

УДК 52
ББК 22.6
А91

Владимир Георгиевич Сурдин – советский и российский астроном и популяризатор науки. Кандидат физико-математических наук, доцент. Старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, доцент физического факультета МГУ. Лауреат Беляевской премии и премии «Просветитель» за 2012 год.

А91 Астрономия: век XXI / ред.-сост. В. Г. Сурдин. – 570 с. + 16 цв. вклеек. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2022. – Текст: непосредственный.

ISBN 978-5-93700-172-6

Эта книга посвящена астрономии в ее разнообразных воплощениях: от исследования Луны и планет до изучения гравитационных волн, темного вещества и темной энергии. Ученые Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (МГУ) рассказывают о важнейших событиях, произошедших в астрономии в начале нового тысячелетия. По странному стечению событий именно этот условный рубеж был отмечен несколькими революционными открытиями в астрономии.

В последние годы астрономия и астрофизика развиваются особенно быстро, о чем говорит количество Нобелевских премий, полученных за актуальные исследования. В первую очередь это касается космологии, регистрации гравитационных волн, изучения сверхмассивных черных дыр и исследования экзопланет.

Результаты новых исследований описаны в 5-м издании книги. В частности, в нем обсуждается проблема «хаббловского напряжения» (Hubble tension), которую пока не смогли решить космологи.

УДК 52
ББК 22.6

На 1-й стороне обложки – спиральная галактика Мессье 83. Фото космического телескопа «Хаббл», NASA.

На 4-й стороне обложки – спиральная галактика NGC 6217. Фото: космический телескоп «Хаббл», NASA.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-93700-172-6

© Оформление, издание,
ДМК Пресс, 2022

Эта книга посвящена астрономии в ее разнообразных воплощениях: от изучения Луны и планет до поисков гравитационных волн, темного вещества и темной энергии. Мои коллеги и я расскажем вам о том, какие важнейшие события произошли в астрономии на рубеже нового тысячелетия. По странному стечению событий именно этот условный исторический рубеж был отмечен несколькими важнейшими открытиями в изучении Вселенной, как на ее ближних рубежах, так и на самых дальних. Последние годы без преувеличения можно назвать великим десятилетием астрономии. И вполне возможно, что это только начало ее нового «золотого века». В самом деле, просто дух захватывает от одного перечисления фундаментальных открытий, сделанных за короткое время.

1992 г. Открыты пространственные флуктуации реликтового излучения (Нобелевская премия по физике за 2006 г.), чем окончательно доказана теория Большого взрыва и поставлена на твердую основу теория происхождения галактик и звезд.

1992–1995 гг. Открыты многочисленные малые планеты на периферии Солнечной системы, в области, получившей название «пояс Койпера» (точнее, Эдворта–Койпера). С 1930 г. за орбитой Нептуна был известен лишь один объект – маленькая планета Плутон; в 1978 г. был открыт его спутник Харон. Казалось, что это граница нашей планетной системы. Но с 1992 г. в окрестности орбиты Плутона и за ней начали обнаруживаться новые объекты. К 1995 г. стало ясно, что эта область – пояс Эдворта–Койпера – населена множеством тел с характерным размером в сотни и тысячи километров, причем некоторые из них больше Плутона и имеют собственные спутники. Границы Солнечной системы «раздвинулись» в несколько раз.

1993–1995 гг. Радиоастрономическими методами обнаружена планетная система у нейтронной звезды-радиопульсара (1993 г.). Методами оптической спектроскопии обнаружено присутствие планет-гигантов рядом с нормальными звездами (1995 г.). К началу 2015 г. в околосолнечной окрестности Галактики уже найдено около 1200 планетных систем, содержащих в сумме около 1900 планет.

1996–1997 гг. Открыт новый класс небесных объектов – коричневые карлики, занимающие промежуточное положение между звездами и планетами. Их массы (от 0,0013 до 0,08 массы Солнца) слишком малы, и поэтому температура в недрах слишком низка для термоядерных реакций с участием основного, легкого, изотопа водорода, хотя и достаточна для сгорания редкого изотопа – дейтерия, не дающего, однако, существенного вклада в энергию. Единствен-

ным долговременным источником энергии коричневых карликов служит их гравитационное сжатие.

1997–1999 гг. Приоткрыта тайна космических гамма-всплесков, часть из которых отождествлена с фантастически мощными взрывами массивных звезд, вероятно, сопровождающими рождение черных дыр.

1998 г. Обнаружено, что расширение Вселенной в последние миллиарды лет происходит с ускорением, что свидетельствует о существовании некой «темной энергии» со свойством антигравитации.

1998–2002 гг. На подземных нейтринных детекторах открыты осциллирующие нейтрино, в частности превращение солнечного электронного нейтрино в мюонное и тау, т. е. доказано, что у нейтрино есть масса покоя, теория внутреннего строения звезд верна и нужно корректировать теорию элементарных частиц.

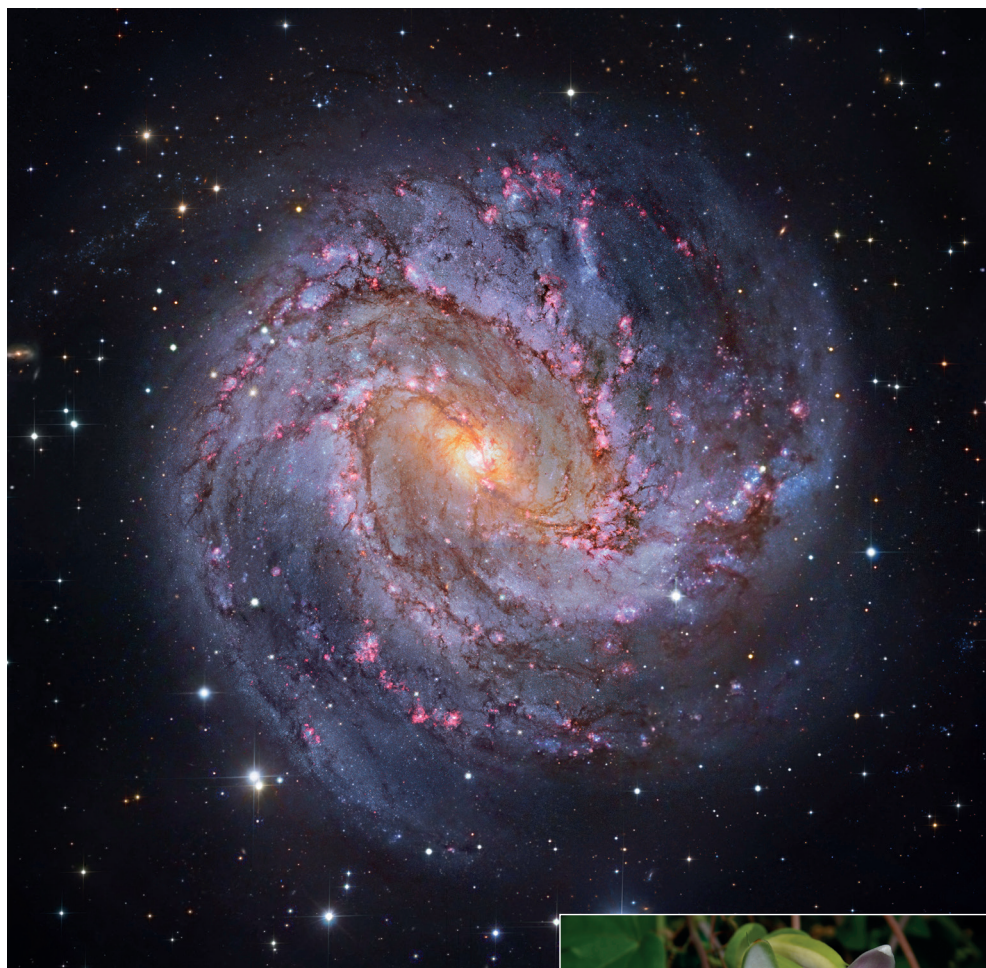
2004–2006 гг. Начали работать первые полномасштабные детекторы гравитационных волн. Их первая регистрация произошла в 2015 г. С этого момента распахнулось новое «окно» во Вселенную.

2008–2013 гг. Открыто явление нового типа – килоновая (kilonova), взрыв при слиянии двух нейтронных звезд или нейтронной звезды с черной дырой. Излучаемая при этом энергия в тысячу раз превосходит энергию обычных новых, но в десятки раз уступает энергии сверхновых. Килоновые служат источником сильных гравитационных волн. При слиянии двух компактных звезд происходит синтез тяжелых ионов в результате быстрого захвата нейтронов ядрами атомов. Поэтому килоновые – один из главных источников элементов тяжелее железа.

2011–2014 гг. На установке «Борексано» в Гран-Сассо (Италия) надежно зарегистрированы низкоэнергетические солнечные нейтрино, рождающиеся в термоядерной протон-протонной реакции – основном источнике энергии Солнца.

2022 г. Открыто явление нового типа – микроновая (micronova), термоядерный взрыв с энергией $\sim 10^{32}$ Дж, происходящий на поверхности белого карлика в окрестности его магнитного полюса при аккреции туда газа с соседней звезды.

Удивительно насыщенными оказались прошедшие годы в астрономии. И ведь я перечислил только самые «сливки», а сколько за это время было сделано «рядовых» открытий! Прошедшие два десятилетия оставят в истории науки заметный след, причем не только в астрономии – вспомним хотя бы о впервые созданном антивеществе: в 1995 г. в CERN и в 1998 г. в Лаборатории Ферми были получены не просто античастицы типа позитронов, а настоящие атомы антиводорода – идеальное топливо для будущих звездолетов. В 2012–2013 гг. на Большом адронном коллайдере открыт долгожданный бозон Хиггса, ответственный за массы элементарных частиц. Множество достижений и в биологии: не так давно (2000 г.) был впервые прочитан геном человека, а сегодня эта операция стала рутинной. Базы геномных данных уже позволяют реконструировать ход биологической эволюции. И эти открытия имеют отношение к нашей профессии, поскольку рабочее поле астронома – Вселенная со всеми происходящими в ней процессами. Именно поэтому астрономы следят за всеми новостями, поступающими из лабораторий естествоиспытателей.



Маленький цветок и гигантская спиральная галактика, по существу, состоят из одного и того же вещества – из обычных химических элементов, т. е. из протонов и нейтронов, или барионов. Однако барионное вещество, демонстрирующее нам всю красоту Вселенной, как выяснилось, представляет собой наименьшую составляющую нашего мира, в основном состоящего из темного вещества и темной энергии.

Пока нам неизвестно, какие структуры сложены этими невидимыми формами материи



Процентный состав материи Вселенной. Если вам становится не по себе от безбрежного моря темной энергии и темного вещества, заполняющего наш мир, то пусть вас согреет мысль о том, что безмерно малая доля серого вещества Вселенной оказалась способной понять устройство этого мира

А с другой стороны, ученые разных профессий стараются быть в курсе астрономических открытий. Ведь в науке о Вселенной каждый день происходит что-то новое. И кто знает, не окажутся ли находки астрономов жизненно важными для биологов или физиков. Например, для физиков космологические исследования сейчас приобрели особую привлекательность в связи с тем, что ускорительная техника ныне почти достигла практического предела своих возможностей, и дальнейшее продвижение в область высоких энергий, а значит – вглубь микромира, сильно замедлилось. Создание новых ускорителей обходится чрезвычайно дорого и позволяет лишь немного продвинуться вверх по шкале энергий. В то же время космос бесплатно предоставляет нам частицы сверхвысоких энергий (в космических лучах встречаются частицы с энергией до 10^{21} эВ), а космологические исследования позволяют анализировать процессы, происходившие в ранней Вселенной при фантастических энергиях. (В этом смысле оправдываются слова акад. Я. Б. Зельдовича: «Вселенная – это ускоритель для бедных».) Не менее ценны астрономические находки и для биологов. В межзвездном пространстве и в ядрах комет обнаружены органические молекулы. В нескольких неожиданных областях Солнечной системы обнаружены благоприятные для жизни условия. Наконец, найдены планетные системы и уже начинается поиск в них обитаемых планет! Собственно, эта книга и была

задумана, чтобы рассказать о достижениях и перспективах астрономии нашим коллегам-ученым и всем, кто интересуется изучением природы.

Авторов книги объединяет то, что все они трудятся в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ) при МГУ. Начало истории ГАИШ, ныне крупнейшего астрономического центра России, восходит к первой трети XIX в., к основанию Астрономической обсерватории Московского университета, на базе которой и был в 1931 г. создан наш институт. В конце 2021 г. ГАИШ исполнилось 190 лет – цветущий возраст для храма астрономии, науки, которая непрерывно развивается уже несколько тысячелетий. Этот юбилей и побудил нас сделать скромный подарок себе, а также нашим коллегам и всем любителям астрономии – коллективно написать данную книгу и рассказать в ней о своей работе по изучению космоса. Мы влюблены в эту работу и хотим, чтобы частица нашего восхищения окружающей природой вплоть до самых далеких ее рубежей передалась и вам, наш уважаемый читатель.



Понятие «антропный принцип» стало модным, но ему часто дают неверное толкование: якобы согласно ему Вселенная создана для человека. В действительности антропный принцип заключается не в этом. Он всего лишь постулирует связь между глобальными свойствами нашего мира и фактом существования в нем конкретного существа, изучающего эти свойства. В частности, антропный принцип утверждает, что даже те характеристики Вселенной, которые нам пока неизвестны, должны быть таковы, чтобы «здесь и сейчас» мог существовать человек

Понятно, что охватить все направления исследований Вселенной в одной книге невозможно. Мы выбрали некоторые, на наш взгляд – важнейшие. В книге рассказано и об исследованиях Солнечной системы, и о загадках эволюции звезд (включая нейронные звезды и черные дыры), и об изучении галактик, и об открытии антигравитации («темной энергии»), и о поиске гравитационных волн... Своими читателями мы представляли старших школьников, студентов, учителей и наших коллег-естествоиспытателей. Хотя большинство специальных понятий объясняется по ходу изложения, в конце книги помещен словарь терминов, который будет полезен при чтении не только этой, но и других астрономических книг.

