



Планеты-гиганты, их кольца и планеты-спутники

Гигантские планеты — какие они?

Наша Солнечная система, если иметь в виду ее вещество, состоит из Солнца и четырех планет-гигантов, а еще проще — из Солнца и Юпитера, поскольку масса Юпитера больше, чем всех прочих околосолнечных объектов — планет, комет, астероидов — вместе взятых. Фактически мы живем в двойной системе Солнце—Юпитер, а вся остальная «мелочь» подчиняется их гравитации.

Сатурн вчетверо меньше Юпитера по массе, но по составу похож на него: он тоже в основном состоит из легких элементов — водорода и гелия в отношении 9:1 по количеству атомов. Уран и Нептун еще менее массивны и по составу богаче более тяжелыми элементами — углеродом, кислородом, азотом. Поэтому группу из четырех гигантов обычно делят пополам, на две подгруппы: Юпитер и Сатурн называют газовыми гигантами, а Уран и Нептун — ледяными гигантами. Дело в том, что Уран и Нептун обладают не очень толстой атмосферой, а большая часть их объема — это ледяная мантия, т. е. довольно твердое вещество, а у Юпитера и Сатурна почти весь объем занят газообразной и жидкой «атмосферой». При этом все гиганты имеют железно-каменные ядра, превышающие по массе нашу Землю.

На первый взгляд, планеты-гиганты примитивны, а маленькие планеты земного типа намного интереснее. Но, может быть, это просто потому, что мы пока плохо знаем природу этих четырех гигантов. Например, к двум ледяным гигантам — Урану и Нептуну — за всю историю астрономии приближался лишь зонд «Вояджер-2» (NASA), да и то пролетел, не останавливаясь, мимо них: в 1986 г. — мимо Урана и в 1989 г. — мимо Нептуна. Много ли он мог увидеть и измерить? Можно сказать, что к исследованию ледяных гигантов мы еще настоящему не приступали.

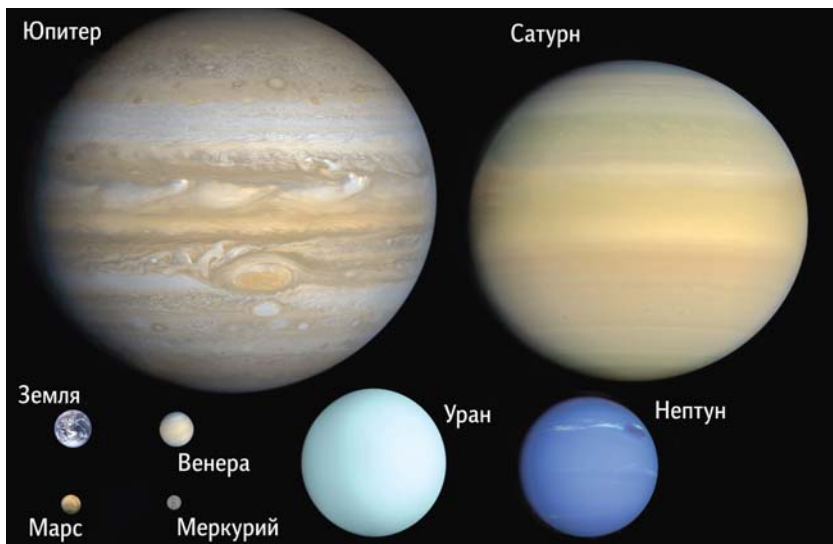


Рис. 6.1. Относительные размеры планет Солнечной системы.

Газовые гиганты изучены намного детальнее, поскольку кроме пролетных аппаратов («Пионер-10 и 11», «Вояджер-1 и 2», «Улисс», «Кассини», «Новые горизонты», NASA и ESA) рядом с ними длительно работали искусственные спутники: «Галилео» (NASA, 1995–2003) и «Джуно» (NASA, с 2016 г.) исследовали Юпитер, а «Кассини» (NASA и ESA, 2004–2017) изучал Сатурн.

Наиболее глубоко был исследован Юпитер, причем в прямом смысле: в его атмосферу с борта «Галилео» был сброшен зонд, который влетел туда со скоростью 48 км/с, раскрыл парашют и за 1 час опустился на 156 км ниже верхней кромки облаков, где при внешнем давлении 23 атм и температуре 153°C прекратил передавать данные — по-видимому, из-за перегрева. На траектории спуска он измерил многие параметры атмосферы, включая даже ее изотопный состав. Это заметно обогатило не только планетологию, но и космологию. Ведь гигантские планеты не отпускают от себя вещество, они навечно сохраняют то, из чего родились; особенно это касается Юпитера. У его облачной поверхности вторая космическая скорость составляет 60 км/с: ясно, что ни одной молекуле оттуда никогда не уйти. Поэтому мы думаем, что изотопный состав Юпитера, особенно состав водорода, характерен для самых первых этапов жизни Солнечной системы, а может быть, и Вселенной. И это очень важно: соотношение тяжелого и легкого изотопов водорода показывает, как в первые ми-

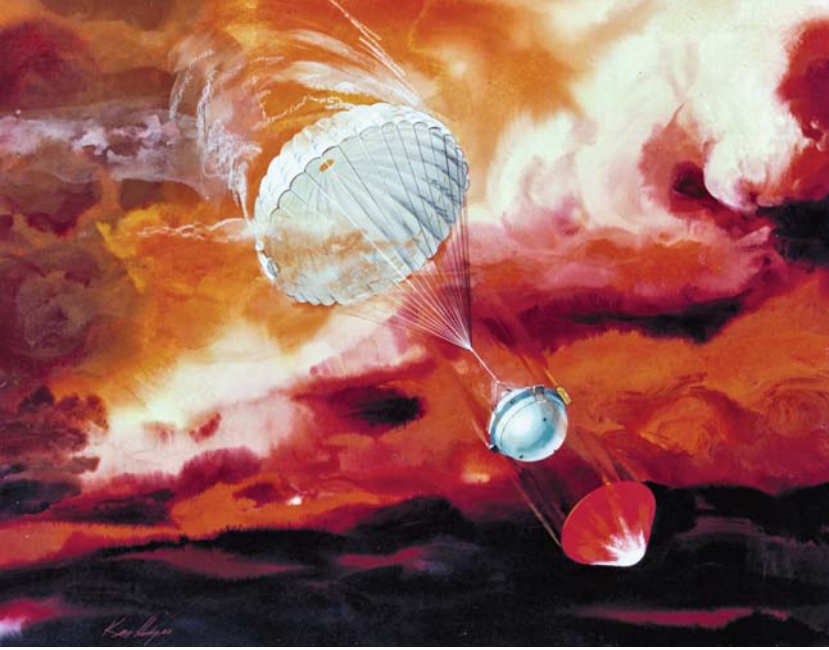


Рис. 6.2. Спускаемый аппарат с зонда «Галилео» в атмосфере Юпитера. Рисунок: Ken Hodges (NASA)

нуты эволюции нашей Вселенной протекал синтез химических элементов, какие физические условия тогда были.

Юпитер быстро вращается — с периодом около 10 часов, а поскольку средняя плотность планеты невелика ($1,3 \text{ г/см}^3$), центробежная сила заметно деформировала ее тело. Невооруженным глазом видно, что планета сжата вдоль полярной оси. Степень сжатия Юпитера, т. е. относительная разница между его экваториальным и полярным радиусами, составляет $(R_{\text{экв}} - R_{\text{пол}})/R_{\text{экв}} = 0,065$. Именно средняя плотность планеты ($\rho \propto M/R^3$) и суточный период вращения (T) определяют форму ее тела. Как известно, планета — это космическое тело в состоянии гидростатического равновесия. На полюсе действует только сила тяготения (GM/R^2), а на экваторе ей противодействует центробежная сила ($V^2/R = 4\pi^2 R^2/RT^2$). Их отношением и определяется форма планеты, поскольку давление в центре планеты не должно зависеть от направления: экваториальная колонка вещества весит столько же, сколько полярная. Отношение этих сил:

$$\frac{4\pi^2 R/T^2}{GM/R^2} \propto \frac{1}{T^2 M/R^3} \propto \frac{1}{\rho T^2}.$$

