



Михаил Никитин

Происхождение жизни От туманности до клетки



С Е Р И Я

PRIMUS



Книжные проекты
Дмитрия Зимина



ЭВОЛЮЦИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Primus

Михаил Никитин

**Происхождение жизни.
От туманности до клетки**

«Альпина Диджитал»

2016

Никитин М.

Происхождение жизни. От туманности до клетки / М. Никитин —
«Альпина Диджитал», 2016 — (Primus)

ISBN 978-5-9614-4350-9

Поражаясь красоте и многообразию окружающего мира, люди на протяжении веков гадали: как он появился? Каким образом сформировались планеты, на одной из которых зародилась жизнь? Почему земная жизнь основана на углероде и использует четыре типа звеньев в ДНК? Где во Вселенной стоит искать другие формы жизни, и чем они могут отличаться от нас? В этой книге собраны самые свежие ответы науки на эти вопросы. И хотя на переднем крае науки не всегда есть простые пути, автор честно постарался сделать все возможное, чтобы книга была понятна читателям, далеким от биологии. Он логично и четко формулирует свои идеи и с увлечением рассказывает о том, каким образом из космической пыли и метеоритов через горячие источники у подножия вулканов возникла живая клетка, чтобы заселить и преобразить всю планету.

ISBN 978-5-9614-4350-9

© Никитин М., 2016

© Альпина Диджитал, 2016

Содержание

Предисловие	6
Благодарности	8
Часть I	9
Глава 1	10
Орбитальная механика	10
Гравитационная дифференциация	12
Приливные явления	12
Орбитальные резонансы	13
Планеты земной группы	14
Планеты-гиганты	16
Глава 2	24
Протопланетные диски	24
Образование планетезималей	27
Образование планет-гигантов	28
Образование планет земной группы	28
Происхождение Луны и спутников Марса	29
Эволюция системы Земля – Луна	30
Происхождение спутников планет-гигантов	30
Нерешенные вопросы в моделях происхождения планет	32
Осевое вращение планет земной группы и особенности	33
Венеры и Меркурия	
Поздняя тяжелая бомбардировка и миграция планет-гигантов	34
Прыгающий Юпитер	37
Солнечная система – норма или исключение?	38
Конец ознакомительного фрагмента.	39

Михаил Никитин

Происхождение жизни. От туманности до клетки

Научные редакторы *Елена Наймарк, д-р биол. наук (главы 4–18); Владимир Сурдин, канд. физ. – мат. наук (главы 1–4)*

Редактор *Полина Суворова*

Руководитель проекта *И. Серёгина*

Корректор *М. Миловидова*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайн обложки *А. Бондаренко*

© М. Никитин, 2016

© ООО «Альпина нон-фикшн», 2016



Серию PRIMUS составят дебютные просветительские книги ученых и научных журналистов. Серия появилась благодаря совместной инициативе "Книжных проектов Дмитрия Зимина" и фонда "Эволюция" и издается при их поддержке. Это межиздательский проект: книги серии будут выходить в разных издательствах, но в едином оформлении. На данный момент в проекте участвуют два издательства, наиболее активно выпускающих научно-популярную литературу: CORPUS и АЛЬПИНА НОН-ФИКШН.



Книжные проекты
Дмитрия Зимина



ЭВОЛЮЦИЯ

Предисловие

Почему жизнь на планете Земля устроена так, а не иначе? Почему цепи ДНК состоят из четырех видов звеньев, а белковые – из двадцати? Почему в клетках используются именно белки и ДНК, а не какие-нибудь другие вещества? Подобные вопросы часто возникают у школьников и студентов, изучающих биологию. Но в учебниках ответов на них нет. В результате студенты привыкали, что задавать эти вопросы бесполезно. И даже когда они вырастали в ученых и могли попытаться на них ответить сами, привычка мешала им это сделать.

Тем временем в биологии с начала XXI века происходит настоящая научная революция. Развитие технологий определения последовательностей ДНК (секвенирования) привело к тому, что базы данных прочитанных последовательностей растут, как снежный ком. Для анализа этого огромного количества данных биологи стали привлекать на помощь специалистов в математике и компьютерных науках. Эти специалисты, чтобы представлять, с чем они работают, стали изучать основы биологии. И, естественно, из них посыпались те самые проклятые «почему?», ставящие биологов в тупик. Автор столкнулся с такими вопросами программистов в Школе анализа данных, организованной компанией «Яндекс» совместно с факультетом биоинженерии и биоинформатики МГУ.

Тем временем наметился путь к ответам на эти вопросы. Успехи химиков привели к возникновению синтетической биологии – созданию новых организмов с новыми, невиданными свойствами. Достижения синтетической биологии, например расширение генетического алфавита до шести букв, позволяют сравнить решения, выбранные нашей земной жизнью, с альтернативными вариантами и выяснить, по каким причинам эволюция предпочла один из них. Тот или иной выбор был сделан жизнью очень давно, скорее всего, до появления клеток. Изучая каждую альтернативу, мы лучше понимаем, как возникла жизнь на нашей планете.

В XXI веке бурно развивалась не только биология. Например, астрономы за последние годы открыли тысячи планет у других звезд (они называются экзопланеты). С этими данными мы теперь можем оценить, насколько наша Солнечная система уникальна или типична для Галактики. Космические зонды, отправленные к дальним планетам, кометам и астероидам, собрали много новой информации о древнейшей истории Солнечной системы. Геологи, вооруженные тончайшими методами анализа горных пород и метеоритов, узнали много нового об условиях, существовавших на древней Земле в те времена, когда жизнь на ней только зарождалась.

Эта книга стала попыткой объединить в один связный рассказ лавину научных статей, проясняющих разные моменты происхождения жизни и вышедших за последние 15 лет. Она написана на основе курсов лекций, которые автор читал с 2010 года в Летней экологической школе и с 2014 года в МГУ. Автор честно постарался сделать все возможное, чтобы книга была понятна читателям, далеким от биологии. К сожалению, на переднем крае науки не всегда есть простые пути, и некоторые главы, например 11-я и 13-я, могут оказаться сложными для неподготовленного читателя. Трудные места из глав 15 и 16, посвященных появлению биологических мембран и связанных с мембранами энергетических систем, в итоге удалось вынести в отдельную, 17-ю главу. Так что не пугайтесь, если она покажется вам слишком сложной, – ее материал развивает и углубляет идеи 15-й и 16-й глав, но и без нее восприятие книги не пострадает.

Естественно, в такой бурно развивающейся области науки мало единых устоявшихся мнений, разделяемых большинством ученых. Автор постарался показать «научную кухню»: какие альтернативные гипотезы выдвигаются и какими экспериментами их проверяют.

В ряде глав есть врезки, выделенные другим шрифтом. В них повторяются кусочки школьных курсов, необходимые для понимания главы. Старшеклассники и первокурсники

могут их пропускать, а вот взрослым читателям они пригодятся. Чтобы материал книги не повисал в пустоте, а как-то соотносился с повседневной жизнью, автор постарался связать описываемые вещества и биохимические процессы с хорошо знакомыми вещами из кулинарии, медицины и косметики.

Благодарности

Эта книга появилась на свет благодаря многим людям, и я хочу поблагодарить их за то, что они сделали. Начать ее историю стоит, пожалуй, с вышедшей в 1999 году книги палеонтолога Кирилла Еськова «История Земли и жизни на ней». Она во многом стала для автора образцом стиля, связности и логичности изложения и повлияла на мой интерес к проблеме возникновения жизни. Если бы не труд Кирилла Юрьевича, эта книга не стала бы такой, какая она есть.

Далее следует благодарить профессора Армена Мулкиджаняна. С его рассказа о теории «цинкового мира» на семинаре нашего института в 2008 году начался мой пристальный интерес к свежим работам в области происхождения жизни. Шестая и пятнадцатая главы этой книги построены в основном на работах Армена Яковлевича. Вполне возможно, что его идеям в книге уделено больше внимания, чем другим альтернативам, но эта необъективность остается на совести автора.

В основу книги лег курс лекций, который автор читал школьникам 10-го класса в Летней экологической школе (ЛЭШ). Я благодарен всем, кто делает ЛЭШ и дает возможность преподавать там уникальные курсы уникальным школьникам. Марина Фридман, услышав мои лекции в ЛЭШ, предложила записать их и издать циклом статей в журнале «Химия и жизнь – XXI век». Текст стал гораздо лучше и был опубликован благодаря редактору журнала Елене Клещенко.

Этот цикл статей, вышедший в «Химии и жизни» в 2013 году, был отмечен литературной премией имени Александра Беляева. На вручении премии автора приперли к стене представители издательств и потребовали писать книгу.

Книга превратилась из научной в хотя бы слегка популярную благодаря редакторам Елене Наймарк и Виктору Сурдину, а также бета-читателям: Александру Хохлову, Марине Мамаевой, Наталье Агаповой и Ларисе Бучок. Естественно, благодарность заслужили работавшие над книгой сотрудники издательства «Альпина нон-фикшн». И последней, но не по значимости, я благодарю замечательную Елену Кармальскую, которая поддерживала меня во всем и наполняла жизнь радостью. Лена, я предлагаю тебе руку, сердце и соавторство в следующей книге!

Часть I

Планеты, пригодные для жизни

*Когда наш мир на треть был меньше,
На треть синей и горячей,
Погасших звезд алмазный пепел
Расцвел в тепле чужих лучей...*

Виктор Аргонов Project

Земля – единственная известная нам планета, на которой есть жизнь. Чтобы понять, как она появилась, нам надо представлять себе условия, которые существовали на нашей планете в древнейшие времена, – температуру, состав и давление атмосферы, площадь материков и океанов, состав морской воды и минералов земной коры. К сожалению, все следы первых 600 млн лет истории Земли были стерты последующими геологическими событиями, поэтому ключи к древнейшей истории Земли надо искать на других небесных телах, история которых была более спокойной: Луне, Марсе, спутниках планет-гигантов, кометах и астероидах. Есть шанс, что мы найдем жизнь на Марсе или спутниках Юпитера и Сатурна. Если окажется, что она возникла независимо от земной, то мы получим уникальную возможность сравнить ее с привычной земной и узнать, какие свойства жизни являются обязательными, а какие могут различаться у независимо возникших линий жизни. Если же мы найдем за пределами Земли жизнь общего происхождения с нами, это будет решающим доказательством ее межпланетного переноса и, скорее всего, примером того, насколько далеко могут разойтись живые организмы единого происхождения за миллиарды лет изоляции в разных условиях. Так или иначе, мы не можем глубоко понять происхождение и эволюцию жизни на нашей планете в отрыве от истории минеральных слоев Земли (коры, мантии, ядра) и без учета более широкого контекста – истории Солнечной системы. А если мы хотим оценить, насколько вероятно возникновение жизни во Вселенной, нам надо сравнивать Солнечную систему с известными экзопланетными системами. Поэтому мы начнем с краткого рассказа об устройстве Солнечной системы, ее происхождении и истории, затем опишем устройство планет земной группы (Земля, Марс, Венера) и только после этого подойдем к вопросу о собственно появлении жизни.