Кроме того, в Приложениях собраны обширные справочные таблицы с данными о важнейших астрономических объектах – Солнце, планетах и их спутниках, ярчайших и ближайших звездах, созвездиях, ярких галактиках, приведены современные значения физических и астрономических постоянных, а также часто используемые в астрономии обозначения. В полном виде даны каталоги Мессье и Колдуэлла, представляющие особый интерес для наблюдающих любителей астрономии.

Замечу, что в качестве единиц расстояния мы используем как парсек (килопарсек, мегапарсек), так и световой год, хотя традиция предполагает использование парсеков в профессиональных, а световых лет – в научно-популярных текстах. Но в такой книге, как эта, охватывающей огромный диапазон астрономических масштабов, использовать какую-то одну единицу длины неудобно. Мы пользуемся разными, чтобы сделать рассказ нагляднее. Напомню, что $1 \text{ пк} \approx 3,26 \text{ св. года}$.

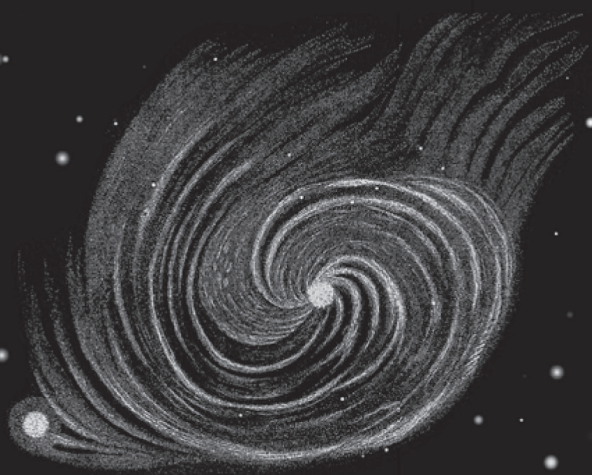
В книге много иллюстраций – фотографий планет, звезд, галактик. Авторы большинства из них – наши коллеги из разных стран, которым мы чрезвычайно признательны. А еще мы и наши коллеги всегда с глубокой благодарностью думаем о тех инженерах, программистах, рабочих, которые создали изумительную технику, позволяющую нам изучать Вселенную: это и прекрасные телескопы, включая великий космический телескоп «Хаббл», новый гигант «Джеймс Уэбб» и замечательные космические зонды, десятилетиями работающие в сотнях миллионов километров от Земли, и суперкомпьютеры, позволяющие «взрывать звезды» и «сталкивать галактики» на письменном столе. Наконец, наша благодарность создателям сети Интернет, объединившей всех любознательных людей планеты Земля и позволившей им (уже сейчас!) самостоятельно искать контакты с другими любознательными существами Вселенной.

А еще мы благодарны читателю, взявшему с полки эту книгу. Надеемся, что она послужит вам долго и поможет в увлекательном мысленном путешествии к тем рубежам, где наше знание соприкасается с фантазией.

В. Г. Сурдин

Введение

АСТРОНОМИЯ – ОТ ВЕКА К ВЕКУ



Астрономия последнего десятилетия переживает очередной этап быстрого развития, возвращающий ее в лидеры естествознания. В течение долгих лет развитие науки идет путем медленного количественного уточнения знаний о мире, но время от времени происходит быстрое расширение сферы познаний, открытия следуют одно за другим, и старое знание предстает лишь как островок в океане нового, о самом существовании которого и не подозревали.

Предвидение Лапласа

Главный вопрос, волнующий нас при обращении к прошлому: может ли оно подсказать нам судьбу наших нынешних представлений о Вселенной? Говорят: кто владеет прошлым, владеет будущим... С конца XVIII в. ученым людям каждого поколения было свойственно думать, что основы мироздания уже постигнуты и осталось лишь уточнить детали. Ньютоновская механика превосходно описывала движение планет и двойных звезд; казалось, что ее достаточно для описания космоса. Пьер Симон Лаплас говорил в конце XVIII в. о перспективе объять «в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движением легчайших атомов», что в известном смысле остается серьезной задачей и для современного естествознания. Последние слова Лапласа были: «То, что мы знаем, так ничтожно по сравнению с тем, чего мы не знаем». Открытия в астрономии на рубеже XX и XXI вв. подтвердили буквальную правоту этих слов. Будут ли они справедливы и в будущем? Величайшая проблема естествознания – возможно ли построение Окончательной Теории Всего? К этому вопросу мы еще вернемся.

Успехи астрономии будущего, как считал Лаплас, будут зависеть от трех условий: точности измерения времени и углов и совершенства оптических инструментов, причем «первые два в настоящее время не оставляют желать почти ничего лучшего». Ныне, два века спустя, окончательно решена лишь первая задача: измерение времени перешло в ведение атомной и молекулярной физики и достигло абсолютного предела точности, определяемого законами квантовой механики. В измерении угловых расстояний на небесной сфере – после почти двухвекового застоя – применение интерференционных методов и выход в космос привели к радикальному прогрессу, пределов которому не видно. Совершенствование оптических инструментов, на которое Лаплас возлагал особые надежды (поскольку измерения времени и углов, как он считал, уже достигло совершенства!), также ничем не ограничено. В 2015 г. количество гигантских наземных телескопов с зеркалами, превышающими 5 метров в диаметре, уже перевалило за два десятка. Сегодня лучшие оптические инструменты имеют зеркала диаметром 8–10 м, уже спроектированы телескопы с зеркалами от 30 до 100 м.

Никто не может предвидеть развития в тех областях науки, которые еще не родились. Например, Лаплас не мог знать о появлении спектрального анализа – основы наших нынешних знаний о физике и химии объектов Вселенной. Хорошо известны слова французского философа, основоположника позитивизма Огюста Конта (1798–1857) о том, что есть вещи, которые мы никогда не узнаем, например химический состав звезд. Но в 1859 г. Кирхгоф и Бунзен

доказали, что яркие и темные линии в спектрах указывают на присутствие в источнике света (или на пути луча) того или иного химического элемента; осталось только приставить спектрограф к телескопу. Это сделал Уильям Хёггинс, и он же в 1866 г. по сдвигу линий в спектре первым измерил лучевые скорости звезд. Как видим, напрасно Конт не следовал правилу «никогда не говори «никогда»»... Впрочем, Лаплас тоже ему не следовал – он писал, что мы никогда не увидим обратной стороны Луны.

Сто лет назад

Какими наблюдательными средствами обладала астрономия сто лет назад? Крупнейшими инструментами были 40-дюймовый рефрактор Йеркской обсерватории, 36-дюймовый рефрактор Ликской обсерватории и 36-дюймовый рефлектор Кросслея, также работавший на Ликской обсерватории, а в 1908 г. вступил в строй 60-дюймовый рефлектор на Маунт-Вилсон. Именно эти два рефлектора, установленные довольно высоко в горах Калифорнии, и открыли мир галактик, исследование которых стало главной задачей астрономии XX в.

Конечно, видели их давно: Магеллановы Облака на южном небе и галактика Андромеды на северном заметны даже невооруженным глазом. Первый список «помех в небесной охоте за кометами» составил известный ловец комет Шарль Мессье в 1781 г.; в этом списке ныне 109 объектов, многие из которых – галактики. Номера по каталогу Мессье до сих пор используются для обозначения самых ярких звездных скоплений, туманностей и галактик. Уильям Гершель в конце XVIII в. составил каталог звездных скоплений и туманностей (большинство из них также оказалось далекими галактиками), в котором было около 2500 объектов. В начале XX в. кросслеевский рефлектор зарегистрировал на фотографических пластинках около 120 000 «слабых туманностей», но об их природе еще долго продолжались споры. Сам Уильям Гершель считал, что наблюдаемые им слабые пятнышки света могут быть далекими системами звезд. В самом деле, некоторые из таких туманностей Гершель смог разрешить на звезды, и вполне естественно было предположить, что с более мощными телескопами это будет сделано и для многих других. Сам он вполне справедливо считал, что некоторые туманности могут быть истинными и состоять из диффузного светящегося вещества, а другие являются далекими звездными системами.

Однако итоговое суждение XIX в. оказалось другим. В книге о развитии астрономии в XIX в. Агнеса Кларк (Agnes Clerke) писала: «Вопрос о том, являются ли туманности внешними галактиками, вряд ли заслуживает теперь обсуждения. Прогресс исследований ответил на него. Можно с уверенностью сказать, что ни один компетентный мыслитель перед лицом существующих фактов не будет утверждать, что хотя бы одна туманность может быть звездной системой, сравнимой по размерам с Млечным Путем». Первое издание этой книги вышло в 1882 г. В четвертом ее издании, вышедшем в русском переводе в 1913 г., именно этих слов я не нашел, но другие галактики, равно как и наша, не упоминаются и в нем. Здесь говорится, что мнение, будто «все без исключения туманности являются отдельными вселенными, отдельными далекими собраниями солнц», в последний раз и ненадолго восторжествовало после открытия лордом Россом спиральных туманностей.

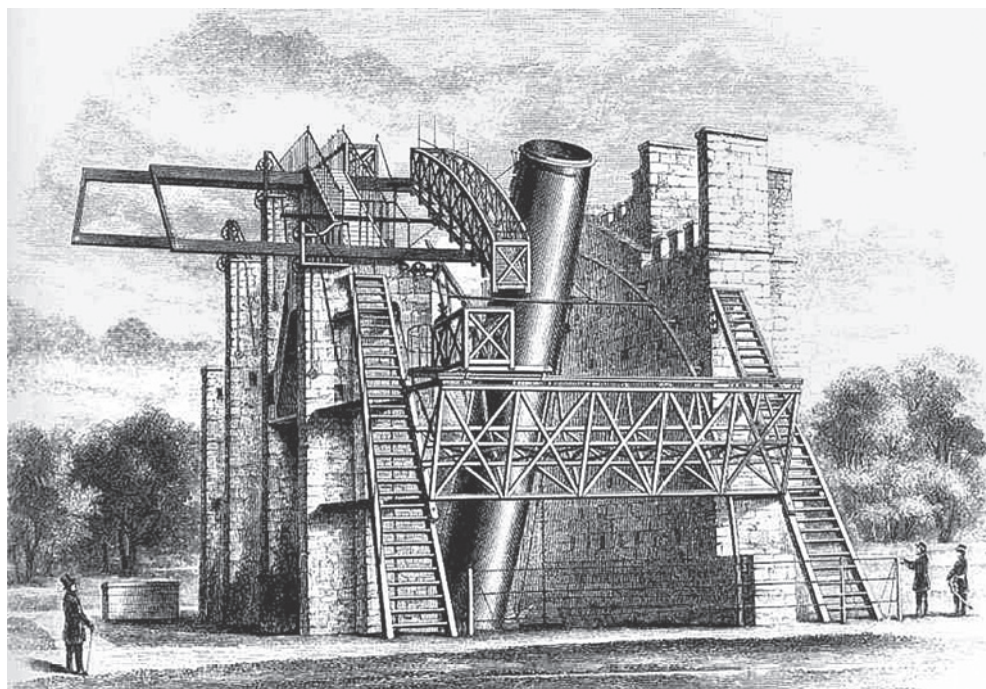
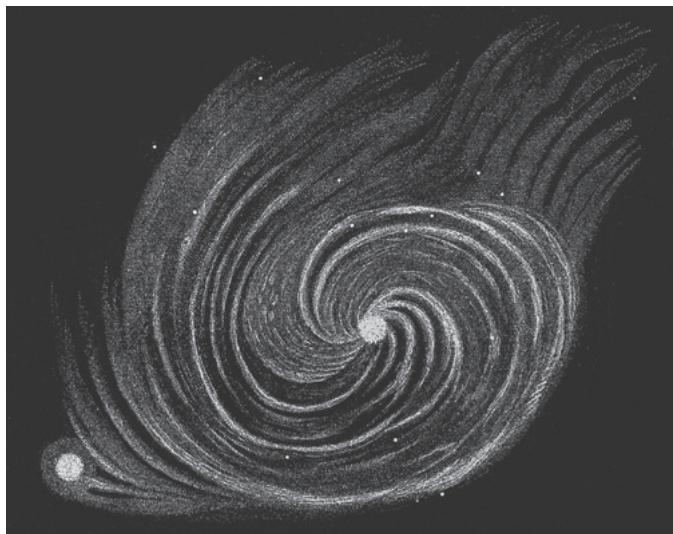


Рис. 1. Гигантский телескоп лорда Росса. В 1845 г. ирландский астроном Уильям Парсонс, третий лорд Росс, спроектировал и построил в своем родовом поместье Бёр-Касл колоссальный 182-сантиметровый рефлектор с фокусным расстоянием 17 м. Телескоп получил прозвище «Левиафан». С его помощью У. Парсонс открыл множество новых деталей в туманностях, в частности спиральную структуру некоторых из них, оказавшихся галактиками

Это случилось в апреле 1845 г., когда гигантский телескоп Росса с металлическим зеркалом диаметром почти 2 метра был наведен на туманность M51 в Гончих Псах. К 1850 г. стало известно уже 14 спиральных туманностей. Но их природа оставалась неясной. Даже в первые десятилетия XX в. по-прежнему господствовало убеждение, что все видимые на небе звезды и туманности принадлежат гигантской всеобъемлющей системе Млечного Пути, близ центра которой находится Солнце. Это была так называемая «Вселенная Каптейна», схема, развитая голландским астрономом Яном Каптейном. Одним из доводов в пользу принадлежности слабых туманностей к системе Млечного Пути было их отсутствие в самой светящейся полосе Млечного Пути. Это был сильный аргумент: если туманности в своем пространственном распределении «чувствовали географию» Млечного Пути, значит, они были с ним как-то связаны. Предположить, что сияющий звездами Млечный Путь непрозрачен для света далеких туманностей, оказалось нелегко. О наличии поглощения света в межзвездном пространстве вообще были только догадки, а мысль о том, что поглощающая свет среда сконцентрирована именно к плоскости Млечного Пути, никому не приходила в голову до 1914 г., когда это предположение высказал Артур Эддингтон. В наше время галактики в «полосе избегания» вдоль Млечного Пути обнаруживаются в инфракрасных лучах, пробивающих слой межзвездной пыли.