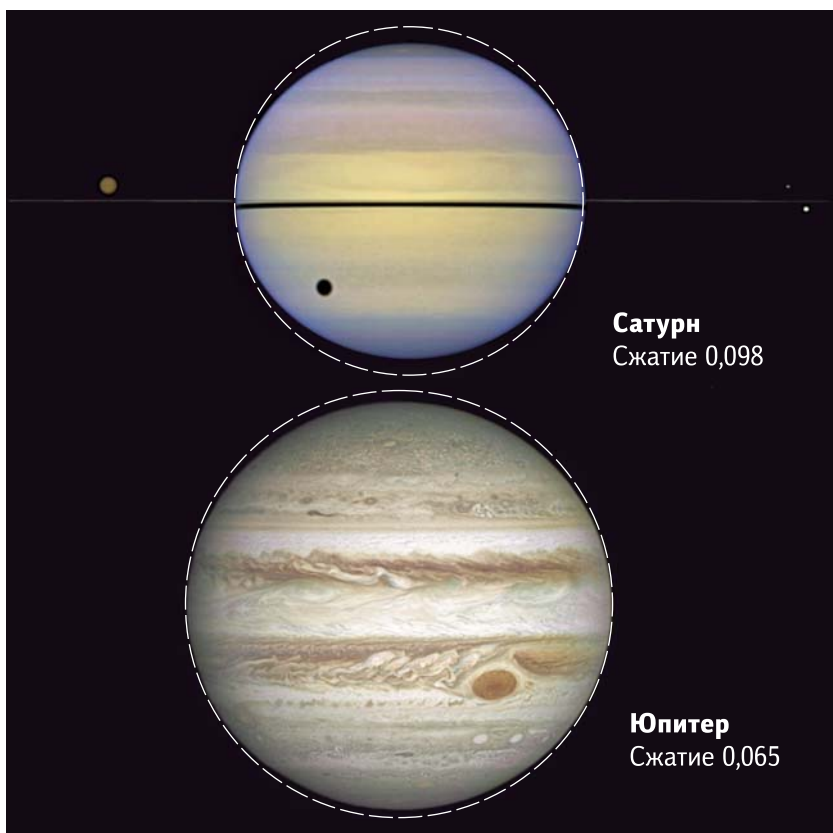


Рис. 6.3. Форма дисков Сатурна и Юпитера в сравнении с правильными окружностями.

Итак, чем меньше плотность и продолжительность суток, тем сильнее сжата планета. Проверим: средняя плотность Сатурна составляет $0,7 \text{ г/см}^3$, период его вращения — 11 час, почти такой же, как у Юпитера, а сжатие — 0,098. Сатурн сжат в полтора раза сильнее Юпитера, и это легко заметить при наблюдении планет в телескоп: сжатие Сатурна бросается в глаза.

Быстрое вращение планет-гигантов определяет не только форму их тела, а значит, и форму их наблюдаемого диска, но и его внешний вид: облачная поверхность планет-гигантов имеет зональную структуру с полосами разного цвета, вытянутыми вдоль экватора. Потoki газа движутся быстро, со скоростями во многие сотни километров в час; их взаимное смещение вызывает сдвиговую неустойчивость и совместно с силой Кориолиса порождает гигантские вихри. Изда-



Рис. 6.4. Вихри в атмосфере Юпитера. Фото зонда «Juno» (NASA). Контраст искусственно усилен.

лека заметны Большое Красное Пятно на Юпитере, Большой Белый Овал на Сатурне, Большое Темное Пятно на Нептуне. Особенно знаменит антициклон Большое Красное Пятно (БКП) на Юпитере. Когда-то БКП было вдвое больше нынешнего, его видели еще современники Галилея в свои слабенькие телескопы. Сегодня БКП побледнело, но все-таки этот вихрь уже почти 400 лет живет в атмосфере Юпитера, поскольку содержит гигантскую массу газа. Его размер больше земного шара. Такая масса газа, единожды закрутившись, не скоро остановится. На нашей планете циклоны живут примерно неделю, а там — столетия.

В любом движении рассеивается энергия, а значит, требуется ее источник. Каждая планета обладает двумя группами источников энергии — внутренними и внешними. Извне на планету льется поток солнечного излучения и падают метеороиды, изнутри ее греют распад радиоактивных элементов и гравитационное сжатие самой планеты (механизм Кельвина—Гельмгольца). Среди внешних источников энергии Солнце вне конкуренции. Хотя мы уже видели, как на Юпитер падают крупные объекты, вызывающие мощные взрывы (комета Шумейкеров—Леви 9), оценки частоты их падения показывают, что средний поток приносимой ими энергии существенно меньше, чем приносит солнечный свет. С другой стороны, роль внутренних источников энергии неоднозначна. У планет земной группы, состоя-

щих из тяжелых тугоплавких элементов, единственным внутренним источником тепла служит радиоактивный распад, но вклад его ничтожен по сравнению с теплом от Солнца.

У планет-гигантов доля тяжелых элементов существенно ниже, зато они массивнее и легче сжимаются, что делает выделение гравитационной энергии их главным источником тепла. А поскольку гиганты удалены от Солнца, внутренний источник становится конкурентом внешнему: порой сама планета греет себя сильнее, чем ее нагревает Солнце. Даже Юпитер, ближайший к Солнцу гигант, излучает (в инфракрасной области спектра) на 60% больше энергии, чем получает от Солнца. А энергия, которую излучает в космос Сатурн, в 2,5 раза больше той, которую планета получает от Солнца.

Гравитационная энергия выделяется как при сжатии планеты в целом, так и при дифференциации ее недр, т. е. при опускании к центру более плотного вещества и вытеснении оттуда более «плавучего». Вероятно, работают оба эффекта. Например, Юпитер в нашу эпоху уменьшается приблизительно на 2 см в год. А сразу после формирования он имел вдвое больший размер, сжимался быстрее и был значительно теплее. В своих окрестностях тогда он играл роль маленького солнца, на что указывают свойства его галилеевых спутников: чем ближе спутник к планете, тем он плотнее и тем меньше содержит летучих элементов. В целом такую же зависимость демонстрируют и сами планеты Солнечной системы по мере удаления от Солнца.

Кроме сжатия планеты как целого, важную роль в гравитационном источнике энергии играет дифференциация недр. Вещество разделяется на плотное и плавающее, в результате чего плотное вещество тонет, выделяя свою потенциальную гравитационную энергию в виде тепла. Вероятно, у планет-гигантов тепло выделяется в первую очередь в результате конденсации и последующего падения капель гелия сквозь всплывающие слои водорода, а также при фазовых переходах самого водорода. Но могут быть явления и поинтереснее: например, кристаллизация углерода — дождь из алмазов (!), правда, выделяющий не очень много энергии, поскольку углерода мало.

Что там внутри?

Внутреннее строение планет-гигантов пока изучается только теоретически. На прямое проникновение в их недра у нас мало шансов, а методы сейсмологии, т. е. акустического зондирования, к ним пока не применялись. Возможно, когда-нибудь мы научимся просве-