Глава 1

Строение Солнечной системы

Наша Солнечная система состоит из множества небесных тел. Крупнейшие из них после Солнца – четыре планеты-гиганта: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун и четыре планеты земного типа: Земля, Венера, Марс и Меркурий. Кроме них имеются астероиды – мелкие объекты, обращающиеся вокруг Солнца в основном между орбитами Марса и Юпитера, хотя есть группы астероидов как ближе, так и дальше от Солнца. За орбитой Нептуна расположен пояс Койпера – скопление небольших ледяных объектов. Первый объект пояса Койпера, Плутон, был открыт намного раньше остальных и поэтому долго считался девятой планетой.

Все эти объекты обращаются вокруг Солнца по орбитам, близким к круговым. Кроме них в Солнечной системе есть множество комет. Они движутся по вытянутым эллиптическим орбитам и, нагреваясь вблизи Солнца, начинают испаряться. Испарение приводит к появлению у кометы видимого «хвоста». Размеры орбит комет сильно различаются. У самых короткопериодических комет орбита целиком находится внутри орбиты Юпитера, а непериодические выходят далеко за границы пояса Койпера, образуя так называемое облако Оорта.

Помимо планет, астероидов, койперовских объектов и комет есть спутники, обращающиеся вокруг всех планет, кроме Меркурия и Венеры. Земля имеет один крупный спутник – Луну, Марс – два маленьких, Фобос и Деймос, а у планет-гигантов есть десятки спутников. Среди спутников планет-гигантов выделяются регулярные и нерегулярные. Плоскость орбиты регулярных спутников близка к плоскости экватора планеты, а форма орбиты – к круговой. У нерегулярных спутников орбиты, как правило, сильно вытянуты и могут находиться под любым углом к экватору планеты, и они обычно обращаются дальше от планеты, чем регулярные. Крупнейшие спутники планет-гигантов, Ганимед и Титан, по размеру в полтора раза больше нашей Луны и практически равны Меркурию.

Орбитальная механика

Само слово «планета» происходит от древнегреческого $\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\eta\varsigma$ – «блуждающая». Если каждую ночь наблюдать положение планет на небе и записывать наблюдения, то окажется, что планеты движутся относительно звезд по причудливому пути. Подобно Луне и Солнцу, они всегда находятся в полосе зодиакальных созвездий, но если Луна и Солнце движутся практически равномерно в одну сторону, то планеты останавливаются и меняют направление движения, описывая сложные петли. В геоцентрической системе мира, господствовавшей в древней и средневековой астрономии, для описания этого движения вводились дополнительные окружности: по окружности вокруг Земли (деференту) равномерно обращается невидимая точка (средняя планета), вокруг которой по второй окружности (эпициклу) равномерно обращается истинная планета.

С переходом к гелиоцентрической системе мира стало понятно, что видимое движение планет складывается из двух: обращения Земли вокруг Солнца и обращения наблюдаемой планеты вокруг него же. Поначалу думали, что планеты обращаются вокруг Солнца тоже по круговым деферентам и эпициклам, но более точные измерения Тихо Браге в XVI веке показали, что эта модель не согласуется с наблюдениями. Иоганн Кеплер, анализируя записи Браге в начале XVII века, сформулировал три эмпирических закона движения планет вокруг Солнца (рис. 1.1).

Первый закон Кеплера: орбита планеты имеет форму эллипса, а Солнце находится в одном из его фокусов.

Второй закон Кеплера: угловая скорость движения планеты в разных местах ее орбиты обратно пропорциональна расстоянию до Солнца.

Третий закон Кеплера: квадраты периодов обращения двух планет соотносятся как кубы больших полуосей их орбит.

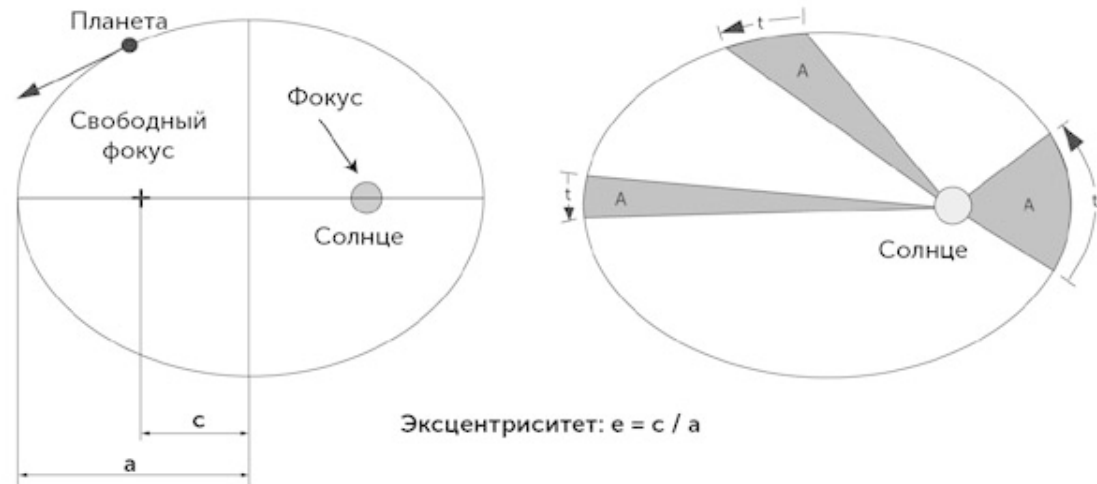


Рис. 1.1. Первый и второй законы Кеплера. Эллипсы.

a – большая полуось эллипса, c – фокальный параметр (половина расстояния между фокусами)

Что такое эллипс и где у него фокус? Как известно, окружность можно нарисовать циркулем, потому что все ее точки находятся на равном расстоянии от центра. Для эллипса способ рисования будет сложнее. Для всех точек эллипса *сумма* расстояний до двух фокусов одинакова. Если мы воткнем две канцелярские кнопки и привяжем к ним нитку так, чтобы ее длина была заметно больше расстояния между кнопками, оттянем нитку в сторону карандашом и будем водить им вдоль нитки так, чтобы она все время была натянута, мы нарисуем эллипс, а кнопки будут в его фокусах. Окружность характеризуется одной величиной – радиусом. У эллипса есть большая полуось (аналог радиуса) и эксцентриситет – отношение к большой полуоси. Если эксцентриситет близок к нулю, то фокусы эллипса находятся совсем рядом, и эллипс близок к окружности. Если эксцентриситет большой, то эллипс имеет сильно вытянутую форму. Орбиты планет имеют небольшой эксцентриситет (0,2 – для Меркурия и менее 0,1 – для остальных планет), а орбиты комет отличаются большим эксцентриситетом, близким к единице.

В дальнейшем Исаак Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, из которого выводятся все три закона Кеплера, если пренебречь влиянием планет друг на друга и на Солнце.

Механика орбитального движения во многом непривычна для неспециалистов. На орбите, чтобы увеличить скорость движения, надо тормозить, а чтобы ее уменьшить, – разогнаться! Проиллюстрируем это на примере выведения спутников на геостационарную орбиту. Эта околоземная орбита, лежащая в плоскости экватора, с периодом обращения 23 часа 56 минут, очень удобна для спутников связи, потому что спутник на ней все время находится над одной точкой Земли и наземную антенну на него можно навести один раз и больше не двигать. Геостационарная орбита имеет высоту 35 786 км над поверхностью Земли, и спутник на ней движется со скоростью 3,07 км/с. При выведении ракета-носитель сначала доставляет спутник

на низкую околоземную орбиту, проходящую примерно в 200 км над поверхностью Земли. Скорость на ней равна первой космической скорости, около 8 км/с. Затем спутник включает двигатель и разгоняется еще на 2 км/с, после чего оказывается на так называемой геопереходной орбите. Это эллиптическая орбита с большим эксцентриситетом, которая в нижней точке касается низкой околоземной, а в верхней – геостационарной орбиты. По второму закону Кеплера скорость спутника в верхней точке оказывается намного ниже, чем в нижней, – около 1,7 км/с. Совершив поворот по геопереходной орбите, в верхней точке спутник включает двигатель во второй раз и разгоняется еще примерно на 1,3 км/с. При этом он оказывается на геостационарной орбите. Несмотря на два разгона, его скорость упала с 8 до 3,07 км/с. Кинетическая энергия летящего спутника при этом не исчезла бесследно, а перешла в потенциальную – он поднялся намного выше над Землей.

Гравитационная дифференциация

Когда в XVIII веке впервые удалось измерить массу Земли, оказалось, что ее средняя плотность составляет $5,5 \text{ г/см}^3$. Однако плотность горных пород на поверхности Земли почти вдвое меньше – около 3 г/см^3 . Следовательно, внутри Земли должно быть более плотное вещество. По данным геологии, в центре Земли и других планет земного типа находится ядро из железа с примесями никеля и других металлов, со средней плотностью 10 г/см^3 . Ядро окружает полужидкая силикатная мантия, покрытая сверху твердой силикатной корой с плотностью около 3 г/см^3 .

При образовании планет составляющие их силикаты и металлы были перемешаны. В дальнейшем планеты расслаивались: железо тянуло к центру Земли и формировало ядро, а силикаты всплывали наверх, образуя мантию и кору.

В процессе расслоения в глубинах планеты выделяется тепло, поддерживающее ядро и мантию в расплавленном состоянии. Другим источником энергии внутри планеты является радиоактивный распад нестабильных элементов. Гравитационная дифференциация поддерживает конвективные течения в мантии, а в случае Земли – еще и движение плит земной коры относительно друг друга.