Рис. 2. Рисунок спиральной галактики М51, сделанный лордом Россом при наблюдении в его гигантский телескоп



Чтобы понять природу «слабых туманностей», надо было знать расстояние до них. Здесь могли помочь только фотометрические методы, но для их применения требовалось знать истинную светимость каких-либо объектов, находящихся внутри этих туманностей, и сравнить ее с видимым блеском этих объектов, т. е. с их звездной величиной. Эту задачу впервые решил американский физик и астроном Фрэнк Верн в 1911 г. Сначала он оценил расстояние до новой Персея 1901 г., сравнив со скоростью света угловую скорость расширения туманности, возникшей вокруг звезды после ее вспышки. Он совершенно спра-



Рис. 3. Современный снимок галактики М51 (по фото Т. и Д. Халлас, АРОД 10 июля 2002 г.)

ведливо предполагал, что расширение туманности – это не что иное, как вызванное вспышкой распространение волны освещения в межзвездной среде, окружающей новую звезду. Затем Вери сравнил определенную им из расстояния и видимой величины светимость новой Персея с видимой величиной новой 1885 г., вспыхнувшей близ центра туманности Андромеды, и оценил расстояние до туманности в 500 парсек. Более слабые туманности, заключил Вери, лежат на расстояниях в миллионы парсек. В этом рассуждении все правильно, кроме того, что новая 1885 г. была на самом деле сверхновой, которые ярче обычных новых в сотни тысяч раз, – и, значит, расстояние до М31 – не 500 пк, а в тысячу раз больше. В результате этого заблуждения Туманность Андромеды «оказалась» внутри Млечного Пути.



Рис. 4. Спиральная система NGC4414 в созвездии Волосы Вероники

Однако в эти годы стали меняться взгляды на строение самого Млечного Пути. Харлоу Шепли, опираясь на зависимость «период–светимость» для цефеид, оценил размер звездной системы Млечного Пути в 100 кпк. Он также предположил, что концентрация шаровых звездных скоплений в созвездии Стрелец объясняется тем, что они сгущаются к центру системы Млечного Пути, и определил расстояние до него в 15 кпк.



Рис. 5. Спиральная галактика в Треугольнике (M33, NGC598). Фото NOAO

Открытие Вселенной

Таким образом, еще в начале 1920-х гг. конкурировали две системы мироздания. По Шепли, в нашей гигантской Галактике, системе Млечного Пути, Солнце помещалось на далекой окраине, как и «слабые туманности». Вселен-



Рис. 6. Спиральная галактика туманность Андромеды (M31, NGC224)

ная Каптейна содержала Солнце близ центра и была намного меньше. О том, что же находится за пределами Млечного Пути, обе схемы мироздания поразительным образом умалчивали, хотя некоторые астрономы были убеждены

(как и Гершель в XVIII в.!), что многочисленные слабые туманности являются огромными звездными системами, сравнимыми с нашей, и что спиральные туманности Андромеды (M31) и Треугольника (M33) – лишь ближайшие из них.

Но окончательно доказать это удалось лишь в 1924 г. Эдвину Хабблу. Используя 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, он нашел цефеиды в M33 и в M31 и по ним с помощью зависимости «период–светимость» определил расстояния: обе звездные системы оказались далеко за пределами Млечного Пути. Опираясь на «цефеидные» расстояния ближайших галактик, Хаббл смог оценить расстояния и до более далеких систем. К 1929 г., пользуясь своими данными о расстояниях и лучевыми скоростями, определенными Хьюмасоном,

он представил доказательства того, что лучевые скорости галактик возрастают с увеличением расстояний до них. Вообще говоря, тот факт, что далекие туманности имеют большие положительные лучевые скорости, был известен давно, но Хаббл впервые, располагая надежными данными, смог уверенно определить коэффициент пропорциональности между расстояниями и скоростями галактик, известный ныне как постоянная Хаббла. Из этой зависимости следовало, что Вселенная расширяется: все расстояния между скоплениями галактик увеличиваются со временем. До конца XX в. это оставалось величайшим достижением астрономии: Вселенная населена галактиками, и она расширяется. Переворот, произошедший в те годы в сознании астрономов за какой-то десяток лет, сравним по своей значимости с революцией, которую произвело учение Коперника.



Рис. 7. Эдвин Хаббл (1889–1953)

Эволюция звезд

Важнейшими проблемами астрофизики первых десятилетий XX в. были внутреннее строение звезд, перенос излучения в звездных атмосферах и количественный анализ звездных атмосфер. Э. Герцшпрунг в 1908 г. и Г. Рассел в 1910 г. построили диаграмму, связывающую температуру поверхности звезды с ее светимостью (подробнее об этом рассказано в главе «Звезды: рождение, жизнь, смерть»). Оказалось, что большинство звезд расположено вдоль полосы, названной главной последовательностью: она тянется от горячих ярких звезд до слабых и холодных. Есть еще и группа холодных звезд высокой светимости – красных гигантов и сверхгигантов. Объяснение этой диаграммы стало важнейшей задачей теории внутреннего строения звезд, в создании которой особая заслуга принадлежит А. Эддингтону. Он разработал к 1924 г. модель звезды, механическая устойчивость которой определяется балансом



Рис. 8. Артур Эддингтон (1882–1944),
один из создателей физической теории звезд

сил тяжести и лучевого плюс газового давления. Но звезда постоянно теряет энергию за счет излучения; что же является источником ее энергии? Джеймс Джинс считал, что это аннигиляция, превращение вещества в энергию, а Эддингтон – что это ядерные реакции, то есть превращения элементов. Он говорил в 1926 г., что возможное в лаборатории Резерфорда не может оказаться слишком трудным для природы и что «разумно надеяться, что в не слишком отдаленном будущем мы будем способны понять такую простую вещь, как звезда».

В те же годы была разгадана причина различной интенсивности линий в спектрах звезд и тем самым были определены температуры и точный химический состав их поверхностных слоев. Это сделала

в 1925 г. Сесилия Пейн, опираясь на теорию возбуждения и ионизации атомов. Выяснилось, что относительное содержание химических элементов у всех звезд примерно одинаково и близко к солнечному: на 96–99,9 % внешние слои звезд состоят из водорода и гелия, а остальное составляют железо, кальций и другие элементы в пропорции, примерно соответствующей среднему составу Земли и метеоритов. Резкое различие спектров звезд было объяснено в основном различием температур их поверхности.

С 1920-х гг. развитие астрономии стало зависеть от успехов физики, которая начала возвращать свой старый долг астрономии, ибо механика была создана Ньютоном, Лагранжем и Лапласом на основе данных о движении планет. Успехи ядерной физики позволили Хансу Бете заложить в 1938 г. основы теории источников энергии звезд. Концентрация большинства звезд на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рассела была объяснена тем, что это самая длительная стадия эволюции, на которой источником энергии звезды служит превращение водорода в гелий. Ядро гелия чуть легче исходных четырех протонов, и в соответствии с формулой Эйнштейна ($E = mc^2$) избыток их массы переходит в энергию излучения. Термоядерные реакции идут при температурах во много миллионов градусов, которые достигаются в ядре звезды после ее формирования из облака межзвездного газа и последующего гравитационного сжатия.

После выгорания водорода ядро звезды сжимается и нагревается еще сильнее, так что становятся возможны реакции превращения гелия в более тяжелые элементы, но теплотворная способность этих реакций невелика. Уже в 1940-е гг. стало ясно, что запасов ядерного горючего у наиболее расточительных звезд высокой светимости хватает лишь на миллионы лет, следо-

вательно, они должны образовываться в нашу космическую эпоху. Соседство этих звезд с газовой-пылевыми туманностями указывало на их генетическую связь, и в 1942 г. Ф. Уиппл заключил, что межзвездное вещество – единственный очевидный источник вещества для формирования звезд. Молодость звезд высокой светимости вскоре получила подтверждение из совсем других соображений. В 1947 г. В. А. Амбарцумян доказал, что в разреженных группировках – звездных ассоциациях – звезды не могут долго удерживаться вместе силой тяготения, следовательно, эти группировки образовались недавно. Вывод о групповом образовании звезд, продолжающемся и в наше время, стал общепризнанным. Но плотные облака, в недрах которых формируются звезды, долго оставались невидимыми из-за их низкой температуры и были обнаружены по излучению молекул межзвездного газа только после рождения радиоастрономии миллиметрового диапазона, в середине 1970-х гг.

Создание теории звезд – объяснение их строения, источников энергии, происхождения и эволюции – величайший триумф науки XX в.

Галактика Млечный Путь

Открытие населенной галактиками Вселенной было и открытием нашей галактики как одной из многих ей подобных. Мы теперь сравниваем нашу звездную систему с другими и, наоборот, опираемся при их изучении на знания о Галактике. Две трудности препятствуют исследованиям Галактики. Одна из них – поглощение света частицами пыли, рассеянными в межзвездном пространстве, из-за чего уменьшается видимый блеск звезд и искажаются их фотометрические расстояния. Преодолеть эту трудность удалось лишь недавно, благодаря наблюдениям в далеком инфракрасном диапазоне, в котором поглощение мало (рис. 9). Впрочем, развитие интерференционных наблюдений из космоса в ближайшие десятилетия позволит определять расстояния объектов в нашей Галактике исходя из геометрических расчетов, без необходимости знать светимость и видимый блеск источников, искаженные поглощением.

Фотометрические расстояния до объектов вычисляются по их светимости на основании правила, согласно которому поток энергии от источника обратно пропорционален квадрату расстояния до него.

Вторая трудность носит принципиальный характер. Мы живем близ экватора нашей дискообразной звездной системы и поэтому не можем окинуть ее взглядом сверху. С этим уже ничего не поделаешь – разве что когда-нибудь мы

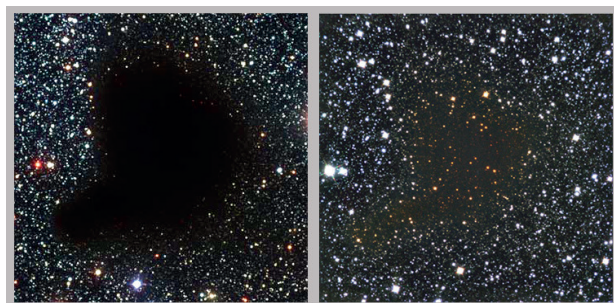


Рис. 9. Плотное газово-пылевое облако – глобула Барнард 68 – на богатом звездами фоне Млечного Пути. В видимом диапазоне спектра (слева) это облако совершенно непрозрачно, но в ближнем ИК-диапазоне (справа) уже полупрозрачно. Фото Европейской южной обсерватории (Чили)

установим связь с разумными существами, живущими хотя бы в килопарсеке над (или под) плоскостью Галактики, и они поделятся своими фотографиями галактического диска, но надежды на это мало. Остается уповать на повышенные точности определения расстояний для все возрастающего числа объектов разного рода.

В 1940-е гг. было установлено, что в Галактике имеются два типа населения. Население типа I, к которому относятся Солнце, рассеянные скопления, звезды-сверхгиганты, облака газа и пыли, сконцентрировано к плоскости Галактики, а население типа II – шаровые скопления, планетарные туманности, некоторые звезды-гиганты и др. – к ее центру, образуя сфероидальное гало. Объекты населения I обращаются вокруг центра Галактики «стройными рядами», в одном направлении, по почти круговым орбитам (как планеты Солнечной системы). Объекты населения II движутся по вытянутым орбитам, хаотически ориентированным к экватору Галактики. Выяснилось также, что два типа звездного населения различаются не только кинематикой и распределением в пространстве. Содержание тяжелых элементов у объектов населения II оказалось в сотни раз меньше, чем у населения I.

Создание к концу 1950-х гг. теории звездной эволюции позволило оценить возраст звезд. У населения II он составляет около 10–15 млрд лет, тогда как у подавляющего большинства объектов диска не превышает 8 млрд лет и может быть сколь угодно мал. Иными словами, только в диске наблюдаются признаки звездообразования, идущего на наших глазах в газово-пылевых облаках. Содержание элементов тяжелее гелия у всех звезд населения I «нормальное» (близкое к солнечному) именно потому, что они образовались из газа, уже обогащенного этими элементами при вспышках сверхновых первого поколения. Большинство спиральных галактик, видимых с ребра, четко показывает плоскую дискообразную систему голубых (молодых) звезд и газово-пылевых облаков, а также сфероидальную систему звезд и шаровых скоплений, сконцентрированных к центру галактики. Эллиптические галактики состоят почти исключительно из объектов населения II, а в неправильных галактиках преобладает население I. Причину этого нам еще предстоит понять.

Все шло хорошо...

Таким образом, к середине XX в. был заложен фундамент наших представлений о природе звезд, о строении галактик и Вселенной в целом. В 1952 г. нашла разрешение, казалось бы, последняя серьезная проблема астрономии. Ее суть заключалась в том, что согласно найденной Хабблом в 1929 г. скорости расширения Вселенной все вещество около 2 млрд лет назад было сосредоточено в точке бесконечно большой плотности; возраст Вселенной при этом получался неприемлемо малым – меньше возраста Земли, известного из геологии. Значение же постоянной Хаббла, дающей «возраст Вселенной», определялось на основе расстояний галактик, вычисленных по светимостям цефеид¹ и их видимых звездных величин. Цефеиды исследовались в близких галактиках, где они доступны крупнейшим телескопам.

¹ Подробнее о них см. в разделе «Переменные звезды».

В 1952 г. В. Бааде в результате исследований галактики Андромеды на 5-метровом Паломарском рефлекторе пришел к выводу, что светимость цефеид примерно на 1,5 звездные величины выше, чем считал Хаббл. Выявилась и еще одна ошибка классика: расстояния до далеких галактик он определял, измеряя яркость их ярчайших звезд, но многие из них оказались компактными звездными скоплениями, светимость которых намного больше, чем индивидуальных звезд. В результате вместо 500 км/(с·Мпк), как было у Хаббла, постоянная его имени составила примерно 50–100 км/(с·Мпк), а возраст Вселенной увеличился до 15–20 млрд лет. К этому времени было уже ясно, что возраст самых старых объектов населения II – шаровых звездных скоплений – составляет около 10–15 млрд лет. В картине эволюции звезд, галактик и Вселенной больше не было противоречий.

