этих местных звезд уже заметно разнообразие. Затем идут не столь узнаваемые светила — остаток из тридцати трех звезд, изображенных на упомянутом рисунке. Возможно, вы с ними не знакомы по очень простой причине: они намного тусклее, чем яркая четверка.

Кроме того, большую часть этих звезд без телескопа не увидеть, поскольку они занимают тот же локальный участок пространства, что и первые четыре, да и по природе своей светят не столь сильно. Значительные перемены в светимости и цвете звезд характерны для всех окрестностей Солнца. Нам это известно, поскольку астрономы смогли достоверно определить расстояния до большинства этих звезд, произвести количественные оценки их цветов и установить их спектральные классы.

Расстояния до звезд

В третьей главе мы говорили, что лучший способ рассчитать расстояние до звезды — это отследить ее годовое движение относительно более удаленных звезд, расположенных на фоне. На самом деле это «параллактическое» движение отражает бег нашей планеты вокруг Солнца — и выражено тем слабее, чем дальше от нас до звезды. Замерив угловой параллакс звезды и зная «базисную линию» Земли, идущей по орбите, астрономы могут при помощи триангуляции вычислить, насколько далеко на самом деле находится звезда. Для наблюдателей, находящихся на Земле, формула, связывающая годичный параллакс звезды (p) с расстоянием до нее (d), выглядит так:

$$d \text{ (парсеки)} = 1/p \text{ (угловые секунды)},$$

где p измеряется в угловых секундах ($1'' = 1/3600^\circ$), а d — в парсеках ($1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. года}$). Более того, единица измерения расстояния — парсек — формально определяется как «угловая секунда параллакса», а «парсек» — это сокращение. Например, α Центавра А — самая яркая звезда в ближайшей к Солнцу звездной системе — два раза в год отклоняется от своего номинального положения на параллактический угол, равный $0,747''$, так что расстояние от Солнца до нее составляет $1/0,747'' = 1,338 \text{ парсека}$, или $4,36 \text{ светового года}$.

На сегодняшний день так были измерены расстояния до примерно 2000 звезд в пределах 50 световых лет от Солнца — и совсем

недавно в этом начали помогать обсерватории, размещенные на борту космических аппаратов и способные точнее определять положение звезд без помех, вызванных атмосферным размытием.

Блеск и светимость звезд

Если ясной безлунной ночью, находясь вдали от искусственного освещения, вы посмотрите вверх, то сможете увидеть несколько тысяч звезд и, возможно, обнаружите, что некоторые из них кажутся намного ярче других. Например, Сириус в созвездии Большого Пса выглядит очень ярким; τ Кита имеет среднюю яркость, в то время как β Лебеда, первая звезда, расстояние до которой удалось определить достоверно, едва видна. Древнегреческий астроном Гиппарх заметил эти отличия около 135 года до нашей эры и разработал систему для их количественной оценки. В ней ярчайшим звездам присваивалась «первая величина», а самым тусклым, едва заметным — «шестая». Таким образом, полный диапазон яркости звезд охватывал величины от 1 до 6. Сириус тогда считался звездой первой величины, в то время как β Лебеда соответствовала бы звездной величине 5 или 6.

В XIX веке астрономы успешно измерили световые потоки, исходящие от звезд, — в данном случае мы считаем синонимами слова «световой поток» и «освещенность» и понимаем под ними принимаемую мощность в расчете на единицу площади. Сопоставив эти потоки со шкалой звездных величин Гиппарха, ученые поняли, что шкала величин яркости носит логарифмический характер и во многом похожа на шкалу громкости звука в децибелах. Оказалось, что при каждом целочисленном увеличении звездной величины поток уменьшается в 2,5 раза. Формула этого соотношения такова:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \lg (f_2/f_1),$$

где m — видимая (наблюдаемая нами) звездная величина, L — освещенность, измеренная в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$), а знак «минус» отражает характер шкалы звездных величин, направлен-

ной от яркости к тусклости. С помощью этой формулы можно рассчитать относительные лучистые потоки и увидеть, что разница в 5 звездных величин, отделяющая ярчайшие звезды от самых тусклых, но еще заметных невооруженным глазом, дает фактическое соотношение потоков, равное 100. Другими словами, система звездных величин сжато выражает реальные потоки в гораздо меньшем диапазоне чисел. Современные астрономы подкорректировали оценки, так что Сириус теперь обладает видимой звездной величиной, равной $-1,5$ (она обозначается как m_v); α Центавра А — несколько меньшей ($m_v = -0,1$); τ Кита намного тусклее ($m_v = +3,5$), а у 61 Лебеда, которую очень трудно увидеть без помощи оптики, $m_v = +5,2$. Согласно этой шкале, видимая звездная величина Солнца колоссальна ($m_v = -26,8$). А вот у звезды Барнарда в созвездии Змееносца (расположенной всего в шести световых годах от нас) видимая звездная величина намного меньше ($m_v = +9,5$), и поэтому она гораздо тусклее и без телескопа ее на небе не найти.

Одно дело — количественно оценить световой поток, исходящий от звезды, или ее видимый блеск. И совсем другое — узнать собственную светимость звезды, иными словами, то, сколько энергии она излучает в космическое пространство каждую секунду. Чтобы определить этот параметр, необходимо знать, как далеко она находится, вот почему та роль, которую играют звезды в окрестностях Солнца, настолько важна. Мы с высокой степенью достоверности знаем, на каком расстоянии от Земли они находятся, и поэтому можем с уверенностью судить об их светимости. Световой поток от любого источника уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Это соотношение можно выразить формулой $f = L/(4\pi d^2)$, где f — измеренный поток, L — собственная светимость, а d — расстояние. Аналогичные законы обратных квадратов справедливы для гравитационной силы, электрической силы и интенсивности звука, поскольку в трехмерном пространстве все эти «действия на расстоянии» предполагают ослабление соответствующего эффекта с увеличением площади воздействия. Если вы знаете расстояние до звезды, то для определения ее свети-

мости можете изменить соотношение так: $L = (4\pi d^2) \cdot f$. Астрономы часто предпочитают выражать его иначе, в системе звездных величин. Они определяют абсолютную звездную величину (M) небесного светила как видимую звездную величину (m), которую оно имело бы, если бы находилось на расстоянии 10 парсек (32,6 светового года) от наблюдателя. Это позволяет им воспользоваться следующей формулой:

$$m - M = 5 \lg (d/10).$$

Зная это соотношение модуля расстояния и то, насколько далеко от вас находится небесное светило, вы могли бы определить, что Сириус — звезда с высокой светимостью (его абсолютная звездная величина, M_v , составляет +1,42); Солнце и α Центавра А светят значительно слабее ($M_v = +4,83$; $M_v = +4,36$ соответственно); а звезда Барнарда — просто тлеющий уголек ($M_v = +13,22$).

Соотнесение абсолютных звездных величин с собственной светимостью звезд предполагает еще одну логарифмическую формулу:

$$M_2 - M_1 = -2,5 \lg (L_2 / L_1),$$

где M_2 и M_1 — абсолютные звездные величины двух светил, L_2 и L_1 — соответствующие им светимости (в ваттах), а знак «минус» снова указывает на «обратную» природу шкалы звездных величин. Вычисление соотношения светимости дает

$$\frac{L_2}{L_1} = 10^{-0,4(M_2 - M_1)}$$

И если вернуться к Сириусу, то можно увидеть, что его меньшая абсолютная звездная величина указывает на его собственную светимость, которая примерно в 25 раз больше, чем у Солнца и α Центавра А. А по сравнению со звездой Барнарда Сириус ослепительно блистает: его светимость больше в 52 000 раз!

Цвета звезд и спектральные классы

Большинству из нас Солнце кажется желтоватым — и такой же кажется самая яркая звезда в ближайшей к нам звездной системе, α Центавра А, если смотреть на нее невооруженным глазом. Сириус, α Большого Пса, напротив, выглядит бело-голубым, а звезда Барнарда в созвездии Змееносца при наблюдении в телескоп имеет явный красноватый оттенок. Разнообразная звездная палитра указывает на широкий диапазон поверхностных температур небесных светил: у самых красных звезд температуры сравнительно низкие, в 2000–3000 К; у желтоватых, таких как Солнце, — 5000–6000 К, а у бело-голубых звезд, таких как Сириус, гораздо выше — в 8000–10 000 К. Эти интерпретации звездных цветов были подтверждены зарегистрированными звездными спектрами, при создании которых свет от каждой звезды разлагается в видимый спектр с помощью призмы или дифракционной решетки (рис. 6.1).

В спектре красноватых звезд, подобных звезде Барнарда, наблюдается множество спадов и разрывов, соотнесенных с присутствием определенных молекул в звездных атмосферах. Если в них предполагается наличие молекул таких веществ, как оксид титана и гидроксид кальция, значит, температура их поверхности достаточно низка для таких сравнительно хрупких молекул и не превышает нескольких тысяч кельвинов. У желтоватых звезд, таких как Солнце и α Центавра А, на наличие молекул в атмосфере не указывает ничего, но в их спектре проявляются отдельные спады, указывающие на присутствие «металлических» элементов, таких как кальций, магний и железо. Электроны в этих элементах уже «приведены в боевую готовность», чтобы активизироваться под воздействием звездного света, пришедшего из нижележащих слоев, при температуре атмосферы около 4000–6000 К. У бело-голубых звезд, подобных Сириусу, не проявляется молекулярных или «металлических» спектральных особенностей. В их спектре преобладают спады, соответствующие предсказанному спектру водорода. Этот простейший

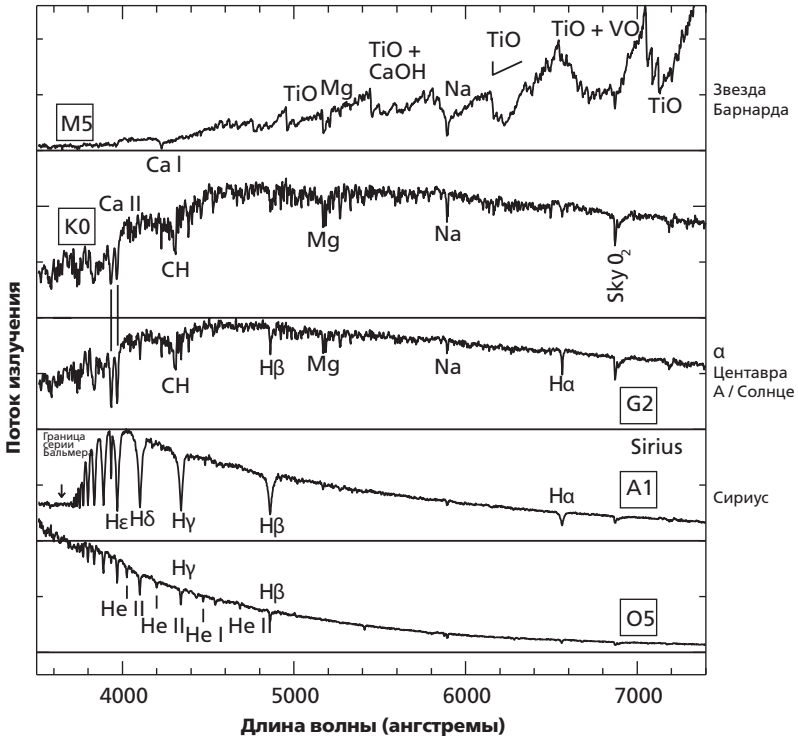


Рис. 6.1. Видимые спектры ближайших звезд показывают значительные различия, которые можно объяснить различной температурой поверхности звезд. Здесь сравниваются спектральные характеристики таких звезд, как Сириус, α Центавра А / Солнце и звезда Барнарда. Обратите внимание, что звезды спектрального класса А (Сириус) проявляют наибольшую яркость на «синем» (коротковолновом) конце своего спектра, в то время как звезды спектрального класса М (звезда Барнарда) — на его «красном» (длинноволновом) конце, в полном соответствии с их наблюдаемыми цветами. Более того, паттерны спектральных линий поглощения позволяют выявить значительные перемены, которые, опять же, можно соотнести с разными температурами поверхности звезд. (По источнику: *Galaxies in the Universe*, L.S. Sparke and J.S. Gallagher, Cambridge University Press [2000], материалы любезно предоставлены L.S. Sparke.)

из атомов наиболее чувствителен к поглощению звездного света, испущенного из нижележащих слоев, при температурах около 8000–12 000 К.

К началу XX века астрономы успешно сфотографировали спектры более чем 200 000 звезд и на основе их визуального изучения разработали последовательность звездных «спектральных классов», которую мы используем и сегодня. Спектральные классы, распределенные в зависимости от температур звездной поверхности, от самых высоких до самых низких, обозначаются так: O, B, A, F, G, K и M. Забавная мнемоника для этой закодированной последовательности звучит на английском как: *Oh Be A Fine Girl [or Guy], Kiss Me!* — «O, будь хорошей девочкой [или мальчиком], поцелуй меня!» (буквы, обозначающие классы, выделены полужирным начертанием). В такой кодировке Сириус относится к классу A; Солнце и α Центавра A — к классу G, а звезда Барнарда — к классу M. Для дальнейшего разделения спектральных классов к букве добавляют цифру, при этом цифра 0 присваивается самой горячей звезде из класса, а 9 — самой холодной. Согласно этой схеме, Солнце с температурой поверхности 5800 К входит в класс G2. В таблице 6.1 кратко описана последовательность спектральных классов и указаны соответствующие им температуры поверхности звезд. Показатель цвета ($B-V$), приведенный в таблице, относится к разнице видимых звездных величин, измеренных в двух фильтрах, голубом (B) и желтом (V). Чем краснее видимый цвет, тем больше показатель цвета $B-V$ и тем ниже температура поверхности.

Таблица 6.1

Наблюдаемые свойства ближайших звезд

Спектральный класс	Показатель цвета ($B-V$)	Особенности спектра	Температура поверхности, К
O5 — O9	фиолетово-голубой ($-0,33$) — ($-0,30$)	ионизированный гелий	60 000—30 000
B0 — B9	голубой ($-0,30$) — ($-0,06$)	нейтральный гелий, водород	26 500—10 000

Продолжение таблицы 6.1

A0 — A9	бело-голубой (+0,00) — (+0,19)	водород (наиболее выражен)	9900—7800
F0 — F9	желто-белый (+0,31) — (+0,54)	водород (слабо выражен), ионизированный кальций	7000—6000
G0 — G9	желтый (+0,59) — (+0,74)	ионизированный кальций, ионизированное железо	5900—5400
K0 — K9	оранжевый (+0,82) — (+1,35)	ионизированный кальций (наиболее выражен), натрий (наиболее выражен)	5200—4000
M0 — M9	красный (+1,41) — (+2,00)	оксид титана, гидроксид кальция	3700—2700

(Данные в таблице основаны на источнике: Harold L. Johnson, *Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 4 [1966], pp. 193—206; а также на статье онлайн-энциклопедии: http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification и на других ресурсах.)

Следует отметить, что астрономы обнаружили еще более холодные звезды, причисленные к другим спектральным классам, — это класс L, куда входят звезды с температурой поверхности от 2500 до 1300 К, и класс T, в котором оказались светила с температурой менее 1300 К. Первые едва ли могут считаться настоящими звездами, создающими энергию, необходимую для излучения света, благодаря идущему в их недрах термоядерному синтезу ядер гелия из ядер водорода. Звезды типа T слишком холодны для такого термоядерного синтеза и поэтому должны полагаться на иной источник энергии, наличие которого могло бы объяснить их слабое излучение, — скорее всего, таким источником становится тепло, которое возникает за счет гравитационной энергии, высвобожденной при их образовании. Эти самые холодные из звездных объектов получили наименование коричневых карликов. Они необычайно тусклые, и из-за этого о них известно очень мало.

Сводим все воедино: диаграмма Герцшпрунга — Рессела

Точно установив расстояния до звезд, астрономы могут легко преобразовать наблюдаемый звездный блеск (или световой поток) в собственную светимость. Это важное свойство звезды, и наряду с температурой ее поверхности (определяемой по наблюдаемому показателю цвета звезды или спектральному классу) оно дает необходимые указания на классы звезд, странствующих в окрестностях Солнца и за их пределами (рис. 6.2).

Диаграмма Герцшпрунга — Рессела (или Г—Р), впервые разработанная в 1913 году датчанином Эйнаром Герцшпрунгом и американцем Генри Норрисом Ресселом, показывает различные классы светимости звезд. «Густонаселенная» главная последовательность проходит по диагонали от верхнего левого угла к нижнему правому. В этом «ансамбле» играет подавляющее большинство звезд. На главной последовательности самые голубые и горячие звезды — самые яркие, а самые красные и холодные — наиболее тусклые. Это следует из поверхностной температуры звезды, при которой светимость меняется приблизительно как температура в четвертой степени. Полное соотношение выражается следующей формулой:

$$L = \sigma(4\pi R^2)T^4,$$

которая количественно определяет тепловое излучение, исходящее от сферической поверхности горячего тела (которое мыслится как идеальный излучатель, или абсолютно черное тело, пребывающее в тепловом и радиационном равновесии с окружающей средой). Величина $(4\pi R^2)$ соответствует площади излучающей поверхности сферического тела (в квадратных метрах), температура поверхности (T) измеряется в кельвинах, а σ в этой формуле — коэффициент пропорциональности, постоянная Стефана — Больцмана. При привязке к светимости Солнца, L_{Sun} , соотношение упрощается:

$$L / L_{\text{Sun}} = (R / R_{\text{Sun}})^2 (T / T_{\text{Sun}})^4.$$

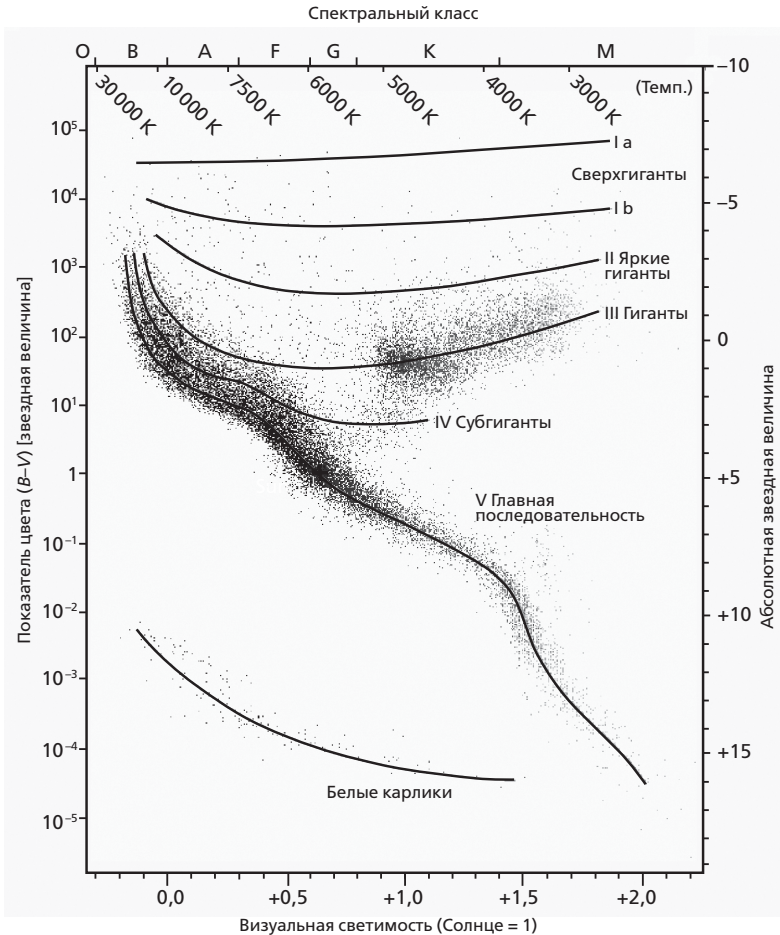


Рис. 6.2. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела, показывающая светимости и температуры поверхности звезд в окрестностях Солнца и за их пределами. Расстояния до всех звезд на этой диаграмме определены по их геометрическим параллаксам. Диагональная главная последовательность достаточно населена; яркие голубые звезды занимают верхний левый угол, тусклые красные звезды — правый нижний. В ветви гигантов относительно меньше звезд, что согласуется с ограниченным объемом пространства, измеримого с помощью метода геометрического параллакса, и с относительной редкостью самих гигантов. Белых карликов на диаграмме мало из-за их крайней тусклости, из-за которой их очень трудно обнаружить. (По источнику: R. Powell, *An Atlas of the Universe*.)

Другими словами, радиус звезды и температура ее поверхности в значительной степени определяют ее светимость. Звезды на главной последовательности несколько различаются по радиусу и более заметно — по температуре. После возведения в четвертую степень вариации температуры ведут к огромной разнице в светимости. Скажем, если рассматривать только звезды, расположенные на главной последовательности, то представители спектральных классов О и В светят в 100 000 раз сильнее Солнца, а светимость Солнца в 10 000 раз выше, чем у звезд спектрального класса М. А вот у звезд-гигантов светимость выше, чем у их «коллег» со сходной температурой, занимающих главную последовательность, поскольку гиганты намного больше, — некоторые из них в сотни и тысячи раз больше Солнца. С белыми карликами все происходит с точностью до наоборот: они намного тусклее, чем их эквиваленты на главной последовательности, потому что они в сотни раз меньше. Многие белые карлики не больше Земли. В двенадцатой главе мы поговорим о том, какие эволюционные процессы лежат в основе этих различных классов звезд.

Звездные массы

Важнейшим физическим свойством звезды является только ее масса. Она определяет светимость звезды, ее эволюционный путь, общее время жизни и, в конечном итоге, ее финал. К сожалению, звездные массы нельзя определить, просто измерив расстояния до звезд, а также их температуру и светимость. Нужно наблюдать за тем, как звезда «танцует» с другой звездой. Отслеживая эти орбитальные фанданго, астрономы могут призвать на помощь ньютоновскую силу тяготения и установить отдельные массы в двойной звездной системе. Процесс легче понять, когда видны обе звезды, и отличным примером в данном случае станет двойная система Сириус А + Сириус В, в которой яркая звезда класса А, занявшая главную последовательность (Сириус А), и ее гораздо более тусклый спутник, белый карлик (Сириус В), медленно вращаются вокруг своего общего центра масс.

Сириус В был открыт в 1862 году, и с тех пор наблюдения показали, что две звезды движутся по эллиптическим орбитам с общим периодом в 50,1 года. Сириус А имеет меньшую орбиту, что соответствует его большей массе. Угловой диаметр большой полуоси орбиты Сириуса В — по отношению к Сириусу А — составляет 7,5", что при ее протяженности в 8,6 светового года дает среднее расстояние в 20 а.е. Используя обобщенную версию третьего закона Кеплера, где

$$P^2 (m_A + m_B) = a^3,$$

можно выразить период (P) в годах, а протяженность большой полуоси (a) в астрономических единицах и, таким образом, вычислить сумму звездных масс ($m_A + m_B$) в единицах измерения, основанных на массе Солнца (M_\odot или, для данной книги, также M_{Sun}). Полученные в результате 3,2 солнечной массы в дальнейшем можно разделить на отдельные массы в соответствии с относительными размерами орбиты каждой звезды так, что

$$m_A / m_B = a_B / a_A,$$

где массы звезд обратно пропорциональны радиусам орбит (подумайте о том, как взрослый и ребенок располагаются на качелях, чтобы сохранить равновесие). Размер орбиты Сириуса А примерно вдвое меньше, чем у Сириуса В — значит, Сириус А вдвое тяжелее белого карлика. В итоге мы получим 2,15 M_\odot для яркого Сириуса А и 1,05 M_\odot для чрезвычайно тусклого белого карлика Сириуса В — и теперь можем завершить досье на Сириус В, звездный объект, по массе сравнимый с Солнцем, но со светимостью всего в 2,6 % от солнечной и с радиусом, который в 119 раз меньше радиуса Солнца. Очевидно, что Сириус В — это звезда совсем другого класса.

По сравнению с системой Сириуса большинство двойных звездных систем далеко не так доброжелательны к астрономам. Они либо слишком далеки, либо слишком тесно связаны, чтобы различить их как отдельные. В таких случаях, а их довольно много, астрономы должны тщательно собрать всю прочую информа-

цию, которая может им пригодиться для определения звездных масс. Наиболее полезными в данном случае оказались те двойные звезды, орбиты которых сильно наклонены к лучу нашего зрения. С нашей точки наблюдения общий блеск звездной системы будет периодически снижаться по мере того, как одна звезда затмевает другую. Отслеживая эти спады в течение продолжительного времени, астрономы могут определить и взаимный орбитальный период звезд, и то, насколько их орбиты совпадают с нашим лучом зрения. Если совпадение идеально, значит, движение звезд по направлению к нам и от нас в точности соответствует их орбитальным скоростям. Движение по лучу зрения, в свою очередь, можно определить по наблюдаемым доплеровским смещениям, заметным в изменениях длин волн на соответствующих спектральных линиях звезд. Учитывая эти особые обстоятельства, можно определить соотношение звездных масс в таком виде:

$$m_2 / m_1 = v_1 / v_2 = \Delta\lambda_1 / \Delta\lambda_2,$$

где масса звезды (m) обратно пропорциональна скорости звезды (v) и соответствующему доплеровскому смещению, заметному в изменении длины волны ($\Delta\lambda$). Как только размеры орбит будут получены из орбитального периода и скоростей, можно будет использовать третий закон Кеплера и вычислить звездные массы... Фух!

Соотношение массы, светимости и времени жизни

Если учесть все требования и сложности, связанные с определением звездных масс, вы, возможно, не удивитесь, узнав, что сколь-либо точно нам удалось «оценить» лишь пару сотен звезд. Эти драгоценные светила позволили выявить критически важную взаимосвязь между светимостью звезды главной последовательности и ее массой (рис. 6.3). По мере увеличения массы звезды наблюдаемая светимость стремительно возрастает. Более того, соотношение массы и светимости для звезд главной последова-

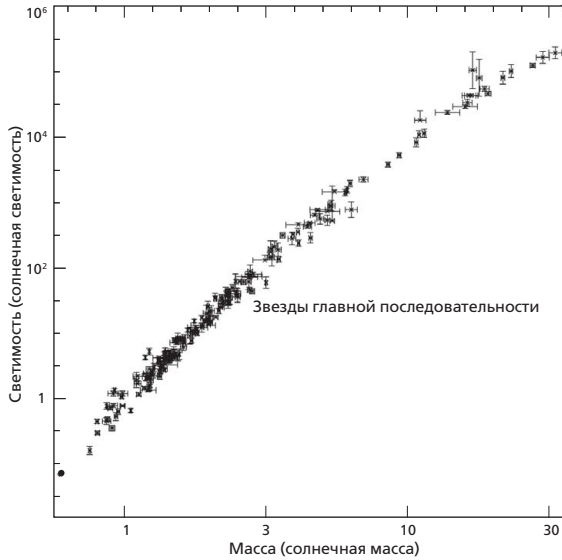


Рис. 6.3. Для соотношения массы и светимости, установленного для звезд главной последовательности, характерна резкая зависимость, при этом небольшое увеличение массы ведет к огромному увеличению светимости. (Материалы любезно предоставлены O. Y. Malkov, со ссылкой на O. Y. Malkov, "Mass-Luminosity Relation of Intermediate-mass Stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2007, vol. 382, pp. 1073–1086.)

тельности можно выразить формулой, имеющей вид степенного закона:

$$L / L_{\text{Sun}} = (m / m_{\text{Sun}})^n,$$

где показатель степени (n) составляет около 4 как для звезд солнечной массы, так и для более массивных. При столь высоком показателе степени простое удвоение массы звезды приведет к шестнадцатикратному увеличению ее светимости. Рассмотрим звезду главной последовательности класса O массой $30 M_{\odot}$. Ее светимость превысит солнечную более чем в 100 000 раз. Почему это соотношение массы и светимости столь велико и каковы последствия?

Определение давления, температуры и светимости внутри звездного ядра, где проходят термоядерные реакции, выходит за

рамки данного путеводителя для начинающих. Достаточно сказать, что добавление массы создает соразмерно большее давление в ядре, вызванное тяжестью вышележащих слоев. Уравнение состояния идеального газа гласит, что температура напрямую связана с давлением и поэтому будет повышаться с любым увеличением массы звезды. Мы уже видели, что светимость зависит от четвертой степени температуры, и поэтому нетрудно представить, что она будет зависеть от чего-то близкого к четвертой степени звездной массы. И этот правдоподобный аргумент ведет к вопросу: «Как долго звезда может излучать энергию при подобной светимости?»

Можно подойти к этой проблеме, сравнив доступное «топливо» (которое составляет некоторую долю массы звезды $[m]$) с уровнем его расхода или «горением» (которое можно отождествить со светимостью звезды $[L]$). Оценить, как долго будет светить звезда, мы сумеем, разделив доступное «топливо» на «горение». При привязке к Солнцу приблизительное время жизни звезды (τ) составляет:

$$\tau / \tau_{\text{Sun}} = (m / M_{\text{Sun}}) / (L / L_{\text{Sun}}).$$

Если светимость (L) заменить на ее эквивалент по массе, то в соответствии с зависимостью «масса — светимость» это соотношение, призванное установить время жизни звезды, сведется к формуле:

$$\tau / \tau_{\text{Sun}} = (m / M_{\text{Sun}})^{-3,0}.$$

Здесь перед нами еще один экстремальный степенной закон. На этот раз он ясно показывает, что возрастание массы приводит к значительному *сокращению* времени жизни звезды. Общую продолжительность термоядерных реакций в недрах Солнца можно рассчитать исходя из его массы ($M_{\text{Sun}} = 2 \cdot 10^{30}$ кг), массы солнечного ядра (примерно 10 % от общей массы), доли этой массы, которая подвергается термоядерному синтезу (около 0,007 массы

ядра), соответствующей энергии, которая высвобождается за время жизни Солнца и определяется согласно знаменитому уравнению Альберта Эйнштейна $E=mc^2$ и измеренной светимости Солнца ($L_{\text{Sun}} = 4 \cdot 10^{26}$ Вт). Все это сводится к общей продолжительности термоядерных реакций в ядре Солнца, выражаемой в виде следующей формулы:

$$\tau_{\text{Sun}} = E_{\text{Sun}} / L_{\text{Sun}} = (0,007 \cdot 0,1 \cdot m_{\text{Sun}}) c^2 / L_{\text{Sun}}.$$

Подставив значения для m_{Sun} и L_{Sun} , мы получим ожидаемую продолжительность термоядерных реакций в ядре Солнца примерно в 10 млрд лет (10^{10} лет), так что сейчас мы находимся примерно на полпути. Если подставить эту приблизительную цифру в предыдущее соотношение, по которому мы высчитывали относительное время жизни звезды, то расчетная продолжительность жизни звезды главной последовательности выразится так:

$$\tau = 10^{10} (m / M_{\text{Sun}})^{-3,0} \text{ лет},$$

и это оказывается достаточным приближением к тому, что показывают более сложно устроенные звездные модели (табл. 6.2). Например, расчетное время жизни звезды главной последовательности класса В3 массой $10 M_{\odot}$ составляет всего 10 млн лет, в то время как звезда класса К5 массой $0,7 M_{\odot}$ должна просуществовать около 30 млрд лет — это намного дольше, чем нынешний возраст самой Вселенной в 13,8 млрд лет.

Таблица 6.2

Физические свойства ближайших звезд главной последовательности

Спектральный класс	Масса (солнечная масса, m_{Sun})	Светимость (солнечная светимость, L_{Sun})	Время жизни, лет	Относительная распространенность, %
O	$> 16 m_{\text{Sun}}$	$> 30,000 L_{\text{Sun}}$	< 5 млн	0,00003
B	$16-2,1 m_{\text{Sun}}$	$30\,000-25 L_{\text{Sun}}$	5–840 млн	0,13
A	$2,1-1,4 m_{\text{Sun}}$	$25-5 L_{\text{Sun}}$	0,84–2,8 млрд	0,6
F	$1,4-1,0 m_{\text{Sun}}$	$5-1,5 L_{\text{Sun}}$	2,8–6,9 млрд	3,0

Продолжение таблицы 6.2

G	1,0–0,8 m_{Sun}	1,5–0,6 L_{Sun}	6,9–13 млрд лет	7,6 %
K	0,8–0,5 m_{Sun}	0,6–0,1 L_{Sun}	13–56 млрд лет	12,1 %
M	0,5–0,1 m_{Sun}	< 0,1 L_{Sun}	> 56 млрд лет	76,5 %

(Массы, светимости и относительные величины даются согласно значениям, приведенным по адресу: en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification. Время жизни в миллионах и миллиардах лет рассчитывается исходя из формулы: $\tau = 10^{10} (m / M_{\text{Sun}}) / (L / L_{\text{Sun}})$; результат выражается в годах. В радиусе 100 световых лет от Солнца находятся четыре звезды класса В. Ближайшая звезда класса О — ξ Змееносца — находится примерно в 400 световых годах от нас, далеко за пределами рассматриваемых здесь окрестностей Солнца.)