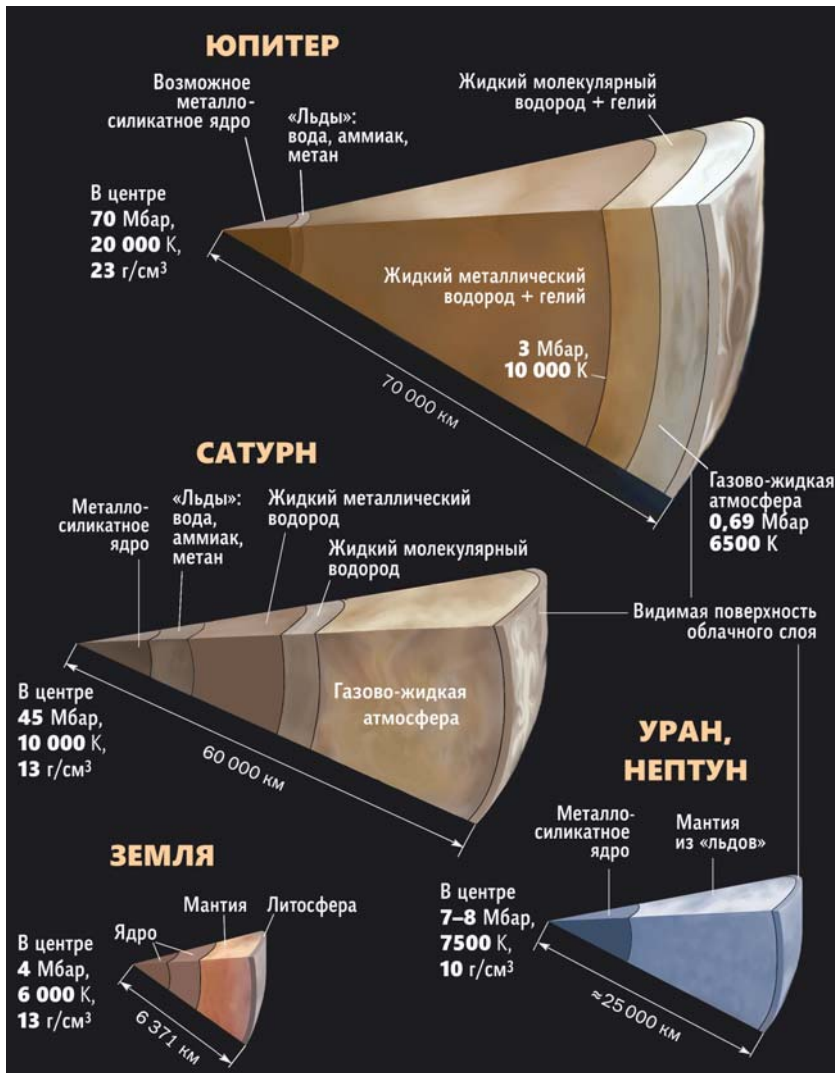


Рис. 6.5. Структура планет Солнечной системы.

читать их с помощью нейтрино, но до этого еще далеко. К счастью, в лабораторных условиях уже неплохо изучено поведение вещества при тех давлениях и температурах, которые царят в недрах планет-гигантов, что дает материал для математического моделирования их недр. На рис. 6.5 показано наше нынешнее представление о внутреннем строении планет-гигантов и, для сравнения, Земли. У Зем-

ли, как видите, температура в центре достигает 6000 К (разные модели дают от 5700 до 6300 К). Получается, что в центре Земли такая же температура, как на поверхности Солнца. Но в недрах гигантов она еще выше: температура в ядре Юпитера – от 20 до 35 тыс. К (по разным моделям), т. е. такая же, как на поверхности самых горячих звезд спектрального класса O.

Для контроля адекватности моделей внутреннего строения планет есть методы. Два физических поля – магнитное и гравитационное, источники которых находятся в недрах, выходят в окружающее планету пространство, где их можно измерять приборами космических зондов.

На структуру магнитного поля действует много искажающих факторов (околопланетная плазма, солнечный ветер), зато гравитационное поле зависит только от распределения плотности внутри планеты. Чем сильнее тело планеты отличается от сферически симметричного, тем сложнее ее гравитационное поле, тем больше в нем гармоник, отличающих его от простого ньютонова GM/R^2 .

Прибором для измерения гравитационного поля далеких планет, как правило, служит сам космический зонд, точнее, его движение в поле планеты. Чем дальше зонд от планеты, тем слабее в его движении проявляются мелкие отличия поля планеты от сферически симметричного, поэтому необходимо запускать аппарат как можно ближе к планете (см. гл. 3, рис. 3.9 и 3.10). С этой целью с 2016 г. рядом с Юпитером работает новый зонд Juno (NASA). Он летает по полярной орбите, чего раньше не было. На полярной орбите высшие гармоники гравитационного поля проявляются заметнее, поскольку планета сжата, а зонд время от времени подходит очень близко к поверхности. Именно это дает возможность измерить высшие гармоники разложения гравитационного поля. Но по этой же причине зонд довольно скоро закончит свою работу: он пролетает через наиболее плотные области радиационных поясов Юпитера, и его аппаратура от этого сильно страдает.

Радиационные пояса Юпитера колоссальны. При большом давлении водород в недрах планеты металлизирован: его электроны обобщаются, теряют связь с ядрами, и жидкий водород становится проводником электричества. Огромная масса сверхпроводящей среды, быстрое вращение и мощная конвекция – эти три фактора способствуют генерации магнитного поля за счет динамо-эффекта. В колоссальном магнитном поле, захватывающем летящие от Солн-



Рис. 6.6. Дозы радиации в системе спутников Юпитера (бэр/сутки).

ца заряженные частицы, формируются чудовищные радиационные пояса. В их наиболее плотной части лежат орбиты внутренних галилеевых спутников. Поэтому на поверхности Европы человек не прожил бы и дня, а на Ио — и часа. Даже космическому роботу нелегко там находиться. Более удаленные от Юпитера Ганимед и Каллисто в этом смысле значительно безопаснее для исследования, поэтому именно туда Роскосмос собирается в будущем послать зонд. Правда, Европа с ее подледным океаном была бы намного интереснее.

Ледяные гиганты Уран и Нептун выглядят промежуточными между газовыми гигантами и планетами земного типа. По сравнению с Юпитером и Сатурном у них меньше размер, масса и центральное давление, но при этом их относительно высокая средняя плотность указывает на большую долю элементов группы CNO. Протяженная и массивная атмосфера Урана и Нептуна в основном водородно-гелиевая. Под ней — водная с примесью аммиака и метана мантия, которую принято называть ледяной. Но планетологи подразумевают под «льдами» сами химические элементы группы CNO и их соединения (H_2O , NH_3 , CH_4 и т. п.), а не агрегатное состояние, так что мантия в большей степени может быть жидкой. А под ней лежит сравнительно небольшое железно-каменное ядро. Поскольку концентрация углерода в недрах Урана и Нептуна выше, чем у Сатурна и Юпитера, в основа-

нии их ледяной мантии может лежать слой жидкого углерода, в котором конденсируются кристаллы, т. е. алмазы, оседающие вниз.

Подчеркну, что внутреннее строение планет-гигантов активно обсуждается, и конкурирующих моделей пока довольно много. Каждое новое измерение с борта космического зонда и каждый новый результат лабораторного моделирования в установках высокого давления приводят к пересмотру этих моделей. Напомню, что прямое измерение параметров весьма неглубоких слоев атмосферы, да и то только у Юпитера, было выполнено лишь однажды зондом, сброшенным с «Галилео» (NASA). А всё остальное — косвенные измерения и теоретические модели.

Магнитные поля Урана и Нептуна слабее, чем у газовых гигантов, но сильнее, чем у Земли. Хотя у поверхности Урана и Нептуна индукция поля примерно такая же, как у поверхности Земли (доли гаусса), но объем, а значит, и магнитный момент намного больше. Геометрия магнитного поля ледяных гигантов очень сложна и далека от простой дипольной формы, характерной для Земли, Юпитера и Сатурна. Вероятная причина — в том, что магнитное поле Урана и Нептуна генерируется в относительно тонком электропроводящем слое мантии, где конвекционные потоки не обладают высокой степенью симметрии (поскольку толщина слоя много меньше его радиуса).

При внешнем сходстве Уран и Нептун нельзя назвать близнецами: у них разная средняя плотность (соответственно 1,27 и 1,64 г/см³) и разная интенсивность выделения тепла в недрах. Хотя Уран в полтора раза ближе к Солнцу, чем Нептун, и поэтому получает от него в 2,5 раза больше тепла, он холоднее Нептуна. Дело в том, что Нептун выделяет в своих недрах даже больше тепла, чем получает от Солнца, а Уран не выделяет почти ничего. Поток тепла из недр Урана вблизи его поверхности составляет всего $0,042 \pm 0,047$ Вт/м² — меньше, чем у Земли (0,075 Вт/м²). Уран — самая холодная планета в Солнечной системе, хотя и не самая далекая от Солнца. Связано ли это с его странным вращением «на боку»? Не исключено.

Теперь поговорим о кольцах планет.

Кольца планет-гигантов

Все знают, что «окольцованная планета» — это Сатурн. Но при внимательном наблюдении выясняется, что кольца есть у всех планет-гигантов. С Земли их заметить сложно. Например, кольцо Юпитера мы не видим в телескоп, но замечаем его в контрольном освеще-

Рис. 6.7. Юпитер. Фото зонда «Галилео» (NASA)



нии, когда космический зонд смотрит на планету с ее ночной стороны (рис. 6.7). Это кольцо состоит из темных и очень мелких частиц, размер которых сравним с длиной волны света. Они практически не отражают свет, но хорошо рассеивают его вперед.