Завершение эта картина получила в 1965 г., когда было обнаружено микроволновое фоновое излучение, реликт первоначального горячего состояния Вселенной. Оно возникло в момент отделения вещества от излучения, когда его температура составляла около 4000 К, но ныне из-за расширения Вселенной она уменьшилась до 2,7 К. Подтвержденная этим открытием космологическая модель первоначально горячей расширяющейся Вселенной объяснила, почему даже в самых старых звездах населения II наблюдается высокое (25–30 % по массе) содержание гелия: он образовался в основном еще в дозвездном газе на ранней стадии расширения. Впоследствии начальные флуктуации плотности развились в протоскопления галактик.

Открытие реликтового излучения подтверждало космологическую модель А. А. Фридмана, основанную на теории гравитации Эйнштейна. Казалось, что основные проблемы астрономии решены.

Старое «облачко» – темная масса

Правда, оставалось облачко сомнений, зародыш которого возник еще в 1933 г. Ныне оно разрослось в гигантскую проблему ненаблюдаемой, но гравитирующей материи, общую и для физики, и для астрономии. А недавно к ней прибавилась и проблема «темной энергии».

В 1933 г. Фриц Цвикки обнаружил, что скорости хаотического движения галактик в скоплении Волос Вероники составляют около 1000 км/с. Если предположить, что галактики в скоплении движутся стационарно, что само скопление не расширяется и не сжимается, то по скорости движения галактик нетрудно вычислить полную массу скопления, что и сделал Цвикки. Разделив массу скопления на число галактик в нем, он нашел среднюю массу, приходящуюся на одну галактику. Она оказалась значительно больше, чем следовало ожидать, исходя из количества звезд в галактиках. Цвикки не мог найти объяснений этой странности, большинство же астрономов вообще не обращало внимания на эту проблему.

Однако уже с конца 1930-х гг. начали появляться признаки того, что ненаблюдаемое вещество имеется не только в скоплениях, но и в индивидуальных галактиках. На это указывали высокие скорости вращения дисков галактик на больших расстояниях от центра, там, где звезд уже не видно. В 1974 г. Дж. Острайкер и Дж. Пиблс и независимо от них Я. Эйнасто и его сотрудники



Рис. 10. Фриц Цвикки (1898–1974)

пришли к выводу о существовании у галактик обширных корон из темного вещества, содержащих около 90 % массы галактики. Таким образом, значения масс галактик следовало увеличить на порядок. При этом сразу стало понятно, почему скопления галактик остаются гравитационно связанными, несмотря на большую скорость движения их членов, а также – как эти скопления удерживают внутри себя чрезвычайно горячий газ, обнаруженный в те же годы по наблюдениям в рентгеновском диапазоне.

Однако что же является носителем невидимой массы в галактиках? Проблема «скрытой массы» до сих пор не решена, хотя практически все уверены, что это не обычное барионное вещество. Ясно, что без понимания природы этого вещества попытки построить теорию происхождения галактик напоминают попытки создать теорию источников энергии звезд до открытия ядерных реакций... Ну что ж, придется подождать. Поиски нейтрино от Солнца завершились успехом лишь после 30 лет работы подземных «нейтринных телескопов». Будем терпеливо продолжать поиски носителей невидимой массы.

Пять проблем Шкловского

В 1979 г. И. С. Шкловский опубликовал статью «Вторая революция в астрономии подходит к концу». В ней он писал: «Эпоха “бури и натиска” в астрономии, связанная со второй революцией, подходит к концу».

Первая революция была связана с именами Коперника и Галилея, с Возрождением и Великими географическими открытиями, вторая – с научно-технической революцией XX в., с развитием электроники. Всеволновая астрономия вскрыла природу звезд и ядер галактик, принесла понимание Вселенной вплоть до самых отдаленных времен. Но важнее всего, писал Шкловский, то, что «генеральный план, взаимосвязь объектов, а главное – история развития, понята и перешли в категорию абсолютных истин. Во Вселенной нет такого фундаментального фактора, который, будучи от нас скрытым, определяет физические условия в космических объектах. Достигнутый в настоящее время физикой уровень познания структуры материи принципиально достаточен для объяснения почти всех явлений во Вселенной (кроме сингулярности)». Он отмечал далее, что каждое важное явление во Вселенной связано с ядерными процессами, а астрономия долгое время успешно развивалась, не подозревая об этом. Такая ситуация больше не может повториться: «Ни одно из будущих открытий физики... не изменит сколько-нибудь радикально ту картину строения и развития Вселенной, которая была создана в результате великих открытий второй революции в астрономии. Не может быть больше такой ситуации,

чтобы в результате каких-либо открытий в физике мир оказался совсем не таким, каким мы его сейчас себе представляем».

Это оказалось не так. Описание пространственной структуры Вселенной действительно завершено раз и навсегда в XX в.; Америку нельзя открыть дважды. Но что сказал бы Иосиф Самуилович, если бы узнал, что лишь о 5 % плотности энергии Вселенной мы можем сказать, чем она обусловлена? Не значит ли это, что мир оказался и впрямь совсем не таким, каким мы его представляли себе в 1979 г.?

В 1979 г. И. С. Шкловский называл пять крупнейших нерешенных проблем. Прежде всего это существование других планетных систем, о которых в те годы ничего не было известно. В 1995 г. была открыта первая внесолнечная планета, сейчас (2021 г.) их известно более 5000.

Свершение вековой мечты астрономов оказалось делом техники...

Вторая из «проблем Шкловского» – существует ли внеземной разум. Открытие других планетных систем, конечно, дает новые надежды, но и только. Никакого прогресса здесь нет, хотя продолжаются и радионаблюдения, и все более глубокое осмысление ситуации. Это действительно проблема проблем, тесно связанная с горизонтом нашего знания и судьбой человечества.

Третья проблема – существование во Вселенной «скрытой» массы. Как уже говорилось, ее наличие твердо установлено, хотя природа составляющих ее объектов пока не определена. Выясняется, что «темное холодное вещество» составляет по массе почти треть содержимого Вселенной.

Четвертой проблемой И. С. Шкловский назвал необходимость полного понимания физических процессов, идущих в активных ядрах галактик. Он отмечал, что в общих чертах картина уже существенно прояснилась – и был прав, говоря об аккреции на сверхмассивные черные дыры как об источнике энергии ядер галактик. Ныне наличие такой «дыры» с массой около $4 \text{ млн } M_{\odot}$ в центре нашей Галактики доказано. Не менее чем в трех сотнях ядер других галактик также найдены признаки существования черных дыр.

«И, наконец, совершенно открыта фундаментальная проблема сингулярности Вселенной». Серьезное продвижение в проблеме эволюции Вселенной, по мнению И. С. Шкловского, – дело сравнительно отдаленного будущего. «Кто знает – может быть, это и будет главным содержанием грядущей третьей революции в астрономии?»

Похоже, что в 1998 г. эта революция началась.

Новая космология

До недавних пор расширение Вселенной оставалось важнейшим и самым неожиданным из всех открытий астрономии. Однако пришедшее к концу XX в. понимание того, что мы не знаем, чем наполнена Вселенная, – еще важнее,



Рис. 11. И. С. Шкловский (1916–1985)

ибо может изменить и лицо физики вообще. И дело не только в постепенном признании существования во Вселенной гравитирующей массы неизвестной природы. Событий, начавшихся в космологии в 1998 г., никто не предвидел.

На основе созданной им общей теории относительности А. Эйнштейн в 1917 г. построил физико-математическую модель мира – вечного и в целом неизменного. Дабы противостоять всемирному тяготению, Эйнштейн ввел в свою модель космологическую константу (лямбда-член), величину и знак которой можно подобрать так, чтобы ни коллапса, ни расширения мира не происходило, Вселенная в целом оставалась статичной. Дело было отнюдь не только в эстетической привлекательности модели вечной самоподобной Вселенной. Эйнштейн опирался на астрономические данные своего времени: скорости звезд были невелики (действительно, на преодоление расстояния, равного своему диаметру, звезда затрачивает в среднем целые сутки – относительно своих размеров улитка движется в тысячи раз быстрее), и кроме звездной системы Млечного Пути – «Вселенной Каптейна», – в мире ничего нет...

После открытия разбегания галактик необходимость в космологическом члене отпала: Вселенная оказалась не статичной, а расширяющейся. Введение космологической постоянной Эйнштейн называл своей самой грубой ошибкой. Однако теперь мы понимаем, что ошибочным было лишь придание этой постоянной значения, необходимого для статичности Вселенной. В целом же предположение Эйнштейна оказалось в принципе правильным. Существование некоей силы антигравитации, которая в противоборстве с обычным тяготением управляет динамикой Вселенной, было недавно доказано. Большинство специалистов уверены, что она соответствует космологическому лямбда-члену в эйнштейновском уравнении гравитационного поля.

Значение космологической постоянной позволили недавно определить наблюдения далеких галактик. Выбор между моделями Вселенной можно сделать, изучив зависимость между красным смещением линий в спектре и расстоянием далеких объектов: при больших красных смещениях должны появиться отклонения от линейного закона Хаббла (т. е. изменение «постоянной» Хаббла во времени), которые должны указать, как именно – ускоренно, равномерно или замедленно – идет расширение Вселенной. Основная трудность связана с необходимостью иметь надежные данные о максимально далеких объектах с известной светимостью, а также в определении этой светимости и тем самым – расстояний. Долгое время единственными объектами, более или менее удовлетворяющими этим требованиям, оставались ярчайшие галактики в богатых скоплениях.

В 1980-е гг. стало выясняться, что гораздо лучшими «стандартными свечами» могут служить сверхновые типа Ia. В максимуме блеска они имеют очень высокую светимость (абсолютная звездная величина около -19^m ¹), благодаря чему видны на больших расстояниях. Но еще важнее, что в кульминации вспышки все они имеют почти одинаковую светимость, как это показали их наблюдения в достаточно близких галактиках с известным расстоянием. Эти свойства сверхновых Ia привлекли внимание космологов, и не напрасно:

¹ Индекс *m* (от *magnitude*) означает звездную величину.

изучение далеких сверхновых привело к выводу об ускорении расширения Вселенной. Следствия из этого открытия выходят за рамки космологии, они могут потребовать радикального развития физической теории.

Успех пришел одновременно к двум командам ученых. Одна из них была сформирована в 1988 г. в Национальной лаборатории им. Лоуренса в США и состояла в основном из физиков, ее возглавил С. Перлмуттер; другую команду из астрономов, возглавил в 1994 г. Б. Шмидт из обсерваторий Маунт-Стромло и Сайдинг-Спринг (Австралия). Наблюдения велись на крупнейших телескопах мира. В январе 1998 г. команда физиков первой объявила, на основании данных о 42 сверхновых, что во Вселенной доминирует антигравитация, так что в современную эпоху Вселенная расширяется с ускорением. Вскоре к аналогичному заключению пришла и более осторожная команда астрономов, которая, однако, первой опубликовала подробную статью. Звезд у нее было меньше, но меньше и значения ошибок.

Далекие сверхновые оказались систематически более слабыми, чем ожидалось по линейному закону Хаббла, и это означало, что Вселенная расширяется с ускорением. Это равносильно утверждению, что космологическая постоянная не равна нулю, а имеет положительный знак, и это эквивалентно существованию космической антигравитации. Результат ошеломляющий! В те годы он казался – а некоторым кажется и сейчас – невероятным. Обуславливающая антигравитацию «темная энергия», скорее всего, связана с отрицательным давлением физического вакуума, плотность которого теперь измеряется астрономическими методами.

Последующие наблюдения подтвердили первые выводы и показали также – на этот раз в соответствии с ожиданиями, – что самые далекие сверхновые уклоняются не вверх, а вниз (в сторону большей яркости) от линейной зависимости блеска от фотометрического расстояния. Это означает, что в еще более далекие времена Вселенная расширялась с замедлением – потому что в те времена она была более плотной и гравитация еще тормозила расширение. Победа антигравитации над тяготением свершилась около 6 млрд лет назад.

Данные о сверхновых в далеких галактиках и параметры пространственных флуктуаций реликтового излучения приводят к таким внутренне согласованным данным о нашей Вселенной:

- нынешний возраст Вселенной составляет $13,8 \pm 0,04$ млрд лет;
- постоянная Хаббла $H_0 = 67,8 \pm 0,8$ км/(с·Мпк);
- отделение вещества от излучения («просветление») произошло при возрасте Вселенной 370 ± 15 тыс. лет;
- Вселенная плоская, т. е. евклидова: сумма углов в треугольнике на всех масштабах равна π . Средняя плотность Вселенной равна критической, и она будет расширяться вечно;
- темная энергия, обладающая свойством антигравитации, вносит в плотность энергии Вселенной вклад, равный 68 %;
- вклад ненаблюдаемого гравитирующего вещества равен 27 %;
- вклад барионов составляет 5 %, в том числе звезд – менее 1 %.

Астроному со стажем нелегко поверить в последние пункты этого списка. На столь любимые нами звезды, которые мы совсем недавно считали самыми важными объектами, приходится не более 1 % массы Вселенной. Большая доля

барионов – это горячий газ, наблюдаемый по его рентгеновскому излучению в скоплениях галактик. Впрочем, почти все наши знания о Вселенной, в том числе и о ее скрытой от глаз составляющей, пришли именно от наблюдений звезд: они составляют вершину «айсберга», по которой обнаруживается само его существование. Кто может теперь сомневаться, что астрономия снова, как во времена Галилея и Ньютона, становится лидером естествознания? Телескопы превратились в инструменты не только астрономического, но и физического исследования.

Черные дыры

Черными дырами, согласно теории, становятся истощившие свои источники энергии звезды, массы которых превышают $3M_{\odot}$. Увидеть их нельзя по определению: гравитационное поле этих объектов не выпускает даже кванты света, – но можно косвенно узнать об их существовании по гравитационному воздействию на соседние объекты. Ныне в нашей Галактике насчитывается около 20 кандидатов в черные дыры звездных масс, а наличие сверхмассивных (в миллионы масс Солнца) черных дыр заподозрено в ядрах примерно 300 галактик, включая и нашу. Падающий на черную дыру газ образует вокруг нее быстро вращающийся диск, взаимное трение слоев в котором приводит к нагреву и мощному рентгеновскому излучению. Взаимодействие вращения этого диска и электромагнитных полей приводит к тому, что из его полюсов у черных дыр всех масс выбрасываются на субсветовых скоростях узкие потоки заряженных частиц – джеты, несущие огромную энергию. Из некоторых ядер галактик истекают джеты, простирающиеся на сотни килопарсек; они часто заканчиваются в огромных облаках, излучающих в радиодиапазоне.