Что же тогда станет с окрестностями Солнца? Еще через миллиард лет или около того исчезнет Сириус. Через 5 млрд лет погибнет Солнце. Между тем каждая красная тусклая звезда класса М, когда бы она ни возникла, — даже если это произошло примерно 12 млрд лет назад, при рождении Млечного Пути, — продолжит свое существование и будет отличительным признаком наших небольших галактических владений. Звездообразующие газопылевые облака могут появляться и исчезать, но преобладать будут крошечные карлики спектрального класса М.

Экзопланеты, ваш выход!

Новости о планетах, найденных за пределами Солнечной системы, становятся все более удивительными. Недавно «Энциклопедия внесолнечных планет» перечислила более 4500 подтвержденных экзопланет в более чем 3200 систем. К тому времени, когда вы прочтете этот раздел, список может ощутимо пополниться. Все эти научные открытия происходят с 1992 года, когда за пределами Солнца удалось обнаружить первую планету, и, представьте себе, она вращалась вокруг нейтронной звезды. До этого были десяти-

летия ложных тревог и несбывшихся надежд. Я прекрасно помню, как преподавал астрономию в 1980-х годах и с энтузиазмом объявил об открытии первой экзопланеты только для того, чтобы опровергнуть эту новость на следующем уроке. Познакомьтесь с историей открытия экзопланет, и вы, возможно, проникнетесь волнением и восторгом, связанными с этой стремительно развивающейся областью астрономии.

До 2010 года подавляющее большинство открытий совершалось благодаря пристальному наблюдению за спектрами звезд-хозяек. Астрономы получали спектры с высоким разрешением, измеряли мельчайшие доплеровские смещения в длинах волн спектральных линий звезд и начали обнаруживать случаи периодического неравномерного движения звезд. Доплеровские смещения составляли менее 1/10 миллиона от номинальных длин волн, но этого хватало, чтобы сделать вывод о колебаниях звезды в несколько метров в секунду (скорость ходьбы). Подобные вращения звезд вокруг неподвижного центра указывали на гравитационное присутствие одной или нескольких ближайших планет. Преимущество такого метода для поиска экзопланет заключается в том, что астрономы могут определить как период обращения планеты, так и ее орбитальную скорость (с учетом наклона орбиты), что позволяет впоследствии вычислить гравитационную массу любой планеты, а также расстояние до планеты от ее звезды-хозяйки.

С 2010 года большинство открытий, связанных с планетами, было сделано с помощью космического телескопа «Кеплер». Этот солнечный орбитальный аппарат, запущенный в марте 2009 года, обнаружил множество планет, и некоторые из них размером не превышали Землю. «Кеплер» был специально настроен на то, чтобы непрерывно снимать один участок неба, охвативший созвездия Лебедя и Лир. В этой области находится примерно 150 000 звезд, и телескоп мог отслеживать их свет с невероятной точностью. «Кеплер» не только наблюдал за естественными переменами блеска звезды, но и фиксировал любые временные спады в световом потоке, которые могли быть вызваны планетой, проходящей по звездному диску. При помощи этих световых профилей

астрономы смогли определить как периоды обращения, так и размеры транзитных экзопланет. Однако для того чтобы высчитать их массы, необходимы и спектроскопические наблюдения, которые покажут, с какой скоростью планеты обращаются вокруг своих звезд-хозяек. Результаты, полученные благодаря «Кеплеру» и другим специализированным наземным телескопам, произвели революцию в том, что мы знаем о внесолнечных планетах.

Если ограничиться лишь теми планетами, что находятся от нас в пределах 100 световых лет, то нам известно примерно 650. В их число входят планеты, обращающиеся вокруг наших ближайших соседей — Проксима Центавра и α Центавра В, а также вокруг других звезд, видимых невооруженным глазом. Для некоторых систем нам даже удалось получить изображения планет, которые движутся по орбите вокруг своих звезд-хозяек.

ПРОКСИМА ЦЕНТАВРА

24 августа 2016 года европейские астрономы сообщили об открытии планеты, двигавшейся по орбите вокруг Проксима Центавра, звезды, ближайшей к нашей Солнечной системе. Этот тусклый красный карлик — отдаленный участник тройной звездной системы α Центавра. Доказательства существования планеты были получены с использованием метода радиальных скоростей (или доплеровской спектроскопии), при котором в спектре центральной звезды наблюдалось незначительное смещение длины волны с периодом в 11,2 дня. По оценкам, масса планеты, названной Проксима Центавра b, эквивалентна по меньшей мере 1,27 массы Земли, а протяженность большой полуоси ее орбиты составляет всего 0,05 а.е. Но насколько бы поразительной нам ни казалась близость планеты к ее звезде-хозяйке, считается, что по температуре ее поверхность близка к поверхности Марса ($-39\text{ }^{\circ}\text{C}$) из-за очень низких показателей температуры и светимости самой звезды. Возможно, здесь важнее всего то, что планетные системы Проксима Центавра и α Центавра В наиболее близки к нашей Солнечной системе — и предоставляют наилучшие перспективы для исследования экзопланет с помощью автоматизированных космических аппаратов.

Реальное количество планет, распределенных по типам, остается неопределенным. Это связано с тем, что наиболее эффективные методы поиска планет — метод радиальных скоростей (он же метод Доплера) и метод транзитов — ориентированы на обнаружение крупных планет вблизи звезд-хозяек. Первый метод основан на том, что притяжение планеты вызывает возмущения в орбитальном движении звезды. Планеты с большей массой и/или те, что расположены ближе к своей звезде, будут вызывать самые заметные колебания. В основе второго метода — то, что планета, проходя на фоне звезды, значительно заслоняет свет последней. Чем больше планета, тем более резким будет итоговый спад общего блеска во время ее транзита. И чем ближе планета к своей звезде, тем больше вероятность того, что мы увидим, как она пройдет по диску звезды в своем истинном виде. Поэтому в текущем «урожае» экзопланет очень много планет размером с Юпитер, находящихся в пределах орбиты, эквивалентной орбите Земли.

Несмотря на эти погрешности наблюдений, астрономы нашли довольно много других планет, не столь массивных и достаточно далеких от своих звезд, что позволяет предположить наличие жидкой воды на их поверхности. Более того, полученные массы и размеры планет позволили ученым высказать догадки об их общем строении — иными словами, о том, являются ли они в основном газообразными, жидкими/ледяными или каменистыми. У нас уже есть и наглядные примеры «суперземель» с глубокими океанами, расположенными в пределах так называемой обитаемой зоны, и маленькая группа каменистых планет, подобных Земле. Между тем количество звезд с обнаруженными планетами, по-видимому, указывает на то, что почти у всех звезд должна быть хотя бы одна планета. Учитывая, сколько звезд могут странствовать по диску нашей Галактики, эта оценка предполагает, что где-то там, в космических безднах, находится от 100 до 400 миллиардов планет.

Исполняя свою миссию, «Кеплер», как мы уже упоминали, досконально исследовал весьма удаленные звезды на небольшом участке неба, устремив свои телескопы к созвездиям Лебедя и Лиры. Новая миссия с космическим телескопом *TESS*, запу-

шенная в апреле 2018 года, исследует звезды, расположенные ближе к нам, — но по всему небосводу. Она уже собирает свой «урожай» в нескольких новых экзопланетных системах, которые именно по причине их близости к нам можно точнее распознать в ходе спектроскопических наблюдений, осуществляемых при помощи наземных телескопов, а теперь и космического телескопа «Джеймс Уэбб».

Чтобы узнать о звездах и их планетах более подробно, нам нужно будет расширить наши горизонты далеко за пределы того, что мы исследовали в этой главе, и рассмотреть весь Млечный Путь. В следующей главе мы постараемся выполнить эту задачу — и познакомимся с разнообразным звездным, туманным и темным содержимым нашей Галактики, а также с ее изумительной структурой и движущими силами.

7

Галактика Млечный Путь

Предметом нашего наблюдения была сущность или материя Млечного Пути. При помощи зрительной трубы ее можно настолько ощутительно наблюдать, что все споры, которые в течение стольких веков мучили философов, уничтожаются наглядным свидетельством, и мы избавимся от многословных диспутов. Действительно, Галактия является не чем иным, как собранием многочисленных звезд, расположенных группами. В какую бы его область ни направить зрительную трубу, сейчас же взгляду представляется громадное множество звезд, многие из которых кажутся достаточно большими и хорошо заметными. Множество же более мелких не поддается исследованию¹.

Галилео Галилей. Звездный вестник

Млечный Путь с самых давних времен поражал и пленял нас своей красотой. В ясные безлунные ночи наши восхищенные прародители поднимали взгляд к небесам и любовались блистающей призрачной лентой. Несомненно, их влекла эта изумительная картина. Неоднородный облик Млечного Пути, что раскинулся по небу от края до края, лег в основу бесчисленных мифов о происхождении нашего мира. В них Млечный Путь становился и тро-

¹ По изданию: *Галилео Галилей. Избранные труды*: В 2 т. / Пер. и примеч. И. Н. Веселовского. М.: Наука, 1964. Т. 1. С. 37.

пой, по которой путешествуют бессмертные; и рекой, разделившей влюбленных; и шествием темных существ на светлом фоне; и молоком, пролившимся из груди богини-кормилицы.

В наши дни трудно воссоздать те чувства, которые, должно быть, испытывали наши далекие предки, глядя на Млечный Путь. Искусственное освещение почти полностью скрыло от нас величественные панорамы ночного неба. И даже в моем родном Рокпорте, штат Массачусетс, в доме, который находится на побережье и с трех сторон окружен океаном, приходится бороться со световым загрязнением от ближайших южных городов.

Границы Галактики

Со времен «звездных собраний», о которых писал Галилей, мы уже узнали, что Млечный Путь — это наш «внутренний» взгляд на сплюснутую звездную систему. Общий план нашей Галактики и та точка, с которой на нее смотрим мы, показаны на рис. 7.1. Если последовать от внутренних пределов наружу, то в строении Млечного Пути выделяются балдж, диск и гало. Солнце и Солнечная система пребывают в диске, примерно на отметке в две трети пути от балджа, расположенного в центре, к внешним областям. Плоский диск содержит почти все звезды, заметные на ночном небе; что же касается невидимых объектов, то их в нем намного больше.

Затемняющий эффект межзвездной пыли, которой заполнен диск, скрывает от нашего взгляда все, что происходит за пределами горизонта в несколько тысяч световых лет, если смотреть в направлении центра Галактики, — а он еще на 27 000 световых лет дальше. Эта пыль состоит из микроскопических крупиц ледяных силикатов и графитов, которые соседствуют со сгустками водорода и гелия, имеющими вид гигантских темных звездообразующих облаков. Свет, проходя сквозь них, теряет яркость, — и тем самым именно они в ответе за неоднородный облик Млечного Пути. По всей видимости, и сами эти облака, и звезды, рожденные в них, располагаются вдоль спиральных рукавов, хотя астрономы до сих пор не уверены, в форме какого узора должны

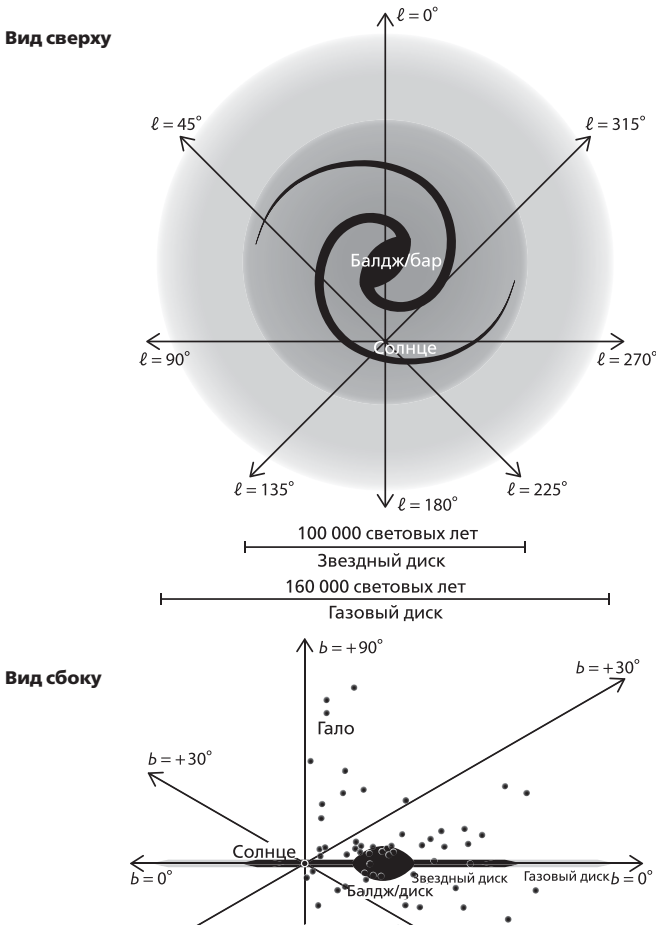


Рис. 7.1. Схематичные изображения Млечного Пути в том виде, в каком он предстает перед наблюдателями, находящимися далеко за его пределами. Эти виды основаны на сочетании наблюдений и последующих объяснительных моделей. *Вверху:* Млечный Путь, вид сверху. Заметны центральный балдж и звездный бар (перемычка), окруженные диском из звезд и газа, а также спиральные рукава в диске — недавние свидетельства звездообразующей активности. Также представлено расположение галактических долгот с началом отсчета в Солнце. *Внизу:* Млечный Путь, вид сбоку. Заметны центральный балдж / звездный бар, тонкий диск из звезд и газа, а также гало, содержащее шаровые звездные скопления (показаны) и значительное количество темной материи (не показана). Также представлено расположение галактических широт с началом отсчета в Солнце. (Источник: *The Milky Way*, W. H. Waller.)

предстать эти рукава на самом деле. Массивные облака, перемежающаяся вокруг центра Млечного Пути по орбитам протяженностью в сотни миллионов лет, олицетворяют будущее нашей Галактики.

Следующий компонент Млечного Пути — балдж — замечен невооруженным глазом. Он простирается поверх темного диска и под ним к созвездиям Стрельца, Змееносца и Скорпиона. В бинокль можно увидеть, как «звездные облака» очерчивают в пыльной дымке границы «окошек», сквозь которые просматриваются звезды балджа. Как и у других галактик, в балдже Млечного Пути присутствуют в основном желтые, оранжевые и красные звезды. Эта ограниченная палитра контрастирует с полным диапазоном звездных цветов, видимых на диске. Насколько можно судить, балдж содержит в основном старые холодные звезды, а диск по-прежнему остается родным домом для молодых горячих голубых звезд и для богатого наследия из более старых звезд с красноватым оттенком.

Форма балджа остается спорной. По крайней мере одна его часть выглядит явно вытянутой, в виде бара (перемычки), наклоненного примерно на 45° к нашему лучу зрения. Другие галактики, имеющие тонкие диски и спиральные рукава, тоже содержат подобные центральные бары (см. гл. 8). Если смотреть издалека, Млечный Путь был бы сочтен спиральной галактикой с баром. Галактика M109, расположенная в созвездии Большой Медведицы и отдаленная от нас на 46 млн световых лет — это близкая аналогия к тому, как мог бы выглядеть наш Млечный Путь (рис. 7.2).

Еще один компонент Млечного Пути — гало — был бы невидим, если бы не шаровые звездные скопления, которых в нем очень много. Эти плотные группы, насчитывающие от тысяч до миллионов звезд, восходят к древнейшим временам, когда Млечный Путь еще формировался из хаоса сталкивающейся и сливающейся материи, наступившего вслед за Большим взрывом. Сегодня шаровые скопления «населены» только долгоживущими звездами с малой массой. Более массивные недолговечные звезды давным-давно исчезли, оставив лишь напоминание о том, как, должно быть, выглядели скопления в далеком прошлом. И все же они даже сейчас выглядят потрясающе — словно броши с драго-



Рис. 7.2. Вероятно, если смотреть издалека, Млечный Путь напоминал бы спиральную галактику M109, показанную на снимке. (Материалы любезно предоставлены: S. Swanson and A. Block. Источник: Национальная обсерватория оптической астрономии, Ассоциация университетов по исследованию в области астрономии, Национальный научный фонд.)

ценными камнями на черном бархате. Хороший любительский телескоп позволит вам в полной мере впечатлиться красотой этих звездных «елочных игрушек».

Гало и балдж в совокупности составляют сфероидальный компонент Галактики. В них есть старые звезды, у которых не хватает тяжелых элементов (хотя в балдже присутствуют и богатые металлом звезды разного возраста). Стремительные движения звезд и газа в диске навели астрономов на мысль о том, что сфероидальный компонент «населен» чем-то еще. Это невыразимое «нечто», наделенное невероятно огромной массой, своим притяжением удерживает в диске подвижные звезды и газ и тем самым защищает нашу Галактику от рассеивания в небытие. Астрономам еще не удалось даже мельком увидеть это гравитирующее вещество, и поэтому его окрестили «темной материей». Поиски различных экзотических частиц, которые, согласно предположениям ученых, составляют эту темную материю, ведутся и сегодня. Пока что убедительных кандидатов нет (см. гл. 13). Но астрономы, несмотря на неудачу, по-прежнему считают, что галактики состоят

в основном из гало темной материи и небольшой доли обычной материи, сосредоточенной в их «густонаселенных» балджах и вращающихся дисках, свет которых рассеивает тьму и — в случае Млечного Пути — оберегает наше наследие.

Компоненты Галактики

Многое из того, что мы знаем о компонентах Млечного Пути — диске, балдже и гало, — стало известным в ходе кропотливой работы, направленной на установление точных расстояний. В третьей и шестой главах мы говорили о том, что определять расстояния до звезд в окрестностях Солнца нам прежде всего помогал метод геометрического параллакса. Как мы помним, он зависит от орбиты, по которой Земля движется вокруг Солнца, — она становится базисной линией для триангулирования расстояний до ближайших звезд. Однако, чтобы эффективно исследовать Вселенную за пределами окрестностей Солнца, астрономам пришлось обратиться к другим методам, подходящим для иных, более обширных протяженностей. В масштабах Млечного Пути лучшими ориентирами оказались звездные скопления.

Звездные скопления

Некоторые звездные скопления можно увидеть невооруженным глазом. К ним относятся Плеяды («Семь Сестер»), расположенные в созвездии Тельца (рис. 7.3); Гиады, составляющие морду быка в этом же созвездии; и двойное скопление в созвездии Персея. Если рассмотреть Млечный Путь в бинокль, вы обнаружите множество других размытых объектов, в которых при ближайшем рассмотрении в телескоп можно распознать звездные скопления. Их много в созвездиях Близнецов и Возничего, расположенных неподалеку друг от друга, и за ними легко наблюдать в бинокль и небольшие телескопы. Как и другие 110 нечетких объектов, впервые внесенные в каталог Шарля Мессье в 1784 году, эти звездные скопления обозначаются литерой М (*Messier*); в таких созвездиях, как Близнецы и Возничий, наиболее заметны скопления М35, М36, М37 и М38.

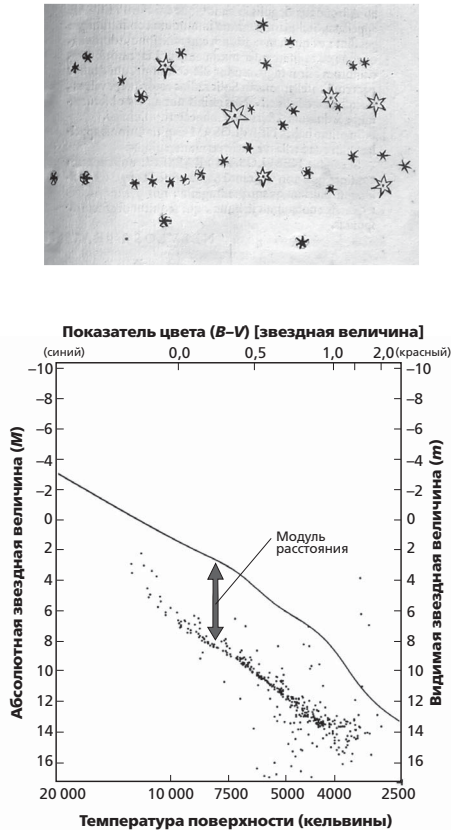


Рис. 7.3. Вверху: звездная карта скопления Плеяд (M45), составленная Галилеем и основанная на его новаторских телескопических наблюдениях. Внизу: современное сравнение показателей звездных цветов (B-V) и видимых звездных величин (m) в скоплении Плеяд, представленных извилистой линией, по сравнению с калиброванными цветами и абсолютными звездными величинами (M), установленными для звезд главной последовательности. Разница между видимой и абсолютными звездными величинами ($m - M$) известна как модуль расстояния, по которому можно рассчитать отдаленность скопления. В данном случае этот модуль равен 5,6 звездной величины, а значит, скопление отдалено на 132 парсека (475 световых лет). (Вверху: По источнику *Siderius Nuncius* [«Звездный вестник»], G. Galilei, Venice, Italy, 1610. Изображение любезно предоставлено: History of Science Collections, University of Oklahoma Libraries. Внизу: на основе интерактивной программы, применимой для звездных скоплений, автор: К. Лее. Источник: Университет Небраски в Линкольне.)

Звездные скопления настолько хорошо помогают нам измерять космическую протяженность в первую очередь потому, что каждая из их звезд отдалена от нас примерно на одно и то же расстояние. А значит, изменения блеска от звезды к звезде можно рассматривать как реальные различия в их светимости. Аккуратно измерив поток света от каждой звезды, входящей в скопление, астрономы смогли построить диаграммы «цвет — звездная величина», на которых показаны звезды главной последовательности (рис. 7.3). Сравнив их с «аналогами» из полностью откалиброванной подборки ближайших звезд, можно определить модуль расстояния того или иного скопления ($m - M$) и его соответствующую отдаленность (см. подпись к рис. 7.3). Этот важный метод известен как подгонка к главной последовательности.

Начав с ближайших скоплений, таких как Плеяды и Гиады, астрономы применили аналогичный подход к определению расстояний до звездных скоплений на значительной части диска, а также в пределах гало. Эти оценки стали важнейшим «каркасом», на основе которого были построены модели, уточняющие общее строение Млечного Пути (как показано на рис. 7.1).

И природа, и облик звездных скоплений рождают в душе восторг. Одни из них обладают полной палитрой спектральных цветов: в них есть голубые, желтые, красные звезды; в других — только желтые и красные. Подробный анализ диаграмм «цвет — звездная величина», характеризующих скопления, позволил показать, что различное звездное население можно описать в показателях соответствующего возраста звезд (рис. 7.4). Ключ к такому описанию — определить цвет и светимость в той точке, где обрывается главная последовательность, образованная звездами скопления. Эта область на диаграмме называется точкой поворота главной последовательности; ее занимают звезды, уже близкие к тому, чтобы закончить свою нормальную жизнь и стать красными гигантами. Если в скоплении с такой точкой есть горячие голубые звезды, значит, оно относительно молодо, поскольку им еще предстоит эволюционировать, покинуть главную последовательность и в конечном счете исчезнуть. Однако, если скопле-

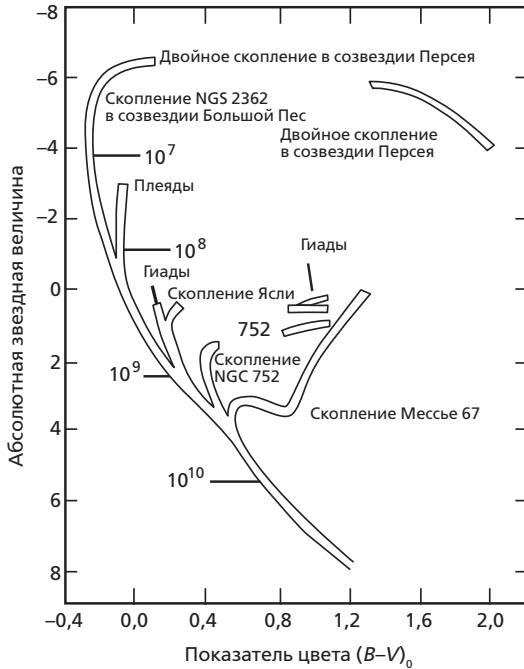


Рис. 7.4. Составная диаграмма «цвет — звездная величина» для заметных звездных скоплений в диске Галактики. Для двойного звездного скопления в созвездии Персея характерна «густонаселенная» главная последовательность; в ней есть и горячие недолговечные звезды класса В, что указывает на молодой возраст скопления — около 10^7 лет. А вот в главной последовательности Плеяд уже нет столь горячих звезд с высокой светимостью, значит, скопление старше — ему 10^8 лет. У Гиад главная последовательность усечена еще сильнее, а возраст скопления — 10^9 лет. (По источнику: *The Milky Way*, B. J. Bok and P. F. Bok, 5th edition, Harvard University Press [1981], со ссылкой на источник: H. L. Johnson and A. R. Sandage, *Astrophysical Journal*, vol. 121 [1955], pp. 616–627.)

ние с такой точкой «населено» желтыми или красными звездами, значит, свои более горячие, голубые, яркие и массивные звезды оно уже утратило. Видя точку поворота главной последовательности, характерную для скопления, и зная установленные соотношения цвета, светимости и времени жизни звезд — о последних мы говорили в шестой главе, — астрономы могут рассчитать, как долго живут звезды главной последовательности, совершающие

этот переход, и благодаря этому вычислить возраст всего скопления. Как оказалось, большинству звездных скоплений в диске не более нескольких миллиардов лет.

Такое впечатление, что условия в диске неблагоприятны для сохранения целостности звездных скоплений. Вероятно, рассеяние их родительских облаков и сближение с другими звездными скоплениями и газовыми облаками привело к тому, что большинство этих звездных коллективов подверглись гравитационным возмущениям и, в конечном итоге, рассеялись. Многие астрономы считают, что Солнце и Солнечная система родились как часть довольно большого скопления, однако за 4,6 млрд лет, прошедших с момента его образования, оно распалось. И сейчас мы, по всей видимости, живем в одной из многих осиротевших солнечных систем, скитающихся по диску, — и живем, как странники среди других странников.

Условия в гало гораздо более благоприятны для пребывающих там шаровых звездных скоплений. Их орбиты, по большей части, проходят вдали от переполненного диска, и шаровые скопления могут находиться в гало гораздо дольше без каких-либо провокаций. Аналогичные методы датирования показали, что шаровые скопления очень древние: их возраст составляет 11–13 млрд лет. Это нижний предел возраста самого Млечного Пути и всей галактической Вселенной.

Суперзвезды

В шестой главе мы упоминали, что в окрестностях Солнца преобладают тусклые красные звезды, которые можно увидеть только в телескоп. А вот на ночном небе, видимом невооруженным глазом, господствуют суперзвезды — светила настолько яркие, что их можно наблюдать с больших расстояний. Посмотрим на созвездие Ориона. Все его заметные звезды необычайно далеки от нас и ярки. Самая яркая из них — Ригель (β Ориона А) — голубой сверхгигант, удаленный от нас примерно на 900 световых лет. Он в 79 раз больше Солнца и светит в 120 000 раз сильнее. Бетельгейзе (α Ориона) — красный сверхгигант, который, как считается, находится от нас в 520 световых годах. Хотя эта суперзвезда намного холоднее Ригеля,

она настолько огромна, что ее поверхность излучает свет, как 120 000 солнц, только на более длинных волнах. Ее прямое изображение показало размер, способный вместить тысячу солнц. И более того, если бы она заменила Солнце, расположившись в центре Солнечной системы, то поглотила бы все планеты вплоть до Юпитера. Диапазон звездных размеров показан на рис. 7.5.

В отличие от ситуации со звездными скоплениями, расстояния, размеры и светимость этих отдельных суперзвезд гораздо менее определены. Анализ звездных спектров позволил астрономам обнаружить характерные признаки, связанные со степенью «распухания» звезды. Например, у относительно компактной звезды главной последовательности имеется плотная излучающая атмосфера, давление которой ведет к формированию стремительного «роя» атомов и к соответствующему доплеровскому уширению спектральных линий поглощения. А у красного сверхгиганта, подобного Бетельгейзе, атмосфера более разрежена, и давление в ней низкое, отчего спектральные линии поглощения будут намного более узкими,

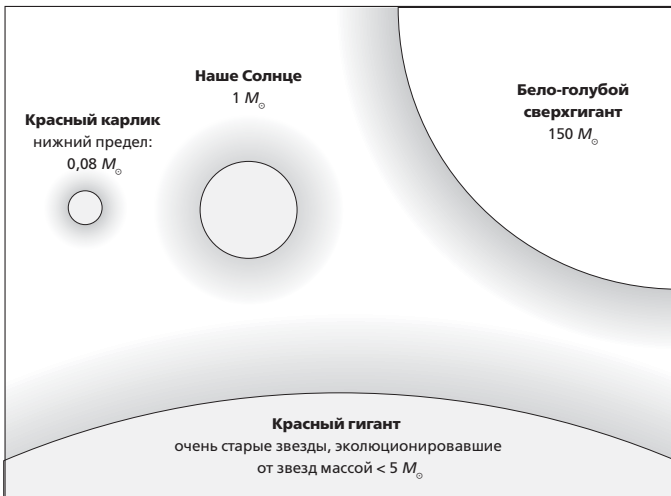


Рис. 7.5. Сравнение размеров звезд — от красного карлика до Солнца и гораздо более крупных звезд-гигантов. (Изображение любезно предоставлено Европейским космическим агентством и космическим телескопом «Хаббл».)

чем у звезды главной последовательности с аналогичными показателями. При помощи таких спектральных характеристик астрономы распределили звезды главной последовательности, гигантов и сверхгигантов по классам светимости — таким сверхгигантам, как Бетельгейзе, был присвоен класс светимости I, а звездам главной последовательности, подобным Солнцу, — класс светимости V. Эти классификации и дополнительные сведения о том, какие наблюдаемые свойства проявляются в скоплениях у звезд эквивалентного типа, помогли оценить размеры излучающей поверхности и светимость отдельных звезд-гигантов и сверхгигантов, а также установить расстояние до них с погрешностью около 25 %.

Стоит признать, что ситуация непростая, но астрометрическая миссия *Gaia* смогла ее значительно улучшить. Этот европейский космический аппарат, запущенный в декабре 2013 года, призван измерить геометрические параллаксы и, следовательно, определить расстояния до 20 миллионов звезд с точностью лучше 1 %. Кроме того, он с точностью лучше 10 % рассчитывает расстояния еще до 200 миллионов звезд — вплоть до тех, что располагаются в центре Галактики. Объединив данные о расстояниях с показателями скорости, которые тоже измерит *Gaia*, астрономы наконец-то смогут составить трехмерную карту звездного устройства Млечного Пути — и поймут, как все эти звезды движутся по Галактике. И, как будто этого недостаточно, ожидается, что *Gaia* обнаружит тысячи новых экзопланетных систем.

Переменные звезды

В пятой главе мы говорили о том, что световой поток, исходящий от нашего Солнца, непостоянен и что для Земли это может иметь потенциально серьезные последствия. В среднем светимость Солнца меняется примерно на 1 часть из 1000 (0,1 %), при этом ультрафиолетовая область солнечного спектра где-то в 15 раз более непостоянна (1,5 %). Теперь рассмотрим настоящие пульсирующие переменные, которые странствуют по Млечному Пути. Впервые их заметили в начале XVII века. Их еще называют физическими

переменными звездами. Они имеют всевозможные размеры, цвета и светимость (рис. 7.6). (Периодические изменения блеска происходят и у затменно-двойных звезд, когда одна из них проходит перед спутницей. Эти системы необходимы для определения звездных масс [см. гл. 6], но здесь мы их рассматривать не будем.)