При ином химическом составе небесного тела оно разделяется на другие слои. Например, крупные спутники планет-гигантов имеют силикатное ядро, мантию из жидкой воды и ледяную кору. На Европе и Энцеладе есть даже аналоги вулканизма и движения литосферных плит – многокилометровые фонтаны воды и движение ледяных блоков коры. Сами планеты-гиганты разделяются на протяженную атмосферу из водорода и гелия, более тяжелый слой жидких метана, аммиака и воды и силикатно-железное ядро. Большую часть их диаметра составляет массивная плотная атмосфера.

Приливные явления

Законы Кеплера подразумевают, что орбиты планет и спутников неизменны и вечны. Однако эти законы выполняются в точности, только если размеры тел ничтожно малы по сравнению с расстояниями между ними, а влиянием планет друг на друга можно пренебречь. Поскольку реальные планеты и спутники имеют заметные размеры, сила притяжения действует на их ближние к друг другу части сильнее, чем на дальние. За счет этой разницы небесные тела немного деформируются, их форма становится слегка вытянутой, подобно дыне. В случае Земли ее океаны легче поддаются деформации, чем земная кора, и изменения их уровня под действием тяготения Луны вызывают приливы, благодаря чему эти силы получили свое название.

Приливные силы быстрее уменьшаются с расстоянием, чем сила тяжести. При увеличении расстояния в два раза притяжение между телами ослабляется в четыре раза, а приливные влияния – в восемь раз. Поэтому на Земле приливные силы, вызванные Луной, преобладают над приливными силами Солнца, хотя Солнце гораздо массивнее Луны.

Движение масс воды, натыкающихся на континенты, и трение в деформируемой земной коре приводят к выделению тепла. Источником этой тепловой энергии является вращение планеты, и оно постепенно замедляется под действием приливов. Кроме того, похоже, что приливное действие Луны направляет дрейф материковых плит земной коры – их движение заметно несимметрично в направлении запад – восток (Riguzzi et al., 2010).

Благодаря приливным силам возможно взаимодействие между вращением планеты и орбитальным движением ее спутников. В системе Земля – Луна вращение Земли вокруг своей оси гораздо быстрее, чем орбитальное движение Луны, поэтому приливный «горб» на Земле немного обгоняет Луну. Притяжение Луны к этому горбу приводит к тому, что вращение Земли постепенно замедляется, а кинетическая энергия передается Луне. При этом радиус лунной орбиты растет, также растет и период обращения Луны вокруг Земли.

Более крупный из спутников Марса, Фобос, совершает оборот вокруг планеты всего за 6 часов, тогда как период вращения Марса вокруг своей оси – 24,5 часа, чуть больше, чем у Земли. Поэтому в системе Марс – Фобос происходит передача кинетической энергии в обратную сторону – от спутника к планете. Фобос неуклонно приближается к Марсу и в ближайшие 15–20 млн лет достигнет так называемого предела Роша, где приливные силы сравняются с тяготением Фобоса, скрепляющим его в единое тело. Достигнув этого предела, Фобос разрушится, и вокруг Марса появится кольцо из камней и пыли, подобное кольцам Сатурна.

При движении спутника по эллиптической орбите его скорость максимальна в ближайшей к планете части орбиты и там же максимально приливное взаимодействие. Поэтому приливы могут изменять форму орбиты спутника. Так, орбита Луны становится более вытянутой под действием приливов, а у орбит спутников Юпитера, наоборот, вытянутость уменьшается.

Орбитальные резонансы

Есть и другая причина, по которой движение планет немного отклоняется от описанного в законах Кеплера. Это гравитационное взаимодействие между планетами. Хотя оно гораздо слабее, чем их притяжение Солнцем, за миллионы лет его влияние может накапливаться и сильно изменять орбиты. Притяжение двух планет друг к другу максимально в период противостояния – когда расстояние между ними минимально. Поэтому влияние разных планет на движение друг друга вокруг Солнца зависит от отношения их периодов обращения. Если эти периоды не образуют простого соотношения типа 1:2, 2:3 или 2:5, то противостояния происходят в разных участках орбит без строгой закономерности, а изменения орбит на больших промежутках времени стремятся к нулю. Если периоды обращения планет относятся как небольшие целые числа, то говорят, что их орбиты находятся в резонансе. В этом случае противостояния происходят в одних и тех же местах орбиты, небольшие изменения орбит постепенно накапливаются, и со временем орбиты могут сильно изменяться¹.

Последствия орбитального резонанса зависят от нескольких факторов: соотношения масс тел, отношения их периодов обращения и эксцентриситетов орбит. Такие резонансы, как 1:2, 1:3, 5:2, 3:7, как правило, приводят к быстрому изменению орбит. Если массы тел сильно отличаются (например, Юпитер и астероид), то орбита астероида становится сильно вытянутой, и он выбрасывается из Солнечной системы. Резонансы 2:3, 3:4, 4:5, напротив, могут ста-

¹ Наглядное представление об устойчивости планетных орбит можно получить в онлайн-игре Super Planet Crash (<http://www.stefanom.org/spc/>). – Здесь и далее прим. авт.

билизовать орбиты. Так, астероиды группы Хильды находятся в устойчивом резонансе 2:3 с Юпитером, а Плутон – с Нептуном.

Особенно быстрые изменения происходят при резонансе 1:2 – тогда планеты встречаются в одной и той же части орбиты, и их притяжение вытягивает их орбиты в эллипсы. В таком орбитальном резонансе находятся спутники Юпитера, Ио, Европа и Ганимед, их периоды обращения относятся как 1:2:4. Однако приливные силы противостоят вытягиванию их орбит, поэтому конечным результатом борьбы орбитального резонанса с приливом оказывается рассеяние кинетической энергии орбитального обращения спутников в нагрев их недр и постепенное приближение к Юпитеру. Благодаря такому источнику энергии на Ио происходит самый активный вулканизм в Солнечной системе, фонтаны расплавленной серы бьют на сотню километров от ее поверхности.

Другое следствие орбитальных резонансов – так называемые пробелы Кирквуда в поясе астероидов. Разные астероиды имеют самые разные периоды обращения, но таких астероидов, которые бы находились близко к резонансам 2:1, 3:1, 5:2 и 7:3 с Юпитером, нет. Малые тела, которые могли быть на этих орбитах, неизбежно перешли на эллиптические орбиты, близко подходящие к Юпитеру, и были выброшены им из пояса астероидов.

Планеты Солнечной системы в настоящее время не образуют орбитальных резонансов между собой. Астрономы древности приложили много усилий, чтобы найти простую и красивую математическую закономерность в периодах обращения планет вокруг Солнца или в радиусах их орбит, но безуспешно. Теперь мы знаем, что Солнечная система с простыми соотношениями между периодами обращения планет оказывается неустойчива. На языке античной астрономии можно сказать, что музыка сфер способна звучать вечно, только если в ней нет гармоничных созвучий, иначе она начнет быстро меняться. В древней истории Солнечной системы, по-видимому, были периоды орбитальных резонансов между планетами, и они оставили свои следы в ее современном устройстве.

Планеты земной группы

Четыре внутренние планеты Солнечной системы – Меркурий, Венера, Земля и Марс – объединяются в земную группу. Они состоят из металлического ядра и силикатных мантии и коры, в отличие от планет-гигантов. Луна, хотя и не является планетой, по химическому составу также близка к планетам земной группы (рис. 1.2).

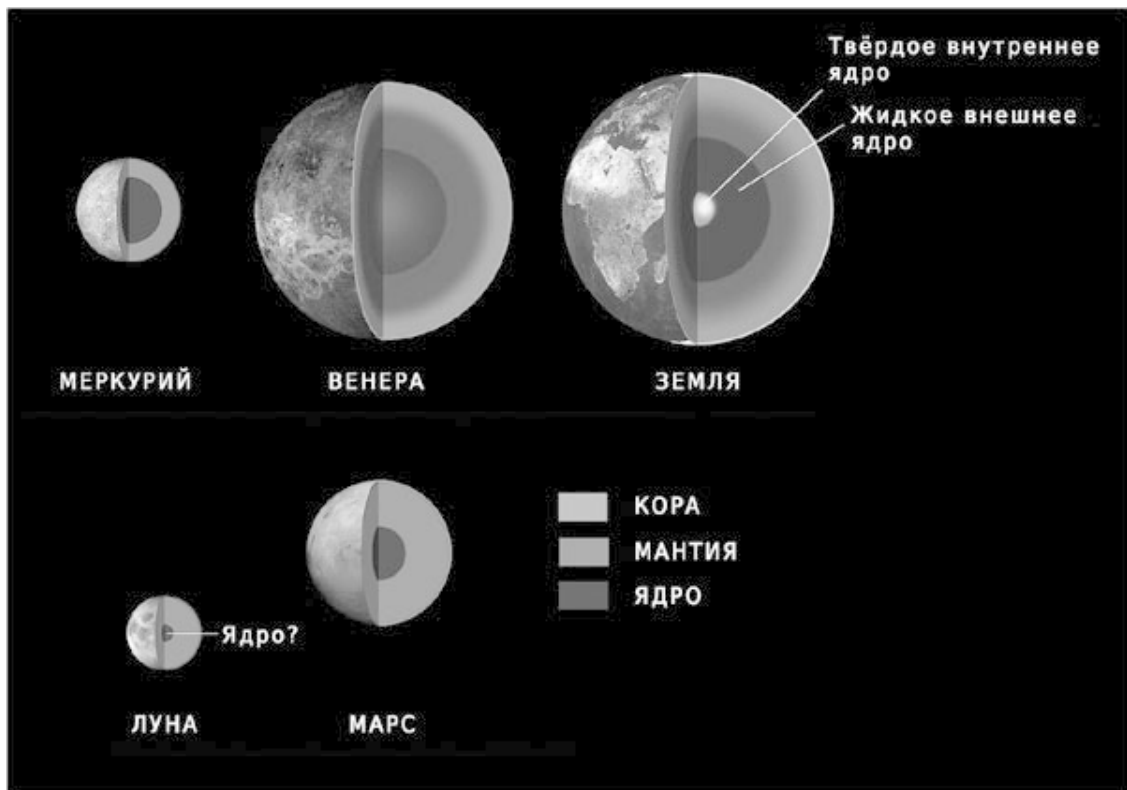


Рис. 1.2. Относительные размеры и внутреннее строение планет земной группы

Таблица 1.1. Сравнение планет земной группы

Планета	Диаметр (км)	Масса (относительно Земли)	Средняя плотность (г/см ³)	Период осевого вращения (сутки)	Наклон оси вращения тела к плоскости его же орбиты (градусы)	Период орбитального обращения (сутки)
Меркурий	4880	0,055	5,43	58,7	0,01	88,0
Венера	12 100	0,815	5,24	243	177,3	225
Земля	12 750	1	5,51	1	23,5	365
Марс	6750	0,107	3,93	1,05	25,2	687
Луна	3470	0,012	3,35	28	6,7	27,3