«Почти доказательством» наличия черных дыр в ядрах галактик служат очень высокие скорости движения газа в самом центре галактик; в центре же нашей Галактики с 1999 г. наблюдаются звезды, с огромной скоростью обращающиеся вокруг него; одна из них – всего за 15 лет. По орбитам этих звезд можно оценить и массу центрального объекта – 3 млн M_{\odot} , и расстояние до него – 7,5 кпк, что лежит в пределах ошибок лучших измерений, выполненных традиционными способами. Оценки радиуса центрального объекта дают лишь его верхнюю границу; однозначного доказательства «чернодырной» природы центрального объекта еще нет, ибо до горизонта событий мы еще не дошли, но скоро это будет достигнуто с использованием космических радиоинтерферометров. Если это и не дыра, то нечто еще более загадочное.

Изучение черных дыр и джетов в ядрах галактик ставит проблемы не менее серьезные, чем существование темной энергии или материи, замечаемой лишь по ее гравитационному воздействию. Исчерпывающей теории черных дыр, по крайней мере их внутренней области, еще нет, и это открывает широкий простор для самых смелых предположений. Черные дыры могут оказаться окнами в другие вселенные, в другие пространственно-временные измерения.

Множественность обитаемых миров

Концепция множественности вселенных (с большой буквы принято обозначать ту Вселенную, в которой мы живем) является составной частью так

называемой инфляционной космологии, согласно которой в извечном океане первичного вакуума то там, то тут возникают хаотические флуктуации плотности, очень быстро раздувающиеся во вселенные. Физические законы в них и – страшно сказать – даже математика могут быть совсем другими, чем в нашей Вселенной.

Получить свидетельства существования других вселенных вроде бы нельзя по определению. Правда, некоторые теоретики говорят о возможности существования соединяющих разные вселенные пространственно-временных туннелей из вещества, находящегося в состоянии, близком к состоянию физического вакуума. Поведение тел и излучений вблизи горловин этих туннелей может быть похоже на поведение объектов, находящихся под действием отрицательной гравитации, например может наблюдаться отклонение света в противоположную от ожидаемой сторону. Сквозь такого рода горловину можно увидеть и вселенную, находящуюся на ранней стадии развития, и она может напоминать яркое ядро галактики... Н. С. Кардашев недавно пришел к выводу, что вход в туннель, ведущий в другую вселенную, может обладать очень сильным радиальным магнитным полем одного знака; натяжение магнитного поля способно играть роль темной энергии (с ее отрицательным давлением), удерживающей туннель от схлопывания. Появляются и наблюдательные данные о сильных магнитных полях в окрестностях черных дыр.

Представление о существовании множества других вселенных является неизбежным выводом современной космологии и вместе с тем – самым экономным объяснением парадокса, известного как антропный принцип. В конечном счете он состоит в утверждении, что необходима тонкая и точная согласованность множества параметров (нашей) Вселенной с возможностью появления изучающего эту Вселенную нашего разума. Но ведь совершенно очевидно, что в ансамбле множества вселенных может найтись и, поскольку мы существуем, действительно нашлось место для такой из них, физические законы в которой совместимы с существованием сложных структур и, в конечном счете, человека, то есть для нашей Вселенной. Безумное число других вселенных существует без наблюдателей. Наверное, каждый человек в детстве задавался вопросом: почему я – это именно Я? После того как событие свершилось, его вероятность становится равна единице, какими бы низкими ни были ее оценки до эксперимента. А в противном случае некому было бы и задавать вопросы. В других вселенных так и случилось.

Концепция множественности вселенных, как отмечает Н. С. Кардашев, – единственное непротиворечивое объяснение Мироздания. Она возникает неизбежно и в инфляционной космологии, и в современной теории черных дыр. Она давно уже высказывалась и физиками (М. А. Марков и др.), и поэтами. Далеко не все специалисты ее принимают, потому что считают рассуждения на эту тему спекулятивными. Однако слово «спекуляция» в науке означает не обман и не махинацию, а умозрение...

Подводя итоги

Возможно ли, что космологическая проблема пребудет с нами навеки? Может ли человек, ничтожное порождение Вселенной, объяснить ее исчерпыва-

ющим образом? Большинство исследователей полагают, вместе с Эйнштейном, что «Господь хотя и изощрен, но не злонамерен» и что мы все ближе, хотя и асимптотически, подходим к полному знанию о Мире. При этом никто не поднимает планку перед нами все выше и выше.

Существует и другая точка зрения, наиболее лаконично выраженная в известном изречении: по мере расширения сферы нашего знания площадь ее соприкосновения с неизвестным становится все больше. Окончательного знания нет даже и в пределе. Однако уже более 40 лет разрабатывается теория струн, в рамках которой появляется и элементарная частица со спином, равным 2, – тот самый гравитон, который необходим для объединения квантовой механики и теории тяготения в Единую Теорию Всего. Может быть, уже виден свет в конце туннеля. Но если такая теория и возможна, она все равно применима лишь к нашей Вселенной: в других вселенных, по определению, и физика, и математика другие...

Великий астрофизик Ф. Хойл писал: «...Мы склонны к некоторому зазнайству, когда говорим, что Вселенная построена логично с нашей точки зрения. Но это все равно, что запрягать телегу впереди лошади. Не Вселенная построена логично с нашей точки зрения; это мы и наша логика развились в соответствии с логикой Вселенной. Таким образом, можно сказать, что разумная жизнь есть нечто, отражающее самую суть творения Вселенной... Мы построены по принципам, которые вытекают из общего устройства Вселенной». Это означает, что пока гипотетический диалог с представителями иных цивилизаций будет идти в рамках уже познанного нами, проблемы взаимопонимания не возникнет. А если Окончательная Теория Всего существует, то, выйдя из младенчества и придя к ней, мы сможем понять всех! Если они существуют...

Ныне мы знаем, где проходят границы нашего незнания. Границы познания непрерывно раздвигаются от нас в стороны бесконечно малого и бесконечно большого – а внутри них наше знание подтверждается гигантским массивом взаимосвязанных данных, всей общечеловеческой практикой.

В 1972 г. Л. А. Арцимович пророчески писал, что будущее принадлежит астрофизике. Ныне это будущее пришло.



Глава **1**

ПЛАНЕТЫ
СОЛНЕЧНОЙ
СИСТЕМЫ



Общая характеристика

Солнечная планетная система, в которой мы живем, – это изолированный островок в безбрежном пространстве Галактики. Расстояние от Солнца до самых далеких планет во много тысяч раз меньше, чем до самых близких звезд. И хотя некоторые объекты Солнечной системы (например, отдельные кометы) удаляются от Солнца на значительные расстояния, основная доля вещества этой системы сосредоточена в нескольких крупных планетах, обращающихся вокруг Солнца.

С древности в Солнечной системе было известно пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, видимые невооруженным глазом. В начале XVII в. астрономы окончательно доказали, что Земля – равноправный представитель планет, и их «стало» шесть. В 1781 г. случайно был открыт Уран, а в 1846 г. был теоретически предсказан и сразу же обнаружен на небе Нептун – восьмая и, по-видимому, последняя крупная планета Солнечной системы. Но в те же годы были открыты малые планеты – астероиды, в основном «обитающие» между орбитами Марса и Юпитера. Однако обнаружить что-либо за орбитой Нептуна долго не удавалось.

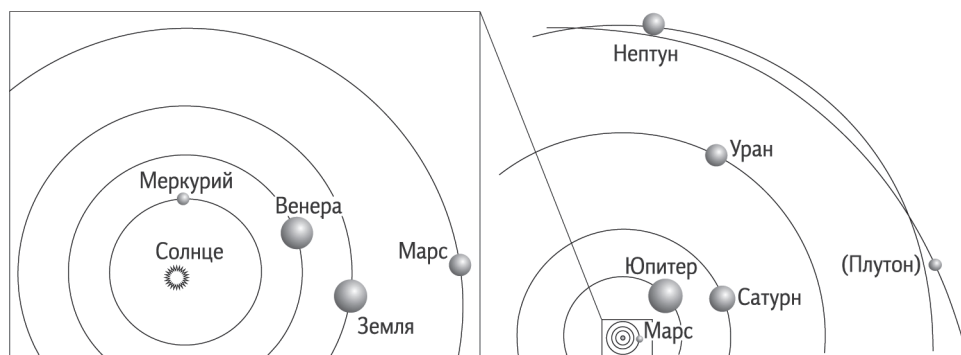


Рис. 1.1. Схема расположения планет в Солнечной системе (без соблюдения масштаба)

Однако настойчивые поиски новых планет принесли успех: в 1930 г. за орбитой Нептуна была открыта небольшая планета Плутон. И хотя своим малым размером и сильно вытянутой и наклоненной орбитой Плутон выделялся среди других планет, его все же «записали» в это семейство, поскольку он был за-

метно крупнее любого из астероидов. До конца XX в. принято было считать, что в Солнечной системе девять планет. Но последнее десятилетие принесло нам открытие множества объектов за орбитой Нептуна, причем некоторые из них похожи на Плутон, а иные даже превосходят его размерами. Поэтому в 2006 г. астрономы уточнили классификацию: 8 крупнейших тел – от Меркурия до Нептуна – считаются классическими планетами, а Плутон стал прототипом нового класса объектов – карликовых планет. Ближайшие к Солнцу 4 планеты принято называть планетами земной группы, а следующие 4 массивных газовых тела называют планетами-гигантами. Карликовые планеты в основном населяют область за орбитой Нептуна – пояс Койпера, хотя некоторые крупные астероиды, «обитающие» внутри орбиты Нептуна, возможно, тоже будут отнесены к этому семейству.

Планеты земной группы похожи между собой по размеру, массе и составу. В эту группу входят Меркурий, Венера, Земля и Марс. Их поверхности сложены твердыми породами. Средняя плотность их вещества весьма велика: от 3,9 г/см³ у Марса до 5,5 г/см³ у Земли. По сравнению с планетами-гигантами размеры планет земной группы сравнительно невелики. Даже крупнейшие среди них – Земля и Венера – в 10 раз меньше Юпитера и Сатурна и в 4 раза меньше Урана и Нептуна. Средний радиус Венеры (6052 км) почти равен земному (6371 км). Марс почти вдвое меньше Земли, его средний экваториальный радиус 3397 км. Меньше всех в этой группе ближайшая к Солнцу планета – Меркурий: его радиус 2440 км. Он движется на среднем расстоянии 58 млн км, или 0,4 а. е. от Солнца (1 а. е., астрономическая единица – среднее расстояние Земли от Солнца). Радиус орбиты Венеры – 0,7 а. е., а Марс отстоит от Солнца в 1,5 раза дальше Земли.

Периоды обращения планет по орбитам закономерно увеличиваются с удалением от Солнца. Быстрее всех по орбите движется Меркурий – со средней скоростью 48 км/с; он совершает оборот вокруг Солнца за 0,24 земного года, Венера, двигаясь со скоростью 35 км/с, – за 0,62 года; Земля, естественно, – за год; ее скорость около 30 км/с, а Марс, средняя скорость которого 24 км/с, – за 1,9 года.

Самая сильная эллиптичность орбиты у Меркурия: ее эксцентриситет равен 0,2, к тому же она заметно наклонена к плоскости, близ которой лежат орбиты остальных планет. А самый малый эксцентриситет орбиты – у Венеры (0,01), она движется практически по окружности. Но в одном Венера и Меркурий очень схожи: их суточное вращение – самое медленное среди всех планет. Один оборот вокруг оси (звездные сутки) длится у Меркурия 58,6 земных суток ($\frac{2}{3}$ меркурианского года!), а у Венеры – 243 суток, что даже превышает длину венерианского года! Оси вращения обеих планет почти перпендикулярны их орбитальным плоскостям, но направления вращения разные: Меркурий, как и большинство планет, вращается в прямом направлении (то есть так же, как движется по орбите), а Венера – в обратном, и в этом одна из ее загадок. Зато Земля и Марс вращаются одинаково «правильно»: в прямом направлении, с суточным периодом около 24 часов, и даже оси их вращения наклонены почти на одинаковый угол: между полярной осью и перпендикуляром к орбитальной плоскости у Земли угол 23°, а у Марса – 25°. Именно этот наклон приводит к смене времен года на Земле и Марсе, подставляющих Солнцу то свое южное, то северное полушарие.

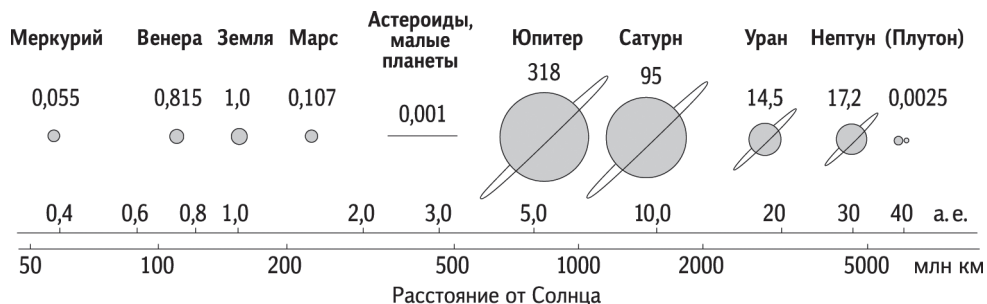


Рис. 1.2. Массы планет (в единицах массы Земли) и их среднее расстояние от Солнца

У планет земной группы очень мало спутников: на 4 планеты всего 3 спутника, тогда как у планет-гигантов их более 200! Самый большой спутник – у Земли, это Луна. Еще два маленьких – у Марса: Фобос и Деймос, каждый размером менее 30 км. А Меркурий и Венера спутников вообще не имеют.