Степень изменений у физических переменных звезд может варьироваться от нескольких десятков или сотен процентов (у переменных типа RR Лиры) до нескольких миллионов процентов (у мирид — переменных типа Миры в созвездии Кита). Кроме того, периоды изменения блеска зависят от спектральных

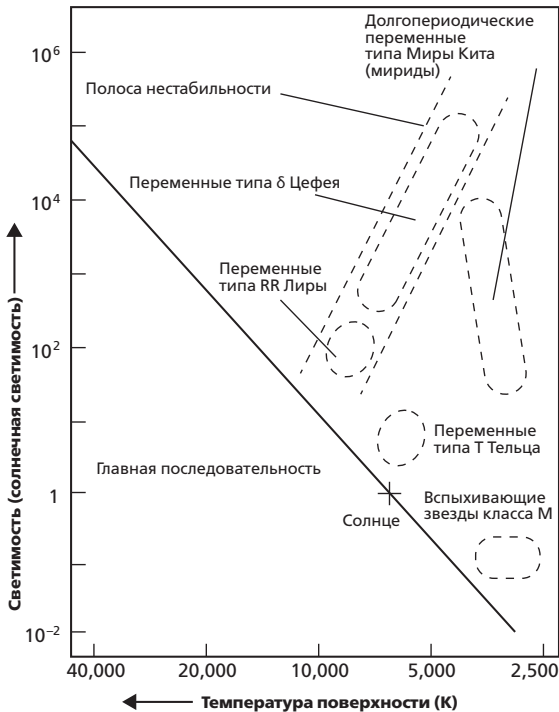


Рис. 7.6. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела, на которой показаны некоторые из многих типов физических переменных звезд. Полосу нестабильности занимают звезды, которые пульсируют на резонансных частотах, откликаясь на внутренние возмущения. (По источнику: *Discovering the Essential Universe*, N. F. Comins, 3rd Edition, W. H. Freeman [2006].)

классов звезд. Скажем, переменные типа RR Лиры — это гиганты класса А; у них периоды пульсаций длятся от нескольких часов до нескольких дней. Переменные типа δ Цефея, или цефеиды, — это гиганты и сверхгиганты классов F–K; периоды пульсаций у них занимают от нескольких дней до нескольких месяцев. Мириды, также известные как долгопериодические переменные, — это красные гиганты, которые близки к концу своей жизни. Этим нестабильным звездам требуются месяцы или годы, чтобы медленно, но радикально изменить свою светимость.

«Бродячий цирк» пульсирующих переменных поражает своим разнообразием. В его «красном» конце, где располагаются переменные с низкой светимостью, присутствуют вспыхивающие звезды класса М. Их масса мала, а их вспышки ассоциируются с магнитными бурями в звездной атмосфере. Несколько более высокой светимостью обладают переменные типа Т Тельца, очень молодые звезды, которым еще предстоит занять свое место на главной последовательности. Их светимость сравнительно выше, поскольку эти «звездные младенцы» еще излучают гравитационную энергию, высвобожденную во время их формирования. Изменения в звездах типа Т Тельца происходят без какой-либо периодичности и носят очень бурный характер, что, опять же, приписывают магнитным возмущениям в их атмосферах.

При более высоких светимостях полоса нестабильности на диаграмме Герцшпрунга — Рассела отходит от главной последовательности вверх, к ветви сверхгигантов. В этой области диаграммы, рядом с диагональю, демонстрирующей взаимосвязь температур звездной поверхности и светимости, располагаются переменные типа RR Лиры и цефеиды. Внутренние условия в звездах, занимающих эту полосу, приводят к динамической нестабильности, когда определенные слои то сдерживают, то высвобождают энергию, которая исходит из нижележащих слоев. Действие этого излучающего «клапана», или каппа-механизма, приводит к тому, что внешние слои звезды в прямом смысле вздымаются и опадают, а в унисон с их движениями периодически возрастают и уменьшаются и температура поверхности, и светимость.

Переменные типа RR Лиры, которые, как правило, встречаются в шаровых скоплениях и других частях более древнего сфероидального компонента Галактики, пульсируют с достоверно установленной светимостью около 50 солнц ($M_v = 0,6$ звездной величины). Эта характерная средняя светимость позволяет использовать их в качестве так называемой «стандартной свечи», с помощью которой астрономы могут измерить расстояния до шаровых скоплений и других галактических областей, содержащих эти звезды. Например, наблюдения за многими переменными типа RR Лиры, пребывающими в галактическом балдже, показали, что балдж — и охваченный им центр Галактики — находится на расстоянии около 27 000 световых лет от нас.

Вдоль полосы неустойчивости были обнаружены два вида цефеид. «Классические», или цефеиды I типа, располагаются в диске, а цефеиды II типа, обладающие меньшей светимостью, обычно «населяют» гораздо более старые шаровые скопления, принадлежащие гало. Для сверхгигантов-цефеид I типа удалось установить критически важное соотношение, позволившее астрономам определять расстояния до звезд, которые находились далеко за пределами Млечного Пути. Наблюдая за цефеидами в Малом Магеллановом Облаке (одной из ближайших галактик — спутников Млечного Пути), астрономы в начале XX века выявили тесную взаимосвязь: оказалось, что у цефеид с более высокой светимостью периоды изменений длились дольше. Зависимость «период — светимость» была выверена по ближайшим к нам цефеидам, расположенным в диске Млечного Пути, и с тех пор помогает нам определять расстояния до любой галактики, если наши телескопы, разбирая ее на звезды, находят в ней цефеиды.

Наблюдая за световым потоком удаленной цефеиды от нескольких дней до нескольких недель, астроном может установить период изменения блеска звезды. Затем его можно преобразовать в светимость звезды, сравнить эту светимость с видимой звездной величиной — и вычислить, насколько далеко от нас находится звезда. Взаимосвязь периода и светимости цефеид впервые обнаружила Генриетта Ливитт в 1912 году, а в 1920-х годах Хар-

лоу Шепли при помощи этого соотношения установил пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике, и с тех пор мы с его помощью находим расстояния до галактик, удаленных от нас на десятки миллионов световых лет.

При наибольшей светимости верхний предел целостности звезд очерчивают голубые переменные звезды. Поток фотонов с поверхности этих новорожденных «крикунов» настолько велик, что полностью дестабилизирует внешние слои и сдувает их, рождая ветры колоссальной силы. Сейчас такие драматические вспышки происходят на звезде η Киля, расположенной в 7500 световых годах от нас в южном созвездии Киля. Ее самая мощная зарегистрированная вспышка произошла в 1843 году, когда она, несмотря на удаленность, была второй по блеску небесной звездой, уступая лишь Сириусу. С тех пор η Киля образовала из вырывающихся наружу газов небольшую биполярную туманность в форме изящных песочных часов. Когда она снова вспыхнет — или взорвется целиком — остается только гадать.

Газовые туманности

Вокруг галактического диска вращается примерно 6000 огромных облаков, состоящих из молекулярного газа и пыли. Каждое из них простирается на десятки-сотни световых лет и содержит туманное вещество, размер которого эквивалентен более чем миллиону солнц — и все это при температуре всего на несколько градусов выше абсолютного нуля ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Эти холодные темные облака примерно на 73 % состоят из молекулярного водорода, на 25 % — из атомарного гелия, а на остаток приходится незначительная доля других молекул, таких как монооксид углерода и формальдегид, наряду с дымкой из микроскопических пылинок. Некоторые из этих пылевых облаков предстают перед нами в виде «темных туманностей», силуэты которых выделяются на сияющем звездном фоне Млечного Пути. Большой Провал, разделивший созвездия Орла и Лебедя, туманности Курительная Трубка в созвездии Змееносца и Угольный Мешок в созвездии Южного Креста — вот

яркие примеры относительно близких к нам молекулярных облаков, скрывающих свет далеких звезд. Индейцы кечуа, живущие в Андах на территории Перу, воспринимали эти разнообразные темные области в сияющем Млечном Пути в обликах лисы, ламы, куропатки и разных мифических существ, тем самым изменив привычный взгляд на Млечный Путь как на светлую область на фоне черных небес.

Сейчас астрономы изучают темные туманности, наблюдая за светом, излучаемым их молекулами. Если учесть, что все это происходит при криогенных температурах, то по большей части свет излучается в низкоэнергетической микроволновой области электромагнитного спектра. Хотя молекулярный водород на сегодняшний день — это самая распространенная молекула, излучает он крайне слабо, за исключением случаев, когда его активизируют сильное ультрафиолетовое излучение или ударные волны, возникающие в межзвездной среде. А вот монооксид углерода легко излучает любую энергию, полученную им от звезд, космических лучей и даже от космического микроволнового фона. Его высокая излучательная способность помогла астрономам составить карту пространственного распределения молекулярных облаков по всему диску Галактики. Оказалось, что облака тяготеют к вращению в пределах кольца, которое охватывает область от 11 000 до 23 000 световых лет от центра Галактики, а также были получены некоторые намеки на то, что облака располагаются вдоль спиральных рукавов, хотя точное количество и форма рукавов остаются спорными.

Пристальное наблюдение за крупнейшими молекулярными облаками с акцентом на монооксиде углерода и других излучающих молекулах показало, что эти облака огромны и сложны по структуре, — каждое из них простирается на сотни световых лет и содержит молекулярный водород, по массе эквивалентный миллиону солнц. И более того, тысячи гигантских молекулярных облаков, заполнивших центр Галактики, — это самые крупные объекты из всех, что присутствуют в Млечном Пути. Внутри этих исполинов происходят удивительные метаморфозы и сгущается молекулярный газ, что в конечном итоге ведет к появлению новых

звездных скоплений, а они, в свою очередь, оказывают энергетическую «обратную связь» на родительские облака, вызывая всевозможные структурные изменения и эмиссионные явления.

В Сети по запросу «Млечный Путь» вы, без сомнения, найдете замечательные снимки и картины, запечатлевшие нашу Галактику и множество живописных темных туманностей, которые подобны волнам, набегаящим на звезды. Может быть, вам посчастливится увидеть и небольшие, более яркие газовые области, светящиеся розовыми оттенками. Простой поиск по слову «туманности» позволит вам увидеть их потрясающе красивые снимки, снятые крупным планом.

Эмиссионные туманности делятся на три основных типа: области Н II, планетарные туманности и остатки сверхновых. Области Н II — это части молекулярных облаков, недавно сформировавших сотни или тысячи звезд, организованных в скопления. Самые массивные из этих звезд невероятно горячие и мощные. В частности, их ультрафиолетовое излучение расщепляет молекулы газа на атомы, а затем срывает с атомов их самые внешние электроны. В ходе этой фотоионизации из положительно заряженных ионов и отрицательно заряженных электронов, вместе имеющих отличительную температуру в несколько тысяч градусов, образуется плазма. Наименование «Н II» относится к однократно ионизированному состоянию водорода, тогда как «Н I» обозначает нейтральный атомарный водород. Имея только один электрон, водород может существовать только в формах Н I и — после ионизации — Н II.

Фотоионизированный водород излучает на определенных длинах волн всегда, как только электрон вновь захватывается ионом водорода, а затем перескакивает на более низкие энергетические уровни. Именно его скачок с третьего на второй квантованный энергетический уровень приводит к появлению рубиново-красного свечения, столь характерного для многих снимков эмиссионных туманностей, сделанных с большой глубиной резкости. В видимой части водородного спектра присутствуют более слабые эмиссионные линии бирюзового, синего и фиолетового цветов. У других атомов больше электронов, доступных для ионизации, и поэтому

у них проявления состояний ионизации и соответствующих пере-скоков электронов могут быть более разнообразными. В областях Н II ионы кислорода (О II и О III), азота (N II) и серы (S II и S III) светятся различными цветами — красным, зеленым, синим, фиолетовым, — в зависимости от специфических скачков в квантованных энергетических состояниях их оставшихся внешних электронов. На фотографиях областей Н II, снятых на длинной выдержке, часто видны разноцветные полости и пузырьки облученного газа, который испаряется под воздействием света. Некоторые из этих «рабочих поверхностей» имеют протуберанцы, обращенные внутрь, к отдающим энергию звездам. Эти газопылевые «скульптуры» напоминают размытые ливнем «эрозионные столбы», которые возвышаются над округой в Брайс-Каньоне и в других местах, подпавших под атмосферные воздействия. Наблюдения в инфракрасном диапазоне показали, что в этих запутанных областях много сложных органических молекул. И более того, на наших глазах в этих наполненных энергией экосистемах зарождается пребиотическая химия. Самая известная область Н II — это туманность Ориона (М42), расположенная в одноименном созвездии в районе меча, «подвешенного» (довольно угрожающе) на поясе Ориона. В хороший любительский телескоп прекрасно видна и она сама, и ее восхитительные звезды. В число других известных областей Н II входят туманность Орел (М16) в созвездии Стрельца (обитель знаменитых «Столпов Творения») и туманность Киля в одноименном созвездии южного неба (ярчайшая эмиссионная туманность на небосводе и родина эруптивной [взрывной] звезды η Киля). С помощью космического телескопа «Хаббл», больших наземных телескопов и даже любительских телескопов мы получили удивительно красивые фотографии этих туманных объектов.

В то время как области Н II прослеживаются вокруг недавно возникших звездных скоплений, планетарные туманности характерны для умирающих звезд. В процессе эволюции звезды с массой от 0,8 до 8 M_{\odot} отходят от главной последовательности, на которой им свойственно ядерное горение водорода, и становятся гигантами, а энергию начинают получать благодаря синтезу гелия из

водорода, проходящему в их недрах. Внутренняя нестабильность приводит к тому, что в конечном итоге внешние звездные слои рассеиваются, порождая стремительные ветры, — и со временем обнажаются горячие ядра. Их ультрафиолетовое излучение фото-ионизирует исчезающие оболочки рассеиваемых газов, создавая горячую плазму, которая флуоресцирует цветами, характерными для ионов, входящих в ее состав. Эти небольшие эмиссионные туманности, впервые обнаруженные в начале XVIII столетия, изначально ассоциировались с планетами, — поэтому их и называют «планетарными». В наше время они по праву считаются одними из самых красивых небесных явлений, видимых в телескоп.

Третий ключевой тип эмиссионной туманности — это остатки сверхновой, свидетельствующие о взрыве некогда массивной звезды (или белого карлика). Звезды, масса которых превышает $8 M_{\odot}$, не останавливаются на переплавке гелия в углерод. Они могут продолжить плавить углерод в кислород, кислород в кремний, а кремний в железо, однако, как только в ядре звезды «выковано» железо, игра окончена. Создать более тяжелые элементы не выйдет, не поглотив энергию самой звезды. Бездействующее ядро быстро сжимается, превращаясь в нейтронную звезду или черную дыру, высвобождается гравитационная энергия — и происходит сильный взрыв, который отшвыривает прочь все оставшиеся звездные оболочки. Как известно, в итоге возникают туманности, представляющие собой остатки сверхновых типа II. В первые несколько тысяч лет выбросы, нагретые действием ударной волны, светятся на всех длинах волн — даже в самой высокоэнергетической точке электромагнитного спектра, в экстремумах рентгеновского и гамма-излучения. Крабовидная туманность (M1) в созвездии Тельца — известнейший пример этой мощной ранней фазы. В дальнейшем ударные волны, устремленные наружу, накапливаются и вызывают возбуждение газов во внешней межзвездной среде. Туманность Вуаль в северном созвездии Лебеда и остаток сверхновой в южном созвездии Паруса — хорошо знакомые версии этой завершающей фазы.

Другой тип сверхновой может возникнуть, когда в тесной бинарной звездной системе присутствует белый карлик. В какой-то момент

эволюции этой системы белый карлик начинает подпитываться веществом от близкого спутника до тех пор, пока его масса не превысит критическую, — а после этого происходит коллапс, и гравитационная энергия, обретшая свободу, расходится по всему белому карлику, разрывая его на куски. Такая сверхновая типа Ia производит остатки, богатые тяжелыми элементами, но совершенно лишенные водорода, поскольку водородные оболочки звезды давно рассеялись. Яркие примеры такого рода — остатки сверхновых Тихо и Кеплера.

За пределами диска и в гало астрономы обнаружили странные облака, состоящие из холодного нейтрального атомарного водорода и медленно плывущие по внешней окраине Галактики. Эти облака называются «высокоскоростными», но на самом деле движутся вокруг Галактики гораздо медленнее, чем диск, в котором находимся мы. Их скорость кажется высокой только в том случае, если смотреть на них с нашей вращающейся точки обзора. Сейчас нам известно примерно двадцать таких облаков — и около десяти

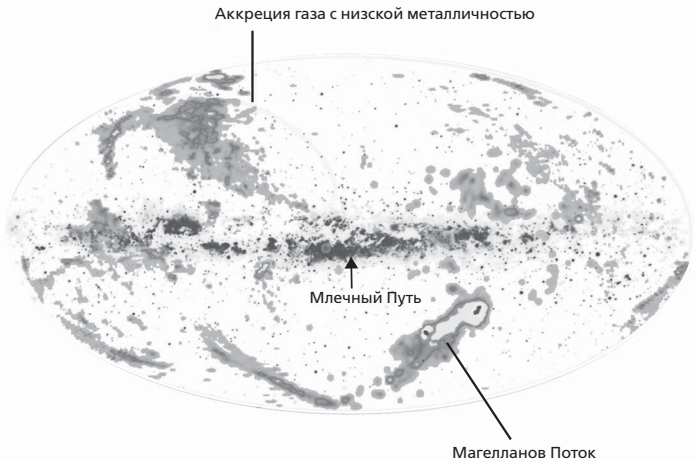


Рис. 7.7. Радиоастрономы обнаружили, что в галактическом гало присутствуют огромные облака атомарного водорода. Одно из крупнейших — Магелланов Поток. Он простирается от Большого и Малого Магеллановых Облаков (галактик-спутников Млечного Пути) на весь квадрант южного неба. (Автор композитного снимка: Ingrid Kallick [*Possible Designs*, Мадисон, Висконсин], данные: Bart Wakker [Висконсинский университет в Мадисоне].)

облаков промежуточной скорости, которые, по-видимому, приближаются к диску (рис. 7.7).

Хотя астрономы не уверены в их происхождении, высокоскоростные облака, скорее всего, относятся к первозданным — судя по тому, насколько в них распространены элементы, — и, по всей вероятности, представляют собой остатки исходного процесса формирования Галактики. Заметное исключение — Магелланов Поток, охватывающий большую часть южного небесного полушария. Скорее всего, этот высокоскоростной «облачный комплекс» выделился из Большого и Малого Магеллановых Облаков во время сближения этих галактик с Млечным Путем. По изобилию элементов в своем веществе Магелланов Поток, как и сами Магеллановы Облака, занимает промежуточное положение. Возможно, что облака промежуточной скорости, в отличие от большинства высокоскоростных облаков, могут представлять собой материю, прошедшую более сложную химическую эволюцию и некогда бывшую частью диска. Когда-то в прошлом — когда именно, нам неизвестно, — интенсивный всплеск звездообразующей активности в диске привел к выбросу этого вещества в гало. Теперь газ возвращается в диск в виде огромного галактического «фонтана».

Темное сердце Галактики

До развития радиоинтерферометрии в 1960-х и 1970-х годах о центре нашей Галактики было известно очень мало: его затемняют пылевые молекулярные облака, заполонившие диск вдоль нашего луча зрения. И более того, из примерно триллиона фотонов, исходящих из ядра Галактики, эту газопылевую полосу препятствий преодолевает, попадая на наши телескопы, только один видимый фотон. Однако радиоизлучение работает на гораздо более длинных волнах и поэтому может беспрепятственно проходить сквозь пылевые облака диска. Объединив несколько радиотелескопов в антенны, которые охватывают большие площади, астрономы смогли достичь углового разрешения, достаточного для составления подробных карт центра Галактики, — и обнаружили ком-

плекс характерных черт газообразных объектов, которые больше в Млечном Пути не проявляются нигде.

Волнение начинается с углового масштаба примерно в $2'$ — под таким углом с Земли видны крупнейшие лунные кратеры. При расчетном расстоянии в 27 000 световых лет эта угловая протяженность переводится в линейный размер, равный примерно 15 световым годам. Три рукава ионизированного газа, расположенные внутри фрагментированного кольца плотного молекулярного газа, образуют спиральный «круговорот», центр которого находится в ядре Галактики (рис. 7.8). Инфракрасное картографирование эмиссионной линии водорода, присутствующего в этих рукавах, выявило движения, совместимые с представлением о том, что газ одновременно стремится к ядру и вращается вокруг него. Само ядро испускает свет в форме синхротронного излучения — близкого к тому, которое производят наши мощнейшие ускорители заряженных частиц, — и электроны мчатся вокруг силовых линий магнитного поля со скоростью, близкой к скорости света. Все более эффективные комплексы радиотелескопов показывают, что размер излучающего ядра не превышает $1/10000$ светового года — это протяженность пояса астероидов нашей Солнечной системы. Итак, перед нами удивительно компактная «машина», способная разгонять субатомные частицы до релятивистских скоростей (скоростей, близких к скорости света) и таким образом создавать мощное синхротронное излучение.

Инфракрасное наблюдение в масштабе $1/10$ светового года позволило астрономам отслеживать отдельные звезды, идущие по орбитам вокруг неразрешенного галактического ядра. Нечто, расположенное в пределах этих орбит, заставляет звезды вращаться вокруг общего центра масс с периодами всего в несколько земных лет. Используя простое ньютоновское тяготение, астрономы подсчитали, что таинственный посредник, обладающий притяжением, имеет массу, эквивалентную примерно 4 млн масс Солнца, — и вся она сосредоточена в пределах периметра, не превышающего протяженность орбиты Плутона. Большинство астрономов уверены, что мы наблюдаем динамическое воздействие

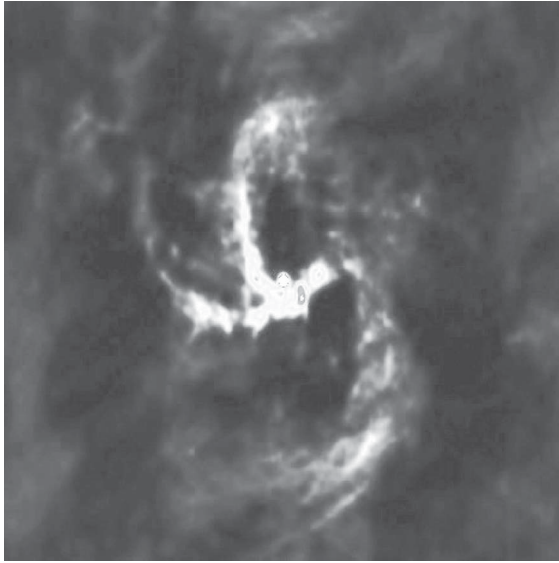


Рис. 7.8. Радиотелескопический снимок области ядра нашей Галактики. Миниспираль теплого ионизированного газа — Стрелец А — имеет размеры около 15 световых лет. Само ядро — Стрелец А* — является нетепловым источником синхротронного излучения, порожденного движением электронов с релятивистскими скоростями в присутствии сильных магнитных полей. В этой области почти не удалось выделить отдельные звезды, но она не может оказаться больше внутренней части Солнечной системы. (Материалы любезно предоставлены: F. Yusef-Zadeh, D.A. Roberts and W.M. Goss. Источник: Национальная радиоастрономическая обсерватория [Associated Universities Inc.], Национальный научный фонд.)

сверхмассивной черной дыры, скрытой в центре нашей Галактики. В числе других наблюдаемых эффектов можно упомянуть о странно изменчивом излучении, исходящем из области ядра в рентгеновском и гамма-диапазоне. Хотя ядро у нашей Галактики явно тусклое, если сравнить его активность с той, какую проявляют ядра некоторых других гигантских галактик, все же имеются все признаки того, что некогда оно было очень активным. И в недалеком будущем это может преподнести нам немало сюрпризов.

8

«Бродячий цирк» галактик и их космическая экспансия

История астрономии — это история удаляющихся горизонтов.

Эдвин Пауэлл Хаббл. Царство туманностей

Подобно гигантским кораблям, сияющим огнями в ночи, галактики придают необъятной и угрожающей тьме облик и суть. Почему природа выбрала эти самогравитирующиеся «сосуды» на роль пристанищ для большей части светящейся материи? Мы этого не знаем. Мы вполне способны представить мириады звезд и звездных скоплений, разбросанных по космосу, бессмысленных и аморфных, — или гораздо более крупные мегагалактики, простирающиеся на миллионы световых лет и содержащие сотни триллионов солнечных масс. Но астрономы обнаружили иное: оказалось, что большинство наблюдаемых галактик имеют размеры от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч световых лет, а их массы варьируются от нескольких миллионов до нескольких триллионов масс Солнца. Эти сравнительно ограниченные диапазоны размеров и масс перекликаются с размерами отдельных звезд, составляющими от одной десятой до тысячи радиусов Солнца, в то время как их массы варьируются в диапазоне от одной десятой массы Солнца до ста солнечных масс. Что же определяет границы галактики? Вероятно, про-

блемы, ограничивающие максимальные размеры и массы звезд и галактик, связаны со стабильностью. Если говорить о звездах, то дестабилизирующим фактором становится световая отдача этих гигантских источников термоядерной энергии. Если масса звезды превышает сотню масс Солнца или близка к этой величине, поток фотонов начинает преодолевать притяжение звезды и гонит газы прочь с ее оболочки. Что же касается галактик, то, по всей вероятности, их максимальные размеры ограничены гравитационной и приливной неустойчивостью. С другой стороны, минимальный предел размера и массы звезды установлен ее способностью синтезировать гелий из водорода в своих недрах. Массой менее $0,1 M_{\odot}$ обладают лишь коричневые карлики, сжигающие дейтерий, и планеты с еще меньшей массой, не способные поддерживать реакции ядерного синтеза. Зато никакие проблемы, связанные с получением энергии, не ограничивают минимальный размер и минимальную массу галактик. Вероятно, эти пределы установились иначе, в условиях, возникших вскоре после Большого взрыва, когда и образовалась большая часть галактик. Мы рассмотрим эти изначальные времена в девятой и десятой главах. Но сначала давайте поближе познакомимся с галактиками текущей эпохи, за которыми мы можем обстоятельно наблюдать.

Местная группа галактик

Подавляющее большинство небесных тел, заметных невооруженным глазом, находятся в нашем Млечном Пути. И видимые объекты в Солнечной системе, и каждая звезда, и звездные скопления, и темные облака, и эмиссионные туманности пребывают в нашем галактическом доме, кружась в вихре сосуществования. Редкие исключения из этого «отечественного производства» можно пересчитать по пальцам одной руки. Это Большое и Малое Магеллановы Облака, видимые в Южном полушарии; галактика Андромеды (M31), которую можно рассмотреть в Северном полушарии темными безлунными ночами; и ее гораздо более тусклый сосед —

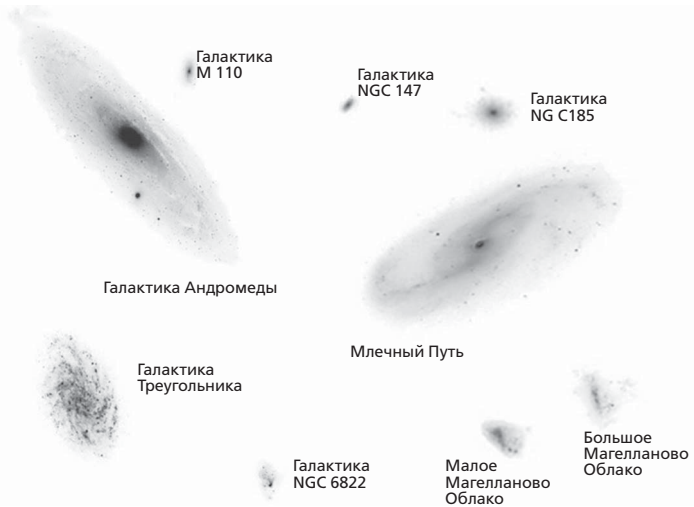


Рис. 8.1. Относительные размеры Млечного Пути, Магеллановых Облаков, галактики Андромеды (М31) и галактики Треугольника (М33) — крупнейших в Местной группе, — наряду с другими известными карликовыми галактиками. (По нескольким источникам.)

галактика Треугольника (М33) (рис. 8.1). По запросу «галактики, видимые невооруженным глазом» Интернет выдаст еще несколько названий, но без телескопов их могут различить лишь очень опытные наблюдатели. Безусловно, самые заметные из внегалактических объектов на видимом небе — это Магеллановы Облака, поскольку они гораздо ближе к нам, чем М31 или М33. Если учесть расстояния, то мы увидим, что М31 по размерам близка к Млечному Пути, далее следуют М33, Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако. В Местной группе еще сорок с лишним галактик, но они гораздо меньше и относятся к карликовым.

Галактики за пределами Местной группы

Наша Местная группа — это лишь одна из как минимум ста групп галактик, составляющих Местное сверхскопление (см. гл. 3). Большинство галактик, представленных в известных каталогах и атласах, входят именно в эту крупную структуру. Расстояния до них опреде-

лены достаточно достоверно, поскольку в большей их части наблюдались переменные звезды — цефеиды, так что размеры и светимость этих галактик тоже можно было с уверенностью установить.

Последовательность Хаббла

Изначально все, что нам было известно об этих галактиках, — это их облик на фотопластинках. Эдвин Хаббл первым смог увидеть некую систему в широком разнообразии их форм. В этом ему помогли снимки с большой глубиной резкости, полученные с помощью 100-дюймового (2,54 м) отражательного телескопа Хукера, который располагался на вершине обсерватории Маунт-Вилсон неподалеку от Лос-Анджелеса. Классификация Хаббла, впервые разработанная в 1926 году, легла в основу «камертона Хаббла», названного в честь создателя и показанного на рис. 8.2.

Взглянем на схему. Если идти слева направо, то мы увидим, что центральный сфероид становится все менее отчетливым, а диск — напротив, все более заметным. Сейчас нам уже известно, что в сфероиде звезды вращаются вокруг галактического центра, а в диске, как правило, движутся по круговым орбитам в одной плоскости. Спиральные рукава на диске плотнее всего у типов Sa и свободнее всего у типов Sc. Галактики, расположенные на зубцах

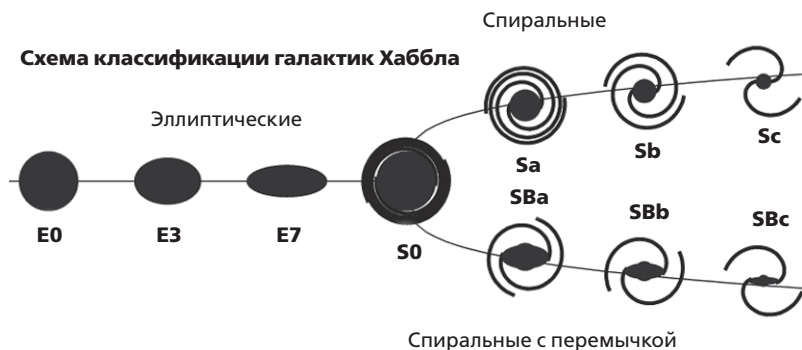


Рис. 8.2. «Камертон Хаббла» для различения галактик по внешнему виду на фотоснимках с длинной выдержкой. Со временем с правой стороны, между зубцами, добавился неправильный («иррегулярный») тип галактик. (Материалы любезно предоставлены *Wikimedia Commons*.)

камертона, относятся к типам спиральных галактик с баром и без него. Считается, что Млечный Путь относится к промежуточному типу (bc) спиральной (S) галактики с баром (B), что в соответствии с классификацией Хаббла обозначается как SBbc. С того времени как Хаббл впервые распределил галактики по типам, астрономы узнали, что последовательность, в которой выстраиваются сами типы, зависит от постоянно возрастающего запаса газа. В эллиптических галактиках газа меньше всего, поскольку почти все их звезды сформировались в течение нескольких миллиардов лет после рождения самих галактик, со времени которого минуло уже примерно 12 млрд лет. Спиральные галактики дают смешанную картину — их сфероиды давно образовали звезды, но в их дисках все еще много газа, что позволяет им рожать новые звезды в текущую эпоху. У иррегулярных (неправильных) галактик до 30 % наблюдаемой материи находится в газообразной форме, и поэтому они неизменно готовы к непрерывному образованию новых звезд.