Однако по другим параметрам эти планеты сильно различаются между собой (табл. 1.1). Так, Земля имеет азотно-кислородную атмосферу умеренной плотности и большое количество жидкой воды на поверхности. Венера покрыта сверхплотной атмосферой из углекислого газа, которая создает сильнейший парниковый эффект и повышает температуру на поверхности

планеты до 460 °С. Воды на Венере нет ни в жидком виде, ни в виде паров в атмосфере. Атмосфера Марса также состоит в основном из углекислого газа, но ее плотность в 5000 раз меньше плотности атмосферы Венеры. Марс отличается холодным климатом, и небольшое количество воды, сохранившееся на нем, находится в твердом виде в полярных шапках и в толще грунта в средних широтах. Меркурий не имеет атмосферы вовсе, температура его поверхности колеблется от –170 на ночной до 400 °С на дневной стороне. Земля обладает достаточно сильным магнитным полем, магнитные поля Марса и Меркурия примерно в 100 раз слабее и не защищают эти планеты от солнечного ветра (потока заряженных частиц из солнечной короны), на Венере магнитное поле не обнаружено. Земля и Марс совершают один оборот вокруг своей оси примерно за 24 часа, тогда как Меркурий и Венера – за 59 и 243 суток соответственно. Все планеты вращаются вокруг своей оси против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса, и только Венера – по часовой стрелке.

Планеты-гиганты

Юпитер является крупнейшей из планет Солнечной системы. Его масса превышает массу всех других планет, спутников, астероидов и комет вместе взятых. Средняя плотность Юпитера составляет 1,3 г/см³, что означает преобладание легких элементов – водорода и гелия – в составе планеты. Видимая поверхность Юпитера, судя по неравномерным движениям отдельных частей, является плотным слоем облаков, а не поверхностью жидкости или твердого тела. Мощное магнитное поле Юпитера собирает заряженные частицы солнечного ветра с большого объема, их падение на полюса планеты вызывает мощные полярные сияния.

Система спутников Юпитера была подробно изучена при помощи наземных телескопов, орбитального телескопа «Хаббл», пролетных зондов «Пионер-10, – 11», «Вояджер-1, – 2», «Улисс», «Кассини», «Новые горизонты» и особенно подробно – искусственным спутником Юпитера «Галилео».

Четыре крупнейших спутника Юпитера – Ио, Европа, Ганимед и Каллисто – были открыты Галилеем в 1610 году при помощи первого в мире телескопа (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Четыре крупнейших спутника Юпитера.
Слева направо: Ио, Европа, Ганимед, Каллисто.
Размеры Ио примерно равны размерам Луны

Их диаметры – от 3100 км (Европа) до 5200 км (Ганимед), что сравнимо с размерами нашей Луны и даже планеты Меркурий. Периоды их обращения вокруг Юпитера составляют от 1,77 суток (Ио) до 16,7 суток (Каллисто). Измерения плотности показывают, что Ио состоит из скальных пород, Европа имеет водную мантию и ледяную кору общей толщиной около 100 км, а Ганимед и Каллисто состоят из льда на 70–80 %. Кроме четырех крупных спутников вокруг

Юпитера обращаются еще четыре малых спутника: Метида, Адрастея, Амальтея и Теба. Все они обращаются внутри орбиты Ио, их размеры не превышают 250 км, а периоды обращения составляют от 7 до 16 часов. Еще Юпитер имеет 59 нерегулярных спутников размером в единицы или десятки километров, с периодами обращения от 130 до 1077 суток.

Вторая по величине планета Солнечной системы – Сатурн. Подобно Юпитеру, он состоит преимущественно из водорода и гелия, причем доля водорода больше, чем в составе Юпитера. Плотность Сатурна минимальна среди всех планет Солнечной системы, всего около $0,69 \text{ г/см}^3$, поэтому его масса почти втрое меньше массы Юпитера при сопоставимых размерах.



Рис. 1.4. Крупные спутники Сатурна.
Верхний ряд, слева направо: Мимас, Энцелад, Тетия, Диона, Рея, Титан.
Нижний ряд: Гиперион, Япет, Феба

Система спутников Сатурна столь же многочисленна, как и система Юпитера (рис. 1.4). Крупнейший спутник Сатурна, Титан, своим диаметром (5150 км) лишь немного уступает Ганимеду. Еще четыре спутника – Тетия, Диона, Рея и Япет – имеют размеры 1000–1500 км, два ближайших к планете, Мимас и Энцелад, – 400 и 500 км, остальные спутники не превышают в длину 260 км. Всего вокруг Сатурна обращается 24 регулярных спутника и 38 нерегулярных.

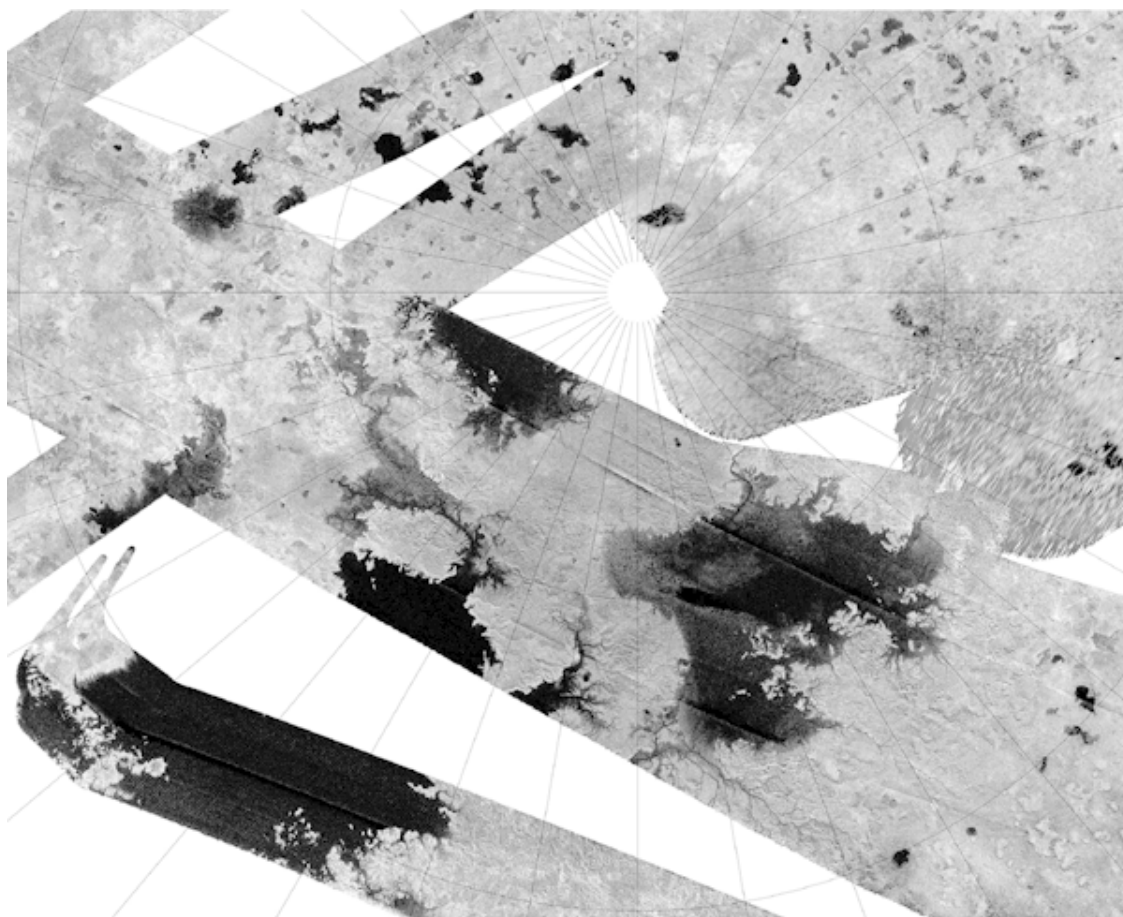


Рис. 1.5. Карта северного полушария Титана по данным радарных съемок «Кассини» (NASA)

Титан уникален среди всех спутников тем, что он имеет плотную атмосферу. Кроме того, Титан – единственное кроме Земли тело Солнечной системы с озерами и реками на поверхности (рис. 1.5). Правда, при температуре $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ эти озера и реки состоят из жидких углеводородов (метана и этана) и текут по скалам из водяного льда. Атмосфера Титана состоит из азота с примесью метана. Под действием ультрафиолета в верхних слоях атмосферы образуются сложные углеводороды, которые создают желтую дымку, скрывающую поверхность спутника.

Остальные крупные спутники Сатурна состоят из водно-аммиачного льда с примесями силикатных минералов. Поверхность Япета, Дионы и Реи делится на переднее (по ходу орбитального движения) и заднее полушария, которые различаются цветом и рельефом; передние полушария Дионы и Реи заметно светлее задних, а у Япета, напротив, переднее полушарие черное как копоть, а заднее яркое, как свежий снег.

Энцелад находится в орбитальном резонансе 2:1 с более массивной Дионой. Сочетание орбитального резонанса и приливных воздействий Сатурна приводит к разогреву недр спутника и рождению гейзеров: из разломов льда в районе южного полюса Энцелада бьют фонтаны воды, которые преодолевают его тяготение. Замерзшие кристаллики льда оказываются на орбите вокруг Сатурна и образуют его самое внешнее рассеянное кольцо (кольцо E). По данным зонда «Кассини», выбрасываемая вода содержит углекислый газ, аммиак, синильную кислоту и сложные углеводороды.