Тонкими кольцами окружены Уран и Нептун (рис. 6.8 и 6.9). Вытянутые изображения звезд указывают, что экспозиция была длительной, поэтому диск планеты получился с передержкой и его пришлось закрыть. Только так удалось заснять кольца. Но все же они за-

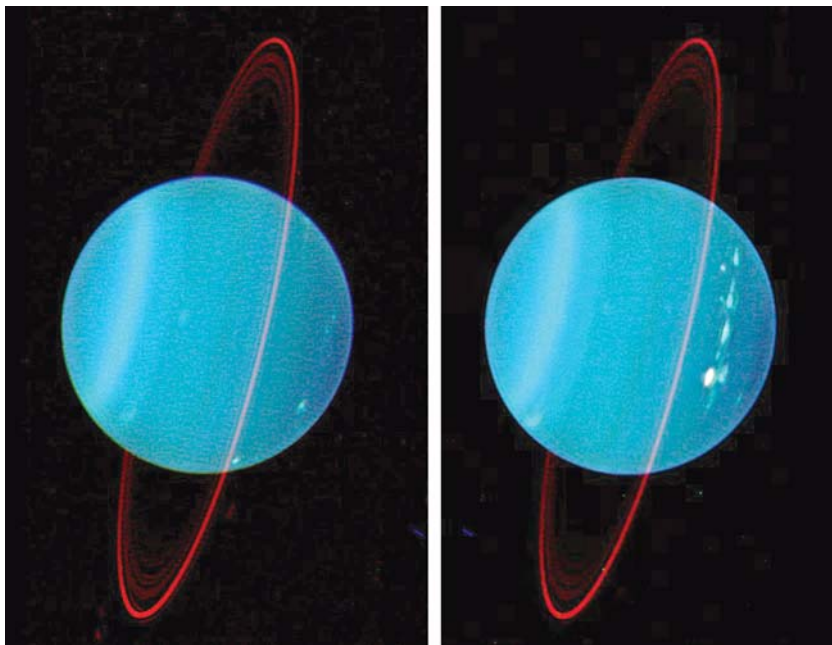


Рис. 6.8. На этом фото кольца Урана сняты в ИК-диапазоне. Снимки получены на 10-метровом телескопе «Кек» с использованием системы адаптивной оптики.

метны в прямом свете, а не в контровом, т. е. их частицы неплохо отражают свет.

Характеристики колец планет Солнечной системы

Параметр	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Размер в радиусах планеты	1,8	2,4	2,2	2,5
Альbedo	0,02	0,6	0,03	0,03
Размер частиц	10^{-3} см	от сантиметров до метров		
Толщина	30–300 км	10–100 м	10–100 м	10–100 м
Диаметр астероида эквивалентной массы, км	0,2	200	4	1

Как видим, кольца совершенно разные. Размер их частиц – от метров до микрометров; поверхность частиц – от светлой ($A=0,6$) до очень темной ($A=0,02$); толщина колец – от десятков метров до сотен километров, а масса вещества в них различается в миллиард раз! Единственное, что объединяет кольца, – их радиусы относительно радиуса своей планеты (R). Внешний радиус кольца в $(2\div 2,5)R$ определяется влиянием приливных сил. Это размер так называемой зоны Роша – расстояние от центра планеты, на котором мягкое тело ее же плотности разрушается под действием приливных сил.

Заметить какую-либо взаимосвязь между параметрами колец довольно сложно. Материал колец Сатурна белый как снег (альbedo 60%), а остальные кольца чернее угля ($A=2-3\%$). Все кольца тонкие, а у Юпитера довольно толстое. Все из «булыжников», а у Юпитера –

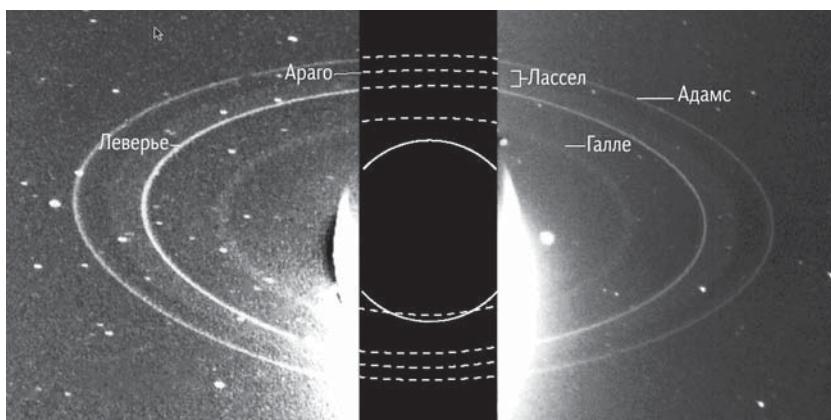
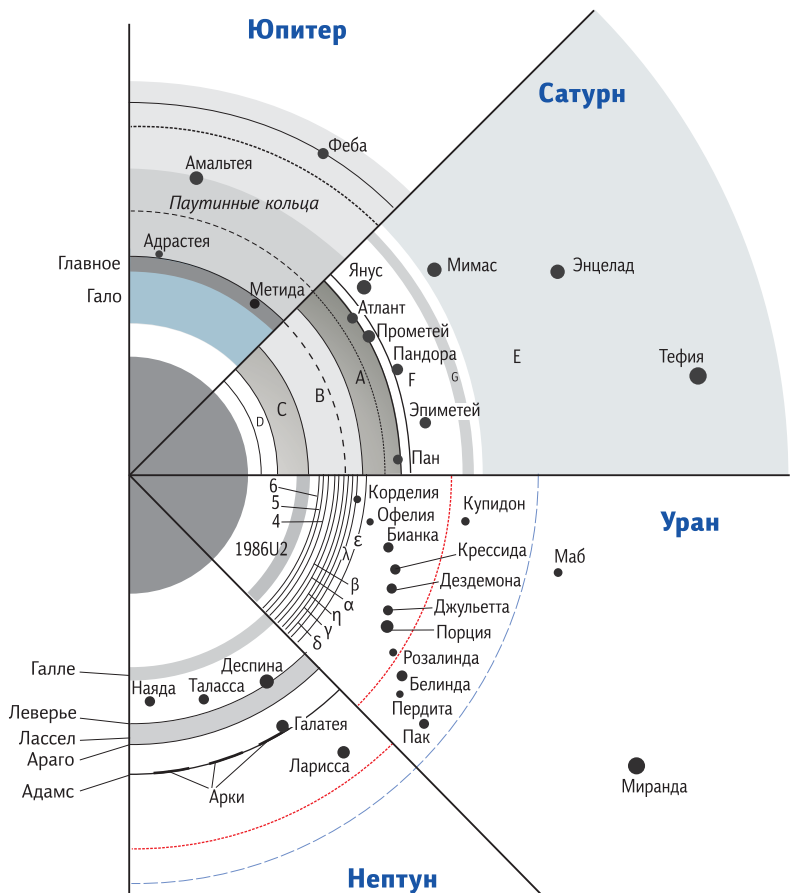


Рис. 6.9. Кольца Нептуна. Фото зонда «Вояджер-2» (NASA), сделанное при пролете вблизи Нептуна в 1989 г.



- — — — — расстояние, на котором орбитальный период равен периоду вращения планеты, т. е. положение синхронной орбиты
- предел Роша для жидких тел плотностью 1 г/см^3 ; на меньшем расстоянии от планеты приливный эффект разрушает эти тела

Рис. 6.10. Кольца и внутренние спутники планет-гигантов. Все расстояния масштабированы к экваториальному радиусу соответствующей планеты.

из пылинок. Структура колец тоже разная: одни напоминают граммофонную пластинку (Сатурн), другие — матрешкообразную кучу обручей (Уран), третьи — размытые, диффузные (Юпитер), а кольца Нептуна вообще не замкнуты и похожи на арки.

В голове не укладывается относительно малая толщина колец: при диаметре в сотни тысяч километров их толщина измеряется десятками метров. Мы никогда не держали в руках столь тонкие пред-

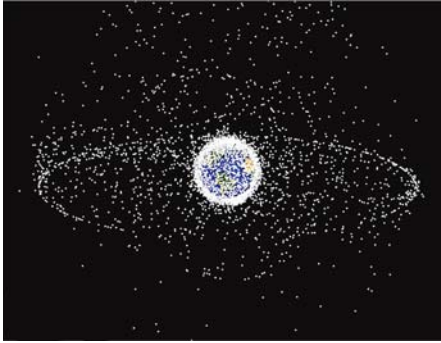


Рис. 6.11. Спутники на геостационарных орбитах образуют «кольцо» вокруг Земли.