Гигантские спиральные галактики

Из всех типов именно гигантские спиральные галактики превосходят все остальные по своей захватывающей красоте. Изумительные цветные снимки, сделанные космическим телескопом «Хаббл», показывают, что в этих галактиках присутствуют богатые экосистемы горячих голубых звезд, светящихся газовых туманностей и темных пылевых облаков, наиболее активные области которых располагаются вдоль спиральных рукавов, подобно «бусинам на нити» или «цветкам на ветви». Недавно астрономы-любители, применив технологии цифровой обработки изображений, создали впечатляющие цветные картины этих галактик. И даже распространенные названия ряда самых известных спиральных галактик-гигантов — галактика Треугольника, Водоворот, Подсолнух, Черный Глаз, Сомбреро — отражают нашу реакцию на их изящные формы.

Но как у этих галактик развилась спиральная структура? И как им удалось сохранить свой привлекательный облик на протяжении космологического времени? Сперва астрономы обратили внима-

ние на диски этих галактик, где находятся спиральные рукава. Оказалось, что звезды и газ находятся в сдвиговом движении, так что вещество во внутреннем диске спиральной галактики вращается быстрее, чем вещество на ее внешнем диске. Степень сдвига составляет примерно 10 км/с на каждые 1000 световых лет галактического радиуса — это оказывает небольшой, но значительный эффект по сравнению с характерными скоростями вращения, составляющими 100–300 км/с. При таком сдвиге на диске сами собой образуются спиральные узоры. Просто представьте себе большое облако звездобразующего газа. И облако, и звезды, недавно рожденные в нем, сместятся в спиральный фрагмент, при этом внешние звезды будут отставать от внутренних. Соберите вместе несколько таких «звездных колыбелей», и в диске появится спиралевидный узор (рис. 8.3).

Возможно, подобный характер возникновения спиральных структур, в основу которого положен сдвиг звездобразующих облаков, объяснит «потрепанность» некоторых спиральных галактик — таких, как галактика Треугольника (М33) в одноименном созвездии и галактика Подсолнух (М63) в созвездии Гончих Псов,

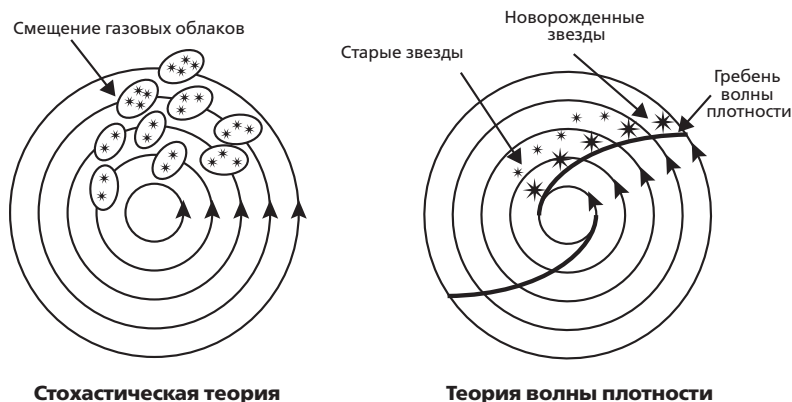


Рис. 8.3. Сравнение фрагментарной спиральной структуры, которая появляется в результате сдвига звездобразующих газовых облаков (слева), и более непрерывной спиральной структуры, которая, как объясняет теория волн плотности, возникает в тот момент, когда облака газа проходят через гребень спиральной волны плотности, занявшей прочное положение в диске (справа). (По источнику: *Galaxies and the Cosmic Frontier*, W. H. Waller and P. W. Hodge.)

спиральные рукава у которых короткие и словно раздроблены на мелкие осколки. Однако он не в силах объяснить «великий замысел» таких спиральных галактик, как Водоворот (M51) в том же созвездии Гончих Псов или Вертушка (M101) в созвездии Большой Медведицы, у которых спиральные рукава обширны и в то же время четко очерчены. Кроме того, он не может объяснить и того, почему в некоторых спиральных галактиках с баром, таких как M94 в созвездии Гончих Псов и M95 в созвездии Льва, присутствуют поразительные кольца, активно рождающие новые звезды. В данном случае астрономы допускают существование некой динамической силы, которая согласуется с резонансным поведением, сохранившимся в Солнечной системе до наших дней, и проявляется, например, в том, как ведут себя кольца Сатурна.

Если сдвигающийся галактический диск испытывает гравитационное возмущение, вызванное или вращением звездного бара, или галактикой-спутником, или его собственной спиральной структурой, он отреагирует в соответствии с частотой собственных колебаний. Астрофизики показали, что вследствие этого, скорее всего, появится спиральная волна плотности, которая будет способна поддерживать сама себя и начнет двигаться вокруг галактики с постоянным орбитальным периодом. Подобно морской волне, накатывающей на берег, волна плотности не состоит из одного и того же вещества, неизменного на протяжении долгого времени, — она состоит из любого вещества, через которое ей случается проходить.

В большей части дисковых галактик звезды и газ движутся быстрее волны и поэтому в конечном итоге проходят сквозь нее. Их взаимодействие можно уподобить тому, как колонна машин, медленно едущих по трассе, проходит через блокпост: чтобы миновать преграду, автомобилям приходится сбавлять скорость, отчего они скапливаются. Примерно так же звезды и газ, проходя через волну плотности, обладающую притяжением, замедляются и сгущаются. В частности, газовые облака сосредоточиваются и сливаются вдоль гребней волн плотности в таком изобилии, что готовы породить новые поколения звезд. Поэтому вдоль спиральных рукавов так много красочных скоплений голубых звезд и розовых областей H II.

Теория спиральных волн плотности в сдвигающихся галактических дисках легко объясняет наблюдаемую субструктуру спиральных рукавов, на всем протяжении которых часто можно увидеть и упорядоченные в пространстве ряды темных пылевых облаков, готовых рождать новые звезды, и недавно возникшие темно-красные области Н II, и несколько более старых голубых звездных ассоциаций (рис. 8.3). Теория волн плотности объясняет и наличие звездообразующих колец в некоторых спиральных галактиках. Эти кольца, как правило, возникают на радиусах, близких к резонансам между газовыми облаками и волной плотности, идущими по своим орбитам. Как и в случае с кольцами Сатурна, орбитальные резонансы расчищают кольцевые промежутки и создают неподалеку концентрацию вещества.

Что остается неясным, так это эволюция спиральных галактик на протяжении космологического времени. Продолжают ли звездообразующие спиральные рукава медленно вращаться вокруг галактики в соответствии с волнами плотности, установившимися в их дисках? Или же волны эволюционируют и таким образом преобразуют внешний вид этих галактик? Поглощают ли сами волны плотности кинетическую энергию из диска, вызывая тем самым радиальные притоки вещества в течение миллиардов лет? А как насчет спиральных галактик с баром? Являются ли бары относительно постоянными скоплениями звезд на реагирующем диске — или они появляются и исчезают? Такие вопросы продолжают приводить в замешательство астрономов и астрофизиков, изучающих галактики.

Гигантские эллиптические галактики

Самые большие галактики в видимой Вселенной — это гигантские и сверхгигантские эллиптические галактики. Обладая размерами в несколько сотен тысяч световых лет и светимостью до триллиона солнц, они господствуют в галактических скоплениях — там их, как правило, и находят. На первый взгляд они кажутся довольно простыми по форме и сути. Просто взгляните на гигантские эллип-

тические галактики М84 и М87 в центре скопления Девы, и вы увидите округлые, ровные и желтоватые звездные системы, в которых очень мало пылевых полос или других характерных черт. Сила звездного света резко падает с увеличением радиуса, принцип этого явления вполне понятен, и его можно смоделировать в виде самогравитирующего «газа» из звезд, которые при характерной «температуре» в изобилии собираются вокруг очень плотного центра. В каждом случае этот центр занимает сверхмассивная черная дыра. У гигантских и сверхгигантских эллиптических галактик масса этой черной дыры может варьироваться от миллионов до миллиардов масс Солнца. Так начинается наше знакомство с более странными аспектами этих на первый взгляд безобидных исполинов.

Стоит посмотреть на них чуть ближе, и мы получим еще одну подсказку к разгадке их странности. На снимках, сделанных космическим телескопом «Хаббл» и другими телескопами мирового класса, видны мощные струи газа, вырывающиеся из центров некоторых гигантских эллиптических галактик. Хороший пример — галактика-сверхгигант М87 в созвездии Девы. В оптическом диапазоне за ее потоком можно следить на расстоянии 1500 световых лет, а в радиоволновом — на невероятном протяжении, составляющем 250 000 световых лет. Разрывы в потоке указывают на вспышки активности, за которыми следуют относительно спокойные периоды. Всю эту эруптивную активность можно проследить до галактического ядра, где, как полагают, находится черная дыра, масса которой составляет 5 млрд масс Солнца.

Последний важный ключ к пониманию природы гигантских эллиптических галактик мы получили благодаря снимкам с очень длинной выдержкой, на которых можно различить едва заметные окраины этих галактик. С 1980-х годов, сначала на фотографиях с эффектом глубины, а затем — на цифровых изображениях, где этот эффект проявился еще ярче, астрономы обнаружили концентрические оболочки рассеянного звездного света. Более того, можно было увидеть, что узор оболочки на одной стороне галактики перемежался с узором оболочки на противоположной стороне. Астрофизики успешно смоделировали эти едва заметные

узоры как следы траекторий галактик, захваченных и поглощенных гигантской эллиптической галактикой. Когда галактики-жертвы по спирали шли навстречу исполинскому «хищнику», они оставляли за собой остатки, похожие на оболочки, — везде, где достигали окраины своих эксцентрических эллиптических орбит. Чередование звездных оболочек согласуется с закручиванием этих несчастных галактик по спирали внутрь.

Галактики со вспышкой звездообразования

В то время как гигантские эллиптические галактики, как полагают, стали такими огромными, поглощая своих меньших «сестер», галактики со вспышкой звездообразования, по всей видимости, чаще всего возникают при взаимодействии двух галактик сходного размера. Другое важное отличие заключается в том, что по крайней мере в одной из таких галактик, вступающих во взаимодействие, должны иметься обильные запасы газа. Именно газ, некогда загнанный в плотные облака, вызывает и «вспышки ярости» у новорожденных звезд, и энергетические последствия этих вспышек, столь характерные для звездообразования. Рассмотрим галактику Сигара (M82), ближайшую к нам из тех, в чьих плотных центрах сейчас активно рождаются новые звезды. Под провоцирующим воздействием гравитации со стороны ее гораздо более крупной соседки — галактики Боме (M81) — M82 полыхает массивными скоплениями горячих голубых звезд, бесчисленными остатками сверхновых, видимых в радиодиапазоне, и огромным биполярным истечением ионизированного газа. Сейчас она формирует новые звезды в таком темпе, что поддерживать его на протяжении долгого времени она просто не сможет, и либо очень скоро она успокоится, либо у нее менее чем за несколько сотен миллионов лет закончится звездообразующий газ.

Другие галактики со вспышкой звездообразования связаны в пары теснее и находятся в процессе слияния (рис. 8.4). Астрономы полагают, что они представляют собой ценные прототипы галактик, возможно, характерные для более густонаселенной

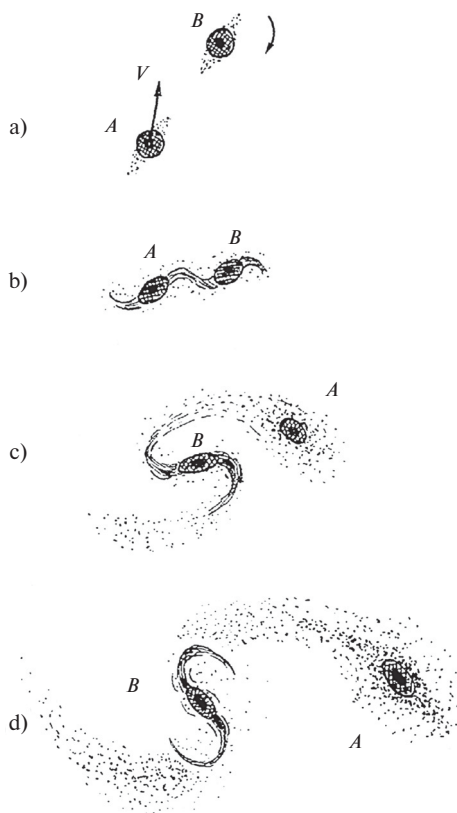


Рис. 8.4. Схема двух галактик в процессе слияния. Многие галактики со вспышкой звездообразования находятся в таких тесно взаимодействующих системах. (Материалы любезно предоставлены F. Zwicky, *Physics Today*, vol. 6 [1953], p. 7.)

ранней Вселенной, в которой только начинали формироваться гигантские эллиптические галактики и балджи будущих гигантских спиральных галактик.

Галактики с активными ядрами

Мы закончим эту главу описанием самых странных объектов в видимой Вселенной — галактик с активными ядрами, которые в текущую эпоху составляют примерно 1% от всех гигантских

галактик. Начиная с 1950-х годов, когда были открыты странно светящиеся источники космического радиоизлучения, астрономы начали сопоставлять их с видимыми галактиками и выявили целый «бродячий цирк» галактик с аномальной активностью. По мере того как угловое разрешение и чувствительность радиотелескопов становились все лучше, на полученных картах обнаружались огромные области биполярного истечения газа, охватившие область протяженностью в несколько сотен тысяч световых лет. Часто видимая галактика, расположенная в центре, кажется в несколько десятков раз меньше, чем эти удивительные потоки. Многие из таких галактик оказались гигантскими эллиптическими галактиками или странно искаженными слияниями ранее неповрежденных галактик.

Тем временем астрономы выяснили, что некоторые спиральные галактики, которые на первый взгляд казались совершенно обычными, содержали яркие ядра, излучавшие в основном в оптическом и инфракрасном диапазонах. Такие галактики были названы сейфертовскими — в честь Карла Сейферта, впервые описавшего их в 1943 году. В спектрах этих источников присутствовали широкие эмиссионные линии высокоионизированных атомов. Состояние высокой ионизации указывало на газовые облака, рядом с которыми находился некий невероятно горячий источник энергии. Кроме того, широкие профили спектральных эмиссионных линий указывали на экстремальное доплеровское смещение, заметное в длине волны излучения, исходящего от газовых облаков; причиной тому были их высокие скорости. Наконец, было замечено, что светимость источника излучения колеблется во временных масштабах от нескольких часов до нескольких дней.

Собрав все это воедино, астрономы со временем пришли к выводу, что эти наблюдения в совокупности согласуются с сейфертовскими галактиками, в которых присутствуют сверхмассивные черные дыры, окруженные дисками прирастающего горячего вещества. Каждый аккреционный диск подобен «эпицентру взрыва», в котором газовые облака, идущие под влиянием при-

тяжения к массивному астрономическому телу, сталкиваются с другим веществом, присутствующим в диске. Вихрь, возникающий в результате ударного нагрева, ярко светится на всех длинах волн, ионизируя и подпитывая энергией любые газовые облака, окружающие диск. Изменения в скорости аккреции объясняют наблюдаемые колебания в светимости как аккреционного диска, так и реагирующих газовых облаков.

Иногда свет от блестящего аккреционного диска не виден, а вместо него наблюдается сильное инфракрасное излучение. Астрономы называют такие системы сейфертовскими галактиками 2-го типа и строят модели, в которых ядра этих галактик окружены толстыми кольцами темной пыли. Пыль поглощает свет, исходящий от аккреционного диска, тем самым скрывая его от нашего взгляда, и повторно излучает этот свет на длинах волн среднего инфракрасного диапазона. Лучшим примером станет ближайшая к нам спиральная галактика с баром M77 (NGC 1068) в созвездии Кита, центральная область которой обильно излучает в инфракрасном диапазоне. Считается, что эмиссионные линии ее спектра исходят из облаков высокоионизированного газа, находящихся не более чем в световом году от черной дыры, расположенной в ядре, а также от аккреционного диска.

Если посмотреть на область ядра плашмя, а не с ребра, мы сможем увидеть прямое излучение аккреционного диска — и станем свидетелями самого высокоэнергетического излучения и самых широких эмиссионных спектральных линий. Такие системы называются сейфертовскими галактиками 1-го типа и служат относительно близкими аналогами квазаров, светящихся еще сильнее и заметных на гораздо больших расстояниях.

Нам нужно зайти довольно далеко, чтобы найти настоящий квазар — активную галактику, излучение ядра которой превосходит все остальные. Один из ближайших примеров — и первый объект, опознанный как квазар, — это 3C 273 в созвездии Девы. Значительное красное смещение эмиссионных линий его спектра указывает на то, что с тех пор, как свет этого квазара был

впервые испущен, космос расширился в 1,16 раза. Это означает, что мы видим его таким, каким он испускал свое излучение примерно 2,4 млрд лет назад, когда находился примерно в 5 млрд световых лет от нас. Несмотря на невероятную удаленность квазара 3С 273, астрономы-любители могут наблюдать его в телескопы с апертурой 350 мм и более. Видимая звездная величина квазара, равная 12,9, в сочетании с огромным расстоянием до него дает просто невероятную абсолютную светимость — около 4 трлн солнц, или в 100 с лишним раз больше, чем у обычной галактики, и все это из области размером не больше нашей Солнечной системы. Недавние снимки, сделанные космическим телескопом «Хаббл» и космической рентгеновской обсерваторией «Чандра», позволили получить намеки на строение 3С 273, в том числе увидеть мощную струю и рассеянный звездный свет. Изображения других квазаров показывают большое разнообразие форм — от спиральных галактик, на первый взгляд совершенно обычных, до множества сливающихся галактик. Мы вернемся к квазарам в девятой главе, поскольку в расширяющейся Вселенной они, как кажется, занимают особый временной период.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ

Красное смещение спектральной эмиссионной линии, исходящей от галактики, определяется как $(z = \Delta\lambda / \lambda_0)$, где $\Delta\lambda$ — наблюдаемое увеличение длины волны эмиссионной линии, а λ_0 — длина волны, измеренная в лаборатории. Эта величина отражает степень расширения Вселенной с тех пор, как свет был впервые испущен. У квазара 3С 273 наблюдаемое красное смещение составляет $z = 0,158$. Это означает, что с тех пор, как он впервые излучил наблюдаемый нами свет, Вселенная расширилась на 16 %, или в 1,16 раза. Принимая как данность то, что возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет (и, по существу, она свободно расширяется), мы видим свет таким, каким он был испущен около 2,4 млрд лет назад.

Подсчет галактик

Как показано в этой главе, в наблюдаемой Вселенной удивительно много самых разнообразных галактик. Астрономы, вдохновленные их изумительной красотой, провели тщательную спектроскопическую съемку и спектроскопические исследования — и выявили в пределах этих галактик сложное взаимодействие между звездами, газом и активными ядрами. Более того, они начали собирать воедино все сведения, связанные с эволюцией этих «островных вселенных» на протяжении космологического времени (см. гл. 10). Но сначала нам предстоит еще многому научиться и пока что просто подсчитать галактики, которые мы можем наблюдать. Впервые это с успехом сделали в 1996 году, после того как космический телескоп «Хаббл» фотографировал один и тот же участок неба в течение рекордных десяти дней непрерывной выдержки. «Глубокий обзор Хаббла», полученный в итоге, запечатлел лишь крошечный участок неба в созвездии Большой Медведицы. Представьте, что вы, держа в вытянутой руке монету в десять центов, фиксируете взгляд на глазе Рузвельта — это эквивалент небольшого поля обзора, доступного «Хабблу». Однако на нем были многие тысячи галактик. Этот невероятный «образец ядра» галактической Вселенной предоставил исследователям самые разные возможности, в том числе и шанс оценить общее число галактик в видимом космосе.

Достаточно сказать, что количество галактик, доступных наблюдению, поистине поразительно — от 50 до 100 *миллиардов*, — и это только гигантские галактики и карликовые галактики со вспышкой звездообразования. Меньшие и менее активные галактики пока остаются вне досягаемости наших исследовательских станций. С 1996 года «Хаббл», «Спитцер» и несколько наземных телескопов позволили нам получить другие глубокие обзоры космоса. Теперь у нас есть спектроскопическое досье образцов галактического ядра, доступ к которому позволит изучить эволюцию галактик за космологическое время — начиная от более чем 10 млрд лет назад и заканчивая нашей эпохой. Однако, чтобы дей-

ствительно обнаружить «первый свет» от самых молодых галактик, нам придется дождаться космического телескопа «Джеймс Уэбб» и других телескопов, сконструированных именно для того, чтобы уловить это едва заметное первичное излучение (см. гл. 10).

Расширение космоса

В 1920-х годах, задолго до «Хаббла» и его потрясающих сверхчетких снимков, астрономы начали пристально изучать галактики, доступные их детекторам и телескопам. Разделив галактический свет на спектры и сфотографировав их на длинной выдержке, они увидели на спектральных линиях значительные доплеровские смещения, заметные в длине волны. Спектры с синим смещением указывали на приближение к нам, спектры с красным — на удаление от нас. Например, галактика Андромеды (М31) показала синее смещение, вызванное тем, что она и Млечный Путь сходятся друг с другом со скоростью 110 км/с. Синее смещение имеет и галактика Треугольника (М33), которая движется к нам со скоростью 44 км/с.

Однако за пределами Местной группы для большинства галактических спектров были характерны красные смещения. Милтон Хьюмсон, талантливый помощник Эдвина Хаббла, искусно фиксировал эти спектры на фотопластинках с помощью вышеупомянутого телескопа Хукера, расположенного в южной Калифорнии, — самого большого телескопа в мире на тот момент. В ходе работы над спектрами Хаббл соотнес их красные смещения с самыми точными на то время оценками расстояния до соответствующих галактик и в 1929 году вывел свой фундаментальный закон: чем дальше до галактики, тем больше ее красное смещение. Сам он понимал это смещение как скорость удаления в соответствии с оптическим эффектом Доплера. Этого хватило, чтобы он совершил огромный концептуальный скачок и интерпретировал свой закон как свидетельство расширяющейся галактической Вселенной. Наглядные аналогии помогут нам яснее представить ход его рассуждений.

Предположим, у нас есть булочка с изюмом, которую мы собираемся поместить в печь. Выберем одну изюминку. Все остальные находятся от нее на определенном расстоянии: одни очень близко, а другие — подальше и ближе к другому краю булочки. Как только булочка испечется, она станет шире. Самые близкие изюминки отодвинутся от нашей «избранницы» совсем чуть-чуть, но те, которые были больше удалены от нее изначально, расположатся еще дальше, а несколько, находящихся на дальнем краю, отодвинутся на наибольшее расстояние. Это соотношение расстояние — движение работает для любой случайно выбранной изюминки. Другими словами, так подтверждается глобальное расширение.

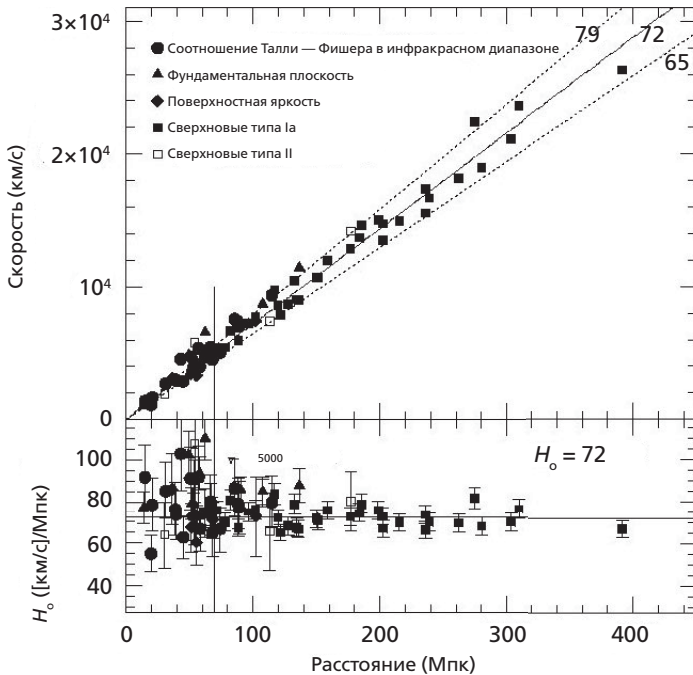


Рис. 8.5. Недавний график с демонстрацией закона Хаббла, связавшего расстояние до галактики в мегапарсеках (Мпк) и скорость ее удаления (км/с). Наклон функции дает значение постоянной Хаббла, в данном случае равное 72 (км/с)/Мпк. (По источнику: W. L. Freedman et al., *Astrophysical Journal*, vol. 553 [2001], p. 47.)

Сегодня астрономы больше не интерпретируют красные смещения галактик как следствие кинематической модели, согласно которой галактики удаляются от нас со скоростями, зависящими от соответствующих расстояний. Теперь они рассматривают растяжение длин световых волн совершенно иначе — как признак расширения пространства. Это не галактики путешествуют в космосе — это сама ткань космоса расширяется и увлекает их за собой! К счастью, в этом случае аналогия с расширяющейся булочкой подходит еще лучше.

Несмотря на верные толкования, скорость расширения по-прежнему выражается в кинематических единицах, (км/с)/Мпк (Мпк — сокращение от мегапарсек, где 1 Мпк = 1 млн парсек, или 3,26 млн световых лет). В настоящее время наиболее точная оценка так называемой постоянной Хаббла (H_0), рассчитанная на основе наиболее точно измеренных расстояний до галактик, составляет:

$$H_0 = 72 \pm 6 \text{ (км/с)/Мпк,}$$

в то время как скорость удаления (v_r), согласно кинематической интерпретации, линейно связана с расстоянием и выражается формулой $v_r = H_0 \cdot d$, что показано на рис. 8.5.

РАЗЛИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ХАББЛА

Недавние измерения, основанные на различных подходах, позволили уменьшить неопределенность в соответствующих значениях постоянной Хаббла. Однако сами значения теперь отличаются — и, возможно, значительно. Пока я пишу этот абзац, измерение расстояний до галактик, предполагающее использование сверхновых типа Ia в качестве стандартных свечей, дает значение H_0 , равное $74,0 \pm 1,5$ (км/с)/Мпк. Однако подробные данные, связанные с космическим микроволновым фоном, указывают на значение $67,5 \pm 0,5$ (км/с)/Мпк, в то время как новый метод измерения расстояний, главную роль в котором играет гравитационное

линзирование удаленных квазаров более близкими галактиками, позволил получить диапазон значений от $72,5 \pm 2,2$ (км/с)/Мпк до 82 ± 8 (км/с)/Мпк. Ученые пока не знают, требуют ли видимые различия некоей новой физики, выходящей за пределы Стандартной модели, или противоречивые результаты можно объяснить системными ошибками и внутренними пристрастиями.

Достижения Хаббла по-прежнему бесценны для астрономии. Его одноименный закон устанавливает существование расширяющейся Вселенной и позволяет определять расстояния до удаленных галактик, скоплений галактик и сверхскоплений, как мы видели в третьей главе. Дальнейшее исследование ведет к возможной нелинейности, позволившей утверждать, что Вселенная расширяется с ускорением; как мы увидим в тринадцатой главе, это придало бы дополнительную достоверность предположению о некоем виде темной энергии, пронизывающей все космическое пространство. Но прежде мы вернемся к тому, с чего все началось, и постоянная Хаббла поможет нам вычислить хаббловское время — первое приближенное значение возраста Вселенной.

ЧАСТЬ III

НАШ МИГ ВО ВРЕМЕНИ

Большой взрыв

В начале было сотворение Вселенной. Оно рассердило многих и было повсеместно расценено как неразумный шаг.

Дуглас Адамс. Автостопом по галактике

Когда-то давным-давно в пространстве-времени наша Вселенная возникла из квантового вакуума. Может быть, этот огромный темный океан возможностей породил и другие пространства-времена — настолько физически изолированные друг от друга, что мы никогда их не найдем. И все же космологи строят теории о такой мультивселенной и о ее возможном устройении. Бесконечна ли мультивселенная так, что каждый процесс в нашей конкретной вселенной — в том числе ваши мысли во время завтрака — до бесконечности повторяется в других пространствах-временах? Или мультивселенная ограничена определенным набором измерений, физических констант и законов? Возможно, нам этого не узнать, но группы космических теоретиков в поте лица ищут ответы.

Подготовка декораций

Между тем у нас, в нашем эволюционирующем пространстве-времени, есть и свои вопросы. Бесконечна ли наша Вселенная в пространственной протяженности, или у нее есть реальный

размер, который примерно 13,8 млрд лет назад начал развиваться из ультрамикроскопического источника и достиг того, что мы видим сегодня? Поскольку возраст нашей Вселенной конечен, та ее часть, которую мы можем воспринять, ограничена. Всему, что превышает этот пространственно-временной радиус, не хватило бы времени, чтобы его свет достиг нас. Поэтому считается, что наш предельный горизонт (обычно выражаемый как предельное абберационное время) имеет радиус, эквивалентный 13,8 млрд лет распространения света. И именно потому, что мы не видим ничего за пределами этого радиуса, наше ночное небо, по сути, темное. Рассмотрим альтернативный вариант. Будь Вселенная бесконечной как по возрасту, так и по протяженности, каждый луч зрения в конечном счете пересекал бы поверхность звезды — и, таким образом, небо всегда было бы ослепительно ярким. Эта головоломка, известная как парадокс Ольберса, приводила астрономов в замешательство до тех пор, пока они не допустили, что у Вселенной было начало.

ЧТО ТАКОЕ АБЕРРАЦИОННОЕ ВРЕМЯ?

Поскольку свет распространяется с конечной скоростью, равной 300 000 км/с, ему требуется время на то, чтобы дойти до нас от своего источника. Это время и называется абберационным. Например, Луну, до которой от нас 384 000 км, мы видим такой, какой она отражала солнечный свет 1,28 секунды тому назад; следовательно, ее абберационное время составляет 1,28 секунды. А Солнце, до которого 150 млн км, мы видим таким, каким оно бурлило и испускало свет 8,33 минуты назад, и его абберационное время — 8,33 минуты. Вот несколько примеров такого времени, которые стоит принять во внимание:

Сатурн — 1,1 часа при максимальном сближении с Землей
 Плутон — 6,9 часа при максимальном сближении с Землей
 α Центавра — 4,2 года
 Вега — 25 лет
 Полярная звезда — 434 года
 Туманность Ориона — 1500 лет

Галактический центр — 27 000 лет
Галактика Андромеды — 2,5 млн лет
Ближайший квазар — 3С 273 (2,4 млрд лет)
Самая дальняя обнаруженная галактика — GN-z11 (13,4 млрд лет)

Измерять метрические расстояния за пределами галактики Андромеды и Местной группы гораздо сложнее: этому препятствует расширение Вселенной. Например, расстояние до той или иной галактики в то мгновение, когда из нее был испущен свет, в конечном итоге оказывается намного меньше расстояния до нее в тот момент, когда нам удастся ее обнаружить. Поэтому оценивать космические расстояния лучше в абберационном времени — оно лучше всего учитывает расширение и дает нам единую меру расстояния до объекта в пределах расширяющегося космоса. Возможно, это вас удивит, но с помощью «Хаббла» и крупнейших наземных телескопов астрономы нашли галактики, для света которых характерно такое красное смещение, что он, по всей вероятности, излучался, когда видимая Вселенная была в 10 с лишним раз компактнее, а значит, насчитывала всего несколько сотен миллионов лет. То, что доступно нашему взгляду из тех изначальных времен, во многом резко отличается от того, что мы наблюдаем в текущей Вселенной, причем галактики ранней эпохи кажутся намного меньше и массивнее, чем их современные аналоги.

В последующих главах мы будем говорить о той части Вселенной, которая доступна нашему наблюдению, поскольку она располагается в пределах светового радиуса, установленного возрастом Вселенной в 13,8 млрд лет. Однако это пространственное ограничение не мешает нам исследовать всю историю космоса и мы сможем пронаблюдать — по крайней мере в принципе — все основополагающие стадии от Большого взрыва до эпохи рекомбинации, образования первых галактик, звезд и планет.

Происхождение космоса

Утверждение, согласно которому у Вселенной было начало, на самом деле звучит невероятно странно и необъяснимо. Впрочем, это не мешало людям придумывать истории о происхождении космоса, ставшие неотъемлемой частью их культурной идентичности. И более того, в разных культурах, возникших задолго до появления письменности, очень много преданий о возникновении мира. Пожалуй, из существ, живущих на Земле, только нам, людям, нужно объяснить наше собственное существование в свете происхождения и эволюции большой Вселенной.