Чем дальше от Солнца располагается планета, тем меньше тепла и света она получает, однако температура на ее поверхности зависит также от наличия и состава атмосферы. У Меркурия атмосферы практически нет, и солнечные лучи беспрепятственно проникают к его поверхности. Максимальная температура на Меркурии достигает почти 700 К. Но самая высокая температура наблюдается на поверхности второй от Солнца планеты – Венеры, расположенной почти вдвое дальше от Солнца. Ее мощная атмосфера из углекислого газа удерживает тепло, сохраняя у поверхности днем и ночью одинаковую температуру – около 735 К. На Земле среднегодовая температура близка к 290 К, а на Марсе с его очень разреженной углекислой атмосферой – лишь к 220 К.

Среди всех планет земной группы существенным магнитным полем обладает только Земля: у остальных планет оно очень слабое. Магнитное поле Меркурия примерно в сто раз слабее земного, а у Марса и Венеры оно еще меньше. Таким образом, среди подобных ей планет Земля выделяется тремя свойствами: наличием массивного спутника, большим количеством жидкой воды на поверхности и весьма сильным магнитным полем. Вероятно, это и сыграло решающую роль в появлении жизни на ней.

Изучение карт рельефа поверхностей планет земной группы показало, что перепады высот (от самой высокой точки до самой низкой) увеличиваются с расстоянием от Солнца: на Меркурии перепад высот около 10 км, на Венере – 13,4 км, на Земле – 20 км (включая океанские впадины), на Марсе – более 30 км. По внутреннему строению планеты земной группы различаются мало: они, как правило, имеют металлическое ядро, мягкую мантию и твердую кору различной толщины. Отличительной особенностью Марса служат гигантские древние вулканические горы, самые крупные из которых достигают 21 км в высоту.

Группа более удаленных от Солнца планет, включающая Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, совершенно не похожа на группу планет земного типа. Это очень массивные планеты-гиганты. На их долю приходится 99,5 % всей массы нашей планетной системы. Например, масса Юпитера в 318 раз превосходит массу Земли. Сатурн превосходит Землю по массе в 95 раз. Почти вся кинетическая энергия Солнца поглощается этими планетами.

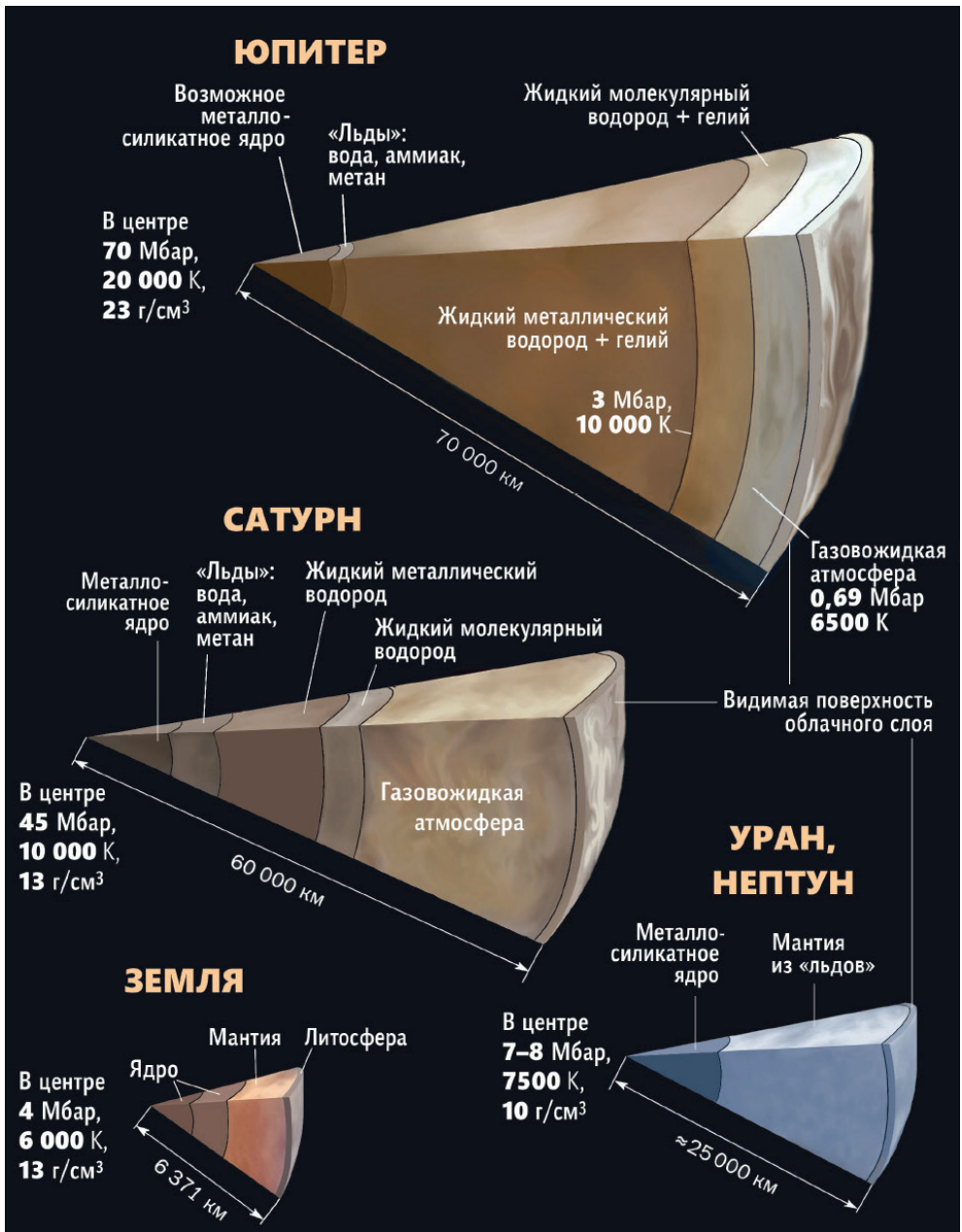


Рис. 1.3. Схема внутреннего строения планет-гигантов в сравнении со строением Земли

тическая энергия вращения и практически весь момент импульса Солнечной системы приходится на планеты-гиганты. Средняя плотность вещества планет-гигантов удивительно низка: от 0,7 г/см³ у Сатурна до 1,6 г/см³ у Нептуна. Самое любопытное, что у них нет твердой поверхности в привычном для нас

смысле. Они состоят в основном из водорода и гелия. Видимая поверхность этих планет – не что иное, как облачный покров мощной атмосферы, окружающей океан жидкого молекулярного водорода.

Периоды обращения планет-гигантов вокруг Солнца весьма велики: от 12 лет у Юпитера до 164 лет у Нептуна. Однако вокруг своей оси они вращаются очень быстро, быстрее любой из планет земной группы: средний период вращения видимых поверхностей Юпитера и Сатурна составляет около 10 часов, а Урана и Нептуна – около 17 часов. Все планеты-гиганты окружены системами колец и множеством спутников, большая часть из которых была открыта в последние десятилетия с помощью космических аппаратов и наземных телескопов. У Юпитера в настоящее время насчитывается 80 спутников; самый крупный – Ганимед, диаметром 5268 км. У Сатурна 83 спутника; крупнейший – Титан, 5150 км. Уран имеет 27 спутников; крупнейший – Титания, 1580 км. У Нептуна 14 спутников во главе с Тритоном (2700 км).

Среди карликовых планет лучше других изучен Плутон. Он не похож ни на одну из больших планет. Его диаметр всего около 2400 км – меньше, чем у Луны. Это очень холодная планета: она находится в 40 раз дальше от Солнца, чем Земля. У Плутона есть крупный спутник, диаметром лишь вдвое меньше самой планеты, – Харон, расположенный на расстоянии менее 20 тыс. км от Плутона. Эту пару нередко называют двойной планетой. Вокруг них обращаются четыре небольших спутника. Для Плутона, Харона и подобных им планет-карликов пояса Койпера, вероятно, характерна толстая ледяная кора, хотя ее состав, по-видимому, различен. По своим параметрам, внутреннему строению и составу Плутон больше похож на ледяные спутники планет-гигантов, чем на планеты земной группы.

Астрономов интересуют причины, по которым планеты земной группы так сильно отличаются от планет-гигантов. Главная причина очевидна – различное расстояние от Солнца. И дело здесь не только и не столько в количестве тепла и света, получаемом этими планетами: просто на заре эволюции планетной системы условия формирования планет вблизи Солнца и на большом расстоянии от него были различными. Существенно различались и плотность вещества, из которого формировались планеты, и его химический состав. Вопрос о том, почему существовали такие различия и как происходило образование планет, пытается решить один из разделов астрономии – космогония. Материалом для размышлений космогонистов служат детальные данные о Солнечной системе и других планетных системах, как существующих, так и формирующихся.

Луна

Луна – естественный спутник Земли и самый яркий объект на ночном небе. Формально Луна – не планета, но она существенно крупнее всех планет-карликов, большинства спутников планет и не очень уступает в размере Меркурию. На Луне нет привычной для нас атмосферы, водоемов и живых организмов. Сила тяжести здесь в 6 раз меньше, чем на Земле, день и ночь с перепадами температур до 300 градусов длятся по две недели. Тем не менее Луна все больше привлекает землян возможностью использовать ее уникальные условия

и ресурсы. Поэтому она – наша первая ступень в знакомстве с объектами Солнечной системы.

Луна, как ближайшее к нам небесное тело, станет первым объектом для внеземного промышленного производства. Создание лунной базы, а затем и сети баз планируется уже в ближайшие десятилетия. Из лунных пород можно извлекать кислород, водород, железо, алюминий, титан, кремний и другие полезные элементы. Лунный грунт является прекрасным сырьем для получения различных строительных материалов, а также, возможно, для добычи изотопа гелий-3, который

способен стать для электростанций Земли безопасным и экологически чистым ядерным горючим. Луна будет использоваться для уникальных научных исследований и наблюдений. Изучая лунную поверхность, ученые могут «заглянуть» в древний период истории нашей собственной планеты, поскольку особенности развития Луны обеспечили сохранность рельефа поверхности в течение миллиардов лет. Кроме того, Луна послужит экспериментальной базой для отработки космических технологий, а в дальнейшем может использоваться и как ключевой транспортный узел для межпланетных сообщений.

Луна хорошо исследована как с помощью наземных телескопов, так и благодаря полетам более 80 пилотируемых и беспилотных космических аппаратов. Автоматические станции «Луна-3» (1959 г.) и «Зонд-3» (1965 г.) впервые сфотографировали восточную и западную части невидимого с Земли полушария Луны. Искусственные спутники Луны исследовали ее гравитационное поле и рельеф. Самоходные аппараты «Луноход-1» и «Луноход-2» передали на Землю множество снимков и информацию о физико-механических свойствах грунта. Двенадцать американских астронавтов с помощью кораблей «Аполлон» в 1969–1972 гг. побывали в 6 различных местах на видимой стороне Луны, провели исследования поверхности и установили научную аппаратуру. Астронавты привезли на Землю около 400 кг лунных пород. Зонды «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» в автоматическом режиме выполнили бурение и доставили лунный грунт на Землю. Космические аппараты нового поколения «Клементина» (1994 г.), «Лунар Проспектор» (1998–1999 гг.), «Смарт-1» (2003–2006 гг.), «Кагуя» (Япония, 2007), «Чанъэ-1, 2» (Китай, 2007, 2010), «Чандраян 1, 2» (Индия, 2008, 2019), «LRO» (США, 2009), «GRAIL» (США, 2011), «LADEE» (США, 2013), «Чанъэ-3, 4, 5», (Китай, 2013, 2019, 2020) и др. получили более точные сведения



Рис. 1.4. Видимая сторона Луны в фазе, близкой к полнолунию. Снимок получен с помощью наземного телескопа

о рельефе и гравитационном поле Луны, а также обнаружили на поверхности залежи водородосодержащих материалов, возможно – водяного льда. В частности, повышенная концентрация этих материалов обнаружена в постоянно затененных понижениях около полюсов.

Лазерные высотомеры спутников «Кагуя» и LRO с высокой точностью определяют рельеф лунной поверхности. Выяснилось, что лунное Море Москвы – уникальное место: толщина лунной коры там минимальна, поэтому магма неоднократно проникала на поверхность и заполняла все дно этого образования. Разрешение изображений LRO достигает 50 см, поэтому удалось обнаружить на поверхности Луны почти все спускаемые аппараты. LRO обнаружил зоны вечной мерзлоты, куда не попадают солнечные лучи и где лед в лунном грунте должен существовать вечно, а позже обнаружил лед в грунте и в светлых частях кратеров. Ключевую роль в этом открытии сыграл российский детектор нейтронов LEND (ИКИ РАН). Зонд LCROSS обнаружил следы воды в кратере Кабео в южной полярной области Луны. Спектрометр NASA «Moon Mineralogy Mapper», установленный на индийском спутнике «Чандраян 1», показал наличие минералов: ортопироксена, оливина и шпинели, – богатых магнием.

Первый китайский луноход «Юйту» на борту «Чанъэ-3» прилунился в Море Дождей 14 декабря 2013 года. В 2019 г. «Чанъэ-4» с луноходом «Юйту-2» сел на обратной стороне Луны в кратере фон Карман, в гигантском бассейне Южный полюс – Эйткен. В 2020 г. «Чанъэ-5» сел в районе Горы Рюмкер в северной части Океана Бурь, собрал грунт и доставил его на Землю.

Двигается Луна под воздействием тяготения в основном двух небесных тел – Земли и Солнца. Любопытно, что к Солнцу Луна притягивается вдвое сильнее, чем к Земле, поэтому траектория Луны всегда обращена своей вогнутостью к Солнцу. Но поскольку и Земля движется вокруг Солнца по близкой траектории, она контролирует движение Луны и удерживает ее на среднем расстоянии 384 400 км от себя. В апогее это расстояние увеличивается до 405 500 км, в перигее уменьшается до 363 300 км. Период обращения Луны вокруг Земли по отношению к далеким звездам составляет около 27,3 суток (сидерический месяц), но поскольку вместе с Землей Луна обращается вокруг Солнца, ее положение относительно линии Солнце–Земля повторяется через несколько больший промежуток времени – около 29,5 суток (синодический месяц). За этот период проходит полная смена лунных фаз:

от новолуния к первой четверти, затем к полнолуннию, к последней четверти и вновь к новолунию (рис. 1.6). Вращение Луны вокруг оси происходит с постоянной угловой скоростью в том же направлении, в котором она обращается вокруг Земли, и с тем же периодом 27,3 суток. Именно поэтому с Земли мы видим только одно полушарие Луны; другое всегда скрыто от наших глаз. Это невидимое с Земли полушарие называют обратной стороной Луны.