меты. Если сравнить кольцо Сатурна с листом писчей бумаги, то при его известной толщине размер листа был бы с футбольное поле!

В шутку можно сказать, что и у Земли есть кольцо – искусственное. Оно состоит из нескольких сотен спутников, выведенных на геостационарную орбиту (рис. 6.11). Здесь показаны не только геостационарные спутники, но и те, что

находятся на низких орбитах, а также на высоких эллиптических орбитах, но геостационарное кольцо выделяется на их фоне вполне заметно. Впрочем, это рисунок, а не фото. Сфотографировать искусственное кольцо Земли пока никому не удалось, ведь его полная масса невелика, а светоотражающая поверхность ничтожна. Едва ли суммарная масса спутников в кольце составит 1000 тонн, что эквивалентно астероиду размером 10 м. Сравните это с параметрами колец планет-гигантов.

Плоскость кольца совпадает с экватором планеты. Иного и быть не может, поскольку у симметричной сплюсненной планеты вдоль

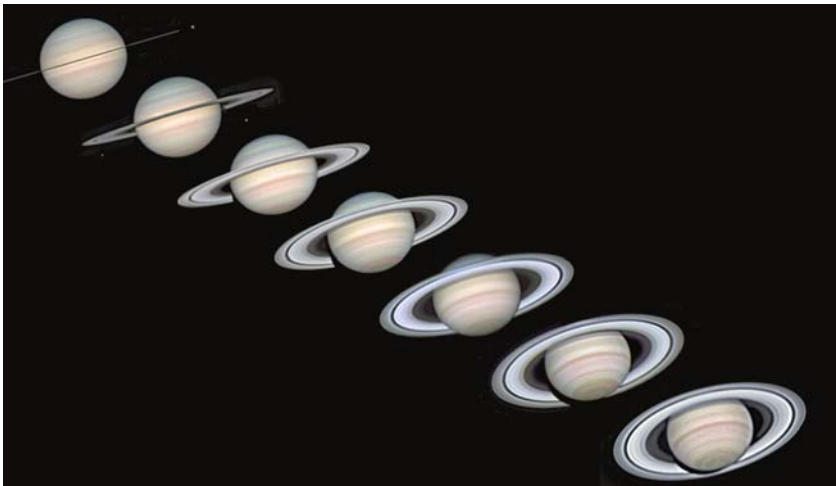


Рис. 6.12. Последовательные снимки Сатурна, сделанные в 2004–2009 гг. (снизу вверх). Фото: Alan Friedman.

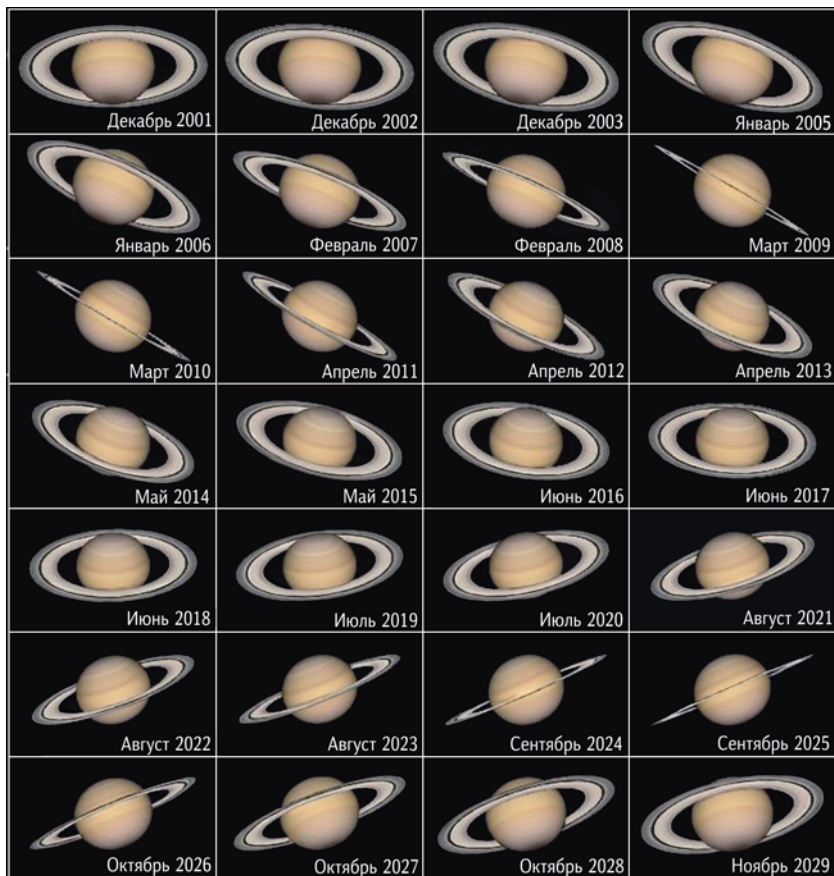


Рис. 6.13. Результат расчета того, как меняется внешний вид Сатурна для земного наблюдателя за период в 28 лет. Весьма благоприятными для наблюдения кольца будут 2018–2020 гг. Так что, если вы хотите полюбоваться кольцом Сатурна, поторопитесь — даже в слабый телескоп вы сможете увидеть это замечательное творение природы.

экватора в гравитационном поле — потенциальная яма. На серии снимков, полученных с 2004 по 2009 гг. (рис. 6.13), мы видим Сатурн и его кольцо в разных ракурсах, поскольку экватор Сатурна наклонен к плоскости его орбиты на 27° , а Земля всегда недалеко от этой плоскости. В 2009 г. мы точно оказались в плоскости колец. Сами понимаете: при толщине несколько десятков метров самого кольца мы не видим. Тем не менее черная полоска на диске планеты заметна — это тень кольца на облаках. Она видна нам, поскольку Земля и Солнце смотрят на Сатурн с разных направлений: мы находимся точно в плоскости кольца, но Солнце освещает Сатурн немного под другим

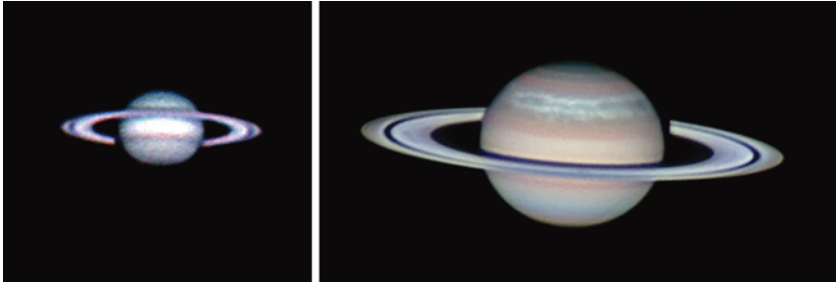


Рис. 6.14. Слева: снимок Сатурна с однократной экспозицией в любительский телескоп. Примерно так же он виден при наблюдении в телескоп глазом. Справа: лучшее из 4800 изображений, полученных с профессиональным телескопом (В. Combs). Но и на нем у кольца еще не видно почти никакой структуры. Давно была замечена темная «щель» — разрыв Кассини, который более 300 лет назад открыл итальянский астроном Джованни Кассини. Кажется, что в разрыве ничего нет.

углом, и тень кольца ложится на облачный слой планеты. Раз есть тень, значит, в кольце — довольно плотно «упакованное» вещество. Тень кольца исчезает только в дни равноденствия на Сатурне, когда Солнце оказывается точно в его плоскости, и это еще одно указание на малую толщину кольца.