Я помню времена, когда астрономы все еще не могли с уверенностью сказать, действительно ли у Вселенной было начало. В 1960-х годах за первенство соперничали две космологические теории. Одна из них называлась теорией стационарной Вселенной. В 1940-х и 1950-х годах ее отстаивали сэр Фред Хойл и его коллеги. Эта теория признавала расширение космоса, открытое Эдвином Хабблом в 1929 году, но допускала появление новой материи для заполнения пустот (войдов) и гласила, что Вселенная остается по существу неизменной во всем пространстве-времени. Так ученым удавалось придерживаться популярного представления об однородности — так называемого идеального космологического принципа. Никакое место или время не играло особой роли, в том числе и наше время на Земле.

Другая теория, которую в 1940-х и 1950-х годах впервые изложил в общедоступной форме Георгий Гамов, постулировала противоположную картину. Согласно ей, наша Вселенная расширялась, истончалась и охлаждалась после эпохи невероятно высокой плотности и температуры, завершившейся несколько миллиардов лет назад. Эта теория Большого взрыва также учитывала скорость расширения, количественно определяемую постоянной Хаббла (H_0), но переворачивала ее, тем самым возвращая расширение к его горячему началу. Минувшее с того момента хаббловское время ($T = 1/H_0$), рассчитанное в соответствии с наилучшими оценками постоянной Хаббла, доступными на тот момент, варь-

ировалось от 10 до 20 млрд лет. С более короткими временными рамками были свои сложности, поскольку возраст некоторых шаровых звездных скоплений, по всей видимости, превышал этот жесткий предел. Как звездное скопление могло быть старше Вселенной, которая его породила? Обе теории привлекали сторонников вплоть до 1964 года, когда был открыт космический микроволновый фон, также называемый реликтовым излучением.

Это стало неопровержимым свидетельством, подтвердившим, что ранняя Вселенная радикально отличалась от той, которую мы видим сегодня. Еще в 1940-х годах физики предсказали, что это остаточное излучение должно было сохраниться от горячего зарождения Вселенной. Они также признавали, что в результате расширения Вселенной длины волн излучения должны были бы растянуться — иными словами, тому, что начиналось как оранжевое свечение ионизированной плазмы при температуре в несколько тысяч градусов, со временем предстояло превратиться в слабое микроволновое «шипение» при очень низкой температуре, всего на несколько градусов превышающей величину абсолютного нуля. Именно его обнаружили Арно Пензиас и Роберт Вильсон, работая с 15-метровой рупорной антенной в городке Холмдейл, штат Нью-Джерси, на вершине холма Кроуфорд-Хилл. Пензиас и Вильсон, ученые из лаборатории Белла, тестировали антенну для нужд спутниковой связи и немного занимались радиоастрономией. Сначала они подумали, что сигнал — это шум, исходящий от какой-то части устройства, и только устранив все возможные источники шума, в том числе и птичий помет внутри антенны, они пришли к выводу, что сигнал исходил из космоса. Это «фоновое» излучение, охватывающее все небо, с тех пор было признано остаточным свечением от Большого взрыва — так свершилось удивительное открытие, которое принесло Пензиасу и Вильсону Нобелевскую премию по физике 1978 года.

С момента открытия космический микроволновый фон измеряли и описывали все точнее. Его спектр соответствует спектру идеального теплового излучателя (черного тела) при эквива-

лентной температуре 2,725 К (рис. 9.1). Астрофизики считают, что это излучение наиболее соответствует Вселенной, которая с тех пор, за 13,8 млрд лет, расширилась в 1100 раз. То, что находят наши детекторы — это излучение вещества, которое лишь недавно остыло из состояния ионизированной плазмы и перешло в нейтральное атомное состояние. В ту критически важную эпоху рекомбинации, наступившую всего через 380 000 лет после Большого взрыва, Вселенная стала прозрачной для собственного излучения, и фотоны получили возможность свободно преодолевать пространство, благодаря чему наши приборы теперь могут их обнаруживать. Наиболее точная оценка постоянной Хаббла (72 [км/с]/Мпк), соответствующее хаббловское время (13,6 млрд лет) и соответственно более юный возраст старейших шаровых скоплений (12,7 млрд лет) прекрасно согласуются с возрастом Вселенной в 13,8 млрд лет, рассчитанным на основе космического микроволнового фона, — и это убеждает астрофизиков в том, что они на правильном пути.

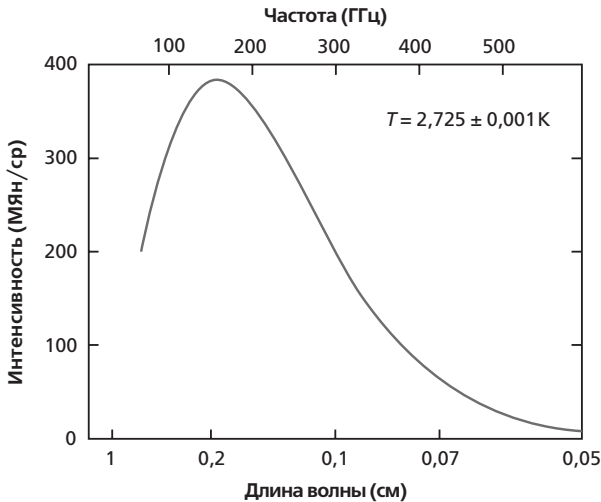


Рис. 9.1. Спектр космического микроволнового фона, измеренный обсерваторией *COBE* в начале 1990-х годов. Он идентичен спектру абсолютно черного тела при температуре 2,725 К. (Материалы любезно предоставлены *C. Bennett, DMR, COBE, GSFC, NASA.*)

Чтобы получить истинную картину космического микроволнового фона, астрофизики тщательно вычли другие микроволновые «наложения», исходящие из Млечного Пути и из множества других галактик. Кроме того, им пришлось вводить поправки на доплеровское смещение излучения черного тела по всей небесной сфере, вызванное, во-первых, движением Солнечной системы вокруг Млечного Пути, а во-вторых, движением нашей Галактики относительно космической системы отсчета. Оказалось, что оставшийся космический микроволновый фон необычайно однороден — степень его флуктуации составляет примерно 1 часть на 100 000. Такие показатели однородности характерны для только что уложенного ледового катка. Большинство флуктуаций происходит в угловом размере, составляющем около 1° на небесной сфере (рис. 9.2).

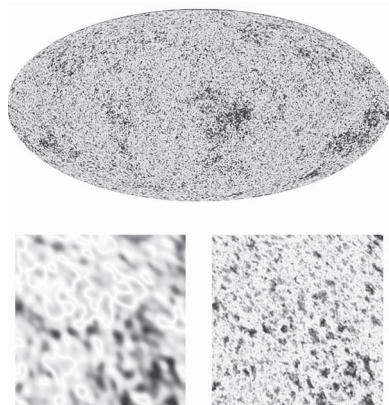


Рис. 9.2. *Вверху:* карта космического микроволнового фона на всей небесной сфере, полученная с помощью космического аппарата *NASA WMAP*, после удаления всех «наложений» от Млечного Пути и других галактик. *Внизу:* слева крупным планом — снимок, сделанный *WMAP*; справа — карта того же региона, сделанная более поздним спутником «Планк». На обеих картах видна похожая рябь с угловым размером в 1° — в соответствии с отпечатком акустических волн, проходящих через ионизированную плазму как раз в тот момент, когда расширяющийся космос остывал до нейтрального атомного состояния. Участки повышенной плотности в плазме проявляются в виде сравнительно более темных областей. (Материалы любезно предоставлены: *ESA; Planck Collaboration; Научная группа NASA/WMAP*.)

Этот характерный угловой размер, а также другие, не столь заметные пики в распределении расстояний говорят астрофизикам о том, что Вселенная исключительно «плоская». Это означает, что два лазерных луча, выпущенных в небо параллельно друг другу, никогда не сойдутся и не разойдутся. Если бы угловые расстояния в космическом микроволновом фоне оказались больше, лучи бы сошлись, подобно меридианам на глобусе, а если меньше — то разошлись бы, как линии на седловой поверхности, расширяющейся книзу (рис. 9.3). Этот почти идеально плоский характер пространства, в свою очередь, указывает на то, что в нашей Вселенной доминирует некий вид темной энергии. В ином случае предполагаемого количества обычной материи, обладающей тяготением, и темной материи не хватило бы на то, чтобы сделать Вселенную

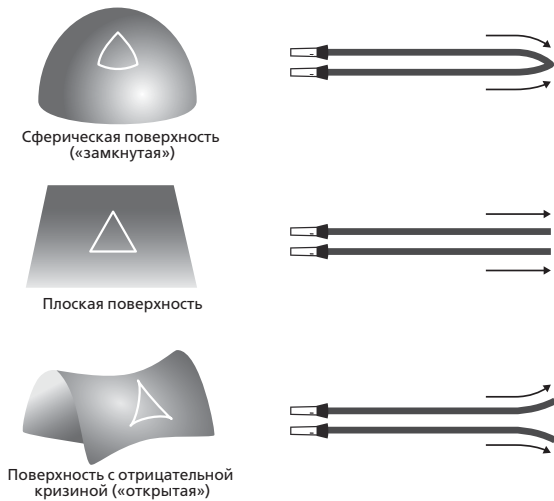


Рис. 9.3. Двумерные аналогии кривизны космоса и их влияние на траектории световых лучей. *Вверху:* на сферической, или «замкнутой», поверхности две изначально параллельные линии сойдутся в одной точке. С изначально параллельными лазерными лучами произошло бы то же самое. *В середине:* на плоской поверхности параллельные линии и лазерные лучи останутся параллельными бесконечно. *Внизу:* на расширяющейся книзу, или «открытой», поверхности и линии, и лазерные лучи, изначально параллельные, будут расходиться. (По источнику: *Discovering the Universe*, N. F. Comins and W. J. Kaufman III, 4th edition, W. H. Freeman [1997].)

плоской. Возможно, интереснее всего то, что распределение угловых расстояний свидетельствует о первозданных условиях, когда Вселенная только возникла из квантового вакуума. Даже тогда космос должен был быть исключительно плоским, одинаковым во всех направлениях (изотропным) и невероятно однородным. И эти ограничения представляют серьезные проблемы для любого космолога, который пытается выяснить, как все началось.

Ключевые эпохи

Если принять во внимание расширение Вселенной и перевести стрелки часов назад, к самым ранним временам, мы можем вообразить себе космос, который был намного плотнее и горячее; Георгий Гамов в 1952 году называл его первичным огненным шаром. Физики поступили именно так — и обнаружили переломные эпохи в раскрывающейся перед нами Вселенной пространства, времени, материи, излучения и других, все еще загадочных форм материи-энергии (рис. 9.4).

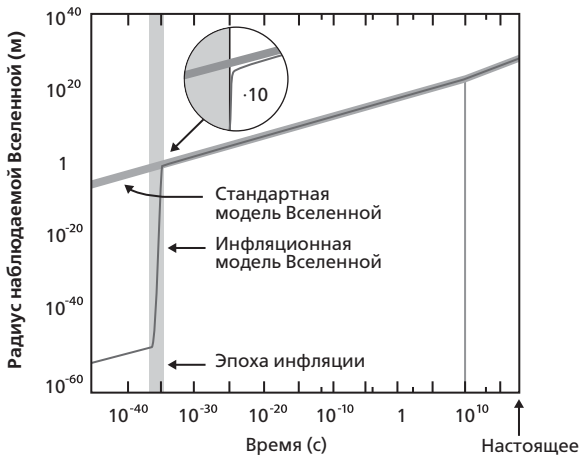


Рис. 9.4. Схематическая временная шкала ранней Вселенной. Показаны ключевые эпохи в расширяющейся и охлаждающейся метасистеме материи-энергии. (По источнику: A. Guth, "Inflation and the New Era of High-precision Cosmology", *MIT Physics Annual* [2002].)

Планковская эпоха

Время $\approx 10^{-43}$ с, температура $\approx 10^{32}$ К

Здесь водятся драконы¹. Мы мало что знаем об этой эпохе, поскольку пространство и время еще не возникли как отдельные измерения и космические часы еще не начали тикать. Более того, все известные взаимодействия, признанные сегодня (сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное), были едины. Только после того, как наступила эта эпоха, пространство, время и гравитация смогли «вымерзнуть» из хаоса и подготовить декорации для развития Вселенной. Пытаясь представить, что могло в ней происходить, физики воображают лишь картину, на которой из квантовой «пены» возможностей внезапно появляются и исчезают из бытия фундаментальные частицы и античастицы, — и, собственно, на этом все. Возможно, когда-нибудь у нас будет жизнеспособная теория квантовой гравитации. Но до тех пор планковская эпоха будет оставаться за пределами нашего понимания.

Эпоха инфляции

Время $\approx 10^{-35}$ с, температура $\approx 10^{27}$ К

Как только Вселенная расширилась и остыла, выйдя из непознаваемой «черной дыры», которую мы называем планковской эпохой, ее заполнил «бульон» из фундаментальных частиц. Это были кварки, глюоны, лептоны и аналогичные им античастицы, а также фотоны — и все это взаимодействовало и преобразалось. Полагают, что в эту эпоху появилось много других экзотических частиц, в том числе аксионы, магнитные монополи, стерильные нейтрино и гравитоны, но пока ни одну из них не удалось обнаружить. Тем временем Вселенная стала достаточно прохладной, чтобы сильное взаимодей-

¹ Переосмысление классического латинского выражения *Hic sunt leones* («Здесь [водятся] львы»), которым на средневековых картах подписывали неизвестные земли. — *Прим. пер.*

ствие отделилось от предшествующего смешения сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий (фундаментальных сил, управляющих поведением частиц, ядер и атомов). Считается, что это привело к резкому раздуванию Вселенной, в результате чего она увеличилась в 150 с лишним раз менее чем за 10^{-33} секунд (рис. 9.4). Так ультрамикроскопическая вспышка превратилась в макроскопический космос, который был на 50 порядков больше. (С тех пор эта область размером с грейпфрут выросла еще на 30 порядков и стала сегодняшней наблюдаемой Вселенной, только это заняло намного больше времени.) Кроме того, отделение сильного взаимодействия ускорило образование элементарных частиц и фотонов — и это придало Большому взрыву его энергичность и силу.

Космологи благосклонны к этому инфляционному сценарию, поскольку он решает ряд проблем, связанных с теорией Большого взрыва. Во-первых, он резко раздувает наблюдаемый космос, так что можно спорить о том, какой пространственной кривизной он обладал до этого момента, и так решается проблема плоскостности. Во-вторых, этот сценарий гарантирует, что все направления в наблюдаемом космосе имеют одинаковую структуру, и тем самым мы избавляемся от проблем, связанных с изотропией и однородностью. Более того, он предсказывает, что квантовые флуктуации, происходившие в течение этой эпохи, могли перерасти в акустическую запись флуктуаций плотности и температуры, проявленную в космическом микроволновом фоне. На момент написания этой книги астрономы искали в нем другие указания, способные еще яснее свидетельствовать об эпохе инфляции, но решающего довода они пока не получили. И если это произойдет, то авторы теории, скорее всего, заслужат Нобелевскую премию.

Эпоха частиц

Время $\approx 10^{-12}$ с, температура $\approx 10^{15}$ К

До этой эпохи элементарные частицы и их античастицы были вовлечены в экзистенциальный танец созидания и взаимного

уничтожения. Но как только Вселенная достаточно расширилась и остыла, смогли появиться стабильные частицы. Эпоха частиц началась с адронной эпохи, когда кварки связывались в протоны, нейтроны и мезоны. Каждый протон и нейтрон состоит из трех кварков, каждый мезон — из двух, а глюоны удерживают их вместе. В то же время объединенное «электрослабое» взаимодействие раздвоилось на электромагнитное и слабое, что еще больше способствовало возникновению из хаоса W - и Z -бозонов. А очень незначительное превышение доли вещества по сравнению с антивеществом (около 1 части на миллиард) в конечном счете привело к возникновению нашей сегодняшней материальной Вселенной.

Стабилизация частиц продолжалась и в следующую эпоху, названную лептонной (время $\approx 10^{-4}$ с, температура $\approx 10^{11}$ К), когда на свободу из «трясины» вырвались электроны, нейтрино и другие относительно легкие частицы. Этот важный период подошел к концу примерно через секунду после Большого взрыва.

Эпоха первичного нуклеосинтеза

Время $\approx 10^2$ с, температура $\approx 10^9$ К

Как только расширяющаяся Вселенная остыла до температуры в миллиард кельвинов, ее протоны и нейтроны начали соединяться в различные атомные ядра. К ним относились стабильные ядра дейтерия (1 протон + 1 нейтрон), гелия-3 (2 протона + 1 нейтрон), гелия-4 (2 протона + 2 нейтрона) и лития-7 (3 протона + 4 нейтрона). Этот период нуклеосинтеза длился около 20 минут, после чего все свободные нейтроны распались обратно на протоны и электроны, тем самым прекратив дальнейшие реакции. Одно из величайших достижений теории Большого взрыва состоит в том, что она точно предсказывает относительную распространенность этих атомных ядер, возникших за отведенное время. Еще до того, как звезды стали создавать свои собственные элементы, ранняя Вселенная уже содержала 75 % водорода-1

(атомное ядро которого состоит из одного протона), около 25 % гелия-4, 0,01 % дейтерия и гелия-3 и ультрамалое количество (порядка 10^{-10}) лития-7.

Эпоха вещества

Время $\approx 10^{11}$ с — 10^4 лет, температура $\approx 10^5$ К

До этой эпохи в энергетическом балансе Вселенной преобладали фотоны, но непрерывное расширение космического пространства изменило это положение. Вселенная раздувалась, и концентрация как фотонов, так и материальных частиц уменьшалась в соответствии с увеличением объема — иными словами, с увеличением размера в кубе (R^3). Между тем уменьшалась и энергия в расчете на фотон, поскольку соответствующая длина волны каждого фотона растягивалась вместе с расширяющейся Вселенной, то есть как размер (R). По причине того, что концентрация фотонов в пространстве снизилась, а энергия каждого фотона сократилась, плотность их энергии уменьшалась в соответствии с четвертой степенью возрастания размера (R^4), а концентрация вещества — в соответствии с кубом возрастания размера (R^3). Потребовалось около 10 000 лет космического расширения, чтобы плотность энергии фотонов упала ниже плотности материальных частиц — и так мы унаследовали Вселенную, в которой преобладает материя.

Эпоха атома

Время $\approx 10^{13}$ с — $4 \cdot 10^5$ лет, температура $\approx 3 \cdot 10^3$ К

Эта эпоха следует сразу за рекомбинацией электронов и атомных ядер с образованием атомов без суммарного заряда. Подробные данные о космическом микроволновом фоне позволили космологам-наблюдателям рассчитать время наступления этой эпохи (380 000 лет после Большого взрыва), ее температуру (3000 К) и то, во сколько

раз с тех пор расширилась Вселенная (1100). Слабое микроволновое свечение, распространенное по всей небесной сфере, ученые интерпретируют как «поверхность последнего рассеивания» от первичной плазмы, которая как раз в тот миг нейтрализовалась и стала прозрачной для фотонов. Разумная аналогия — видимая поверхность Солнца: мы не можем заглянуть сквозь нее в более глубокие слои солнечной плазмы, и остается довольствоваться тем, что мы видим поверхность ее последнего рассеивания, где плотность снизилась в достаточной мере для того, чтобы высвободились фотоны. Точно так же космический микроволновый фон считается свидетельством того переломного момента, когда электроны обрели возможность связываться с атомными ядрами и тем самым образовывать нейтральные атомы. Плазмы, с которой взаимодействовали фотоны, пронизывающие космический простор, больше не существовало, и теперь они могли распространяться сквозь пространство и время — чтобы через 13,8 млрд лет попасть на наши детекторы.

Завершающий пассаж

Теория Большого взрыва объясняет очень многое из того, что астрономы узнали о Вселенной, в том числе:

1. Космическое расширение. «Обратная перемотка» этого расширения к началу приведет нас в космос, который был намного плотнее и горячее нынешнего. Наиболее точные оценки возраста расширения составляют около 13,8 млрд лет.
2. Парадокс Ольберса. Причина темного облика ночного неба заключается в том, что возраст Вселенной конечен. Свет от чего-либо за пределами соответствующего абберационного времени в 13,8 млрд световых лет до нас еще не дошел.
3. Содержание элементов в космосе. Наблюдаемая относительная распространенность водорода, дейтерия, гелия-3, гелия-4 и лития-7 соответствует рассчитанному результату нуклеосинтеза, проходившего в первые двадцать минут после Большого взрыва.

4. Космический микроволновый фон. Это свечение всего неба понимается как излучение, испущенное Вселенной в то время, когда она только остывала и переходила из состояния ионизированной плазмы в нейтральное атомное состояние. Это происходило примерно через 380 000 лет после Большого взрыва.

Сама по себе теория Большого взрыва не может объяснить необычайную плоскостность, изотропность и однородность Вселенной, на которые нам указывает характер космического микроволнового фона. И здесь на сцену выходит эпоха инфляции. Резко увеличив пылинку пространства-времени на самой ранней стадии возникновения Вселенной, космическая инфляция сгладила и вещество, и излучение, которым предстояло эволюционировать в нашу сегодняшнюю Вселенную. Она еще не подтверждена экспериментально, но многие астрофизики полагают, что эту проблему решат будущие измерения поляризации волн в космическом микроволновом фоне.

Эта глава заканчивается эпохой атома, когда Вселенная состояла из нейтральных атомов и потока видимых фотонов, а ее температура составляла около 3000 К. Однако не стоит пренебрегать вечно таинственной темной материей и темной энергией. И более того, возникает впечатление, что формирование галактик, а также галактических скоплений и сверхскоплений из крошечных сверхплотностей, проявленных в космическом микроволновом фоне, особенно зависит от расположения темной материи. В следующей главе, посвященной образованию галактик, мы поговорим о ее гравитирующей роли, а также обсудим еще несколько важных вопросов.

10

Возникновение галактик

В любом хаосе есть космос и в любом беспорядке — скрытый порядок.

Карл Юнг. Современный человек в поисках души

Сложности, связанные с формированием галактик, проявляются уже в крошечных флуктуациях, заметных в космическом микроволновом фоне. Если интерпретировать их как избыточную или недостаточную плотность вещества, составляющую всего несколько частей на 100 000, то как эти намеки на структуру могли появиться в гораздо более плотных галактиках, скоплениях галактик и сверхскоплениях, населяющих сегодняшнюю Вселенную? Кроме того, расширение должно было произойти очень стремительно. Изображение небольшой области в созвездии Большой Медведицы, полученное при помощи телескопа «Хаббл», и сверхчеткие снимки, сделанные в дальнейшем, позволили выявить галактики с красным смещением 5 и более — а это значит, что они сформировались по прошествии менее чем миллиарда лет после Большого взрыва. Как столь резкое сгущение вещества могло произойти так быстро?

К сожалению, нам еще только предстоит построить телескопы, мощности которых хватило бы для исследования так называемых Темных веков — эпохи, которая началась спустя 400 000 лет после Большого взрыва и завершилась по прошествии миллиарда лет после него. Снимки, сделанные «Хабблом», позволили нам мельком заглянуть в эту черную бездну и предположить, что первые галактики были относительно маленькими и причудливыми —

и безудержно рождали новые звезды. Этот «наблюдательный тупик» слегка разрешится в следующем десятилетии, когда мы задействуем космический телескоп «Джеймс Уэбб» (наблюдающий в ИК-диапазоне), радиоинтерферометр *SKA* (наблюдающий в радиодиапазоне) и другие передовые телескопы.

Моделируемые сценарии

За последнее десятилетие команды астрофизиков, создающие численные модели, добились огромных успехов. Используя самые мощные суперкомпьютеры, многочисленные группы ученых воображали самые разные сценарии, пытаясь понять, как из расширяющегося и остывающего «бульона» темной материи и атомов возникли галактики (рис. 10.1). Как правило, эти сценарии начинаются с темной материи, поскольку под воздействием притяжения она могла начать сливаться в единое целое еще до эпохи рекомбинации. В то время обычное вещество по-прежнему пребывало в состоянии ионизированной плазмы, и поэтому стремительные потоки фотонов, продолжавшие с ней взаимодействовать, не давали ему застыть. Напротив, темная материя, не испытывавшая никаких влияний, могла пойти своим путем и гравитационно откликаться на любые первичные флуктуации,

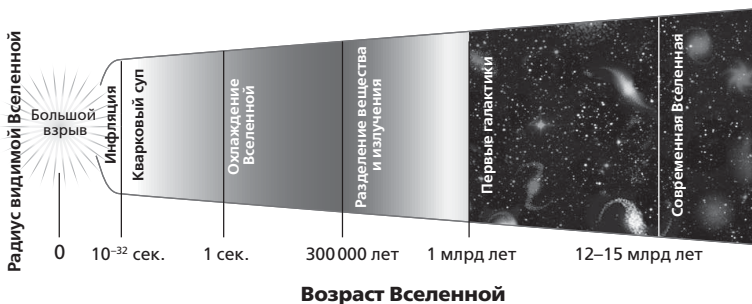


Рис. 10.1. Графическое представление эволюционирующей Вселенной, включая Темные века, эпоху формирования галактик, реионизацию и последующие преобразования в текущую эпоху. (Материалы любезно предоставлены NASA.)

которые в это время распространялись по космосу. Предполагаемое сгущение темной материи в огромные кластеры и нити могло бы подготовить декорации для появления космической паутины, а также для формирования галактик внутри ее прядей и узлов.

Как только Вселенная остыла настолько, что электроны смогли воссоединиться (рекомбинировать) с ионами и тем самым сформировать нейтральные атомы, фотоны утратили способность взаимодействовать с обычным веществом. Атомы водорода, гелия и других легких изотопов, получив свободу, устремились к центрам притяжения, впервые установленным темной материей. Еще в конце XX века теоретики говорили о том, что после рекомбинации плотность окружающей среды и температура Вселенной должны были оказаться наиболее благоприятными для возникновения относительно небольших сгустков протяженностью в несколько сотен световых лет и массой около миллиона масс Солнца. Будь эти сгустки хоть немного меньше, их собственной гравитации уже не хватило бы для противодействия всепроникающему давлению газа; а также, что значительно важнее, уменьшились бы шансы при помощи тяготения отделить столь огромное облако от расширяющейся среды.

Численное моделирование, основанное на представлении разных сочетаний холодной темной материи, обычной материи и темной энергии (модель Лямбда- CDM [ΛCDM]), предоставило нам впечатляюще подробную картину зарождения космической паутины, а также галактик и галактических скоплений, сгустившихся в ней. Ни один отдельно взятый код не в состоянии охватить невероятный динамический диапазон пространственных масштабов и ассоциируемых с ними структур, поэтому большинство моделей специализируются на определенной области. В совокупности они показали, что первые галактики, по всей вероятности, походили не на диски и сфероиды, известные нам сегодня, а скорее на маринованные корнишоны. Может быть, именно их мы и видим на снимках «Хаббла» и в других глубоких обзорах неба. Кроме того, благодаря моделям мы узнали, что спиральные галактики по завершении своего формирования оказываются более упругими, чем ожидалось. Возможно, предстоящее столкновение Млечного

Пути с галактикой Андромеды, до которого еще примерно 4 млрд лет, не будет таким катастрофическим, как полагали прежде.

И самое главное, численное моделирование выявило в галактиках сильную чувствительность к энергетической «обратной связи» от новорожденных звезд. В частности, самые массивные звезды производят интенсивное ультрафиолетовое излучение, порождают сильные ветры и, наконец, вызывают вспышки сверхновых, которые приводят к возмущениям в гравитирующих скоплениях темной и обычной материи. Возможно, этот сильный звездный «отклик» помогает замедлять формирование звезд, одновременно уменьшая общее число скоплений. И в то время как расчеты, связанные с образованием галактик в стандартной модели Λ CDM, предсказывают появление огромного роя «карликов» вокруг гигантской галактики, подобной Млечному Пути, добавление звездной «обратной связи», по всей видимости, устраняет эту проблему.

Реионизация космоса

Численные модели формирования галактик в окончательном итоге завершаются появлением «звездных кузниц». Однако до того, как в звездах начали создаваться элементы тяжелее гелия, самим звездам было очень сложно появиться в том виде, в каком они сегодня известны нам. При температурах в несколько сотен кельвинов атомы водорода и гелия излучают очень слабо и не могут избавиться от гравитационной энергии, унаследованной после коллапса родительских облаков, а значит, ни о каком дальнейшем охлаждении не может идти и речи. Учитывая такое положение дел, астрофизики предположили, что первые звезды в силу необходимости обладали невероятной массой и светимостью. Только очень массивное родительское облако могло бы иметь тяготение, способное противодействовать высоким температурам и давлениям, которые поддерживались бы в уплотняющемся водородно-гелиевом облаке.

Эти звезды первого поколения, обладавшие расчетными массами в несколько сотен солнечных масс и светимостью в ультрафиолетовом диапазоне, эквивалентной светимости многих мил-

лионов солнц, должны были бы ионизировать весь окружающий газ в галактиках-хозяйках и, более того, по всей вероятности, сделали бы то же самое с любым разреженным межгалактическим газом. Астрофизики назвали этот переломный момент эпохой реионизации, а астрономы стали искать ее подтверждения. На сегодняшний день они увидели, что спектры квазаров, абберационное время которых старше этой эпохи, выражаются из-за поглощения промежуточных нейтральных атомов водорода и гелия, в то время как при меньшем абберационном времени свидетельств такого вырождения в спектрах квазаров нет. Это связано с тем, что в последнем случае свет мог бы проходить через повторно ионизированные водород и гелий без какого-либо дальнейшего поглощения. В 2015 году астрономы заявили, что им удалось обнаружить настоящие звезды первого поколения в молодой галактике *COSMOS Redshift 7*. Эта необычно яркая галактика наблюдалась в абберационном времени, составляющем примерно 13 млрд лет, когда она излучала в основном в ультрафиолетовом диапазоне. Более того, нам не удалось выявить никаких намеков на выбросы или поглощение элементов тяжелее гелия, и это согласуется с представлением о том, что в первом поколении звездное население было не очень большим.

Наша ионизированная межгалактическая среда — это наследие эпохи реионизации. Кроме того, от первого поколения звезд нам досталось довольно много тяжелых элементов. После своей короткой, но яркой жизни эти звезды-первопроходцы взорвались, став сверхновыми, и выбросили залпы «выкованных» в их недрах элементов в свои галактики и за их пределы. Обогатившись этими тяжелыми элементами, галактические облака смогли испустить гравитационную энергию, охладиться и сжаться в более «нормальные» звезды, привычные нам.

Слияние и объединение

Как только небольшие сгустки галактик отделились от непрерывного расширения, они под влиянием тяготения начали собираться в более крупные структуры. Стоит помнить, что 13 млрд лет назад

наша наблюдаемая Вселенная была в 5 раз меньше и, следовательно, в 125 раз плотнее ($5^3 = 125$), чем сейчас. Частота столкновений между субгалактическими сгустками должна была соразмеряться с плотностью, и поэтому в переполненной ранней Вселенной тесные взаимодействия и слияния, скорее всего, были в порядке вещей.

Что же возникло за это время? Возможно, сначала образовались более крупные сфероиды, а вслед за ними — диски в тех объединявшихся системах, которые обладали значительным угловым моментом. На самом деле у астрономов нет ответа. Однако нам известно, что гигантские галактики появились поразительно быстро. Примерно через 1,5 млрд лет после Большого взрыва эти исполины уже вышли на космическую сцену. Они были в 10 раз массивнее нашего Млечного Пути и полыхали, рождая новые звезды. Как они могли сформироваться за столь краткий срок? Этот вопрос до сих пор остается серьезной проблемой для астрофизиков.

Всесторонние исследования галактик в диапазоне красных смещений и предполагаемого абберационного времени выявили довольно четкую эволюцию среднего темпа звездообразования (рис. 10.2). Большинство галактик, и в том числе Млечный Путь,

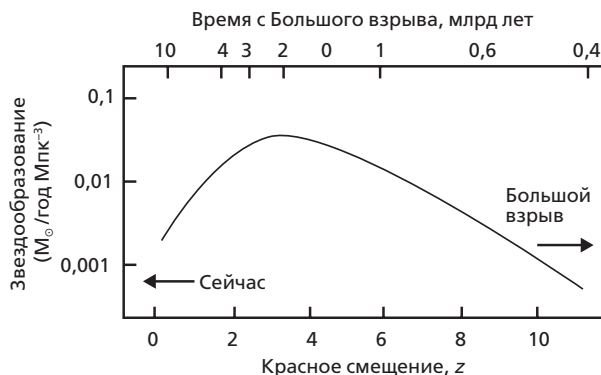


Рис. 10.2. История космического формирования звезд, где темп звездообразования в расчете на единицу совместно расширяющегося объема отображается как функция красного смещения и соответствующего абберационного времени, равного примерно 10 млрд лет. (По источнику: P. Madau and M. Dickinson, "Cosmic Star Formation History", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* [2013], База данных внегалактических объектов NASA/IPAC.)