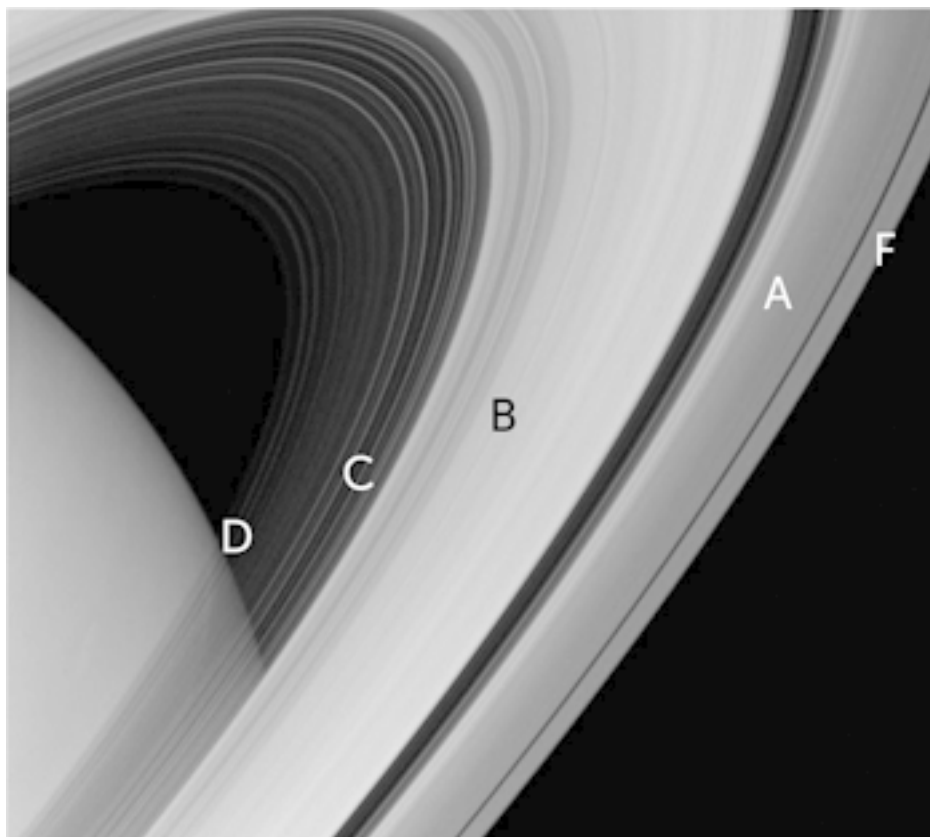


Рис. 1.6. Тонкая структура колец Сатурна.
Буквами обозначены основные кольца

Кольца Сатурна – самая заметная часть его системы (рис. 1.6.). Сейчас кольца известны у всех четырех планет-гигантов, но только у Сатурна они плотны и отражают почти столько же света, сколько сама планета. Кольца состоят из ледяных частиц размером от миллиметров до десятков метров.

Толщина колец не превышает 1 км. Считается, что кольца возникли при распаде одного или нескольких спутников, затормозившихся за счет приливного взаимодействия с Сатурном и пересекших предел Роша. Структура колец поддерживается за счет взаимодействия со спутниками. Так, щель Кассини, разделяющая кольца А и В, поддерживается орбитальным резонансом 2:1 с Мимасом, выбрасывающим частицы из этой щели. Несколько мелких спутников обращаются вблизи внешнего края колец и даже среди колец: это Атлас, Прометей, Пандора, Пан, Янус и Эпиметей. Они называются «спутниками-пастухами», так как их воздействие удерживает частицы колец от перехода на другие орбиты. Например, Атлас поддерживает четкий внешний край кольца А. Янус и Эпиметей движутся по очень близким орбитам, радиус которых различается всего на 50 км, и периодически меняются местами.

Две внешние планеты Солнечной системы, Уран и Нептун, относятся к ледяным гигантам. Их диаметр – около 50 000 км (в четыре раза больше Земли и почти в три раза меньше Юпитера), а средняя плотность составляет около 1,3 (Уран) и 1,6 (Нептун) г/см³. Они состоят в основном из воды, метана и аммиака в жидком и твердом состояниях, а на долю водорода и гелия приходится менее 10 %. Атмосферы Нептуна и особенно Урана значительно спокойнее, чем атмосфера газовых гигантов; устойчивые вихри заметны редко. Ось вращения Урана наклонена на 97 градусов относительно плоскости орбиты, поэтому смена времен года

на нем происходит совсем не так, как на других планетах, а полюса получают в среднем за год больше тепла, чем экваториальные районы. Уран и Нептун обладают мощным магнитным полем, однако в отличие от других планет их магнитные полюса далеки от географических. Магнитная ось Урана наклонена на 59 градусов относительно оси вращения, Нептуна – на 47 градусов. Если магнитное поле газовых гигантов и планет земной группы порождается конвективными потоками в ядре, то для ледяных гигантов предполагаемый источник магнитного поля – жидкая водно-аммиачная прослойка ближе к поверхности.



Рис. 1.7. Крупнейшие спутники Урана. Слева направо: Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания и Оберон

Известно 27 спутников Урана и 14 спутников Нептуна. Пять спутников Урана – Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания и Оберон – достаточно велики, чтобы иметь форму шара (рис. 1.7.). Диаметр Миранды – 470 км, четыре остальных достигают размеров 1000–1500 км, состоят из льда и небольшого каменного ядра. Все они, особенно Миранда и Ариэль, имеют следы тектонической активности и обновления поверхности. 13 внутренних спутников Урана – мелкие, до 130 км, вращающиеся среди колец Урана и испытывающие заметное приливное торможение. Со временем их ждут распад и превращение в новые кольца либо столкновение с планетой.

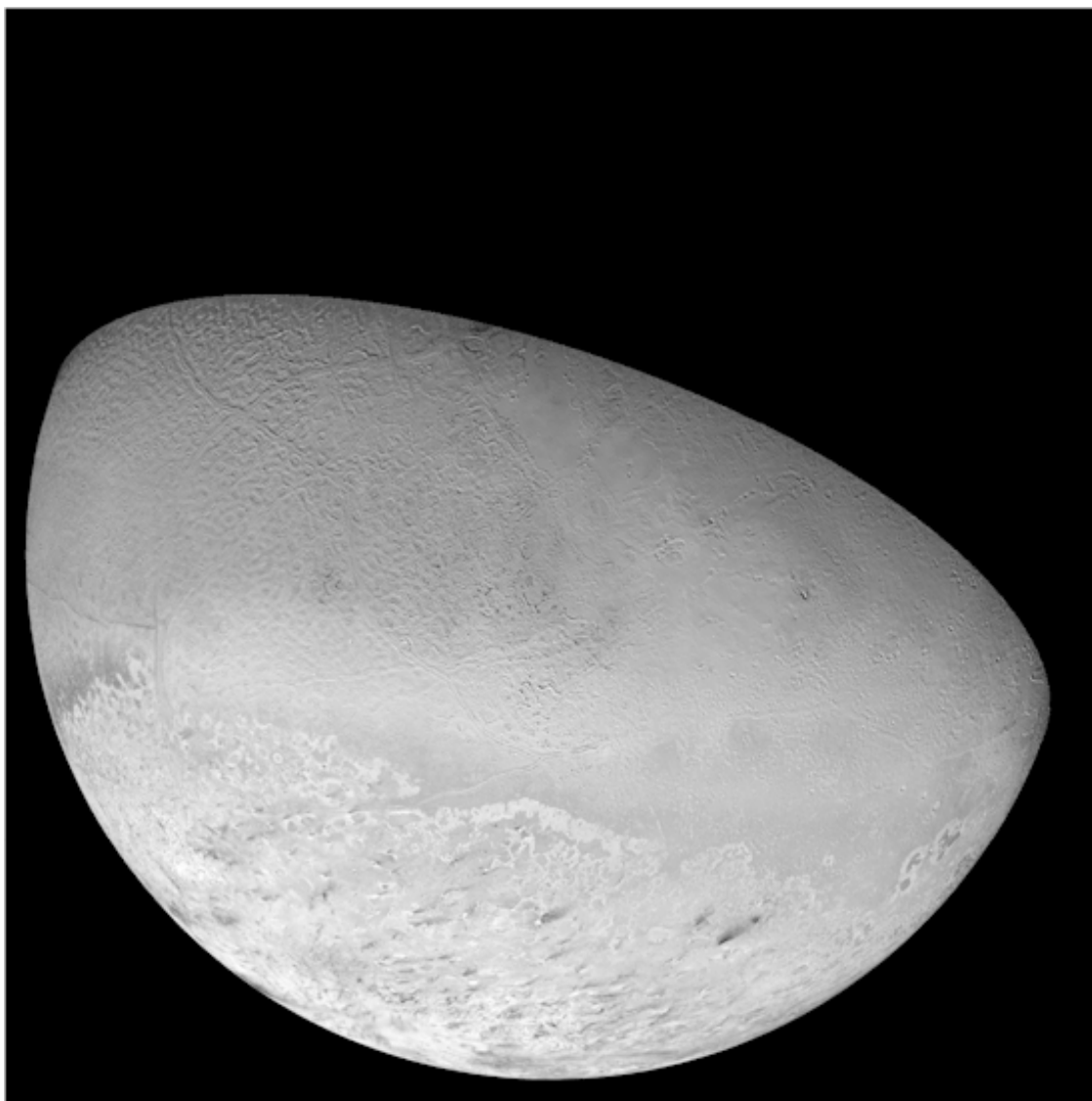


Рис. 1.8. Тритон

В системе Нептуна есть один крупный спутник – Тритон (рис. 1.8.) диаметром 2700 км (несколько меньше Луны), семь мелких внутренних спутников, очень близких к планете, и пять удаленных от планеты мелких нерегулярных спутников. Тритон обращается вокруг Нептуна в обратном направлении, как нерегулярный спутник, хотя его орбита практически круговая и наклонена лишь на 24 градуса относительно экватора планеты. Его плотность $2,07 \text{ г/м}^3$ свидетельствует о большой доле каменных пород по сравнению с другими спутниками Урана и Нептуна. Состав Тритона и характер его орбиты заставляют предположить, что раньше Тритон был самостоятельной карликовой планетой, вроде Плутона, и был захвачен Нептуном при сближении. На поверхности Тритона заметны следы тектонической активности и гейзеры, извергающие азот. Активность этих гейзеров поддерживает разреженную азотную атмосферу, ее давление примерно в 50 000 раз ниже давления атмосферы Земли.