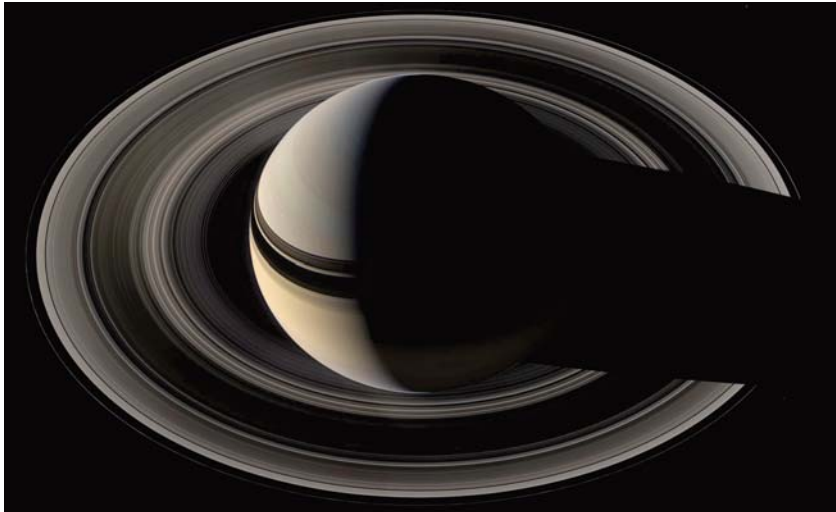


Рис. 6.15. На этом снимке особенно хорошо видна тень кольца на облачной поверхности Сатурна и, разумеется, тень самой планеты на кольце. В данном случае мы видим ночную сторону кольца, недоступную для наблюдения с Земли. Взгляд на любой предмет с другой стороны всегда полезен. Там, где в прямом свете мы видели черноту, «провал» в кольце, здесь мы видим вещество; просто оно другого типа, по-другому отражает и рассеивает свет.



Рис. 6.16. С ночной стороны Сатурна сразу появляются те слабо видимые части колец, которые в прямом свете не видно. Фото зонда «Кассини» (NASA).

Кольцу Сатурна посвящено много работ. Джеймс Клерк Максвелл, тот самый, что прославился своими уравнениями электромагнитного поля, исследовал физику кольца и показал, что оно не может быть единым твердым предметом, а должно состоять из мелких частиц, иначе центробежная сила разорвала бы его. Каждая частица летит по своей орбите — чем ближе к планете, тем быстрее.

Когда космические зонды прислали снимки кольца Сатурна, нас поразила его тонкая структура. Однако еще в XIX в выдающиеся наблюдатели на обсерватории Пик-дю-Миди во Франции именно эту структуру видели глазом, но им тогда никто особенно не поверил, потому что никто, кроме них, подобных тонкостей не замечал. Но оказалось, что кольцо Сатурна именно такое. Объяснение этой тонкой радиальной структуре кольца специалисты по звездной динамике ищут в рамках резонансного взаимодействия частиц кольца с массивными спутниками Сатурна вне кольца и мелкими спутниками внутри кольца. В целом теория волн плотности справляется с задачей, но до объяснения всех деталей еще далеко.

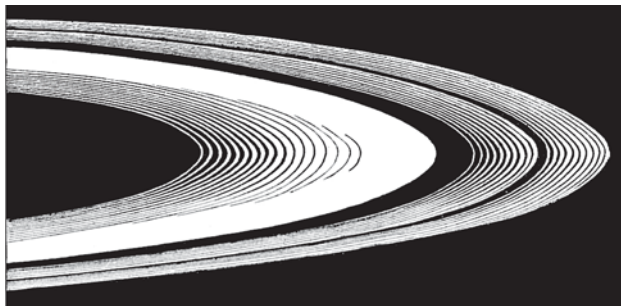


Рис. 6.17. Рисунок, выполненный на обсерватории Пик-дю-Миди (Франция) в XIX в.

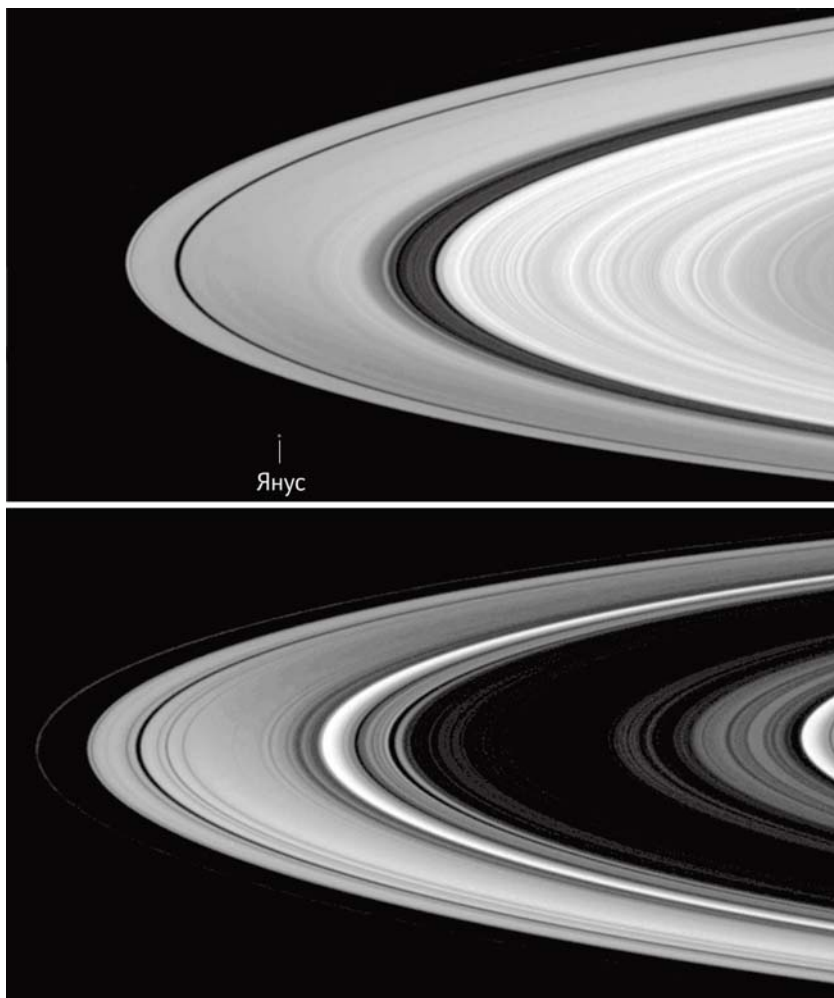


Рис. 6.18. Вверху — дневная сторона колец Сатурна. Зонд пролетает через их плоскость, и на нижнем снимке они повернуты к нам ночной стороной: вещество в делении Кассини стало вполне заметно, а яркие кольца, плотные и непрозрачные, напротив, потемнели. Это связано с тем, что мелкие частицы не отражают свет, а рассеивают его вперед. Снимки показывают, что вещество есть везде, но его частицы — разного размера и структуры. Что заставляет эти частицы разделяться, пока не очень ясно. На верхнем фото виден Янус — один из спутников Сатурна.

Надо сказать, что, хотя космические аппараты пролетали близко от колец Сатурна, ни одному из них не удалось увидеть реальные частицы, составляющие кольца, мы видим лишь общее их распределение. Отдельные глыбы не видны — исследователи не риску-

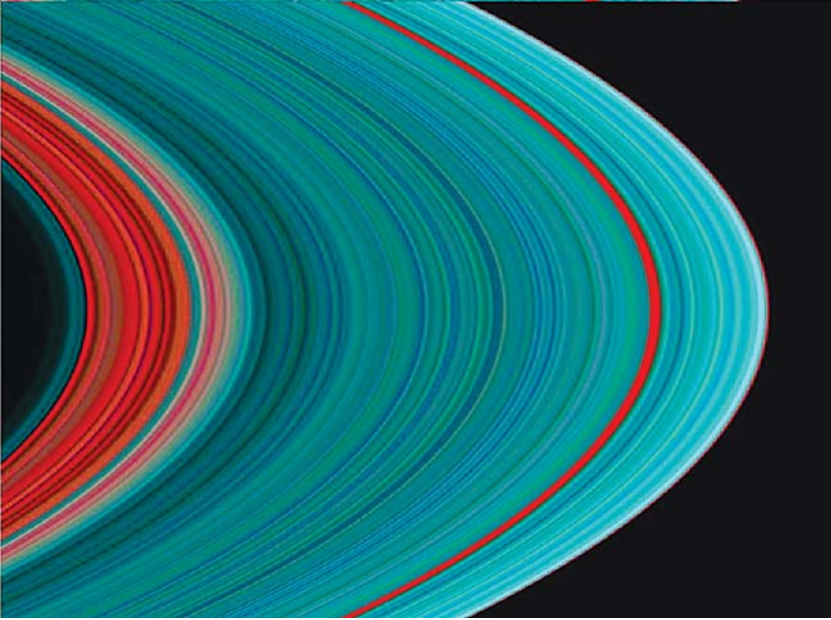


Рис. 6.19. Это не настоящий цветной снимок: цветами здесь показан характерный размер частиц, составляющих ту или иную область. Красные – мелкие частицы, бирюзовые – более крупные. Фото зонда «Кассини» (NASA)



Рис. 6.20. Гравитационные возмущения колец Сатурна, создаваемые небольшим спутником Дафнисом. Фото зонда «Кассини» (NASA).