начали рождать новые звезды более 12 млрд лет назад — менее чем через 1,8 млрд лет после Большого взрыва. Затем темп звездообразования достиг пика, заметного при красном смещении около 4, что соответствует абберационному времени примерно в 2–3 млрд лет. Сейчас средняя активность формирования звезд в галактиках — это лишь тень себя прежней.

То же самое заметно в том, как развивалась в этих галактиках ядерная активность. В данном случае появление блистающих квазаров и других мощных ядерных феноменов приписывают присутствию в этих галактиках сверхмассивных черных дыр, выросших в их ядрах. Пик активности при красном смещении около 4 указывает на то, что в ту особую эпоху эти новорожденные «чудовища» только и делали, что поглощали все вокруг, а образование звезд и массивных черных дыр в галактических центрах, по всей вероятности, было созависимым. Ряд астрономов (и в том числе я) считают, что вместе с расширением внутренних галактических областей возрастали и черные дыры в ядрах этих галактик. Другие предполагают, что черные дыры появились первыми, а потом возле них скопились остатки галактического газа и звезды.

Взгляд в будущее

Вселенная, в которой мы живем, украшена гигантскими эллиптическими и спиральными галактиками, «неправильными» галактиками, уступающими первым в размерах, и даже «карликами» самых разных форм, похожими на эллипсы, сфероиды и многое другое. В восьмой главе мы уже говорили об их характеристиках и эволюционной истории, но я бы хотел добавить еще кое-что. С учетом того, что наша Вселенная непрестанно расширяется, расстояния между группами галактик, скоплениями и сверхскоплениями будут возрастать. Однако внутри этих кластерных структур галактики будут взаимодействовать друг с другом во временных масштабах от миллиардов до десятков миллиардов лет, и непременно будут победители и проигравшие, причем после всех этих слияний и объединений общее число галактик, по всей вероятности, сократится.

Между тем количество газа, доступного для образования новых звезд, будет уменьшаться с каждой новой звездой малой и средней массы. Эти звезды не взрываются и поэтому поглощают большую часть вещества, ушедшего на их образование. Постепенно в галактиках будет рождаться все меньше звезд. Если расширение Вселенной не обратится вспять или если из космической паутины — либо из космического вакуума — не появятся новые источники вещества, способного притягиваться к астрономическим объектам, циклы рождения и гибели звезд в оставшихся галактиках завершатся сами собой, и в конце концов галактический театр погрузится во тьму. Означает ли это, что само наше существование в качестве людей на Земле, согретой Солнцем, — это совершенно особый период в расширяющемся и эволюционирующем космосе? Да, это вполне возможно. И в свете размышлений о нашем далеком будущем еще более драгоценными кажутся те физические условия, благодаря которым возникли звезды, подобные Солнцу, и такие планеты, как Земля. В следующей главе мы подробнее поговорим о том, в какой обстановке рождаются эти звезды и планеты, а также об их ранней эволюции.

11

Рождение звезд и планет

Бывало, все небо над головой усеяно звездами, и мы лежим на спине, глядим на них и спорим: что они — сотворены или сами собой народились? Джим думал, что сотворены; а я — что сами народились: уж очень много понадобилось бы времени, чтобы наделать столько звезд. Джим сказал, может, их луна мечет, как лягушка икру; что ж, это было похоже на правду, я и спорить с ним не стал; я видал, сколько у лягушки бывает икры, так что, разумеется, это вещь возможная¹.

Марк Твен. Приключения Гекльберри Финна

Будьте смиренны, ибо вы сделаны из земли.

Будьте благородны, ибо вы сделаны из звезд.

Сербская пословица

Хотя галактики и родились почти в один день, этого нельзя сказать о звездах. Примерно в течение миллиарда лет после Большого взрыва субгалактические сгустки сливались и объединялись, образуя тот «бродячий цирк» галактик, который мы наблюдаем сегодня; звезды, напротив, возникали задолго до этого времени и продолжают появляться и сейчас. Что же требуется для создания одной из этих термоядерных «электростанций» и ассоции-

¹ По изд.: *Твен М. Приключения Гекльберри Финна* / Пер. с. англ. Н. Дарузес. М.: Просвещение, 1988. С. 94.

руемой с ней системы планет, комет, астероидов и всего-всего-всего? В поисках ответа мы можем исследовать нашу Солнечную систему, изучать темные пылевые туманности, где сейчас рождаются протозвезды и протопланетные системы, и строить физические модели процесса их формирования.

Откровение от Солнечной системы

На то, как именно она формировалась, Солнечная система намекает нам на каждом шагу. Начнем со дня ее рождения. Радиометрическое датирование урана, тория и других радиоактивных изотопов в метеоритах ясно показало, что их максимальный возраст составляет 4,6 млрд лет. Такой же возраст у древнейших лунных пород, собранных и доставленных на Землю астронавтами «Аполлона». Теоретические модели Солнца и системы его «энергетической подпитки» также подтверждают эту дату. А вот каменная поверхность Земли кажется значительно моложе. Самые древние земные минералы из тех, что известны нам, — это цирконы, найденные в Джек-Хиллз в Австралии. Их первые кристаллизации произошли 4,4 млрд лет назад. Возраст старейших земных цельных горных пород, в том числе и пород Канадского щита, близок к 4 млрд лет. Эти различия дают нам сделать вывод, что для остывания, в ходе которого внешняя земная кора могла затвердеть, новорожденной Земле потребовались сотни миллионов лет.

Изначальный возраст в 4,6 млрд лет говорит нам и о том, что Солнце и Солнечная система стали далеко не первыми звездными системами в Млечном Пути. С учетом того, что предполагаемый возраст нашей Галактики составляет 12 млрд лет, мы видим, что звезды активно в ней формировались на протяжении семи с лишним миллиардов лет до появления Солнечной системы. Это важное открытие, поскольку оно свидетельствует о том, что наша планетная система получила свое наследство от тысяч поколений массивных звезд, некогда возникших, проживших яркую жизнь и погибших в яростной вспышке сверхновых. Тяжелые элементы, выброшенные ими, смешались с межзвездной средой, из которой под влия-

нием тяготения сгустилось наше родительское облако. Вот почему мы живем на поверхности каменистой планеты, полной воды, а не там, где атмосфера целиком состоит из водорода и гелия. Об этом прекрасно сказал Карл Саган: «Мы сделаны из звездного вещества».

Кроме того, форма и движение нашей Солнечной системы раскрывают многие тайны возникновения планетных систем. Примите во внимание, что все известные планеты Солнечной системы — в том числе восемь главных, а также с полдесятка «карликов» во внешних областях и мириады астероидов во внутренних — обращаются вокруг Солнца в одном направлении и почти в одной плоскости. Кроме того, большая часть планет, за исключением Венеры и Урана, вращаются вокруг своей оси в направлении своих орбит. Эти общие черты позволили астрофизикам представить, что Солнечная система — как и любая другая планетная система — возникла в результате монолитного коллапса медленно вращающегося родительского облака. Позже мы гораздо подробнее рассмотрим эту основную картину происхождения звезд и планет.

Откровение от темных туманностей

До XX века астрономы приходили в замешательство, глядя на небольшие темные участки на светлом газовом шлейфе Млечного Пути. Даже знаменитый астрофотограф Эдвард Эмерсон Барнард задумывался о природе этих лоскутов: облака ли это, закрывающие свет, или настоящие дыры в звездном небосводе? Только в 1919 году он наконец решил, что на его сверхчетких снимках запечатлены облака, содержимое которых ослабляло фоновый свет звезд. Однако лишь в 1930-х годах астрономы получили убедительные доказательства существования этой промежуточной среды, состоящей из газа и пыли, — мы сейчас называем ее межзвездной средой. Наблюдая за звездами с помощью спектроскопа, они увидели особые линии поглощения, которые нельзя было приписать самим небесным светилам. По всей видимости, эти узкие линии, соответствующие кальцию и другим элементам, происходили из некоей разреженной среды, находящейся на

переднем плане по отношению к звездам. Более того, астрономы обнаружили, что чем дальше находилась звезда, тем сильнее в ее спектре проявлялись линии поглощения. Так же вел себя и свет звезды, если говорить о яркости и цвете, — нечто, бывшее снаружи, одновременно ослабляло его и окрашивало в красные тона.

Важные подсказки для понимания природы этой межзвездной среды мы смогли получить благодаря снимкам темных и ярких туманностей, в число которых входили и объекты Барнарда, получившие свое имя в честь упомянутого астрофотографа. Например, на изображениях туманности Конская Голова (Барнард 33), названной очень верно, на ярком облакоподобном фоне видна расплывчатая темная дымка, имеющая форму лошадиной головы. Это позволило астрономам предположить, что в этой туманности присутствовали области как светящихся газов, так и темных пылевых частиц.

К 1970-м годам радиоастрономы создали достаточно гладкие зеркальные антенны и чувствительные детекторы, способные работать на миллиметровых длинах волн. Решив воспользоваться этой новой возможностью на все сто, ученые направили телескопы на свои любимые туманности в ожидании излучения от любых молекул, которые могли бы там находиться. И они не разочаровались: спектральных линий монооксида углерода, циана, формальдегида и других простых органических молекул хватало с избытком.

Как показывают самые последние карты, размеры этих молекулярных облаков варьируются от нескольких световых лет до сотен световых лет, а их масса — от нескольких тысяч до миллионов масс Солнца. Более того, облака располагаются в виде запутанных нитей, — возможно, это происходит под влиянием слабых магнитных полей, пронизывающих межзвездную среду. По всей видимости, эти нити играют роль важного связующего звена в формировании ядер в облаках, а также протозвездных систем, которые развиваются в этих ядрах.

Тщательные спектроскопические наблюдения, проведенные в радиоволновом диапазоне, показали, что молекулярные облака невероятно холодны и их температура не более чем на несколько десятков градусов Цельсия выше абсолютного нуля. Такое состоя-

ние, называемое криогенным, дает нам еще один важный ключ к пониманию того, как происходит формирование звезд и планет. В этих очень холодных мирах гравитация способна оказаться сильнее, чем случайные движения разных молекул. И как только она берет верх, может начаться сгущение вещества, отчего образуются молекулярные ядра, плотность которых в тысячу раз больше, чем у окружающих облаков. И более того, астрономы все никак не могли понять, что удерживает молекулярные ядра от гравитационного коллапса и не позволяет им устроить грандиозную вакханалию с рождением новых звезд. Здесь нам на помощь придет «тонкая настройка». Во-первых, следует учесть и другие движения, в том числе вращение ядра и внутреннюю турбулентность; кроме того, свою роль могут играть и магнитные поля, поскольку они будут усиливаться, если окажутся в тесной связи с уплотняющимися облаками. Наконец, любые новорожденные звезды будут вливать в остатки облаков, из которых они появились, лучистую и механическую энергию — и тем самым предотвратят дальнейшее сгущение. В молекулярных облаках мы наблюдали проявления всех этих опосредующих факторов, но пока еще не ясно, насколько важен каждый из них.

Наблюдениям за плотными молекулярными ядрами способствовали недавние кампании по визуализации и спектроскопии в среднем ИК-диапазоне. На этих длинах волн активно светятся как сложные органические молекулы, так и микроскопические пылинки. Космический телескоп «Спитцер» особенно искусно картировал и описывал звездообразующие ядра молекулярных облаков, расположенных в созвездиях Тельца, Ориона и Цефея, а также многих других, населяющих Млечный Путь. Кроме того, «Спитцер» получил четкие снимки нескольких гигантских молекулярных облаков, в которых находятся самые массивные, горячие и мощные новорожденные звезды. У этих туманных великанов видны обширные полости со странными пальцевидными выпуклостями, указывающими назад, на активные звезды. Такие полости — это итог интенсивной чистки и ударов, которые окружающему пространству туманностей наносят ультрафиолетовое излучение и ветры горячих звезд. Известные Столпы Творения,

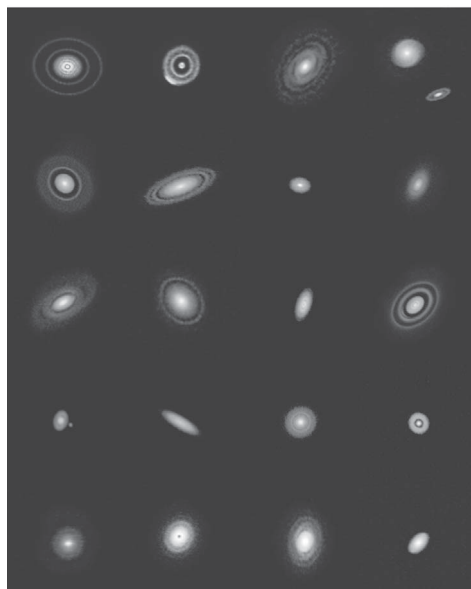


Рис. 11.1. Галерея из двадцати протопланетных дисков, снятых комплексом радиотелескопов *ALMA* на миллиметровых длинах волн. Здесь свет исходит от микроскопических пылинок при криогенных температурах около 20–40 K. (Материалы любезно предоставлены *ALMA* [*ESO/NAOJ/NRAO*], S. Andrews et al.; [*NRAO/AUI/NSF*], S. Dagnello.)

характерная черта туманности Орел (M16), а также туманность Душа (W5) свидетельствуют о преобразующем воздействии массивных горячих звезд на мир, в котором они родились. Мы собрали уже много фактов, свидетельствующих о том, что Солнце и Солнечная система сформировались внутри одной из таких «звездных колыбелей». Так что тяжелые элементы, по всей вероятности, достались нам в наследство не только из ближайших сверхновых, но и из самой межзвездной среды.

Направив окуляры своих телескопов на молекулярные ядра, астрономы постигали проявления звездного генезиса — они искали протозвезды и любые протопланетные диски, которые могли бы их окружать. Космический телескоп «Хаббл» первым получил четкое изображение таких дисков — в туманности Ориона, где они предстали в виде силуэтов на фоне розового свечения.

А совсем недавно комплекс радиотелескопов *ALMA*, расположенный в Чили, запечатлел удивительный «паноптикум» протопланетных дисков. Одни из них гладкие, по другим идут спиральные волны плотности, а у некоторых есть темные кольца — знак того, что вещество из областей, определенных этими радиусами, пошло на формирование планет (рис. 11.1). И, наконец, многочисленные наземные и космические обсерватории проследили непосредственные отклики возникающих звезд. Можно даже увидеть, как с противоположных концов некоторых протозвезд вырываются струи светящегося газа, официально названные объектами Хербига — Аро в честь Джорджа Хербига и Гильермо Аро, астрономов из Америки и Мексики, которые первыми заговорили о таких потоках еще в 1940-х годах.

Откровение от физических моделей

Сумев пронаблюдать присутствие молекулярных ядер, протопланетных дисков и зрелых планетных систем, к которым относится и наша, астрофизики добились значительных успехов в описании процесса образования звезд. Многим мы обязаны Пьеру-Симону Лапласу, который еще в конце XVIII столетия первым выдвинул небулярную гипотезу, призванную объяснить, как возникла Солнечная система. Он учел, что на облако (или на туманность) воздействует его собственное тяготение, сделал поправку на некоторое общее вращение и понял, что сплющивание облака будет проходить преимущественно вдоль его оси вращения. Вдоль экватора вещество сжалось бы не так сильно, поскольку сила тяжести, направленная внутрь, по большей части пошла бы на то, чтобы ограничить его вращательное движение. Этот гравитационный коллапс, имевший предпочтительное направление, сам собой привел бы к появлению центральной области, в которой концентрация вещества была бы максимальной, и плоского диска с его остатками, из которых в конечном итоге возникли бы звезда-хозяйка и группа планет, идущих вокруг нее по орбитам в одном и том же направлении (рис. 11.2).

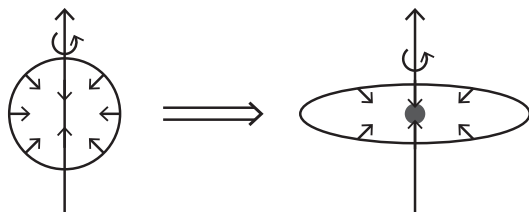


Рис. 11.2. Упрощенное изображение вращающегося облака, которое под действием собственной гравитации коллапсирует в центральную массу и окружающий ее диск, в том виде, в котором его впервые в конце XVIII века описал Пьер-Симон Лаплас. Вращение облака уменьшает ускорение свободного падения на его экваторе, в результате чего образуется сплюснутый диск. Центральная масса со временем станет самосветящейся звездой, а диск распадется на планеты.

Со времен Лапласа астрономы пытались решить множество проблем, связанных с этой гипотезой. Одна из главных загадок заключается в том, как именно молекулярное ядро, которому приходится претерпевать сгущение, вращение и сжатие, справляется со своим начальным угловым моментом (вращающейся массой). Поскольку большая часть вещества под действием гравитации направляется к центральной протозвезде, последняя должна обладать наибольшим угловым моментом в системе. И поскольку она коллапсирует на много порядков величины, то должна раскручиваться до невероятных скоростей, чтобы сохранить свой изначальный угловой момент. Мы уже упоминали, что именно для этого фигуристка во время вращения прижимает руки к груди; можно еще привести пример с ныряльщицей, которая группируется во время прыжка в воду. Впрочем, в коллапсирующих ядрах такой вращательной динамики мы не увидим. Взгляните на Солнце. Оно содержит более 99% массы Солнечной системы и все же вращается довольно спокойно, делая один оборот вокруг своей оси за двадцать семь дней. Следовательно, большая часть оставшегося углового момента Солнечной системы сосредоточена на орбитах планет-гигантов, особенно Юпитера. Куда же исчез остальной угловой момент изначальной Солнечной системы?

Одно из возможных решений этой проблемы — избавиться от значительной доли массы исходного диска, вращающейся и дви-

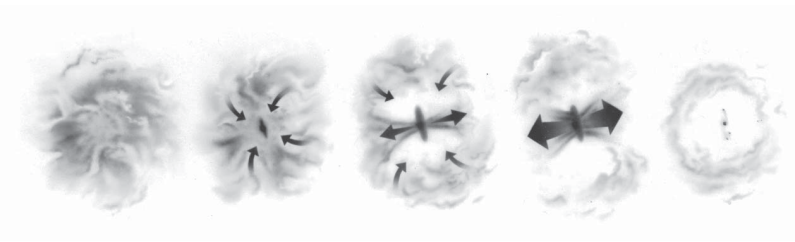


Рис. 11.3. Этапы рождения звезды (слева направо). Сперва возникает ядро молекулярного облака, затем под действием гравитации к нему поступает газ, из которого образуются протозвезда и аккреционный диск. В дальнейшем от протозвезды отходит биполярное истечение, вследствие чего из протопланетного диска удаляется вещество и остается звезда с обращающимися вокруг нее планетами — такой вид характерен для «зрелых» планетных систем, в том числе и для нашей. (Материалы любезно предоставлены: Charles Lada [Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики], Rob Wood [иллюстратор].)

жущейся под действием гравитации. Иными словами, в формирующейся Солнечной системе должен был появиться сильный отток от диска. Это помогло бы объяснить и биполярные истечения, которые наблюдались у многих протозвезд.

С учетом противоречивой динамики, участие в которой принимают и гравитация, и вращение, и магнитные поля, и излучения, и другие воздействия, рассказ о формировании звездных и планетных систем из туманного вещества может оказаться немного сложным. На рис. 11.3 изображены ключевые этапы рождения, которые, как полагают, сменяют друг друга в ходе метаморфоз.

Считается, что полное превращение из протозвезды, которую можно распознать, в звезду, подобную Солнцу, занимает всего 30 млн лет. Звезда массой в $40 M_{\odot}$ (такая дает энергию туманности Ориона) сформировалась бы всего за 100 000 лет, что приблизительно эквивалентно возрасту человечества, в то время как образование звезды с массой $0,1 M_{\odot}$ (скажем, такой, как Проксима Центавра, карлик класса М — вторая из ближайших к нам) заняло бы до миллиарда лет. Как мы еще увидим, и жизнь, и гибель звезд в решающей степени зависят от их первоначальной массы.

Циклы жизни и гибели звезд

Все-таки они не просто красивы — звезды подобны деревьям в лесу, они живут и дышат.

И они наблюдают за мной.

Харуки Мураками. Кафка на пляже

Ничто не вечно, даже звезды. Их рождение в космическом холоде, их бурная молодость и стабильная зрелость, их «старческое оплывание» и окончательное угасание — все это предполагает множество превращений. Астрономы смогли составить единую картину циклов жизни и гибели звезд, рассмотрев каждую наблюдаемую звезду как «моментальный снимок» в соответствующей истории ее существования. Оказывается, участь звезды в плане времени жизни и эволюционных изменений, которые с ней произойдут, во многом определяет ее масса.

Маломассивные звезды

Звезды с наименьшей массой (от 0,08 до 0,8 M_{\odot} , спектральный класс М) меняются меньше всего, поскольку они полностью конвективны (рис. 12.1). Со временем каждый атом такой звезды циклически проходит через ядро, в котором происходят термоядерные реакции, и питает звездную «электростанцию», пока все водородное топливо не переплавится в гелий. Что ждет их в конце,

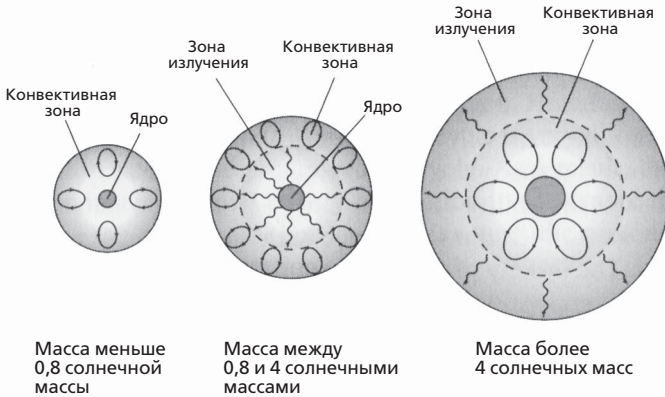


Рис. 12.1. Внутреннее строение звезд с различной массой. Маломассивные звезды (слева) полностью конвективны. У звезд средней массы (в середине) конвективные зоны располагаются над зонами излучения, у массивных (справа) — наоборот. (По источнику: *Astronomy*, С. J. Peterson.)

неизвестно: эти звезды живут очень долго. И более того, каждая маломассивная звезда, возникшая в Млечном Пути за 12 млрд лет его существования, все еще полна жизни.

Солнцеподобные звезды

Солнцеподобные звезды (от 0,8 до 1,4 M_{\odot} , спектральные классы K, F и G) 90 % своей жизни проводят на относительно стабильной главной последовательности (рис. 12.2). Все это время в ядре прежде всего «сгорает» водород и образуется гелий. Этот процесс высвобождает энергию, которая передается наружу через остальные области звезды. Сразу за пределами ядра высокоэнергетические фотоны нагревают частицы газа, которые в дальнейшем, в соответствии со своими температурами, излучают энергию повторно. По мере того как излучение распространяется вовне, нагревается все больше частиц газа, но их температуры по сравнению с той, что царит в ядре, становятся все ниже. В зоне лучистого переноса то, что некогда представляло собой горстку гамма-квантов, преобразуется в поток ультрафиолетового излучения и види-

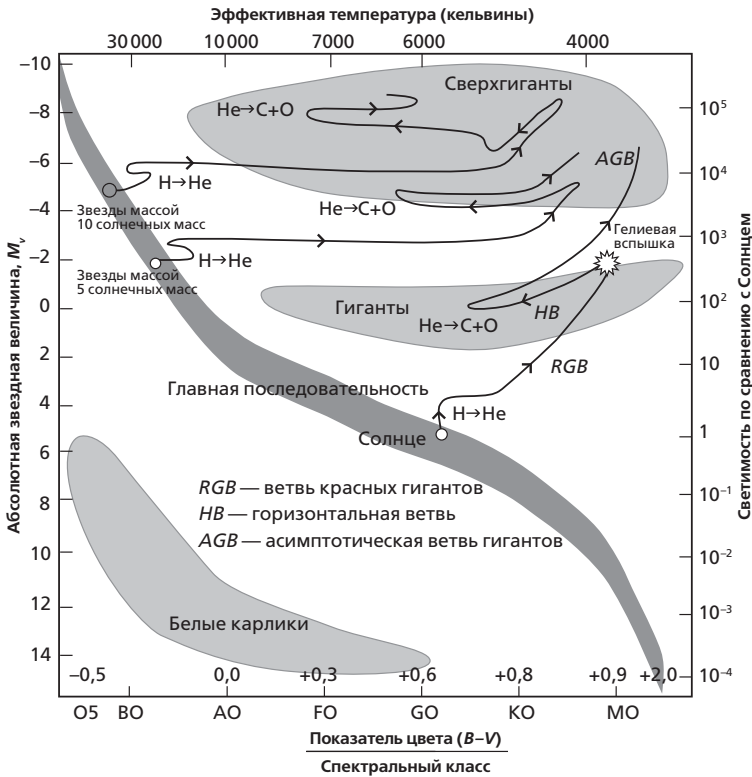


Рис. 12.2. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела, показывающая светимость звезды в зависимости от ее цвета, спектрального класса и температуры ее поверхности. Голубоватые горячие звезды — слева, красноватые холодные — справа. Обозначены звезды главной последовательности, гиганты, сверхгиганты и белые карлики, а также ветвь красных гигантов (RGB), горизонтальная ветвь (HB), асимптотическая ветвь гигантов (AGB) и часть эволюционных путей для звезд различной массы. (По источнику: сайт *Australia Telescope Outreach and Education*, владелец — Государственное объединение научных и прикладных исследований [CSIRO] Австралии.)

мого света, энергия фотонов в котором относительно низка. В двух третях пути от ядра к внешним оболочкам в дело вступают гигантские конвекционные потоки, поднимающие нагретые частицы к поверхности, где те излучают энергию (в основном в видимом диапазоне длин волн), охлаждаются, уплотняются, а затем опускаются обратно, вниз, чтобы повторить конвекционный цикл.

А как же все обстоит с самим Солнцем? Оно сформировалось из туманного вещества 4,6 млрд лет назад и находится в середине своего жизненного пути в качестве обычной звезды главной последовательности. За это время атомные ядра водорода в ядре Солнца активно переплавлялись в атомные ядра гелия с выделением нейтрино и гамма-лучей — последние дают Солнцу световую энергию. Этот термоядерный синтез привел к тому, что в солнечном ядре теперь преобладают атомные ядра гелия, каждое из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов, а не изначальная когорта атомных ядер водорода, состоящих из одиночных протонов. И это значит, что общее количество автономных частиц в ядре неуклонно сокращается.

Согласно закону идеального газа, внутреннее давление зависит как от количества частиц, так и от их общей температуры. И если частиц становится меньше, температура должна повышаться, чтобы поддерживать давление, необходимое для предотвращения гравитационного коллапса. Так возникает звезда, у которой непрестанно возрастают и температура ядра, и соответствующая ей светимость. Возможно, Солнце, светившее над ранней Землей, было намного более тусклым. Еще через несколько миллиардов лет наша звезда будет намного ярче, чем сейчас, и жизнь на Земле станет невыносимой — причем еще до того, как Солнце перейдет в стадию красного гиганта.

Теперь стоит сказать, что в звездах, подобных Солнцу, внутренний излучающий слой отделен от внешнего конвективного слоя, и из-за этого ядро, в котором совершаются термоядерные реакции, не имеет доступа ко всему водороду звезды. В конце концов в нем закончится топливо, оно перейдет в бездействующее состояние, и произойдет его гравитационный коллапс, отчего водород начнет сгорать в оболочке, расположенной непосредственно за пределами сжатого ядра. Такое горение характерно для стадии красного гиганта, во время которой звезда расширяет внешние слои до тех пор, пока не увеличится в 100 раз. Менее чем через 1,2 млрд лет после того, как звезда уйдет с главной последовательности, плотность и температура в ее сжимающемся ядре

станут достаточно высокими для того, чтобы содержащийся в нем гелий переплавился в углерод и кислород. В ходе этих термоядерных реакций энергия высвобождается значительно слабее, и скорость их протекания должна увеличиться, иначе случится коллапс. В это время звезда находится на стадии горизонтальной ветви (рис. 12.2), которая продлится всего около 100 млн лет.

Исчерпав запасы гелиевого «топлива», ядро снова станет сжиматься до тех пор, пока гелий не начнет синтезироваться в оболочке, окружающей ядро. Эту оболочку, в свою очередь, окружит другая, в которой будет происходить ядерное горение водорода. Светимость звезды будет постоянно возрастать, и она вступит в стадию асимптотической ветви гигантов (рис. 12.2). В этот момент размер звезды, возможно, сравняется с протяженностью орбиты Марса, а внешние слои звездной атмосферы станут достаточно прохладными, благодаря чему некоторые газы, присутствующие в них, смогут кристаллизоваться в микроскопические пылинки, а атомы углерода, кремния и кислорода, некогда свободные, осядут в виде крупниц силиката и графита величиной с частички сажи. В дальнейшем наличие двух оболочек, в которых проходит термоядерный синтез, приведет к нестабильности, нестабильность вызовет пульсации, эти пульсации породят сильные ветры, а ветры вытолкнут пылинки прочь и наполнят межзвездную среду достаточным количеством пыли, чтобы из нее образовались планетезимали и, в конечном итоге, планеты. Так что и наша родная Земля, и другие каменные планеты обязаны своим происхождением могучим ветрам некогда гигантских звезд!

У звезды, подобной Солнцу, стадия асимптотической ветви гигантов длится всего 20 млн лет. В течение этого краткого периода мощные звездные ветры будут удалять все больше и больше массы, обнажая остатки углеродно-кислородного ядра. А само ядро будет сжиматься до тех пор, пока не превратится в белого карлика, способного противостоять своей сокрушительной самогравитации за счет сил отталкивания между его электронами (подробнее об этом в гл. 13). Поскольку поверхность углеродно-кислородного белого

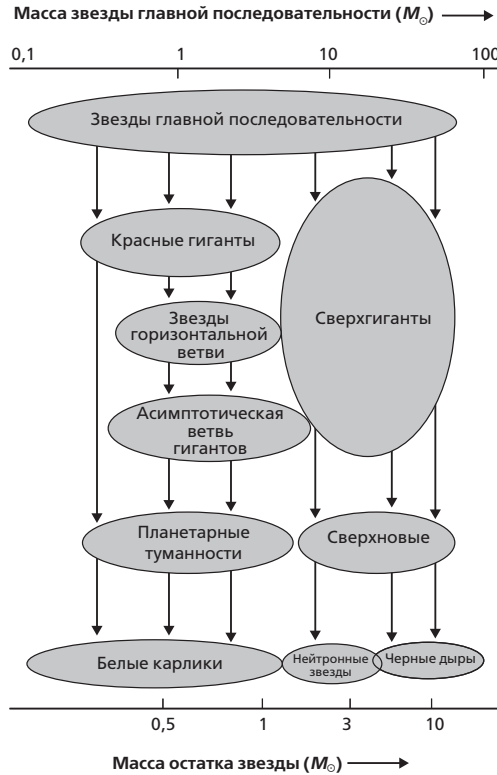


Рис. 12.3. Пути эволюции звезд и их зависимость от изначальной массы. Звезды средней массы становятся белыми карликами, а массивные звезды — либо нейтронными звездами, либо черными дырами. (Приводится с изменениями по источнику: *Discovering the Universe*, W. J. Kaufmann and N. F. Comins, 4th edition, W. H. Freeman [1996].)

карлика необычайно горяча — от 30 000 до 100 000 К, — она обильно излучает в ультрафиолетовом диапазоне, а излучение ионизирует газы, переносимые ветрами, и заставляет их флуоресцировать. Так возникает планетарная туманность, чья изящная форма и цветовая палитра продержатся всего мгновение — 10 000 лет, — прежде чем рассеяться в космосе. И теперь, когда уже ничто не повлияет на статическое равновесие плотного остатка звезды, белый карлик будет медленно охлаждаться за счет теплопроводности и излучения на протяжении миллиардов лет (рис. 12.3).