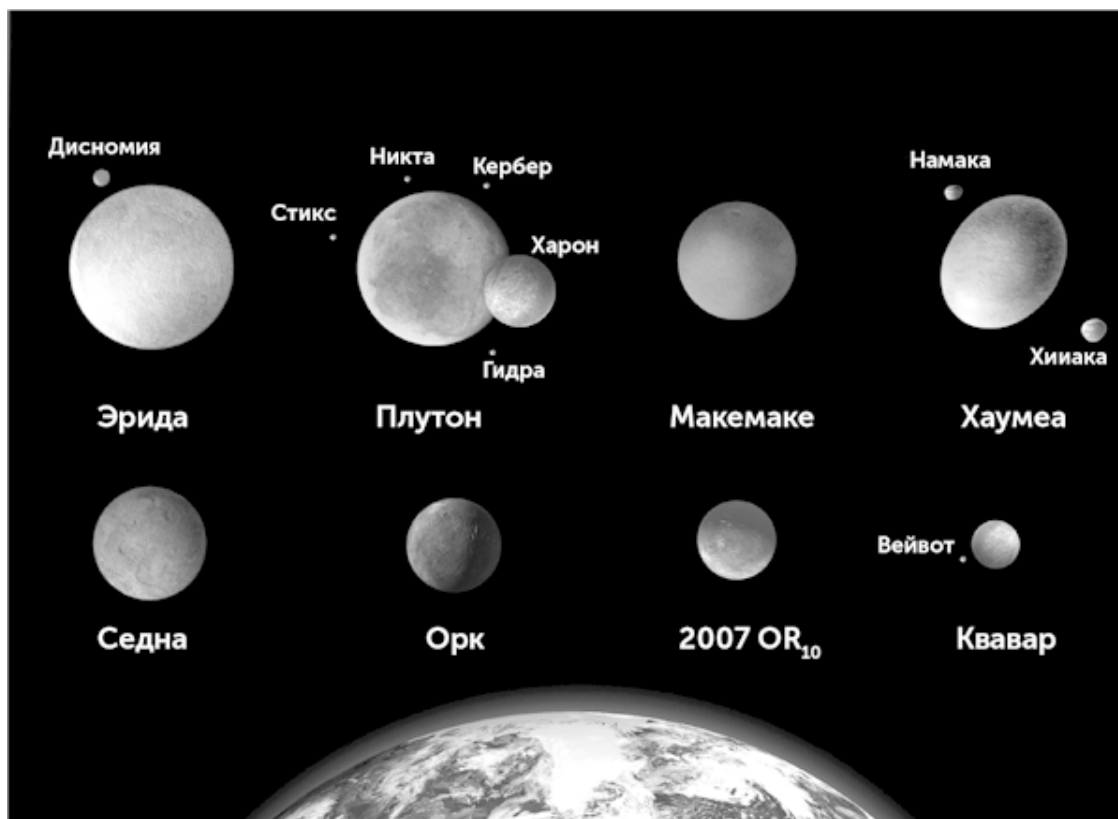


Рис. 1.9. Объекты пояса Койпера

За Нептуном находится так называемый пояс Койпера (рис. 1.9). Он состоит из небольших ледяных объектов. Первый открытый объект пояса Койпера, Плутон, долгое время считался девятой планетой Солнечной системы. Когда был уточнен его диаметр (2400 км, в полтора раза меньше Луны), и особенно после открытия других похожих объектов, Плутон стал первым в новой категории карликовых планет. К ним относят объекты достаточно крупные, чтобы принять шарообразную форму, но недостаточно тяжелые, чтобы очистить окрестности своей орбиты от других тел. В эту категорию кроме Плутона попали крупнейший астероид Церера и три крупных тела пояса Койпера: Эрида, Макемаке и Хаумеа.

Тела пояса Койпера состоят в основном из водяного, метанового и аммиачного льда.

Многие из них имеют коричневую или красную поверхность. Этот цвет им придает толин – сложная смолоподобная смесь органических веществ, которая образуется под действием радиации на метановый и аммиачный лед. Плутон и Эрида с диаметром около 2400 км остаются самыми крупными телами пояса Койпера. Всего же их сейчас известно более тысячи. У многих тел пояса Койпера есть спутники, иногда довольно крупные. Харон, крупнейший спутник Плутона, по массе лишь в 9 раз уступает Плутону.

Орбиты тел пояса Койпера разнообразны. Большинство из них («холодное население пояса Койпера») имеют орбиты, близкие к круговым и почти в той же плоскости, что орбиты планет. Они делают оборот вокруг Солнца за 270–310 лет. К ним относится, например, Кваввар. Другие, такие как Макемаке и Хаумеа («горячее население»), при тех же периодах обращения отличаются большим наклоном орбиты, до 30 градусов.

Плутон находится ближе к Солнцу, пересекает орбиту Нептуна, но опасных сближений не происходит, потому что его орбита наклонена на 15 градусов к плоскости орбиты Нептуна. Известно более 100 объектов с похожими орбитами (например, Орк) – они называются «плутино» и движутся в орбитальном резонансе 2:3 с Нептуном (период обращения – 240

лет). Наконец, есть так называемые обособленные объекты, которые находятся дальше всего от Солнца. К ним относятся, например, Эрида (период обращения – 561 год) и Седна (период обращения – около 11 400 лет).

Глава 2

Происхождение Солнечной системы. Экзопланеты²

Протопланетные диски

Формирование звезд, наблюдаемое и в настоящее время, происходит в газовой-пылевых облаках. Такие облака под собственной тяжестью сжимаются и распадаются на фрагменты. По мере сжатия отдельных фрагментов небольшое случайное вращение, которое имело облако до сжатия, усиливается – по закону сохранения момента импульса если вращающиеся тела приближаются к центру вращения, то скорость вращения должна возрасти (так фигуристы на льду прижимают руки к телу, чтобы ускорить свое вращение). В случае газового облака взаимодействие вращения и силы тяжести приводит к тому, что облако принимает форму диска. Вдоль оси вращения сжатие происходит беспрепятственно, а в плоскости диска газ и пыль могут падать к центру, только потеряв по какой-либо причине скорость вращения. Центральное сгущение сжимающегося фрагмента облака – протозвезда – образуется еще до того, как фрагмент сожмется в диск. Гравитационная энергия падающего в протозвезду газа разогревает ее, и еще до начала термоядерных реакций светимость протозвезды может в сотни раз превышать ее будущую светимость в качестве обычной звезды. Примерно через миллион лет газ из диска в основном попадает в звезду, и светимость ее поддерживается уже только термоядерными реакциями. Известным примером звезды на этой стадии эволюции является Т Тельца. Остаток диска, имеющий массу порядка 10 масс Юпитера, постепенно образует планеты (рис. 2.1).

² Большая часть информации в этой главе взята из двух обзоров: Montmerle, Augereau, Chaussidon, Gounelle, Marty, Morbidelli, 2006. *Earth, Moon and Planets* 98, doi: 10.1007/s11038-006-9087-5; Crida, 2009, <http://arxiv.org/abs/0903.3008>. Другие источники указаны в тексте.

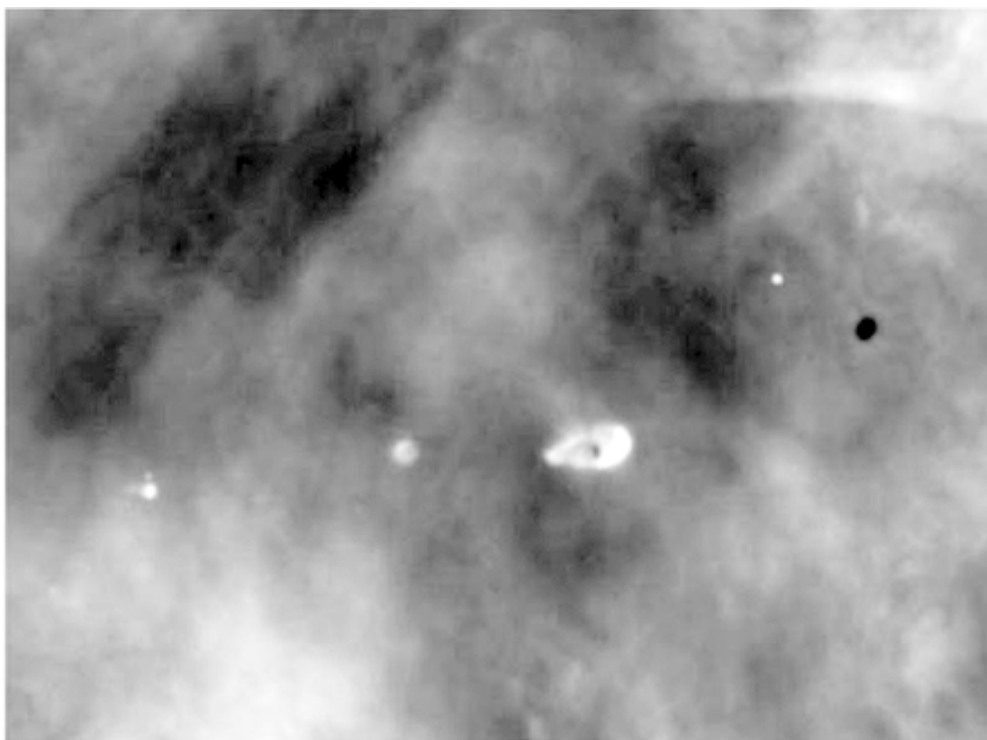


Рис. 2.1. Протопланетный диск в туманности Ориона. Снимок космического телескопа «Хаббл»

Древнейший известный твердый материал, попавший в руки ученых, – так называемые досолнечные зерна (presolar grains). Эти частицы микронных размеров, найденные внутри метеоритов, состоят из тугоплавких минералов – карбида кремния, алмаза, оксидов алюминия и титана, оливина и пироксена. Досолнечные зерна отличаются по изотопному составу от остального вещества Солнечной системы. Например, они часто сильно обогащены тяжелым изотопом кальция ^{44}Ca . Этот изотоп получается из радиоактивного титана ^{44}Ti с периодом полураспада 60 лет, который, в свою очередь, возникает в больших количествах при вспышках сверхновых. Следовательно, досолнечные зерна образовались в конце жизни различных звезд в процессе сброса их оболочек – как тихого (звездный ветер), так и взрывного (вспышки сверхновых).