Рис. 1.5. Снимки, полученные в разное время одним и тем же телескопом, ясно показывают различную удаленность от нас Луны в апогее (справа) и перигее

Сочетание равномерного вращения Луны вокруг оси с ее неравномерным движением по эллиптической орбите приводит к тому, что наблюдатель с Земли может «заглядывать» за границу видимого полушария с западного и восточного краев Луны на 8° от среднего положения. Это явление называется оптической либрацией по долготе. Существует также оптическая либрация по широте, возникающая из-за того, что ось вращения Луны немного наклонена к плоскости ее орбиты. Поэтому в течение месяца наблюдатель на Земле может заглянуть за каждый полюс на 7° .

Лунная ось вращения составляет почти прямой угол ($88,5^\circ$) с плоскостью эклиптики, т. е. с плоскостью земной орбиты, так что полярные дни и ночи на ней существуют только в непосредственной близости от полюсов. У Земли этот угол равен $66,5^\circ$, поэтому на нашей планете полярные дни и ночи охватывают большие пространства, и сезонные различия в освещенности и температуре весьма заметны. А на Луне сезонов нет.

Но орбитальное движение Луны происходит не в плоскости орбиты Земли, а под углом: лунная орбита наклонена к эклиптике примерно на 5° и испытывает небольшие колебания. Поэтому в пространстве Луна располагается то с одной, то с другой стороны от эклиптики, пересекая ее дважды за один период обращения вокруг Земли. Это и служит причиной того, что затмения Солнца лунным диском (солнечные затмения) или попадания Луны в тень, отбрасываемую Землей (лунные затмения), происходят далеко не каждый месяц.

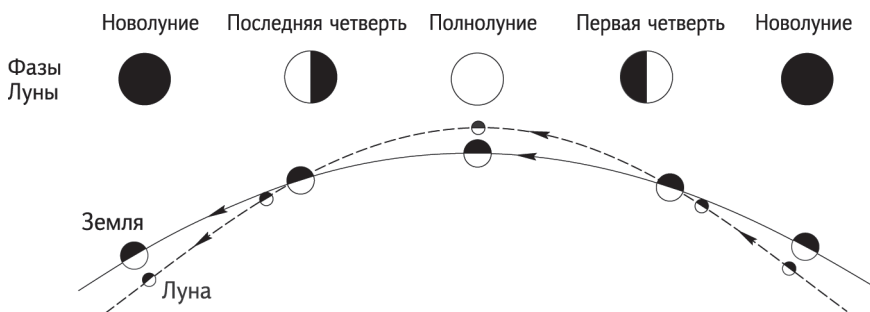


Рис. 1.6. Пять последовательных положений Земли и Луны на орбите (без соблюдения масштаба) и соответствующие им фазы Луны

Конфигурация физической поверхности Луны очень близка к правильной сфере со средним радиусом 1737,4 км. Центр этой фигуры сдвинут относительно центра масс Луны примерно на 2 км в сторону Земли. Площадь поверхности лунного шара – около 38 млн км²; это всего лишь 7,4 % площади земной поверхности, или около четверти площади земных материков. Объем лунного шара равен 22 млрд км³ (около 2 % объема Земли). Соотношение масс Луны и Земли составляет 1:81,3. Если принять массу Земли равной $5,97 \cdot 10^{24}$ кг, то масса Луны составит $7,35 \cdot 10^{22}$ кг. Легко подсчитать среднюю плотность Луны: она составляет 3,34 г/см³, что значительно меньше средней плотности Земли (5,52 г/см³). Сила тяжести на Луне в 6 раз меньше, чем на Земле, поэтому человек, находясь на ее поверхности, будет ощущать себя в 6 раз легче. Правда,

при этом следует помнить, что на поверхности Луны человек должен быть одет в скафандр, масса которого обычно превосходит массу человека. Поэтому вес космонавта на Луне от силы в 2–2,5 раза меньше, чем на Земле без скафандра.



Рис. 1.7. Фотографии Луны в различных фазах: 1 – молодая Луна (лунный серп, полумесяц: своей выпуклой стороной он всегда обращен в сторону Солнца); 2 – первая четверть; 3 – растущая Луна; 4 – полнолуние; 5 – убывающая Луна; 6 – последняя четверть

Поскольку масса Луны относительно мала, плотной атмосферы у нее почти нет. В ее слабом поле тяготения газы практически свободно рассеиваются в окружающем космическом пространстве, поэтому поверхность Луны весьма интенсивно освещается не поглощенными атмосферой прямыми солнечными лучами. Тени от неровностей рельефа на Луне очень черны, поскольку нет рассеянного в воздухе света. Солнце с лунной поверхности выглядит ярче, чем с Земли, а небо даже днем совершенно темное.

Разреженная газовая оболочка Луны, состоящая из водорода, гелия, неона и аргона, является в десять триллионов раз менее плотной, чем наша земная атмосфера, но она в тысячу раз плотнее межпланетного вакуума. Поскольку Луна не защищена плотной газовой оболочкой, на ее поверхности в течение суток происходит резкое изменение температуры. Солнечное излучение отлично поглощается лунной поверхностью. В среднем освещенное полушарие Луны рассеивает около $\frac{1}{10}$ падающего излучения, остальные $\frac{9}{10}$ солнечной энергии поглощаются породами поверхностного слоя и превращаются в тепло. Но теплопроводность лунного вещества весьма низка, поэтому существенно разогревается только самый верхний слой толщиной около 1 м. Ниже температура пород остается почти постоянной. В летний полдень близ экватора поверхность разогревается до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$, в отдельных местах и выше; а ночью температура падает до $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Быстрое остывание поверхности наблюдается и во время лунных затмений.

На Луне выделяют области двух типов: светлые – материковые, занимающие 83 % всей поверхности (включая обратную сторону), и темные, названные морями. Такое деление возникло еще в середине XVII в., когда предполагалось, что на Луне действительно имеется вода. Поскольку названия морей в течение нескольких столетий использовались на картах Луны, их не стали менять. Любопытно, что в названиях морей, предложенных итальянским астрономом Риччоли в 1651 г., отразилось существовавшее в то время мнение, будто фазы Луны определяют погоду на Земле. Поэтому в восточной части видимого полушария (освещенной, когда Луна в фазе первой четверти) моря носят «штилевые» названия: Море Спокойствия, Море Нектара, Море Ясности, Море Изобилия, а в западной части лунного диска (освещенной в фазе последней

четверти) названия «штормовые»: Океан Бурь, Море Дождей, Море Влажности, Море Облаков.

По минералогическому составу и содержанию отдельных химических элементов лунные породы на темных участках поверхности (морях) очень близки к земным породам типа базальтов, а на светлых (материках) – к анортозитам. Для анортозитов характерно более высокое, чем для базальтов, содержание окислов алюминия и кальция и меньшее количество окислов железа и титана. Лунные морские базальты отличаются от земных базальтов более высоким содержанием FeO, а иногда и TiO₂. Другие основные окислы – SiO₂, MgO, CaO и Al₂O₃ – входят в состав лунных пород примерно в тех же количествах, что и в состав земных пород.

Представление о внутреннем строении Луны дают сейсмологические исследования, проводимые непосредственно на лунной поверхности. Во время экспедиций «Аполлонов» на поверхности Луны были установлены сейсмографы, которые показали, что естественная сейсмическая активность ее относительно невелика. Принято выделять два типа лунотрясений. Одни из них, наблюдаемые во время прохождения Луной апогея и перигея, связаны с процессами в глубоких недрах Луны, на глубине 600–800 км. Другие колебания вызваны подвижками в лунной коре, и возникают они реже: за три года непрерывных измерений было зарегистрировано лишь 11 лунотрясений этого типа.

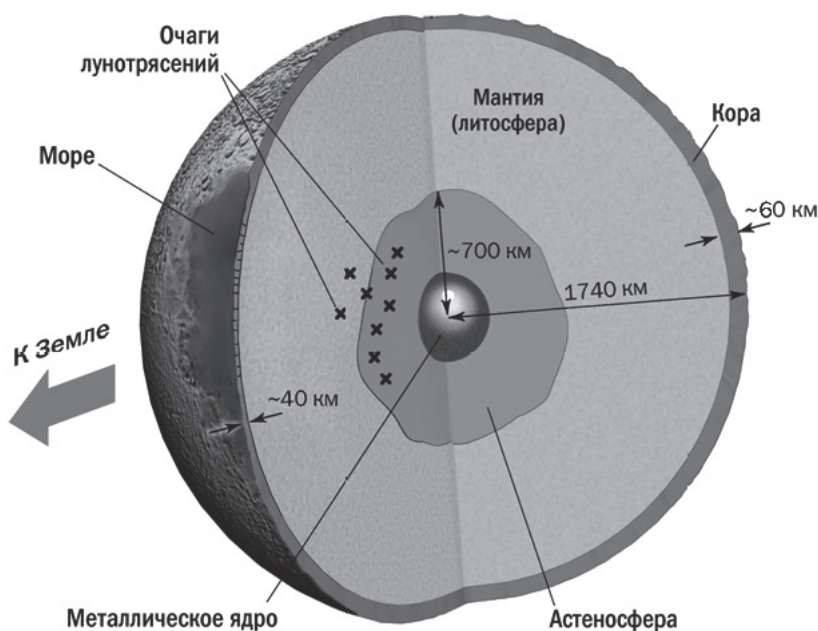


Рис. 1.8. Схема внутреннего строения Луны

Наряду с наблюдениями естественных лунотрясений ученые вызвали и несколько искусственных. Для этого на поверхность Луны были сброшены последние ступени ракет-носителей и лунные отсеки кораблей «Аполлон» (разумеет-



Рис. 1.9. Изображение многокольцевого бассейна Море Восточное на Луне, полученное зондом «Лунар Орбитер-4»

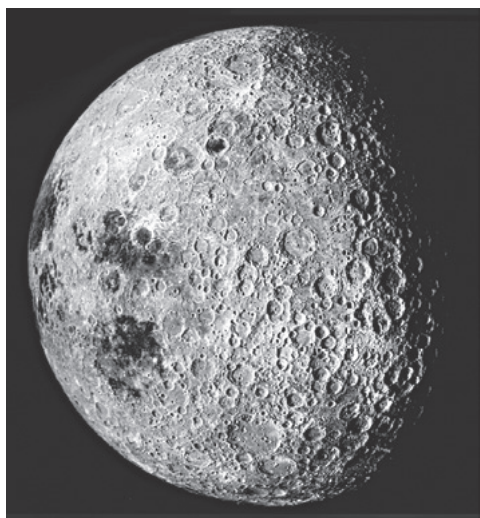


Рис. 1.10. Обратная сторона Луны, сфотографированная с корабля «Аполлон-16»

нар Проспектор», у Луны имеется железное ядро радиусом 300–400 км.

В вопросе о происхождении Луны пока нет полной ясности. Особенности химического состава лунных пород позволяют предположить, что Луна и Зем-

ся, после взлета астронавтов с Луны, когда эти отсеки стали не нужны). Наблюдая с помощью оставленных на Луне приборов за распространением сейсмических волн, специалисты уточнили модель изменения скорости звука в лунных недрах, отражающую распределение пород разной плотности.

Условно лунные недра разделяют на пять зон. Самая верхняя из них отождествляется с лунной корой, образованной породами в основном анортозитового состава. С помощью двух небольших спутников GRAIL (NASA) удалось в тысячу раз повысить точность гравитационных карт Луны, выявить множество крупных ранее неизвестных кольцевых структур на поверхности, а также структуры и лавовые трубы под поверхностью. Средняя толщина лунной коры (50 км) оказалась меньше, чем предполагали до этих исследований. Вторая зона (верхняя мантия) имеет толщину около 250 км, третья зона (средняя мантия) – около 500 км; в ней лежат очаги глубокофокусных лунотрясений. Предполагают, что морские базальты возникли вследствие частичного плавления вещества именно в средней мантии. Четвертая зона – нижняя мантия, вещество которой может находиться в расплавленном состоянии. Таким образом, на глубине около 800 км кончается твердая оболочка Луны – литосфера; ниже располагается астеносфера. Температура в верхней части этого слоя может достигать до 1500 °С. На глубине 1400–1500 км было обнаружено резкое уменьшение скорости продольных волн. Эта граница отмечает начало пятой зоны – лунного ядра. По данным зонда «Лу-

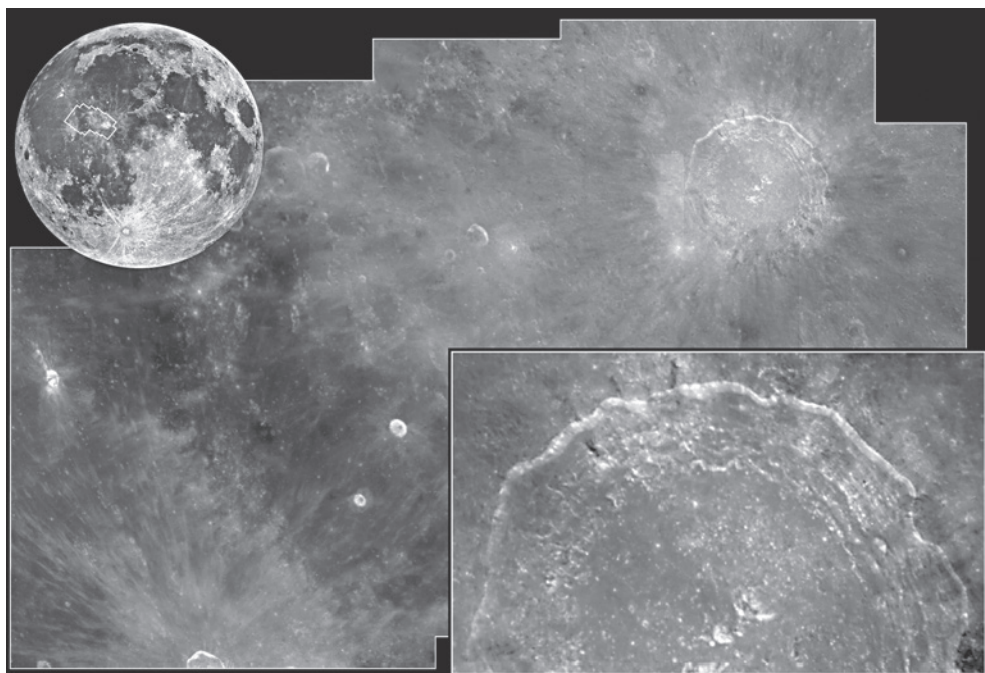


Рис. 1.11. Район кратера Коперник. Снимок космического телескопа «Хаббл»

ля образовались в одной и той же области Солнечной системы. Однако разница в их составе и внутреннем строении заставляет думать, что оба эти тела не были в прошлом единым целым. В настоящее время одна из наиболее популярных теорий происхождения Луны – теория «косого удара»: предполагается, что в период формирования планет о Землю ударилось тело размером с Марс, в результате чего значительная часть вещества коры и верхней мантии Земли была вырвана. Часть рассеянного при этом вещества сначала образовала кольцо обломков вокруг Земли, а затем слипание этих обломков привело к формированию нашего естественного спутника. Впрочем, российскими учеными во главе с акад. Э. М. Галимовым была разработана альтернативная гипотеза одновременного образования Луны и Земли из крупномасштабного газово-пылевого сгущения.