Другие звезды средней массы

Звезды, которые значительно тяжелее Солнца ($1,4\text{--}8\ M_{\odot}$), проходят через те же эволюционные фазы, что и солнцеподобные звезды, но с неожиданным поворотом. Находясь на главной последовательности, они точно так же синтезируют гелий из водорода, присутствующего в их ядрах. Однако у них в термоядерный синтез вовлекаются еще и доступные атомные ядра углерода, азота и кислорода, что ускоряет протекание реакций. Такие каталитические реакции требуют поддержания в ядре, где совершается термоядерный синтез, более высоких температур, и поэтому они могут протекать только в звездах с большей массой. Это так называемый *CNO*-цикл — он помогает более массивным звездам, находящимся на относительно стабильных стадиях главной последовательности, значительно увеличить их светимость.

Массивные звезды

Считается, что разделительная линия между звездами средней массы и массивными звездами пролегает на отметке примерно в 8 масс Солнца. Если этот порог превышен, то термоядерный синтез в ядре звезды, идущий на всем протяжении ее жизни, может выйти за рамки последовательности превращения водорода в гелий, гелия в углерод, а углерода — в кислород, свойственной звездам средней массы. У массивных звезд ($8\text{--}120\ M_{\odot}$) температура ядра может настолько возрасти, что кислород начнет превращаться в кремний, а кремний — в железо, а попутно звезда раздуется и станет сверхгигантом, размер которого может превышать протяженность орбиты Сатурна. После синтеза гелия в углерод, кислород и неон звезда примерно за сутки преобразует эти элементы в кремний, затем в железо — и все заканчивается.

Атомное ядро железа обладает большей (отрицательной) энергией связи, чем все остальные элементы. Синтез таких атомных ядер в более тяжелые потребовал бы *дополнительной* (положительной) энергии для запуска реакции. Подобные эндотермические

реакции хорошо протекают при наличии удобного источника энергии — в пример можно привести, скажем, солнечный свет, при участии которого идет фотосинтез. Однако в ядрах звезд нет запаса энергии для воспламенения железа — и под воздействием гравитации бездействующее ядро коллапсирует менее чем за секунду, а в результате высвобождения гравитационной энергии в остальной части звезды происходит колоссальный взрыв.

Когда массивная звезда превращается в сверхновую, она может затмить по блеску всю свою галактику. По прошествии от нескольких недель до нескольких лет сверхновая потускнеет и будет едва различима. Вещество, выброшенное ею в космос, образует остаток сверхновой, содержащий все тяжелые элементы, созданные в ней до взрыва и при его совершении. А мы, безусловно, должны быть благодарны таким звездным взрывам за большую часть периодической таблицы химических элементов.

О том, что происходит с остатками ядер массивных звезд после коллапса, мы поговорим в следующей главе.

13

Загадки материи и энергии

Есть многое на свете, друг Горацио,
Что и не снилось нашим мудрецам.

Уильям Шекспир. Гамлет

Среди бесчисленных чудес планетарного, звездного и галактического происхождения скрыты еще более таинственные и причудливые явления. Невероятно плотные крупницы вещества, едва колеблющиеся волны пространства-времени, призрачные проявления темной материи и темной энергии — космос все так же манит величайшие умы и ускользает от них. К загадкам материи и энергии относятся белые карлики, нейтронные звезды, пульсары — и, конечно же, как звездные, так и галактические черные дыры. Мы знаем, что нейтронные звезды существуют, поскольку наблюдали их в центрах остатков сверхновых — часто в облике пульсаров. Также мы достаточно уверены в существовании звездных черных дыр, поскольку нам удалось обнаружить обычные звезды в тесных двойных парах с невидимыми объектами соответствующей массы. И более того, в 2015 году мы впервые зафиксировали гравитационные волны, вызванные столкновением двух черных дыр звездной массы. Вслед за этими долгожданными «отпечатками» колеблющегося пространства-времени мы в 2017 году уловили гравитационные волны от двух столкнувшихся нейтронных

звезд. Недавние успехи специалистов в гравитационно-волновой астрономии резко контрастируют с продолжающимися неудачами физиков, которые пытаются понять природу темной материи и темной энергии. Имеются веские доказательства того, что обе эти формы материи-энергии пронизывают космос. Мы просто пока не знаем, что включает их в себе.

Белые карлики

В предыдущей главе мы говорили, что звезды средней массы ($0,8\text{--}8 M_{\odot}$) последовательно превращают водород в гелий, гелий — в углерод, а углерод — в кислород. Дальнейшие реакции термоядерного синтеза требуют наличия в центре звезды более высоких температур, чем те, что достижимы при этих звездных массах. Поэтому реакции термоядерного синтеза в конце концов прекращаются — и ядро, в котором некогда шел этот синтез, сжимается под собственной тяжестью, отчего возникает удивительно красивый углеродно-кислородный самородок с массой Солнца, но размером с Землю. Он «металличесен» в том смысле, что кристаллизованные атомные ядра окружены электронами проводимости, и при плотности в миллион граммов на кубический сантиметр белый карлик плотнее всего, что мы можем изготовить в лаборатории. Более того, чайная ложка его вещества имела бы такую же массу, как автомобиль среднего размера.

Однако странности белого карлика не заканчиваются его металлическими свойствами и поразительно высокой плотностью. Когда атомы так тесно прижаты друг к другу, начинают проявляться причудливые квантовые эффекты. Согласно принципу запрета Паули, никакие две частицы не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Это означает, что никакие два электрона в белом карлике не могут обладать одинаковой энергией, поэтому энергии электронов и соответствующие давления зависят только от плотности остатка звезды — температура больше не играет в поддержании повышенного давления никакой роли. Это необычное явление — вырождение электронов — удерживает белого карлика от дальнейшего коллапса.

Представьте себе обычную звезду. Если к ней добавится масса, то повысится центральное давление, соответственно возрастут температура и светимость, и звезда расширится. Так ведут себя звезды главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга — Рес-села. Такие звезды с большей массой и соответствующей светимостью (Спика, Вега, Сириус) значительно крупнее своих собратьев с меньшей массой (Солнце, звезда Барнарда) (рис. 7.6). Однако в белом карлике добавление вещества приводит к тому, что остаток становится меньше! Добавленное вещество не увеличивает ни внутреннее давление, ни соответствующую температуру — и он сжимается под собственной тяжестью. Конечно, такому поведению есть предел, когда накапливается достаточно массы, чтобы сформировать остаток с практически нулевым радиусом. В 1930 году великий индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар подсчитал, что предельная масса будет ровно в 1,4 раза превышать массу Солнца. Как показали наблюдения, расчетные массы белых карликов варьируются от 0,17 до 1,33 M_{\odot} , что, по всей видимости, подтверждает этот предел. Масса большинства белых карликов составляет 0,5–0,7 M_{\odot} . Если же масса звездного ядра превышает предел Чандрасекара, ему суждено образовать нечто совершенно иное, и мы поговорим об этом чуть позже.

Может быть, белые карлики и малы, но время от времени они способны затмить своих звездных родственников огромными показателями других величин. Поскольку их звездные массы сосредоточены в формах планетарного размера, их поверхностная гравитация необычайно высока — она в миллиард с лишним раз превышает поверхностную гравитацию Земли. Все, что упадет на поверхность белого карлика, произведет большой взрыв. Именно это случается, когда белый карлик находится в тесной двойной звездной системе. По мере того как звезда-спутник превращается в красного гиганта, ее внешняя атмосфера подпадает под гравитационное воздействие белого карлика, затем вещество от несчастного гиганта обтекает белого карлика и проникает на его поверхность. Вещества становится все больше, и в какой-то критический момент, по достижении пороговых значений массы и плотности,

на поверхности белого карлика начинается неконтролируемая цепная термоядерная реакция. Этот бушующий пожар звездных масштабов был отождествлен с «новой звездой», феноменом, при котором яркость звезды-спутника внезапно возрастает минимум в 10 000 раз, а максимум — в 16 миллионов раз (на 10–18 звездных величин). Теперь мы знаем, что это — разительно заблиставший белый карлик, невидимый в иных условиях. В Млечном Пути ежегодно наблюдается около десяти «новых звезд», причем примерно одну из них можно заметить невооруженным глазом.

Последнее, что может совершить белый карлик, — это взорваться и выбросить в космос все свое вещество. Считается, что это происходит в тесных двойных системах, когда белый карлик накапливает достаточно массы от звезды-спутника и превышает предел Чандрасекара в $1,4 M_{\odot}$. Внезапный взрыв, направленный вовнутрь, вызывает ударные волны, которые разрывают остатки белого карлика. Последствия таких взрывов предстают перед астрономами в виде сверхновых типа Ia, когда в спектрах вспышек очень мало эмиссионных линий водорода, поскольку взрывающийся белый карлик по большей части лишен какой-либо водородной оболочки. А вот коллапс ядра у массивных звезд, богатых водородом, приводит к образованию сверхновых типа II, в спектрах которых эмиссионных линий водорода много. Все сверхновые типа Ia возникают из остатков, практически равных по массе, и обладают одинаковой полной светимостью, поэтому их можно использовать как стандартные свечи при определении расстояний до галактик, в которых эти звезды находятся. Так астрономы достоверно подсчитали расстояния до галактик, удаленных от Земли на миллиард световых лет.

Нейтронные звезды

На массивной звезде с бездействующим ядром, масса которой превышает $1,4 M_{\odot}$, под воздействием гравитации произойдет имплозия — взрыв, направленный вовнутрь, — после чего она превратится либо в нейтронную звезду, либо в черную дыру. Мы уже говорили,

что это приведет к взрыву окружающих звездных оболочек, и перед наблюдателем этот взрыв предстанет в виде сверхновой II типа. Астрономы полагают, что разделительная линия, определяющая судьбу такой звезды, проходит на уровне примерно $3 M_{\odot}$. Для нейтронной звезды сдвливание прекращается, когда остаток достигает плотности ядра — точки, в которой вырожденные электроны, соединившись с протонами в атомных ядрах углерода и кислорода, образуют нейтроны. После этого перед нами, по сути, возникает гигантское атомное ядро, состоящее исключительно из вырожденных нейтронов. Остаток звездного ядра приходит в это состояние после того, как коллапс сожмет его до размеров города — около 25 км в поперечнике. Итоговая плотность в 10^{14} г/см³ превышает плотность белого карлика в 100 миллионов раз. Чайная ложка вещества нейтронной звезды имела бы массу, эквивалентную массе Эвереста, — и если бы эту ложку уронили на поверхность Земли, ее содержимое прошло бы сквозь каменную толщу, как пуля сквозь воздух, а затем металось бы от места удара к другой стороне Земли и обратно, наподобие игрушечной катушки йо-йо.

В 1930-х годах, вскоре после открытия нейтронов, астрономы впервые выдвинули гипотезу о том, что взорвавшиеся остатки массивных звезд могут существовать как нейтронные звезды. Но только в 1960-х годах им удалось получить убедительные доказательства реального присутствия этих невероятных объектов в космосе. В 1967 году аспирантка Джоселин Белл (позже Белл Бернелл) и ее научный руководитель Энтони Хьюиш впервые заметили странности с радиосигналами, регистрируемыми в Маллардовской радиоастрономической обсерватории в Англии. Что-то в космических безднах вспыхивало и гасло в необычайно регулярном ритме. Последующие наблюдения, проведенные несколькими радиообсерваториями, выявили десятки мерцающих источников радиоизлучения по всей небесной сфере. Эти источники пульсировали с периодичностью от нескольких секунд до нескольких миллисекунд, и хотя изначально их в шутку называли *LGM* (от *little green men*, «маленькие зеленые человечки»), позже они получили более почтенное наименование «пульсары», которое с тех пор за ними и закрепилось.

Астрономы уже знали о пульсирующих звездах, но период их пульсаций занимал от нескольких часов до нескольких дней и даже недель. Ни одна обычная звезда не смогла бы пульсировать с интервалом от секунды до миллисекунды: за несколько таких пульсаций ее просто разорвало бы на куски, причем не смог бы устоять даже белый карлик. Возможно, если бы он вращался, то мог бы испускать излучение по направлению к нам при каждом обороте своего остатка — но для объяснения феномена пульсара требовалось допустить вращение столь стремительное, что гравитация, характерная для белого карлика, не смогла бы удержать его от разрыва. Оставалась лишь модель нейтронной звезды, постулированная еще в 1930-х годах. Такая звезда, масса которой намного превышала массу Солнца, а объем был сравним с объемом сибирского озера Байкал, обладала бы достаточно сильной самогравитацией, чтобы противостоять своему безудержному вращению.

Раскрыть тайну пульсара можно, если немного схитрить и позволить полюсам интенсивного магнитного поля нейтронной звезды немного отклониться от оси ее вращения. Здесь, на Земле, пусть и в меньшей степени, наблюдается столь же асимметричное взаимное расположение соответствующих осей. В таком случае магнитные полюса описывают вокруг осей вращения круги (рис. 13.1). Открытые силовые линии магнитного поля на полюсах обеспечивают выброс электромагнитного излучения, которое проходит сквозь области Галактики подобно лучу маяка, и если Земля случайно оказывается на пути этого луча, то наши радиотелескопы улавливают регулярные пульсации излучения. В итоге астрономы объясняют пульсары как нейтронные звезды, у которых магнитные оси время от времени проходят через наш луч зрения. Поскольку эта модель работает как никакая другая, она получила широкое признание.

Большинство нейтронных звезд не проявляют феномена пульсара, поскольку лучи, испущенные ими с обоих полюсов, не проходят через наш луч зрения. Впрочем, некоторые из этих чрезвычайно малых объектов были обнаружены непосредственно в центрах остатков молодых сверхновых. Все еще невероятно

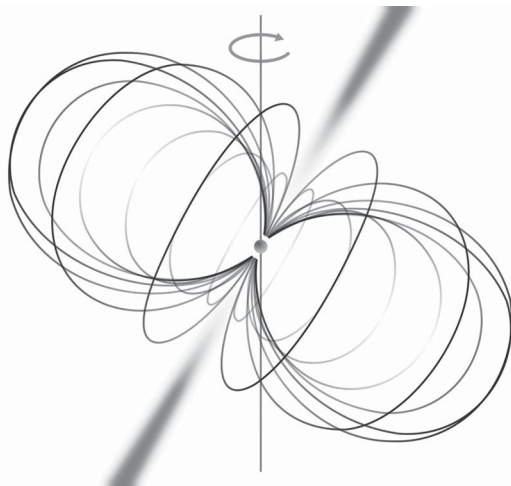


Рис. 13.1. Схематический рисунок быстро вращающейся нейтронной звезды, испускающей электромагнитное излучение вдоль своей магнитной оси. Считается, что именно такая конфигурация, для которой характерны значительная плотность, сильная намагниченность и высокая энергия, порождает феномен пульсара. (Материалы любезно предоставлены Roy Smits, *Wikipedia Commons*.)

горячие после имплозии, приведшей к их появлению на свет, новорожденные нейтронные звезды обильно излучают в рентгеновском диапазоне. Остаток сверхновой Кассиопея А — отличный пример нейтронной звезды, которая не является пульсаром. Совсем недавно, в 2017 году, Кассиопея А и ее нейтронная звезда, которым, по нашим наблюдениям, всего 330 лет, были сфотографированы космической рентгеновской обсерваторией «Чандра» (sm.chandra.harvard.edu/photo/2017/casa_life/).

Подобно белым карликам, нейтронные звезды могут становиться очень «энергичными», когда находятся в тесной парной связи с другими звездами, более близкими к нормальным. Подобно тяготению белого карлика, мощная гравитация нейтронной звезды поглощает внешнюю атмосферу звезды-спутника. Только в данном случае риск намного выше, поскольку нейтронная звезда, в сравнении с белым карликом, обладает поверхностной гравитацией, которая больше в 300 000 раз. В итоге происхо-

дят взрывы такой силы, что они могут объяснить ряд наиболее колоссальных выбросов энергии, случившихся в космосе. Эти самые экстремальные из так называемых катаклизмических переменных излучают свои тревожные сигналы как в рентгеновском, так и в гамма-диапазоне.

Черные дыры

Общее определение черной дыры — это область в пространстве, из которой не может вырваться ничто, даже свет. Другими словами, чтобы выбраться из нее, пришлось бы двигаться быстрее скорости света. Считается, что такие скорости физически невозможны.

Черной дырой может стать любой материальный сгусток. Самое сложное — это сжать его настолько сильно, чтобы все его вещество уместилось в пределах горизонта событий черной дыры, где гравитационная энергия едва способна сдержать кинетическую энергию любого фотона. У невращающейся черной дыры горизонт событий соответствует гравитационному радиусу, или радиусу Шварцшильда (R_s), который можно выразить в виде формулы:

$$R_s = (2 \cdot G \cdot M) / c^2,$$

где M — масса сгустка, G — гравитационная постоянная, или постоянная Ньютона, а c — скорость света. Если бы вы захотели превратить Землю в черную дыру, вам пришлось бы сжимать ее до тех пор, пока она не поместилась бы в сфере, радиус которой равнялся бы девяти миллиметрам — это радиус небольшого шарика. Совершить нечто подобное вам не позволят прочные электрохимические связи, характерные для каменных недр нашей планеты. Для Солнца радиус Шварцшильда — три километра. Но наша звезда никогда его не достигнет, поскольку максимальный предел, до которого она может сжаться, став при этом белым карликом, совпадает с размерами Земли, а на то, чтобы коллапс продолжился, у нее просто не хватит массы.

Черные дыры звездной массы

Бездействующие ядра звезд с массой от 3 до $30 M_{\odot}$ могут сжаться еще сильнее, чем у белого карлика и нейтронной звезды, и превратиться в черные дыры. Так происходит потому, что вырожденные электроны в белом карлике и вырожденные нейтроны в нейтронной звезде не могут создать достаточное давление, способное противостоять сокрушительной гравитации этих более массивных ядер. Считается, что бездействующие ядра белого карлика и нейтронной звезды, миновав соответствующие им радиусы Шварцшильда (от 9 до 30 км), взрываются вовнутрь и исчезают внутри своих горизонтов событий. О том, что происходит внутри горизонта событий, можно только догадываться. Достигает ли материя, взорвавшаяся вовнутрь, гравитационной сингулярности, когда вся масса содержится в нулевом объеме? Это бессмысленное состояние подразумевало бы бесконечную плотность, которую большинство физиков открыто осуждают. Возможно, если мы допустим, что внутри горизонта событий сильно искривляется пространство-время, эту дилемму можно будет обсуждать. Физики говорят, что, несмотря на любые события, могущие происходить в этой «зоне полной неизвестности», у черной дыры все равно проявятся масса, заряд (если он будет) и угловой момент. В частности, именно первая характеристика из перечисленных позволяет астрономам с уверенностью делать предположения о присутствии в космосе черных дыр звездной массы.

Посмотрим, что покажет спектр звезды, которая некогда была нормальной. Если на спектральных линиях поглощения видны периодические доплеровские смещения, заметные в изменении длины волны, астрономы могут сделать вывод, что звезда входит в двойную систему наравне со своим невидимым спутником. И если предполагаемая динамическая масса этого спутника превышает $3 M_{\odot}$, то перед нами, скорее всего, черная дыра звездной массы.

Присутствие черной дыры звездной массы можно установить и иначе — найти и отслеживать переменные источники рентгеновского и гамма-излучения. Если такой источник можно ото-

ждествить с видимой звездой, то она, скорее всего, находится в двойной системе и тесно взаимодействует с белым карликом, нейтронной звездой или черной дырой. Изменчивость и энергетические свойства излучения станут дополнительными подсказками для различения верного сценария среди этой вероятной триады. Орбитальная рентгеновская обсерватория *RXTE*, запущенная в 1996 году, особенно искусно отслеживала по всей небесной сфере шалости этих громогласных «крикунов» (см. раздел «Рекомендуемая литература и ресурсы»).

В Млечном Пути известно примерно двадцать кандидатов в черные дыры звездной массы, но вполне возможно, что в нашей Галактике их гораздо больше. Оценочные данные, основанные на общем количестве звезд в Млечном Пути и той их доле, которая обладает достаточной массой для образования черной дыры, позволяют предположить, что в диске, балдже и гало Галактики присутствует приблизительно 100 млн черных дыр звездной массы. Полный список кандидатов в черные дыры звездной массы, в черные дыры средней массы и в сверхмассивные черные дыры можно найти в «Энциклопедии черных дыр» (*Black Hole Encyclopedia*), составляемой под патронажем обсерватории Мак-Доналд (см. раздел «Рекомендуемая литература и ресурсы»).

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ — НЕ АЛЧНЫЕ БЕЗДНЫ

Одно из главных заблуждений, связанных с черными дырами, — это уверенность в том, что их гравитационное влияние распространяется гораздо дальше, чем у других форм материи. Расхожее представление о черной дыре, затягивающей в себя все, что окажется рядом, по большей части ошибочно. Например, если бы мы каким-то образом сумели заменить Солнце на черную дыру с аналогичной массой, то практически ничего бы не изменилось: все планеты, астероиды и кометы так и вращались бы по своим орбитам вокруг черной дыры. Конечно, в Солнечной системе было бы намного темнее, и жизнь на Земле и других планетах или спутниках неминуемо вернулась бы к внутренним источникам тепла и химической энергии. Но чтобы ощутить таинственные эффекты искрив-

ленного пространства-времени, потребовалось бы проникнуть достаточно далеко за пределы изначального радиуса Солнца. Тогда и только тогда мы бы стали свидетелями замедления времени, сокращения длины, растягивающего действия приливных сил и сильного искривления света, предсказанных Эйнштейном.

Черные дыры средней массы

Астрономы потратили десятилетия, пытаясь найти черные дыры, масса которых была бы больше, чем у остатков звезд, и меньше, чем у сверхмассивных черных дыр, обнаруженных в ядрах гигантских галактик. По массе такие объекты были бы сопоставимы с сотнями и даже многими тысячами солнц. Успех пришел совсем недавно, и пока в «Энциклопедии черных дыр» перечислены только шесть кандидатов. Три из них находятся в центрах шаровых скоплений, а остальные — в центрах маломассивных галактик или в дисках других галактик, более массивных. Недавно международная команда астрономов выдвинула еще несколько десятков кандидатов в черные дыры средней массы. Выявить присутствие таких черных дыр по отношению к их галактикам-хозяевам важно, поскольку это поможет астрофизикам определить, каким образом они образовались: как некие «семена», к которым позже приросли ближайшие черные дыры звездной массы, или как итог одного большого коллапса плотного первозданного облака?

Сверхмассивные черные дыры

Наилучшие доказательства существования черных дыр можно найти в центрах крупных галактик. Спектроскопия высокого разрешения позволила нам заглянуть в самые потаенные галактические уголки и получить данные о сверхмассивных черных дырах, содержащих от нескольких миллионов до нескольких миллиардов масс Солнца. Спектроскопия показывает звезды, которые чрезвычайно быстро движутся по своим орбитам, а это возможно только в том случае, если в пределах этих орбит располагается огромная гравитирующая масса. Высокая пространственная разрешающая

способность космического телескопа «Хаббл» позволила «засечь» звезды, удаленные от центров галактик всего на несколько десятков световых лет. Предполагаемые массы этих центров, с которыми часто сочетается ассоциируемая ядерная активность — это сильный довод в защиту идеи, согласно которой в ядрах большинства крупных галактик находятся сверхмассивные черные дыры.

Кроме того, астрономы выявили важную взаимосвязь между массами черных дыр, находящихся в центрах галактик, и массами окружающих их галактических балджей. Соотношение массы черной дыры к балджу составляет примерно 1:1000. Эта стойкая взаимосвязь подразумевает, что черные дыры и галактические балджи, вероятно, эволюционировали вместе. Однако подробности их совместной эволюции остаются неясными.

Но самые убедительные свидетельства существования сверхмассивных черных дыр мы найдем в центре Млечного Пути, поскольку он в 90 с лишним раз ближе, чем центр любой другой гигантской галактики, и его можно изучить гораздо более подробно. При помощи огромных телескопов «Кек», расположенных на Гавайях — на вершине горы Мауна-Кеа, — Группа галактического центра Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе под руководством Андреа Гез более 10 лет отслеживала самые далекие звезды Галактики. В частности, звезда S0-2 находится на расстоянии 0,0019 светового года (120 а.е.) от центра Млечного Пути. Эта протяженность эквивалентна радиусам орбит некоторых транснептуновых объектов в самых отдаленных уголках нашей Солнечной системы. И если учесть такое расстояние, то стремительная скорость S0-2, составляющая 2,5 % от скорости света, позволяет астрономам предположить, что в этой области находится сверхмассивная черная дыра массой в 4 млн M_{\odot} . (В 2020 году Андреа Гез и Райнхард Генцель получили за это достижение Нобелевскую премию по физике.)

Совсем недавно группа Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе построила кинематическую модель орбитального движения звезды S0-2 в трехмерном пространстве. Эта дополнительная информация показала, что траектория движения S0-2 согласуется

не с законом обратных квадратов Ньютона, а с теорией относительности Эйнштейна. Эйнштейновское искривление пространства-времени в присутствии столь концентрированного вещества по-прежнему дает нам наилучшую модель, благодаря которой мы понимаем, как ведут себя материя и свет вблизи черных дыр.

В 2019 году в мировой прессе широко освещались еще более важные новости, касающиеся сверхмассивных черных дыр. 10 апреля команда проекта «Телескоп горизонта событий» объявила, что им удалось получить изображение сверхмассивной черной дыры в центре гигантской эллиптической галактики M87. Объединив радиосигналы из восьми обсерваторий, расположенных в разных точках планеты, команда смогла создать снимок с достаточно мелкими деталями, чтобы можно было рассмотреть черную дыру (см. eventhorizontelescope.org). Световое кольцо, заметное на снимке, астрономы интерпретируют как гравитационно линзированное излучение, исходящее от вещества, расположенного сразу за горизонтом событий черной дыры. Команда нацелила свои радиотелескопы и на гораздо более близкую сверхмассивную черную дыру в Млечном Пути. Однако на момент написания этого текста они еще не сообщили о каких-либо результатах.

Гравитационное излучение

За время работы над этой книгой область гравитационно-волновой астрономии превратилась из «погони за химерами» в признанную науку огромной важности. Гравитационное излучение было предсказано Альбертом Эйнштейном в 1916 году как основной результат его теории относительности, в которой ньютоновские силы заменяются искривлением пространства-времени в присутствии материи. Эта же теория предсказывала, что любое асимметричное возмущение в расположении гравитирующей материи вызовет серию распространяющейся наружу «ряби» в ткани пространства-времени — гравитационную волну. Экспериментальные поиски гравитационного излучения начались в конце 1960-х годов, но только в конце 1980-х годов мы начали создавать достаточно точные приборы. Необходимая точность невероятна,

поскольку воздействие проходящей гравитационной волны от удаленного источника искривит ткань пространства-времени на Земле на уровнях, меньших 1 % диаметра протона!

14 сентября 2015 года в двух отделениях Лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (*LIGO*), расположенных в Хэнфорде (штат Вашингтон) и Ливингстоне (штат Луизиана), одновременно зафиксировали гравитационно-волновой «писк», длившийся менее секунды, с резко возросшей частотой. Источник этого сигнала, согласно самым лучшим моделям, был определен как пара закручивающихся по спирали и сливающихся черных дыр. Их массы были эквивалентны 36 и 29 M_{\odot} , что помещает их в верхнюю категорию черных дыр звездной массы. За это удивительное достижение, к которому команда *LIGO* готовилась 25 лет, в 2017 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

17 августа 2017 года две обсерватории *LIGO* и недавно введенная в эксплуатацию обсерватория *VIRGO* в Италии обнаружили более слабое, но гораздо более продолжительное гравитационное излучение от двух сливающихся нейтронных звезд. Третья гравитационно-волновая обсерватория позволила астрономам провести триангуляцию области неба, в которой находился источник, чтобы проводить последующие телескопические наблюдения по всему электромагнитному спектру. Оказалось, что в эллиптической галактике, отдаленной от нас на 130 млн световых лет, произошло интенсивное слияние. Это привело к образованию килоновой, которую можно было отслеживать в обсерваториях с помощью гамма-телескопов и рентгеновских телескопов. Гигантский взрыв высвободил огромное облако нейтронов, которые затем вновь собрались в «бродячий цирк» тяжелых атомных ядер. Теперь некоторые астрофизики считают, что золото в наших ювелирных изделиях и уран в наших реакторах родились из подобных столкновений нейтронных звезд.

С первого открытия, произошедшего в 2015 году, мы обнаружили гравитационно-волновые сигналы от более чем двадцати случаев слияния. Тем временем по всему миру в режиме реального

времени создаются новые инструменты. И именно сейчас зарождается гравитационно-волновая астрономия, которая обещает найти гораздо больше остатков слившихся и взорвавшихся компактных звезд — это белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, — а также охарактеризовать коллапс ядра сверхновых, понять процессы нуклеосинтеза тяжелых элементов, отследить слияния сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик и, возможно, когда-нибудь выявить сам Большой взрыв.

Темная материя

Вероятность существования темной материи в галактиках и в более обширном космосе становится все более очевидной. Исторически сложилось так, что первое научно обоснованное предположение о невидимой форме материи сделал в 1930-х годах швейцарский астроном Фриц Цвикки, славившийся своей вспыльчивостью. С помощью представления об этой материи, которую мы сейчас именуем «темной», Цвикки, сотрудник Калифорнийского технологического института, объяснял высокие скорости движения галактик в изобилующих ими галактических скоплениях. Целый рой этих галактик обладал такой скоростью, ограничить которую гравитация видимых звезд, газа и пыли внутри них просто не могла, — и, по всей видимости, в скоплениях присутствовало что-то еще. Цвикки назвал это «скрытой массой», но на самом деле она не скрывается, а скорее присутствует в некой странно «темной» форме.

В 1970-х годах Вера Рубин и Кент Форд из Института Карнеги обнаружили, что звезды в отдельных спиральных галактиках движутся по орбите вокруг соответствующих галактических центров с такой скоростью, что никакая видимая материя, присутствующая в этих галактиках, была не в силах удержать их на местах. Эти исследователи также предположили, что некая невидимая субстанция предоставляет необходимый гравитационный «клей». Их идея получила дальнейшую поддержку, когда радиоастрономы вычислили орбиты газовых облаков в спиральных галактиках

и когда оказалось, что радиусы этих орбит выходят далеко за пределы звезд, а кривые вращения, вопреки ожидаемому радиальному падению скоростей, оставались устойчиво ровными (рис. 13.2).

Для меня решающим аргументом в пользу того, что темная материя пронизывает и галактики, и межгалактическое пространство, стали снимки «Хаббла», которые случайно оказались на луче зрения, направленном к более отдаленным галактикам. На них слабо различимы фоновые объекты, которые смешиваются с галактиками на переднем плане. Наблюдаемое искривление этих объектов можно в полной мере объяснить эффектами гравитационного линзирования фоновых галактик, осуществленного темной материей того скопления, которое находится на переднем плане. Анализ этих эффектов выявил присутствие гравитирующей темной мате-

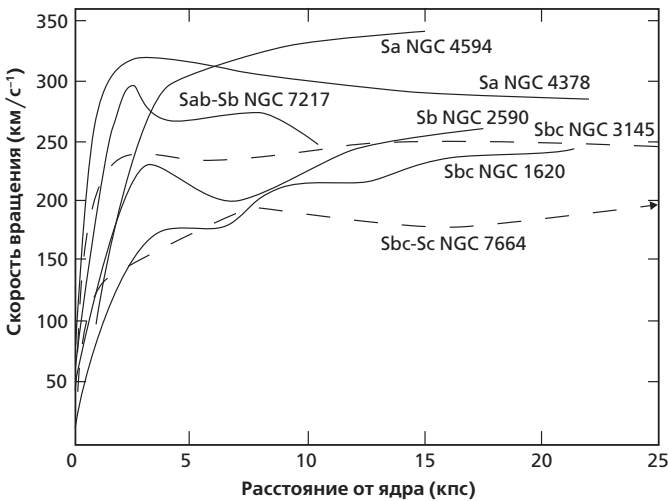


Рис. 13.2. Кривые вращения ближайших спиральных галактик в разбивке по типам показывают, что орбитальные скорости остаются практически неизменными, несмотря на увеличение радиуса. Такое поведение противоречит ожиданиям, связанным с радиальным ослаблением звездного света в этих галактиках. Вместо этого ученые предполагают, что с увеличением радиуса суммарные массы этих галактик продолжают линейно расти. (По источнику: D. A. Popolo, со ссылкой на источник: A. Bosma, "Nonbaryonic Dark Matter in Cosmology", *Int. J. Mod. Phys. D23* [2014] 1430005 arXiv:1305.0456 [astro-ph.CO].)