Самые древние твердые тела Солнечной системы, кальций-алюминиевые включения, тоже входят в состав метеоритов, но они крупнее, до миллиметра в размере, и в их составе есть и менее тугоплавкие материалы. Возраст всех кальций-алюминиевых включений, определенный с высокой точностью уран-свинцовым методом, одинаков и составляет 4568 млн лет. Момент образования кальций-алюминиевых включений принимается за точку отсчета существования Солнечной системы (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Хронология образования Солнечной системы

0,5–2 млн лет до начала	Вспышка сверхновой, загрязнившая протопланетное облако радионуклидами ^{26}Al и ^{60}Fe
0,2–0,3 млн лет до начала	Центр молекулярного облака начинает сгущаться в Протосолнце
0	Образование кальций-алюминиевых включений. Протосолнце набрало большую часть массы и высветило большую часть гравитационной энергии
0–2 млн лет	Образование хондр
0,2–2,5 млн лет	Образование планетезималей размерами до 10 км
1–3 млн лет	Олигархический рост планетных зародышей размером до 7000 км (во внутренней Солнечной системе) и до 15 000 км (в зоне планет-гигантов)
3–10 млн лет	Образование Юпитера и Сатурна, первый этап обеднения пояса астероидов
3–100 млн лет	Столкновения планетных зародышей и слияние их в планеты земной группы
60–100 млн лет	Образование Луны после столкновения Тейи с Землей
600–650 млн лет	Период нестабильности во внешней Солнечной системе. Разрушение первичного пояса Койпера. Поздняя тяжелая бомбардировка во внутренней Солнечной системе. Второй этап обеднения пояса астероидов

Кальций-алюминиевые включения тоже несут в себе изотопные следы вспышек сверхновых в виде избытка ^{26}Mg и ^{60}Ni – продуктов распада радионуклидов ^{26}Al и ^{60}Fe с периодами полураспада 730 000 лет и 2,6 млн лет соответственно. Следовательно, образование Солнечной системы произошло вскоре после вспышки сверхновой в этом районе космоса. Ударная волна от вспышки сверхновой могла стать толчком, запустившим сжатие облака.

Пока не очень понятно, как соотносится изотопная хронология твердых тел Солнечной системы и возраст Солнца. Наиболее вероятно, что кальций-алюминиевые включения конденсировались, когда Протосолнце высветило большую часть гравитационной энергии и температура внутренних частей диска упала ниже 1500 °C. Этот момент наступил примерно через 200 000–300 000 лет после начала образования Солнца.

Следующим поколением твердых тел Солнечной системы стали хондры. Это силикатные шарики размером до нескольких миллиметров, составляющие основную часть материала самых обычных метеоритов – хондритов. Хондры состоят из таких минералов, как оливин (MgFeSiO_4), пироксен ($(\text{Mg, Fe, Ca})\text{Si}_2\text{O}_6$), полевой шпат ($(\text{K, Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), а также имеют примеси фосфатов кальция, сульфида железа, самородных железа и никеля. Структура хондр указывает на их образование при быстром (не более минуты) нагревании до примерно 1000 °C и таком же быстром охлаждении. Что могло быть причиной такого кратковременного нагрева – непонятно. Рассматриваются версии коротких вспышек молодого Солнца, столкновений метеоритов и ударных волн в протопланетном диске. Эпоха образования хондр началась с момента появления кальций-алюминиевых включений и продолжалась примерно 2 млн лет.

Метеориты по минеральному составу делятся на три основных класса – железные, каменные хондриты и каменные хондриты (рис. 2.2). Хондриты наиболее многочисленны и состоят из хондр, небольшой доли кальций-алюминиевых включений и мелкозернистого матрикса, соединяющего крупные зерна. В состав матрикса часто входят вода и органические соединения. В некоторых хондритах доля органики достигает 30 %. Железные метеориты и каменные хондриты более однородны и имеют следы полного расплавления. Скорее всего, железные метеориты и каменные хондриты являются осколками крупных, диаметром более 100 км, астероидов, дифференцировавшихся на железное ядро и силикатную мантию, а хондриты никогда не входили в состав крупных тел и сохраняют древнейшие минералы Солнечной системы в неизменном виде. Железные метеориты и каменные хондриты в среднем на 1–2 млн лет моложе хондритов, но самые древние из них – ровесники древнейших хондритов и кальций-алюминиевых включений.



Рис. 2.2. Спицы метеоритов:
А – каменный хондрит; Б – железный метеорит; В – каменный хондрит

Образование планетезималей

Размер первых твердых частиц Солнечной системы, кальций-алюминиевых включений и хондр не превышал 1 см. Для того чтобы образовались астероиды и планеты, мелкие частицы должны были сталкиваться между собой и слипаться. Для частиц размером до 10 см основную роль в слипании играют электростатические взаимодействия. Тела километровых размеров (планетезимали) удерживаются вместе своей гравитацией. Долгое время было необъяснимо, как могли образоваться километровые тела, потому что в размерном классе метров-десятков метров столкновения по всем моделям должны приводить к разрушению тел, а не к их росту. Точнее, метровые тела могут увеличиваться за счет столкновения с мелкой пылью, но моделирование показывает, что рост за счет пыли отстает от разрушения за счет столкновений между телами сравнимых размеров. Другим слабым местом небулярной теории образования Солнечной системы было взаимодействие пыли с газом. Газ в протопланетном диске движется по окружности со скоростью меньше орбитальной, так как его дополнительно поддерживает давление нижележащих слоев газа. Пылинка в таких условиях должна тормозиться в газе и падать на Солнце в течение нескольких тысяч лет.

Обе этих проблемы решаются, если газовая часть протопланетного диска была турбулентна и в ней крутилось множество устойчивых вихрей. В этом случае пылинки падают не на Солнце, а к центру ближайшего вихря. В центре вихря скорости столкновения пылинок сильно уменьшаются, а их плотность возрастает, что позволяет метровым частицам слипаться в километровые. Образование планетезимали в вихре занимает не более 10 000 лет, но как долго мог продолжаться период массового рождения планетезималей, не очень ясно. По разным оценкам, он мог составлять от 100 до 500 000 лет.

После того как значительная часть пыли собралась в планетезимали, начинается рост планетных зародышей, в котором основную роль играют их гравитационные взаимодействия. Более крупные тела растут быстрее. Когда появляются первые планетные зародыши размером до 1000 км, их гравитационное воздействие искажает орбиты мелких планетезималей, что повышает скорость их столкновений. В этих условиях мелкие планетезимали уже не могут объединяться друг с другом, а могут только присоединяться к более крупным. Этот период называется «стадией олигархического роста». В течение 1–2 млн лет олигархический рост приводит к объединению большей части твердого вещества в районе планет земной группы и пояса астероидов примерно в сотню планетных зародышей размером 3000–6000 км и массой, составляющей 1–10 % массы Земли (в промежутке между массами Луны и Марса). Небольшая часть планетезималей сохранилась до наших дней как астероиды.

Образование планет-гигантов

Планеты-гиганты образовались дальше от Солнца, за «линией льда», где конденсация воды в ледяные пылинки резко увеличила массу материала, доступного для построения планет. Масса Юпитера в 314 раз больше массы Земли, Сатурна – в 94, Урана – в 14 и Нептуна – в 17 раз. Юпитер и Сатурн состоят в основном из водорода и гелия, на долю тяжелых элементов приходится, по разным оценкам, 15–30 масс Земли в составе Юпитера и 10–20 – Сатурна. Уран и Нептун сложены в основном водой, метаном и аммиаком, доля водорода и гелия в них составляет порядка одной массы Земли.

Зародыши планет-гигантов образовались так же, как и зародыши планет земной группы, но благодаря доступности льда их масса была намного больше, порядка 10 масс Земли. После этого они начали накапливать газ протопланетного диска, и по достижении примерно 25 масс Земли поглощение газа стало лавинообразно нарастать. Большая часть газа была набрана Юпитером и Сатурном в течение всего 10 000 лет. Начальные стадии роста, однако, должны были занять от 3 до 10 млн лет, иначе гравитационное влияние Юпитера помешало бы образованию планетных зародышей во внутренних областях Солнечной системы. Уран и Нептун, скорее всего, росли еще дольше и не успели набрать достаточно большую массу к моменту рассеяния протопланетного диска.

Образование планет земной группы

После того как во внутренней части Солнечной системы остается около 100 планетных зародышей, их дальнейший рост замедляется, так как из-за их малого числа вероятность столкновений сильно снижается. Постепенно взаимное притяжение зародышей искажает их орбиты, и столкновения все же происходят. Несмотря на большие скорости столкновения, превышающие 10 км/с, зародыши объединяются благодаря гравитации. Во всех численных моделях этого процесса в течение 50–100 млн лет из зародышей образуются от трех до пяти планет с размерами от Марса до Земли и устойчивыми орбитами.

В районе пояса астероидов исходно находятся планетные зародыши общей массой до двух масс Земли, однако формирования планет из них не происходит из-за влияния Юпитера. Те зародыши, которые оказались с ним в орбитальном резонансе, быстро переходят на все более вытянутые эллиптические орбиты и либо врезаются в формирующиеся внутренние планеты, либо проходят вблизи Юпитера и выбрасываются его тяготением за пределы Солнечной системы. Поскольку орбиты зародышей постоянно меняются из-за взаимодействия друг с другом, в резонансе с Юпитером рано или поздно оказывается большинство из них. Кроме того, из-за вытянутой формы орбит столкновения планетных зародышей в этом районе происходят на очень больших скоростях, и образуется много мелких обломков. В итоге за 100 млн лет в

районе пояса астероидов остается около 1 % исходной массы в виде небольших тел на эллиптических орбитах, заметно наклоненных к плоскости эклиптики.

Происхождение Луны и спутников Марса

Теория происхождения Луны должна объяснять несколько ключевых фактов. Во-первых, система Земля – Луна обладает большим моментом импульса, из которого основная часть приходится на орбитальное движение Луны. Во-вторых, породы Луны по химическому составу похожи на земную мантию, но в них практически нет воды, азота, инертных газов и других летучих веществ. Содержание умеренно летучих элементов, таких как сера, хлор, натрий и свинец (они переходят из минералов в газ при температурах 500–700 °С), в породах Луны в несколько раз ниже по сравнению с Землей. Железное ядро Луны очень мало и составляет около 1 % ее массы (на ядро Земли приходится более 30 % массы планеты). В-третьих, изотопный состав всех элементов в лунном грунте точно такой же, как на Земле. Это очень важно, потому что по соотношениям изотопов кислорода, кремния и титана Земля, Марс и все семейства метеоритов четко отличаются друг от друга. Иначе говоря, судя по изотопному и химическому составу, похоже, что Луна – это вырванный кусок земной мантии с небольшой примесью железа, который после отделения был полностью расплавлен и лишился всех летучих веществ.