Рис. 6.21. Кольца и некоторые спутники Сатурна (навания спутников даны курсивом). ют запускать аппараты внутрь колец. Но когда-нибудь это придется сделать.

Когда кольцо разворачивается ребром к Солнцу, тени от крупных неоднородностей ложатся на плоскость кольца (рис. 6.22, 6.23). Самая длинная тень здесь — от спутника Мимас, а многочисленные мелкие пики, которые в увеличенном изображении показаны на врезке, однозначного объяснения пока не получили. За них ответственны вы-

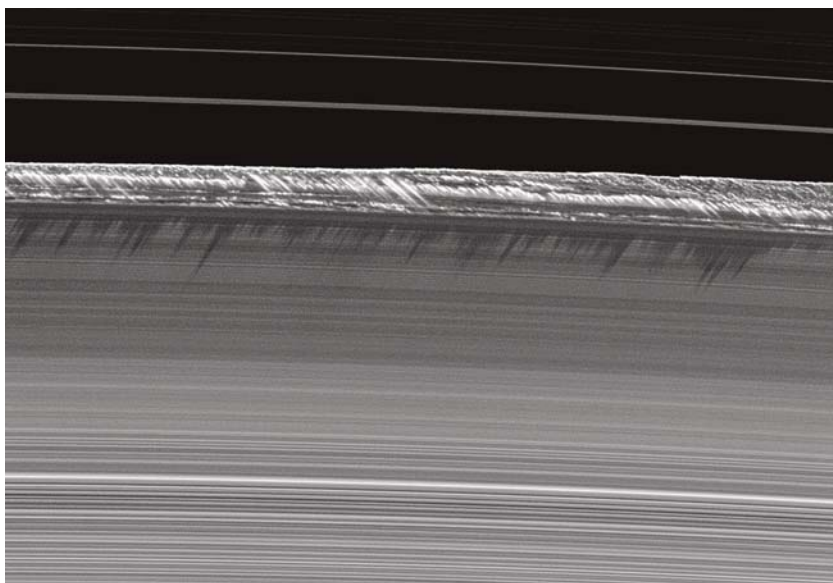


Рис. 6.22. Пики и тени от них в кольце В Сатурна. Фото зонда «Кассини» (NASA).

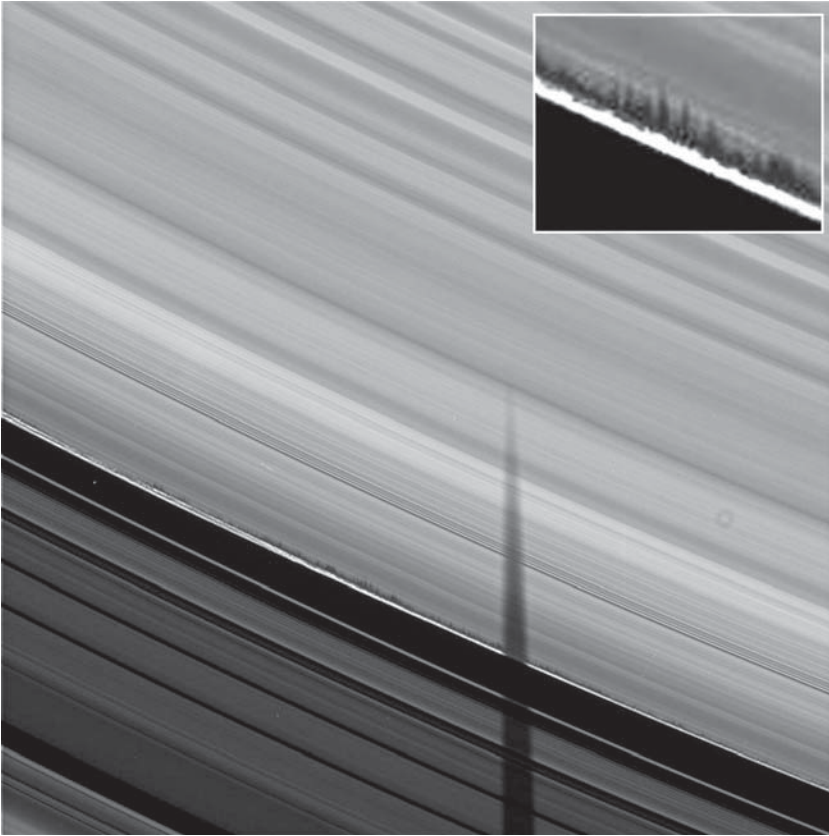


Рис. 6.23. Тени на поверхности колец Сатурна. Фото зонда «Кассини» (NASA).

ступы километровой размера. Не исключено, что некоторые из них — это тени от наиболее крупных камней. Но квазирегулярная структура теней более соответствует временным скоплениям частиц, возникающим в результате гравитационной неустойчивости.

Вдоль некоторых колец летают спутники, так называемые «сторожевые псы» или «пастушьи собаки», которые своей гравитацией удерживают от размытия некоторые кольца. Причем сами спутники довольно интересны: один из двух движется внутри тонкого кольца, другой снаружи (например, Янус и Эпиметей). Их орбитальные периоды чуть-чуть различны: внутренний ближе к планете и, следовательно, быстрее облетает ее, догоняет наружный спутник и за счет взаимного притяжения меняет свою энергию: наружный притормаживается, внутренний ускоряется, и они меняются орбитами — тот,

что затормозил, переходит на низкую орбиту, а тот, что ускорился, — на высокую. Так они делают несколько тысяч оборотов, а затем вновь меняются местами. Упомянутые выше Янус и Эпиметей меняются местами раз в 4 года.

Несколько лет назад открыли самое далекое кольцо Сатурна, о котором вообще не подозревали. Это кольцо связано со спутником Феба, с поверхности которого улетает пыль, заполняя область вдоль орбиты спутника. Плоскость вращения этого кольца, как и самого спутника, не связана с экватором планеты, поскольку из-за большого расстояния гравитация Сатурна воспринимается как поле точечного объекта.

Спутники

У каждой гигантской планеты есть семейство спутников. Особенно богаты ими Юпитер и Сатурн. На сегодняшний день у Юпитера их известно 79, а у Сатурна — 62, и регулярно обнаруживаются новые. Нижняя граница массы и размера для спутников формально не установлена, поэтому для Сатурна это число условное: если вблизи планеты обнаруживается объект размером 20–30 метров, то что это — спутник планеты или частица ее кольца?

В любом многочисленном семействе космических тел мелких всегда больше, чем крупных. Спутники планет — не исключение. Мелкие спутники — это, как правило, глыбы неправильной формы, в основном состоящие из льда. Имея размер менее 500 км, они не в состоянии своей гравитацией придать себе сфероидальную форму. Внешне они очень похожи на астероиды и ядра комет. Вероятно,

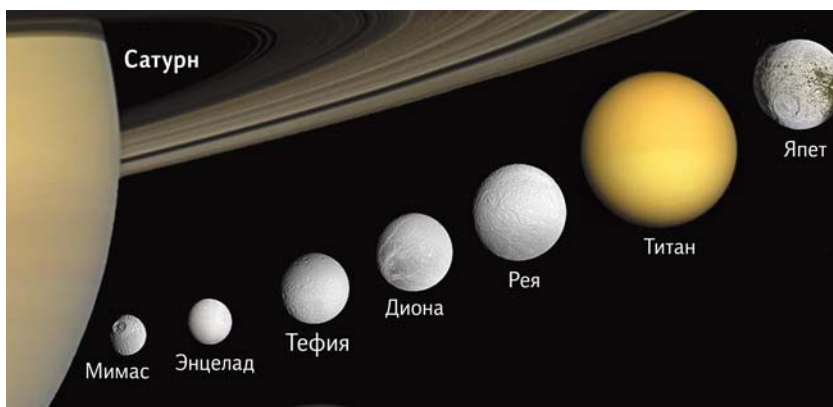


Рис. 6.24. Крупнейшие спутники Сатурна (не в масштабе).