рии как внутри отдельных галактик в тех или иных скоплениях, так и в пространстве, разделившем эти галактики. Астрономы пришли к выводу, что темная материя преобладает над всеми другими формами видимой материи в 8,5 раза. Это открытие не может не тревожить, поскольку сейчас доля темной материи, которую мы можем обнаружить в космической бездне, не превышает 15 %. Единственный выход — найти для этой материи, обладающей тяготением, но невидимой, приемлемых кандидатов.

Обычная темная материя

Объекты, состоящие из «обычных» протонов, нейтронов и электронов, при определенных обстоятельствах могут быть темными. Например, одинокая планета или спутник, удаленные от какой-либо звезды, не будут ни отражать звездный свет в сколь-либо великой мере, ни испускать заметное излучение. Отдельные черные дыры, холодные нейтронные звезды и белые карлики могут просто не попасть на наши детекторы. Несомненно, некоторые из этих межзвездных странников наполняют и наш Млечный Путь, и другие галактики. Ученые даже называли такие объекты массивными астрофизическими компактными объектами гало (англ. *massive astrophysical compact halo object*, *MACHO*). Вопрос только в том, хватит ли их, чтобы объяснить долю в 85 %, которая приходится на невидимую, но гравитирующую материю. До сих пор астрономы, ведущие ее поиски, стремятся обнаружить объекты размером с планету или спутник, которые не принадлежат ни к протопланетным дискам, ни к зрелым солнечным системам, которых в нашей родной Галактике очень много. Даже если бы все звезды во всех галактиках содержали планетные системы и половина из этих систем скрылась во тьме, количество пропавшей материи составило бы лишь небольшой процент от необходимой величины. Такой же недостаток характерен и для предложенных оценок других *MACHO*.

Еще одно ограничение для обычной темной материи связано с процессом нуклеосинтеза, происходившим в течение первых нескольких минут после Большого взрыва. За это время нейтроны

и протоны сливались в атомные ядра гелия-4, а также, в ультрамалых количествах, в атомные ядра дейтерия, гелия-3 и лития. Одиночные нейтроны распадаются обратно на протоны и электроны примерно за пять минут, и поэтому весь активный нуклеосинтез должен был произойти до достижения этого временного предела. Конечная продолжительность, в свою очередь, ограничивала количество ядерного вещества, которое можно было выделить из хаоса. Чтобы сопоставить относительные количества водорода, гелия-4 и других изотопов, наблюдающихся в современной Вселенной, астрофизики предполагают, что плотность всей этой обычной материи составляет всего 2–5 % от уровня, необходимого для того, чтобы ткань пространства-времени стала «плоской». Топологически плоский космос — это одно из главных открытий, сделанное в результате недавнего картирования космического микроволнового фона (см. гл. 9). И чтобы его объяснить, нам нужно гораздо больше темной материи и непомерная доля темной энергии (о ней чуть ниже).

Горячая темная материя

Необычная темная материя может быть трех видов: горячей, теплой и холодной. Как нам известно, субатомные частицы, называемые нейтрино, существуют в огромном множестве и представляют собой форму горячей темной материи из-за их крошечных масс и, соответственно, релятивистских скоростей. Такие экстремальные скорости позволяют им не поддаваться притяжению отдельных галактик и, возможно, даже галактических скоплений. На гораздо больших масштабах нейтрино могли бы играть гравитирующую роль, но предполагаемой распространенности темной материи на галактические масштабы это не объясняет. Некоторые физики говорят о «стерильных нейтрино», которые взаимодействуют с обычной материей еще меньше, чем нейтрино, обнаруженные на сегодняшний день. Эти частицы могли бы иметь гораздо большую массу и, соответственно, меньшие скорости — достаточно низкие, чтобы подпасть под притяжение отдельных галактик. Сейчас их ищут многие, а наряду с этим ведутся поиски

других слабо взаимодействующих массивных частиц — вимпов. Стратегия, получившая благосклонность и поддержку, заключается в том, чтобы разместить чувствительные детекторы частиц глубоко под землей и тем самым уменьшить назойливое фоновое влияние космических лучей. Но несмотря на десятилетия усилий, ни один эксперимент пока не привел к результату, который можно было бы повторить.

Холодная темная материя

Космологов манит идея о холодных и медленных вимпах, поскольку их наличие может объяснить очень многое: то, почему космический микроволновый фон устроен именно так, а не иначе; то, почему правы те, кто полагает, что в галактиках и галактических скоплениях присутствует темная материя; то, как именно устроены галактики в больших масштабах и то, как проходит процесс их формирования, при котором обычная материя непрерывно стремится вдоль нитей к ранее возникшим сгусткам темной материи (см. гл. 10). В число частиц холодной темной материи, существование которых пока лишь предполагается, входят более тяжелые аналоги «бродячего цирка» частиц, о котором нам уже известно. Наличие таких «теневых» частиц предсказано суперсимметричными теориями элементарной материи. Селектрино, нейтралино, фотино и гравитино — это лишь некоторые из предложенных суперсимметричных «тяжеловесов». Увы, нашим самым мощным ускорителям частиц и самым чувствительным детекторам еще предстоит совершить находки, способные подтвердить присутствие таких объектов в обозримом космосе.

Модифицированная ньютоновская динамика

Я проявил бы небрежность, если бы не упомянул в этой главе соперничающую гипотезу, способную полностью устранить необходимость в темной материи. Она получила название модифицированной ньютоновской динамики и утверждает, что сила тяжести массивного объекта уменьшается с расстоянием, которое немного

отличается от знаменитого закона обратных квадратов Ньютона (о нем мы говорили в гл. 3). Есть и альтернативный взгляд: сила гравитационного притяжения могла бы оставаться ньютоновской, но реакция объекта на эту силу — его ускорение — отличалась бы от второго закона движения Ньютона, в котором $a = F/m$. Различия, как правило, становились бы существенными на очень больших расстояниях. Вот почему движения планет вокруг Солнца, по всей видимости, подчиняются ньютоновским ожиданиям, а движения звезд и газовых облаков во внешних частях галактик превосходят те прогнозы, которые мы делаем на основе материи, наблюдаемой в галактиках, и закона всемирного тяготения Ньютона. Кроме того, при помощи модифицированной ньютоновской динамики астрофизики пытаются объяснить некоторые подробности, связанные с кривыми вращения спиральных галактик, и сильную наблюдаемую связь общей яркости галактики со скоростью ее вращения (соотношение Талли — Фишера). Впрочем, большинство астрономов считают, что темная материя может объяснить гораздо больше.

Итак, определить темную материю и ее альтернативы нам по-прежнему не удастся, несмотря на все наши попытки. Что же, пока лишь остается сказать: «Поживем — увидим».

Темная энергия

Призыв к еще одной невидимой форме материи-энергии впервые громко прозвучал в 1990-х годах, когда астрономы, работавшие с данными «Хаббла», заметили небольшое отклонение от одноименного закона Хаббла, устанавливающего связь между расстоянием до галактики и ее красным смещением (см. гл. 8). На наибольших расстояниях и соответствующих периодах абerrационного времени наблюдаемые красные смещения оказались немного меньше, чем ожидалось. Это означало, что галактики в ранней Вселенной расширялись и отдалялись друг от друга с несколько меньшей скоростью, чем та, какую мы наблюдаем в текущую эпоху. Двигаясь вперед во времени, Вселенная галактик, по-видимому, расширяется с непрерывно возрастающей

скоростью. Это ускорение необходимо объяснить. Существует ли какой-то вид «отталкивающей гравитации», способный стать движущей силой этого форсированного расширения? Или происходит нечто иное?

Чтобы объяснить, почему галактическая Вселенная, которую мы наблюдаем, расширяется с ускорением, космологи привлекли новую форму материи-энергии — темную энергию. Та же самая невыразимая таинственная сила, если ее присутствие в наши дни окажется достаточно велико, легко объясняет исключительную топологическую плоскостность космоса (см. гл. 9). Более того, по-видимому, сценарии формирования галактик, а также их эволюции и объединения в группы согласуются лучше всего, если принять, что во Вселенной 73 % темной энергии, 26 % темной материи, как обычной, так и экзотической, и 1 % светящейся обычной материи — это модель Лямбда-*CDM* (*Λ CDM*), упомянутая в десятой главе.

Темная энергия многое успешно объясняла, поэтому и обрела популярность у космологов и астрофизиков. Однако остается важный вопрос — с чем мы имеем дело? Альберт Эйнштейн в своем уравнении гравитационного поля требовал положительной плотности энергии, или «давления», призванного противодействовать отрицательному давлению гравитации. Он ввел этот термин именно для данного случая, чтобы удерживать Вселенную от коллапса в саму себя. Услышав, что Вселенная расширяется, Эйнштейн назвал включение этого термина самым большим просчетом в своей карьере. Сегодня мы восстановили эту космологическую постоянную (*Λ*) как жизненно важный компонент космоса, требующий более глубокого понимания.

Некоторые космологи полагают, что темная энергия возникает в результате расширения самого пространства. Космос неуклонно растет, и к смешению темной и светящейся материи добавляется все больше темной энергии. Это означает, что баланс темной материи и темной энергии менялся с течением времени, причем в ранней Вселенной преобладала темная материя (рис. 13.3), а в теку-

щую эпоху эта роль перешла к темной энергии. Эту эволюцию в некотором смысле подтверждают данные о красных смещениях галактик, рассчитанных в зависимости от расстояния и соответствующего абберационного времени. Если это время превышает 10 млрд лет, измеренные красные смещения не указывают на расширение со сколь-либо заметным ускорением, однако при более «современных» показателях абберационного времени свидетельства ускоряющегося расширения и связанной с ним темной энергии становятся намного весомее.

Лично мне интересно, все ли вызванные гравитацией сгущения вещества, произошедшие за космологическое время, приводили

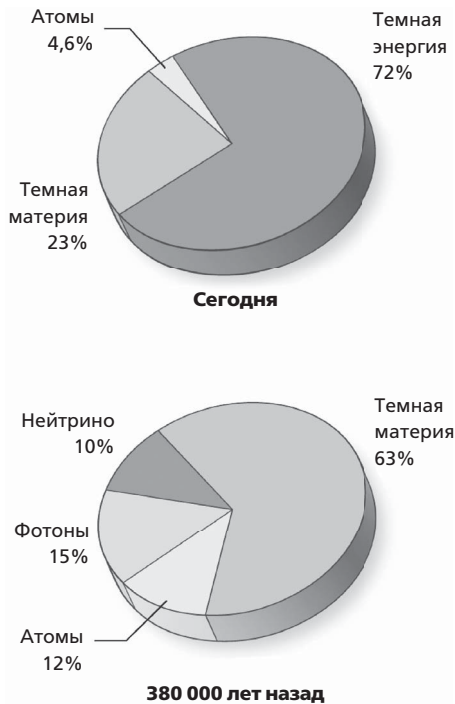


Рис. 13.3. Баланс темной материи и темной энергии в современную эпоху по сравнению с ним же 380 000 лет назад. Считается, что по мере расширения космоса доля темной энергии в этом сочетании становилась все более высокой, пока она не стала господствующей формой материи-энергии. (Материалы любезно предоставлены Научной группой *NASA/WMAP*.)

к соответствующему отталкиванию уплотняющихся объектов. Возможно, здесь действует некий закон сохранения, предполагающий высвобождение гравитационной энергии. В период своего формирования галактики были бы особенно склонны к этому антигравитационному дополнению к номинальному расширению космоса (так называемому «разбеганию»).

Это представление в высшей степени умозрительно, но у него есть нечто общее с более авторитетными идеями, поскольку оно требует наличия некоего посредника, способного стать движущей силой ускоряющегося расширения. Космологи называют его квинтэссенцией или «фантомной энергией», способной проявляться в виде силового поля, которое зависит от пространства и меняется со временем. По оценкам космологов, силовое поле эволюционировало от направленности внутрь к направленности наружу около 10 млрд лет назад — как раз тогда, когда материя начала преобладать над излучением и когда галактики начали собираться воедино. Однако эта картина космического расширения, ускоряющегося все быстрее, влечет мрачный прогноз. За неизвестные миллиарды лет вся наша Вселенная могла бы разорваться на части... целиком, вплоть до атомов, из которых состоят наши планеты, и ядер в этих атомах. Этот «большой разрыв» стал бы нашим концом.

Так сможет ли эволюционирующая квинтэссенция или неизменно устойчивая космологическая постоянная в конечном счете объяснить то ускорение, с которым расширяется Вселенная, и его движущую силу — темную энергию? Сейчас ученые не могут выбрать какой-либо вариант. Необходимо точнее измерить само расширение и подробнее картировать космический микроволновый фон. Слабая рябь, наблюдаемая в нем, уже произвела революцию в космологии — и еще может стать источником поразительных откровений.

14

Наше космическое достояние

Пытаясь понять что угодно как таковое,
мы находим, что оно связано
со всем остальным во Вселенной.

Джон Мьюир. Мое первое лето в Сьере

Вы все — это дети Вселенной,
подобно деревьям и звездам,
со всем правом в ней пребывать.
И видите вы или нет,
но она, несомненно,
раскроется так, как должна.

Макс Эрманн. Desiderata

Мы все — телесные создания, и каждый из нас — воплощение хода всей космической истории. Каждый протон и нейтрон в каждом ядре каждого атома наших тел возникли из бурлящего хаоса, властвовавшего на протяжении первой миллионной доли секунды после Большого взрыва. Затем, в течение первой секунды, электроны, окружившие каждое ядро для создания цельных атомов, освободились из раскаленного «бульона». Так космос в мгновение ока породил субатомные компоненты, жизненно важные для нашего атомного и молекулярного «я».

Алхимия жизни

Более тяжелые атомы в наших телах происходят из самых разных космических уголков. Скажем, углерод, присутствующий в наших

костях и мышцах, образовался в ходе термоядерного синтеза атомных ядер гелия, который протекал в глубоких недрах звезд средней массы, в то время находившихся на эволюционной стадии гигантов горизонтальной ветви. По мере эволюции в нестабильные звезды асимптотической ветви гигантов они высвобождали созданный углерод с помощью мощных ветров. Солнце — звезда средней массы, и поэтому служить источником углерода оно будет только через 4–5 млрд лет.

Кислород в воде, пронизывающий всю земную жизнь, появился на последних стадиях существования более массивных звезд, в центре которых давление и температура были достаточно высоки, чтобы переплавить атомные ядра углерода в кислород, кремний и железо. Все эти важнейшие элементы стали сырьем для последующих звезд, планет и жизненных форм, когда угасшие массивные звезды наконец взорвались как сверхновые и извергли свои химические творения в Галактику.

Каменистые планеты, подобные Земле, стали наследниками этого элементного изобилия. Астрономы предполагают, что эти планеты выросли из кристаллов, содержащих кремний и углерод, которые ранее затвердели в относительно прохладных внешних слоях атмосферы красных гигантов. Изгнанные прочь звездными ветрами, заледеневшие кристаллы промчались по Млечному Пути и смешались с формирующимся облаком межзвездного газа, которое оказалось на их пути. По мере того как части этих облаков под воздействием гравитации сжимались в протозвездные туманности и последующие протопланетные диски, кристаллы собирались в микроскопические пылинки, те скапливались в хондры размером с каплю, потом — в планетезимали размером с гальку, и, спустя несколько миллионов лет гравитационной конденсации, — в планеты, подобные Земле. Идея, согласно которой наша планета и все ее обитатели — это «звездное вещество», может показаться надуманной, но это правда!

Как только Земля стала полноценной планетой, жар, высвобожденный при ее формировании, и энергия радиоактивных изотопов урана и тория поддерживали и тепло в ее недрах, и динамику

конвективных течений, благодаря чему становились возможны тектонические сдвиги, вулканизм и другие процессы горообразования, характерные для земной поверхности на протяжении миллиардов лет. Считается, что атомные ядра урана и тория возникли в горячей среде, богатой нейтронами и ассоциируемой с двойными системами нейтронных звезд, в которых обе звезды движутся по спирали внутрь и впоследствии сливаются. (В Интернете можно найти периодическую таблицу элементов с указанием их космического происхождения; вот одна из возможных ссылок: apod.nasa.gov/apod/ap171024.html.) На Земле этих нестабильных изотопов достаточно, и их постоянная радиоактивность вносит свой вклад в геологические циклы поднятия земной коры, выветривания, аккумуляции, седиментации, метаморфизма и субдукции. Без этих тектонических «примочек», действовавших на протяжении сотен миллионов лет, у нас не было бы ни осадочных, ни метаморфических горных пород, способных сохранить присутствие предшествующих форм жизни в течение этого «глубокого времени», и мы ничего не знали бы о нашем биологическом прошлом. Но случилось иначе, и ископаемые остатки в горных породах ясно показали, что мы — всего лишь недавние участники биологического бытия и становления, оставивших нам необычайно богатое наследство.

Преимственность жизни

Геологическая летопись жизни на Земле показала, что микроскопические формы жизни могут эволюционировать во все более макроскопические и сложные организмы с обменом веществ, способных воспроизводить себе подобных и преобразовать окружающий мир. За последние 3,5 млрд лет «бродячий цирк» живых существ превратился в обширную и удивительную систему органического мира, состоящую из царств, порядков, семейств, родов и видов. Какие еще живые существа могли бы населять большой космос? Этот ключевой вопрос волнует и астрономов, и геологов, и химиков, и биологов. На сегодняшний день нам еще только предстоит найти какие-либо явные свидетельства существования

жизни за пределами Земли. Но это не помешало нам непрерывно искать любые намеки в доступных нам образцах метеоритов, лунных пород и планетного вещества. К сожалению, вряд ли мы знаем, на что именно нам следует смотреть.

Большую часть поисков мы вели на планетах и спутниках, где вода может находиться в жидкой форме и где могут удерживаться химические вещества на основе углерода. Жидкая вода — главный растворитель во всех биохимических процессах, происходящих на Земле. Однако играть подобную роль в мирах, где температура намного выше или ниже земной, могли бы и другие жидкие растворители. Показательный пример — поверхность Титана, спутника Сатурна: в его атмосфере, насыщенной азотом, были обнаружены «моря» метана и этана — и все это при умопомрачительной температуре в -179°C . Какие химические метаморфозы могли бы (медленно) происходить в этой сюрреалистической обстановке?

Химические процессы, основанные на углероде, составляют всю органическую химию, которая, в свою очередь, представляет собой фундамент жизни на Земле. Но даже хотя углерод — и главный солист в ансамбле, другие элементы из его группы в периодической таблице Менделеева (кремний, германий и другие) при определенных обстоятельствах вполне могут взять на себя эту роль. Итак, мы даже не знаем, на какие химические сигналы обращать внимание при проведении спектроскопических исследований экзопланет. Сейчас лучшая идея, к которой мы смогли прийти — это поиск в планетарных атмосферах всего, что укажет на присутствие молекул метана, озона и кислорода. В частности, свободный двухатомный кислород (O_2) обладает высокой реакционной способностью, и если мы обнаружим его, то он может стать свидетельством биохимических процессов, активно пополняющих запасы кислорода в атмосфере — таких, как фотосинтез. Наличие озона (O_3) тоже могло бы указать на свободный двухатомный кислород. Ему свойственны яркие линии поглощения в инфракрасной части электромагнитного спектра, поэтому астрономы так хотят найти его с помощью огромных телескопов новейшего поколения.

А какие *формы* жизни могли бы населять этот мир? Являются ли автономные клетки обязательным условием для обмена веществом и энергией с окружающей средой? И как эта среда (включая ее гравитационные, тепловые, магнитные и электрические свойства) ограничит формы жизни, населяющие иные миры? Должна ли жизнь, возникнув, всегда эволюционировать в сторону усложнения? Так было на Земле, но, возможно, в других мирах этот путь не был столь предопределенным.

Как показывают эти вопросы, поиск внеземной жизни с открытыми глазами — сложнейшее дело. И все же космохимики, астробиологи и специалисты междисциплинарных областей всерьез взялись за решение этой грандиозной задачи. Постоянно растущая группа из примерно 4000 экзопланет, которые вращаются вокруг бесчисленного множества звезд, побудила их продолжить поиски с новыми силами. Для нас, землян, поиск только начался.

Завершающий пассаж

Всесторонний обзор биологической эволюции на Земле выходит за рамки данного путеводителя для начинающих. Однако цель этой книги — подчеркнуть реальные узы, соединяющие нас с большим космосом. Мы все разделяем богатое космическое достояние, сделавшее нас теми, кто мы есть, и путь к этому был долгим — 13,8 млрд лет назад возникла вся материя; около 12 млрд лет назад образовался Млечный Путь; 4,6 млрд лет назад сформировались Солнце и Солнечная система; 3,5 млрд лет назад на Земле появилась микробная форма жизни; 500 млн лет назад эволюционировали сложные жизненные формы; 300 млн лет назад жизнь вышла из моря на сушу; 240 млн лет назад на планете воцарились динозавры; 66 млн лет назад их эра закончилась, а всего несколько миллионов лет назад наступил расцвет гоминид.

Мы состоим из звездного вещества и так же связаны с космосом, как и породившая нас Галактика. Тем не менее многие ключевые вопросы остаются нерешенными. Вот мой топ-10:

1. Как различные субатомные частицы, из которых состоит вся материя, приобрели свои четко определенные массы, заряды и спиновые состояния в течение секунды после Большого взрыва? Стал ли этот «бродячий цирк» элементарных частиц удачным стечением обстоятельств — или был предопределен заранее?
2. Что характерно для темной материи, кроме невероятной отчужденности ее гипотетических частиц? Когда мы вообще получим *прямые* доказательства ее существования?
3. Является ли темная энергия необходимым и господствующим компонентом космоса — или это просто плод фантазий астрономов?
4. Как галактики смогли принять свой облик так скоро после Большого взрыва? Только представьте: всего за несколько сотен миллионов лет аморфная космическая плазма с избыточной плотностью в 1 часть на 100 000 сгустилась под воздействием гравитации в гигантские вращающиеся галактики, состоящие из звезд и планет. Разве это не кажется невероятно сложной задачей?
5. Что происходит внутри горизонтов событий черных дыр? И что они собой представляют? Порталы в иные пространства-времени? Или это просто компактные материальные миазмы, навсегда скрытые от любых наблюдателей своей огромной гравитацией?
6. Из какого звездообразующего облака сформировались Солнце и Солнечная система? Какие еще звездные и планетные системы в Млечном Пути произошли из той же туманности, что и наша?
7. Когда, где и как именно мы найдем первые прямые доказательства существования микробной формы жизни за пределами Земли?
8. Когда, где и как именно мы найдем первые прямые доказательства существования сложной формы жизни за пределами Земли?
9. Когда, где и как именно мы найдем первые прямые доказательства существования разумной, технологически-коммуникативной формы жизни за пределами Земли?

10. Пока мы ждем открытия разумных форм жизни, каким будет наилучший способ общения с ними — и стоит ли нам стремиться к этому общению?

И даже если на время забыть о возможном существовании других вселенных, эти вопросы подчеркивают, как много мы еще не знаем о нашем космосе — и о нашем месте в нем. Мы только выходим на галактическую сцену, наши технологии еще развиваются, и нам потребуется гораздо больше времени и согласованных усилий, чтобы ответить на эти очень важные вопросы. А тем временем наше существование в качестве части земной биосферы стало опасно неустойчивым. Не отравим ли мы экосистемы, на которые полагаемся, постоянно загрязняя окружающую среду? Будут ли парниковые газы, которые мы непрестанно производим, нагревать нашу атмосферу и океаны, не давая им восстановиться? Совладаем ли мы с угрозой перенаселения, мирового голода, пандемии? Или наше ядерное оружие уничтожит нас раньше? Эти экзистенциальные угрозы страшат нас до глубины души. Впрочем, я сохраняю оптимизм и думаю, что мы справимся и примем необходимые меры для решения проблем. Главное, чтобы нам хватило времени. Насколько все должно стать плохо, прежде чем мы наконец сделаем шаг вперед? Мы ведь только начали воспринимать себя как вероятных граждан космоса, и нам есть что терять — но мы можем приобрести еще больше.

Мы уже 60 лет отправляем в космос машины и людей, и перед нами, как никогда прежде, открыта дорога к различным мирам Солнечной системы. Пока вы читаете этот абзац, создаются ракетные технологии, способные доставить нас на Марс и за его пределы. Мечты и грезы о посещении ближайших звездных и экзопланетных систем при помощи роботизированной техники превратились в достойно финансируемые программы с подробными планами и графиками работ. Тем временем наши телескопы и радиоаппараты непрестанно ищут ясный сигнал от технологически развитых форм жизни. Эти усилия еще не дали воспроизводимых результатов, но они заслуживают постоянной поддержки общества. И именно тем, кто предпринимает их день ото дня, я скажу: *carpe posterum* — живи будущим!

Рекомендуемая литература и ресурсы

Источники общего характера

Astronomy, C.J. Peterson, CliffsQuickReview, IDG Books Worldwide (2000). Краткий аналог настоящего издания.

Astronomy, A. Fraknoi, D. Morrison, S.C. Wolf et al. (2016). Бесплатный онлайн-учебник для колледжа: openstax.org/details/books/astronomy. Также доступен в печатном виде.

Astronomy Notes, N. Strobel (2001). Менее броский, но достойный бесплатный онлайн-курс для колледжей: www.astronomynotes.com. Первый в своем роде.

Classifying the Cosmos — How We Can Make Sense of the Celestial Landscape, S. J. Dick, Springer (2019). Прекрасно изложенная «биологическая классификация» космоса и всех его элементов, объединенных в царства, семейства и классы.

The Milky Way: An Insider's Guide, W. H. Waller, Princeton University Press (2013). Содержательное исследование элементов, строения, движущих сил и эволюции нашей Галактики.

Galaxies and the Cosmic Frontier, W. H. Waller and P. W. Hodge, Harvard University Press (2003). Всесторонний обзор галактик во всем восхитительном разнообразии и подробный рассказ о более обширном космосе, в котором они родились.

Origins: Fourteen Billion Years of Cosmic Evolution, N. D. Tyson and D. Goldsmith, W. W. Norton & Company (2004). Развернутый рассказ о космосе на протяжении всей его истории — от первых частиц до галактик, звезд, планет и жизни. Дополнение к мини-сериалу *Origins*, входящему в цикл фильмов телепрограммы *NOVA*.

История

The Sleepwalkers: A History of Man's Changing View of the Universe, A. Koestler, Penguin Books (1990). Увлекательная история о том, как люди познавали космос — от вавилонян до Коперника, Кеплера, Галилея и Ньютона. С комментариями экспертов, посвященными противостоянию науки и религии на протяжении веков.

A Short History of Nearly Everything, B. Bryson, Broadway Books (2003). Более современная и юмористическая трактовка гуманитарного аспекта науки, в которой история астрономии представлена вместе с историей физики, химии, биологии и палеонтологии.

Parallax: The Race to Measure the Cosmos, A. W. Hirshfeld, W. H. Freeman (2001). Искрометная история об астрономах, стремившихся измерить расстояния до звезд.

The Glass Universe, D. Sobel, Viking/Penguin Random House (2016). Ценные сведения о женщинах из Гарвардской обсерватории, которые провели спектроскопические измерения звезд, создав таким образом сферу звездной астрофизики.

Lonely Hearts of the Cosmos, D. Overbye, Harper Collins (1991). История наблюдательной космологии XX века с обилием персоналий.

Журналы

Sky & Telescope: skyandtelescope.org

Astronomy: astronomy.com

Space.com (онлайн-журнал)

Другие источники

Астрономический образовательный и информационный центр: nasa-us.org

Астрономическая картинка дня: apod.nasa.gov/apod/astropix.html

Атлас Вселенной: www.atlasoftheuniverse.com

Энциклопедия черных дыр — список черных дыр звездной массы, средней массы и сверхмассивных черных дыр: blackholes.stardate.org/objects.html

Космическое происхождение элементов: apod.nasa.gov/apod/ap171-024.html

Калькуляторы космического расширения: ned.ipac.caltech.edu/help/cosmology_calc.html

Энциклопедия внесолнечных планет: exoplanet.eu

Проект «Телескоп горизонта событий»: eventhorizontelescope.org

Миссия *Gaia*: sci.esa.int/gaia

Обучающие моменты в астрономии и астрофизике: sites.google.com/site/sciencegazette/teachable-moments-in-astronomy-astrophysics?authuser=0

Технические примечания из книги *Galaxies and the Cosmic Frontier*: cosmos.phy.tufts.edu/cosmicfrontier/main.html

Визуализация кратковременного рентгеновского излучения из нейтронных звезд и черных дыр: xte.mit.edu (см. страницу *ASM The Movie*)

Гражданская научная платформа *Zooniverse*: www.zooniverse.org

Научно-популярное издание Танымал ғылыми басылым

Уоллер Уильям

ГАЙД ПО АСТРОНОМИИ

Путешествие

к границам безграничного космоса

Ответственный редактор *А. Сумцова*
Технический редактор *Л. Сеницына*
Корректоры *П. Шевнина, В. Алексина*
Компьютерная верстка *Т. Коровенковой*

В оформлении обложки использованы иллюстрации

© Hatcha/Shutterstock.com
© jumpingsack/Shutterstock.com
© MicroOne/Shutterstock.com
© Tshooter/Shutterstock.com
© klyaksun/Shutterstock.com

Подписано в печать / Баспаға қол қойылды 03.11.2023.

Формат 60×88 1/16. Гарнитура «Newton».

Бумага офсетная. Печать офсетная. Уса. печ. л. 15,68.

Тираж 2000 экз. W-SCI-32782-01-R. Заказ №

Изготовитель: Өндіруші:

ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» – обладатель товарного знака КоЛибри	«Издательская Группа «Азбука-Аттикус» ЖШҚ – КоЛибри тауар белгісінің иесі,
115093, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ	115093, Мәскеу, қ. іш. аум. Даниловский
Даниловский, пер. Партийный, д. 1, к. 25	муниципалдық округі, Партийный т.ш., 1-үй, к. 25
Тел. (495) 933-76-01, факс (495) 933-76-19	Тел. (495) 933-76-01, факс (495) 933-76-19
E-mail: sales@atticus-group.ru	E-mail: sales@atticus-group.ru

Филиал ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» в г. Санкт-Петербурге 191123, Санкт-Петербург, Воскресенская набережная, д. 12, лит. А	Санкт-Петербург қ. «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» ЖШҚ филиалы, 191123, Санкт-Петербург, Воскресенская жағалауы, 12-үй, А лит.
Тел. (812) 327-04-55	Тел. (812) 327-04-55
E-mail: trade@azbooka.spb.ru	E-mail: trade@azbooka.spb.ru
www.azbooka.ru; www.atticus-group.ru	www.azbooka.ru; www.atticus-group.ru
Отпечатано в России.	Ресейде басып шығарылған.

Техникалық реттеу туралы РФ заңнамасына сай басылымның сәйкестігін
растау туралы мәліметтерді мына адрес бойынша алуға болады:
<http://atticus-group.ru/certification/>.

Знак информационной продукции (Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)
Товар соответствует требованиям ТР ТС 007/2011 «О безопасности продукции,
предназначенной для детей и подростков».



Ақпараттық өнім белгісі (29.12.2010 ж. № 436-ФЗ Федералдық заң)
Тауар КО ТР 007/2011 «Балалар мен жасөспірімдерге арналған
өнімдердің қауіпсіздігі туралы» талаптарына сәйкес келеді.

Что будет, если мы все случайно
попадем в черную дыру?

А если Луна навсегда повернется
к нам темной стороной?

Сколько осталось времени до того,
как гигантский метеорит врежется в Землю?

На самые сложные вопросы, над которыми веками
бьются лучшие умы человечества, астроном Уильям
Уоллер дает простые и лаконичные ответы.

Начав с первых шагов древнего человека в изучении
ночного неба, отправляйтесь в увлекательное
путешествие по бескрайнему космосу.

Под руководством автора самостоятельно выведите
теорию Большого взрыва и загляните внутрь черных
дыр, прогуляйтесь по ледяным кольцам Сатурна
и станьте свидетелями рождения галактик.

Рассчитайте, когда взорвется Солнце, и докажите,
что Плутон — это все-таки планета.

Уильям Уоллер — бывший ученый НАСА
и профессор-исследователь в Университете Тафтса,
штат Массачусетс, преподаватель и популяризатор
естественных наук.