На самой ранней стадии существования Луны, в период от 4,3 до 4,6 млрд лет назад, произошла глобальная магматическая дифференциация (разделение) лунного шара, в результате которой сформировались лунная кора и верхняя мантия. Этот процесс сопровождался интенсивной метеоритной бомбардировкой и падением фрагментов, оставшихся после основного этапа формирования Луны.

Большинство крупных кратеров и огромные впадины (многокольцевые бассейны) появились на поверхности лунного шара в период сильной бомбардировки поверхности. Около 3,5 млрд лет назад в результате внутреннего разогрева из недр Луны излились на поверхность базальтовые лавы, заполнившие низины и круглые впадины. Так образовались лунные моря. На обратной

стороне из-за более толстой коры излияний было значительно меньше. На видимом полушарии моря занимают 30 % поверхности, а на обратном – лишь 3 %. Таким образом, эволюция лунной поверхности в основном завершилась около 3 млрд лет назад. Метеоритная бомбардировка продолжалась, но уже с меньшей интенсивностью. Основную массу бомбардирующих тел в настоящее время составляют микрометеориты. В результате длительной переработки поверхности образовался верхний рыхлый слой пород Луны – реголит, толщиной в несколько метров.

Изучая движение искусственных спутников Луны, удалось обнаружить положительные аномалии гравитационного поля – масконы (от англ. *mass concentration*); они выявлены в ряде мест, в том числе и под морями, окруженными кольцевым валом. По-видимому, граница коры и мантии в этих местах наиболее близко поднимается к поверхности. А поскольку вещество мантии плотнее коры, это вызывает локальное увеличение силы тяжести над лунной поверхностью. В отдельных районах Луны выявлены и отрицательные аномалии гравитационного поля.

У Луны практически отсутствует глобальное магнитное поле дипольного типа, подобное земному, поэтому компас с магнитной стрелкой был бы на Луне бесполезен. Однако на поверхности Луны существуют локальные магнитные поля, индукция которых в тысячи раз слабее, чем у земного поля. Окрестности Моря Дождей на видимой стороне и центральная часть самого крупного бассейна «Южный полюс – Эйткен» отличаются повышенной намагниченностью пород. По-видимому, это остаточная намагниченность, которую породы когда-то приобрели во внешнем, значительно более сильном магнитном поле, обладавшем индукцией $\sim 10^{-4}$ Тл (т. е. 1 Гс). Имела ли Луна поле, подобное земному, когда ее недра были расплавлены, или она приобрела намагниченность в каком-то районе Солнечной системы и позднее была захвачена Землей? Ответ на этот вопрос смогут дать палеомагнитные данные, зашифрованные в лунных породах.

Преобладающим типом образований на лунной поверхности являются кратеры, возникшие от ударов метеоритов и астероидов. Их поперечники самые разные – от десятков сантиметров до сотен километров. Различаются кратеры не только размерами, но и состоянием кольцевого вала: сравнительно молодые имеют четко выраженный вал, а у более древних он заметно разрушен. Большинство молодых кратеров на внутренних стенках вала имеют террасы, а на дне кратера, в области его центра, встречаются горки. На дне некоторых кратеров можно увидеть также трещины или цепочки из мелких кратеров. Дно ряда кратеров залито лавой.

У самых молодых кратеров поперечником в десятки километров при отвесно падающих лучах Солнца (в полнолуние) можно видеть радиально расходящиеся светлые полосы, простирающиеся на сотни, а иногда и тысячи километров. Многочисленные светлые полосы расходятся от кратеров Тихо, Коперник и некоторых других. Есть на Луне и гигантские цепочки кратеров, протянувшиеся к северо-западу от Моря Восточного на тысячи километров. Долины шириной в несколько десятков километров и длиной в сотни километров встречаются на окраинах морей. Более узкие и обрывистые ложбины – борозды встречаются и на морях, и на материках. Горные массивы чаще всего окаймляют круговые моря. Польский астроном Ян Гевелий еще в 1647 г. пред-

ложил называть их по именам земных гор: Апеннины, Алтай, Кавказ, Карпаты. Самые высокие лунные горы – Апеннины достигают 6 км. Кратеры названы в честь астрономов, философов и других ученых. Все новые названия объектов на Луне, как и на других телах Солнечной системы, утверждаются Международным астрономическим союзом.

Луна – единственный космический объект, поверхность которого можно детально изучать с Земли в телескоп, причем не только в профессиональный, но и в любительский. Даже хороший бинокль дает возможность познакомиться с селенографией, т. е. с «географией» Луны. А телескоп с увеличением в 150–300 раз позволяет детально исследовать лунную поверхность и получать огромное наслаждение от этих «виртуальных экспедиций». Для любителей астрономии существует немало интересных задач, связанных с наблюдениями Луны: это и тренировка глаза наблюдателя, и поиск возможных изменений, так называемых «временных явлений» на Луне, и отработка методов астрофотографии, и изучение оптических свойств телескопа. Лунная поверхность, особенно в районе терминатора (границы освещенной и теневой зон), высококонтрастна и служит прекрасной «таблицей» для настройки оптической системы телескопа. Одним словом, Луну очень интересно и полезно наблюдать.

Меркурий

Ближайшая к Солнцу планета – Меркурий – имеет загадочное прошлое. Не исключено, что в древности он был не самостоятельной планетой, а спутником Венеры. Эта ближайшая к Солнцу планета названа в честь древнеримского бога Меркурия, соответствовавшего греческому Гермесу, который считался глашатаем Зевса, вестником богов, а также покровителем торговли и плутовства. Древние египтяне называли эту планету Собкоу, в Скандинавии и Германии она была известна как Один, в Японии – Суйсей, в Индии – Будх.

Меркурий находится на среднем расстоянии 58 млн км, или 0,39 а. е. от Солнца, яркий свет которого мешает наблюдать эту планету с Земли. Двигаясь по сильно вытянутой орбите, он в перигелии приближается к Солнцу на расстояние 0,31 а. е., а в максимальном удалении – в афелии – оказывается на расстоянии 0,47 а. е., совершая полный оборот за 88 земных суток. Долгое время считалось, что Меркурий вращается вокруг своей оси синхронно с движением вокруг Солнца и поэтому обращен к нему всегда одним полушарием, как Луна к Земле. Однако в 1965 г. с помощью радиолокации было установлено, что период вращения этой планеты составляет только 58,6 суток, то есть за $\frac{2}{3}$ своего года он завершает полный оборот вокруг своей оси относительно далеких звезд. Сложение осевого и орбитального движений Меркурия приводит к тому, что солнечные сутки (промежуток времени между верхними или нижними кульминациями Солнца на небе

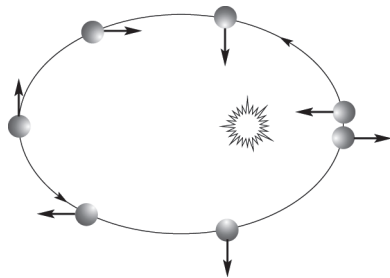


Рис. 1.12. Схема орбитального и суточного движений Меркурия. Стрелка «закреплена» на поверхности планеты и помогает следить за ее вращением. За один орбитальный период Меркурий совершает полтора оборота вокруг оси



Рис. 1.13. Фотомозаика снимков Меркурия, полученных зондом «Маринер-10»

Меркурия) продолжают на этой планете 176 земных суток, т. е. ровно два меркурианских года. Это уникальный случай среди планет: за сутки проходят два года!

Движение Меркурия любопытным образом связано с движением Земли: в течение одного земного года Меркурий успевает совершить почти точно 4 оборота вокруг Солнца и 6 раз повернуться вокруг своей оси. В течение земного года с точки зрения земного наблюдателя Меркурий успевает сделать почти точно 3 оборота вокруг Солнца и 5 раз повернуться вокруг своей оси. По-видимому, это совпадение и стало причиной того, что астрономы первой половины XX в. были уверены, что Меркурий всегда обращен к Солнцу одним и тем же полушарием. Дело в том, что наблюдать Меркурий в средних широтах можно лишь в течение одного сравнительно короткого периода в году – в летние месяцы, когда после захода Солнца планета видна сравнительно высоко над горизонтом. Составитель первых карт Меркурия знаменитый итальянский астроном Джованни Скиапарелли провел первые наблюдения этой планеты в 1881 г. и повторил их ровно через год. Разумеется, никаких изменений во внешнем виде Меркурия он не заметил и решил, что планета всегда ориентирована к Солнцу одной стороной.

В конце XIX в. астрономы пытались зарисовать темные и светлые детали, наблюдаемые на поверхности Меркурия. Наиболее известны работы Скиапарелли (1881–1889) и американского астронома Персиваля Ловелла (1896–1897). Интересно, что астроном Т. Дж. Си в 1901 г. даже объявил о том, что он видел кратеры на Меркурии. Мало кто поверил в это, однако впоследствии 625-километровый кратер (Бетховен) оказался в месте, отмеченном Си. Французский астроном Эжен Антониади составил в 1934 г. карту «видимого полушария» Меркурия, поскольку тогда считалось, что всегда освещено лишь одно его полушарие. Отдельным деталям на этой карте Антониади дал названия, которые частично используются и на современных картах.

Составить действительно надежные карты планеты и увидеть мелкие детали рельефа поверхности впервые удалось благодаря космическому зон-

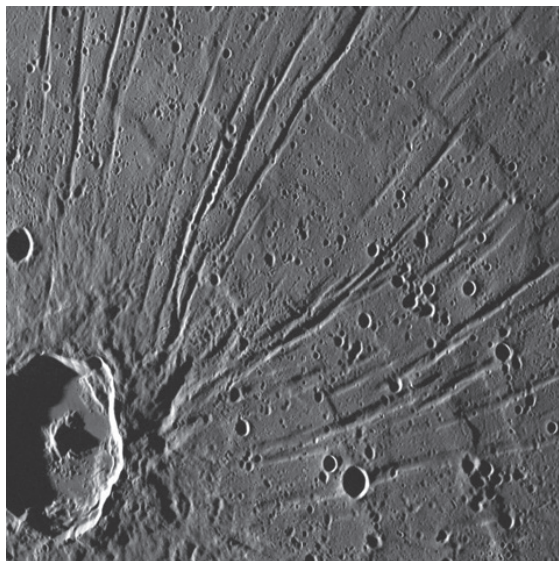


Рис. 1.14. Кратер Аполлдор и борозды Пантеон. Эту структуру обнаружили на снимках, сделанных зондом «Мессенджер» при его первом пролете мимо Меркурия 14 января 2008 г. Название она получила за сходство с ребристым куполом римского Пантеона. 8 апреля того же года это название утвердил Международный астрономический союз. Среди любителей астрономии кратер и борозды имеют неофициальное название «Паук» (англ. *Spider*), данное объекту научной группой «Мессенджера». Борозды Пантеон стали первыми (и до сих пор остаются единственными) из известных на Меркурии, хотя подобные давно были известны на Венере, Марсе и многих спутниках планет.
Фото: MESSENGER, NASA

ду «Маринер-10», запущенному в 1973 г. Он трижды сближался с Меркурием и передавал телевизионные изображения освещенных участков его поверхности. В общей сложности было снято 45 % поверхности планеты, в основном – западное полушарие. Были также уточнены радиус планеты (2440 км) и ее масса (5,5 % массы Земли). Самые лучшие снимки содержат детали размером до 100 м. На некоторых фотографиях хорошо видны следы излияния лавы и уступы, названные эскарпами. По-видимому, интенсивная метеоритная бомбардировка поверхности Меркурия в прошлом иногда приводила к таким излияниям. Появление эскарпов связывают со сжатием коры Меркурия.

Ускорение свободного падения на Меркурии составляет $3,68 \text{ м/с}^2$. Космонавт там будет весить почти втрое меньше, чем на Земле (без скафандра). Средняя плотность у Меркурия почти такая же, как у Земли, следовательно, и у Меркурия должно быть железное ядро, занимающее, по расчетам, примерно половину объема планеты. Над ядром должна быть мантия, а над ней – силикатная оболочка.

Меркурий получает в 6 раз больше солнечного света на единицу площади, чем Земля. При этом большая часть солнечной энергии поглощается, поскольку поверхность у Меркурия темная, отражающая лишь 12–18 % падающего света. В перигелии температура освещенной поверхности достигает $430 \text{ }^\circ\text{C}$, а в афелии опускается до $290 \text{ }^\circ\text{C}$. На ночной стороне температура поверхности снижается до $-170 \text{ }^\circ\text{C}$. Но эти сильные перепады температуры не проникают глубоко: поверхностный слой планеты (реголит) сильно измельчен и служит прекрасной теплоизоляцией, так что на глубине нескольких десятков сантиметров от поверхности температура всегда держится постоянной – около $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сфотографированная часть поверхности Меркурия удивительно похожа на лунную: множество кратеров различного размера покрывают эту планету, однако в некоторых областях, названных равнинами, плотность кратеров существенно меньше, как и на поверхности лунных морей.