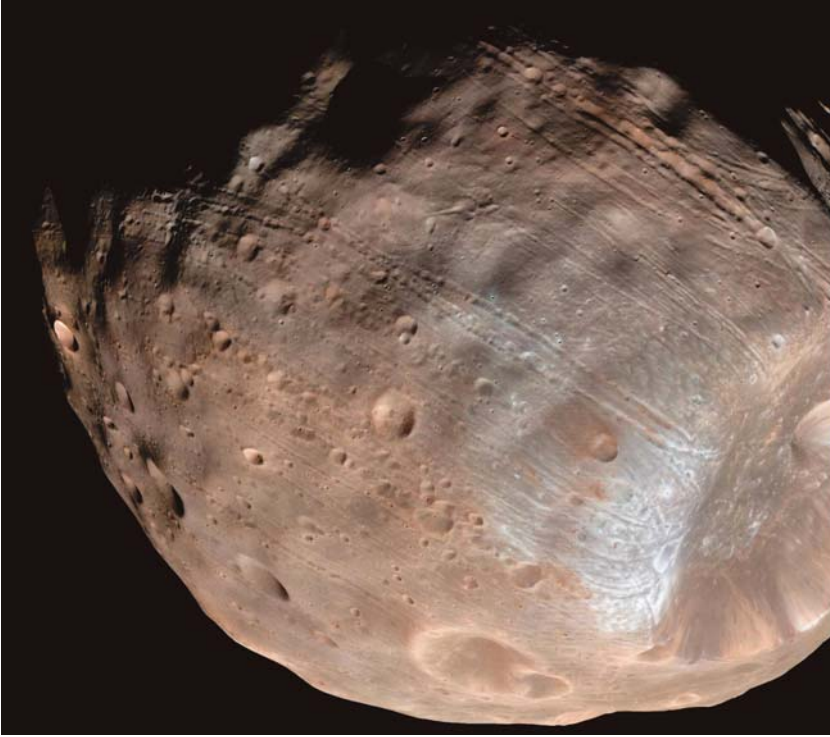


Рис. 6.25. Фобос. Фото зонда Mars Reconnaissance Orbiter (NASA)

многие из них таковыми и являются, поскольку движутся вдаль от планеты по весьма хаотическим орбитам. Планета могла захватить их, а через некоторое время может потерять.

С малыми астероидоподобными спутниками мы пока знакомы не очень близко. Детальнее других исследованы такие объекты у Марса — два его небольших спутника, Фобос и Деймос. Особенно пристальное внимание было привлечено к Фобосу; на его поверхность даже хотели отправить зонд, но пока не получилось. Чем внимательнее присматриваешься к любому космическому телу, тем больше в нем загадок. Фобос — не исключение. Посмотрите, какие странные структуры идут вдоль его поверхности. Эти линии из мелких провалов и борозд похожи на меридианы. Существует уже несколько физических теорий, пытающихся объяснить их образование, но пока никто не предложил исчерпывающей.

Все мелкие спутники несут на себе многочисленные следы ударов. Время от времени они сталкиваются друг с другом и с прихо-



Рис. 6.26. Наиболее крупные спутники планет Солнечной системы в одном масштабе с Землей и Меркурием. Они ничем не уступают Меркурию, а по своей природе даже более интересны.

дящими издали телами, дробятся на отдельные части, а могут и объединяться, поэтому восстановить их далекое прошлое и происхождение будет нелегко. Но среди спутников есть и те, что генетически связаны с планетой, поскольку движутся рядом с ней в плоскости ее экватора и, скорее всего, имеют общее с ней происхождение.

Особый интерес представляют крупные планетоподобные спутники. У Юпитера их четыре; это так называемые «галилеевы» спутники — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. У Сатурна выделяется своим размером и массой могучий Титан. Эти спутники по своим внутренним параметрам почти неотличимы от планет. Просто их движение вокруг Солнца контролируется еще более массивными телами — материнскими планетами.

Вот перед нами Земля и Луна, а рядом в масштабе спутник Сатурна Титан. Замечательная маленькая планета с плотной атмосферой, с жидкими большими «морями» из метана, этана и пропана на поверхности. Моря из сжиженного газа, который при температуре поверхности Титана ($-180\text{ }^{\circ}\text{C}$) находится в жидком виде. Очень привлекательная планета, потому что на ней будет легко и интересно работать — атмосфера плотная, надежно защищает от космических лучей и по составу близка к земной атмосфере, поскольку тоже в основном состоит из азота, хотя и лишена кислорода. Вакуумные скафандры там не нужны, поскольку атмосферное давление почти как на Земле, даже чуть больше. Тепло оделись, баллончик с кислородом за спину — и вы легко будете работать на Титане. Кстати, это единственный (кроме Луны) спутник, на поверхность которого удалось посадить космический аппарат. Это был «Гюйгенс», доставленный туда на борту «Кассини» (NASA, ESA), и посадка была довольно удачной.

Вот единственный снимок, сделанный на поверхности Титана (рис. 6.28). Температура низкая, поэтому глыбы — это очень холод-

Рис. 6.27. Снимок поверхности Титана, сделанный зондом «Гюйгенс» с высоты нескольких километров при спуске на парашюте 14 января 2005 г. Видны русло реки и дно озера, в которое впадает река, в настоящий момент сухие, но еще недавно в них была жидкость — вероятно, метан.

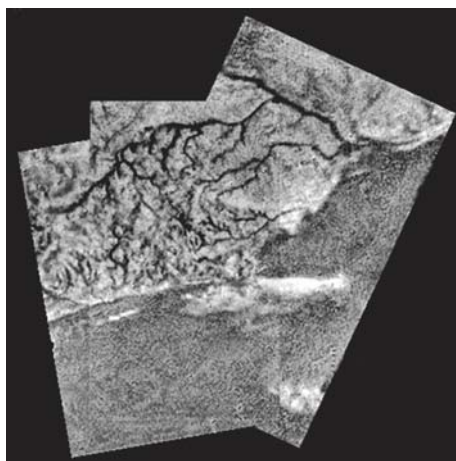




Рис. 6.28. Поверхность Титана. Снимок зонда «Гюйгенс».

ный водяной лед. Мы в этом уверены, потому что Титан вообще по большей части состоит из водяного льда. Цвет красновато-рыжевато-оранжевый; он естественный и связан с тем, что в атмосфере Титана под действием солнечного ультрафиолета синтезируются довольно сложные органические вещества под общим названием «толины». Дымка из этих веществ пропускает к поверхности в основном оранжевый и красный цвет, довольно сильно его рассеивая. Поэтому изучать из космоса географию Титана довольно сложно. Помогает радиолокация. В этом смысле ситуация напоминает Венеру. Кстати, и циркуляция атмосферы

на Титане тоже венерианского типа: по одному мощному циклону в каждом из полушарий.

Спутники других планет-гигантов тоже оригинальны. Ио, ближайший спутник Юпитера, находится на таком же расстоянии от планеты, что и Луна от Земли, но Юпитер — гигант, а значит, действует на свой спутник очень сильно. Приливное влияние Юпитера расплавilo недра спутника, и мы видим на нем множество действующих вулканов, которые выглядят как черные точки. Видно, что выбросы вокруг вулканов ложатся по баллистическим траекториям. Ведь там практически нет атмосферы, поэтому то, что выброшено из вулкана, летит по параболе (или по эллипсу?). Малая сила тяжести на поверхности Ио создает условия для высоких выбросов: 250–300 км вверх, а то и прямо в космос!

Второй от Юпитера спутник, Европа, покрыт ледяной корой, как наша Антарктида. Под корой, толщина которой оценивается в 25–30 км, — океан жидкой воды. Ледяная поверхность покрыта многочисленными древними трещинами. Под влиянием подледного океана пласты льда медленно перемещаются, напоминая этим дрейф

земных материков. Трещины во льду время от времени открываются, и оттуда фонтанами вырывается вода. Теперь мы это знаем точно, поскольку видели фонтаны с помощью космического телескопа «Хаббл». Это открывает перспективу исследовать воду Европы. Кое-что о ней мы уже знаем: это соленая вода, хороший проводник электричества, на что указывает магнитное поле. Ее температура, вероятно, близка к комнатной, но о ее биологическом составе мы пока ничего не знаем. Хотелось бы зачерпнуть и проанализировать эту воду. И экспедиции с этой целью уже готовятся.

Другие крупные спутники планет, включая нашу Луну, не менее интересны. По сути, они представляют самостоятельную группу планет-спутников.