К середине XX века, пока состав Луны не был известен, в астрономии конкурировали три гипотезы ее происхождения. По одной из них Луна когда-то была самостоятельной карликовой планетой, захваченной Землей. По другой она образовалась одновременно с Землей при росте последней в центре вихря в газовой-пылевой диске (эта гипотеза сейчас подтверждена для спутников планет-гигантов). По третьей центробежная сила на быстро вращающейся молодой Земле привела к отрыву фрагмента земной коры и мантии и выходу его на околоземную орбиту.

Как только на кораблях «Аполлон» и советских автоматических зондах «Луна» на Землю были доставлены образцы лунного грунта, его анализ показал, что захват отдельно сформированной Луны исключается из-за ее точного совпадения с Землей по изотопному составу. Рост Луны в газовой-пылевой вихре вместе с Землей тоже исключается, потому что по гафний-вольфрамовым изотопным часам она сформировалась через 50 млн лет от начала Солнечной системы, когда газ давно рассеялся. Отрыв фрагмента Земли из-за быстрого вращения не объясняет полное расплавление Луны и требует нереалистично высокой скорости вращения – около двух часов на оборот. По современным представлениям, Луна появилась в результате масштабного столкновения Земли с другой протопланетой из выброшенных на околоземную орбиту расплавленных обломков.

Как описано выше, образование планет земной группы включало несколько десятков крупных столкновений. Многие из них проходили по касательной, что приводило к выбросу в космос большой массы обломков. Согласно изотопным часам, Луна на 50 млн лет моложе Солнечной системы, т. е. удар, породивший ее, был одним из последних в истории формирования Земли.

Численное моделирование удара, приводящего к образованию Луны (Canup, Asphaug, 2001), показало, что масса столкнувшегося тела (оно получило название Тейя) должна быть примерно равна массе Марса (в 10 раз меньше массы Земли); угол удара – от 30 до 50 градусов в зависимости от предшествующего вращения Земли; выброшенный в космос материал происходит в основном из мантий Земли и Тейи, что соответствует малому содержанию железа в Луне. Энергия удара разогревает Землю настолько, что вся ее поверхность представляет собой океан магмы, окутанный плотной и протяженной атмосферой силикатных паров, CO₂ и водяного пара. Благодаря этой атмосфере изотопный состав Земли и Луны выравнивается. Обломки на околоземной орбите собираются в Луну в течение всего нескольких лет, началь-

ная высота ее орбиты составляет 25 000–30 000 км (примерно в 15 раз меньше современной). Через 1–2 млн лет поверхность Земли охлаждается достаточно для появления первых твердых пород земной коры.

Спутники Марса – Фобос и Деймос – очень малы и ранее считались захваченными астероидами. Однако прямое измерение массы Фобоса по влиянию на орбиты космических зондов показало, что его плотность ($1,8 \text{ г/см}^3$) необычно мала для астероидов. По данным спектрального анализа, поверхность Фобоса сложена филлосиликатами – рыхлыми слоистыми минералами, обычными на поверхности Марса. Эти данные означают, что Фобос сложен материалами, выброшенными с Марса при ударах метеоритов, и в отличие от Луны его поверхность никогда не была полностью расплавлена. Возраст Фобоса пока неизвестен, не исключено, что он накапливал выбрасываемые с Марса обломки на протяжении миллиардов лет.

Эволюция системы Земля – Луна

Радиус лунной орбиты увеличивается из-за приливного взаимодействия с Землей. Момент импульса Земли передается Луне, при этом Луна отодвигается от Земли, а вращение Земли замедляется. Часть энергии вращения при этом рассеивается в тепло. Скорость передачи вращения Луне сильно зависит от приливного трения – меры сопротивления Земли приливным движениям океана и мантии.

Современные измерения при помощи лазерных дальнометров показали, что Луна отдаляется от Земли со скоростью около 3,5 см в год. Рассчитанное из этих данных приливное трение оказывается довольно большим, и получается, что возраст Луны не может превышать 1,5 млрд лет, что противоречит изотопным датировкам и другим данным. В распоряжении ученых есть также данные о скорости вращения Земли за последние 600 млн лет, полученные путем изучения суточных и годовых колец прироста ископаемых кораллов, а также подсчета слоев ритмитов – отложений морских осадков, оставленных приливо-отливными течениями. Эти данные показывают, что темпы замедления вращения Земли колебались, отличаясь в несколько раз в разные эпохи. Колебания связаны с изменением расположения материков и океанов. Мелководные моря тормозят приливную волну сильнее, чем глубокие океаны. Современное расположение материков, перекрывающих экватор в трех местах, тормозит приливную волну гораздо больше, чем было, например, в палеогене – с океаном Тетис между Евразией и Африкой и без Панамского перешейка.

Самая полная последовательность ритмитов, отлагавшаяся в течение 60 лет в позднем протерозое (620 млн лет назад), известна из формаций Рейнелла и Элатина в Австралии (Williams, 2000). Она показывает, что в ту эпоху продолжительность суток составляла 21,8 часа, а радиус лунной орбиты был на 6 % меньше современного. Для более древних эпох такие отложения, к сожалению, неизвестны.

Происхождение спутников планет-гигантов

Юпитер, Сатурн и Уран обладают системой из нескольких регулярных спутников, обращающихся в плоскости экватора планеты. У Юпитера и Урана есть по четыре крупных спутника примерно равной массы, а у Сатурна – один большой (Титан), четыре поменьше (Тетия, Диона, Рея, Япет), более 20 совсем мелких спутников и кольца. Какие закономерности определяют количество, размеры и орбиты регулярных спутников?

Общей чертой всех систем регулярных спутников является их масса. Для каждой из планет-гигантов все ее спутники, вместе взятые, составляют около 0,02 % массы планеты. Более того, для Нептуна, потерявшего свои регулярные спутники после захвата Тритона, это соотношение тоже верно: масса Тритона составляет 0,025 % массы Нептуна. Масса регулярных

спутников была меньше этого значения, иначе Тритон, захваченный на ретроградную орбиту, при взаимодействии с регулярными спутниками потерял бы скорость и упал на планету. Это одинаковое отношение масс спутников и планеты неожиданно, потому что планеты-гиганты имеют разный состав и разную историю роста. Сатурн и Юпитер прошли стадию лавинообразного поглощения газа с увеличением массы планеты в 5–10 раз за 1 млн лет, а в истории Урана и Нептуна такого не было.

Первое успешное численное моделирование роста спутников, в котором получились системы, очень близкие к реальным, было опубликовано в 2006 году (Canup & Ward, 2006). В моделировании получился такой сценарий: вокруг растущего гиганта возникает газово-пылевой диск, более плотный, чем большой диск, вращающийся вокруг Солнца. Газ в этом диске падает на планету и несет с собой пыль. Однако высокая плотность пыли и наличие в околосолнечном диске планетезималей приводят к тому, что в околопланетном диске начинают расти спутники. Уже при размерах в несколько километров торможение спутников газом становится незаметным. По мере роста более крупные спутники поглощают или выбрасывают в планету мелких собратьев, и в диске остается от четырех до пяти спутников примерно одинаковых размеров. Однако, когда спутники вырастают очень сильно, до 0,01 % массы планеты, их притяжение вызывает спиральные волны плотности в газовом диске, и взаимодействие с этими волнами приводит к тому, что спутники опять начинают терять орбитальный момент и приближаться к планете. Чем крупнее спутник, тем быстрее это происходит. Поэтому первое поколение спутников по очереди, начиная с ближайшего, падает в планету, и когда из них остается один, начинается рост следующего поколения. Этот механизм приводит к ограничению на массу системы спутников в 0,02 % массы планеты. Пока идет поглощение газа, все возникающие спутники неизбежно поглощаются планетой. За это время может родиться и погибнуть больше десяти поколений спутников. Лишь когда газ в околосолнечном диске кончается, торможение спутников прекращается, и те спутники, что дожили до этого момента, остаются с планетой на миллиарды лет. Итоговый вид системы зависит от того, в какой момент цикла роста спутников кончился газ. Если это произошло в момент расцвета поколения спутников, то их будет от четырех до пяти примерно равной массы, как у Юпитера и Урана. Если же рост остановился в тот момент, когда остался последний спутник одного поколения и начало расти следующее, то получается система Сатурна с огромным Титаном и несколькими более мелкими спутниками (все остальные спутники Сатурна, вместе взятые, в 15 раз легче Титана).

Отсюда следует, что если бы рост Юпитера остановился чуть раньше или позже, то у него мог возникнуть крупный спутник, в три-четыре раза массивнее Ганимеда и Титана и немного не дотягивающий до массы Марса. В других звездных системах известны более тяжелые газовые гиганты, вплоть до 10 масс Юпитера. У таких гигантов возможно появление спутников массой почти с Землю, а если они находятся на подходящем расстоянии от звезды, то на таком спутнике будет жидкая вода и атмосфера. Так что масса планеты Пандора из фильма «Аватар», обитаемого спутника газового гиганта (72 % от земной), находится у верхнего предела масс спутников, а Полифем, вокруг которого она обращается, должен быть гораздо массивнее Юпитера.

Дальше авторы расширили свою модель и вычислили происхождение колец Сатурна (Canup, 2010). Большинство спутников планет-гигантов имеют смешанный силикатно-ледяной состав, и в них содержится до 30–50 % скальных пород. Однако кольца Сатурна практически чисто ледяные, и несколько его ближайших спутников (Тетис, Энцелад, Мимас и все мелкие внутренние спутники) – тоже. Мы помним, что у Титана были «братья» – два-три спутника сравнимого размера, которые начали расти одновременно с ним, но ближе к Сатурну, и были им со временем поглощены. Когда они приближались к Сатурну и переходили предел Роша, эти спутники начинали разрушаться. Сначала от них отрывались менее плотные внешние слои – ледяная кора и подледный океан. Более плотное скальное ядро держалось дольше и падало

в Сатурн целиком, а вокруг планеты оставалось ледяное кольцо. Поэтому практически оно и состоит из чистого льда.

Пока газ из околосолнечного диска поступал, его падение в Сатурн быстро утаскивало туда же образующиеся кольца. Но когда приток газа прекратился и угроза падения в Сатурн миновала, кольцо от последнего распавшегося спутника осталось на орбите на миллиарды лет. Его масса была в 100–300 раз больше современной. Взаимодействие частиц кольца между собой приводило к размыванию границ кольца: часть обломков приближалась к Сатурну и в итоге падала в него, а другие отдалялись и выходили за предел Роша. Там они собирались в новые спутники, состоящие почти из чистого льда. Далее приливное взаимодействие с Сатурном поднимало их орбиты, и они освобождали место у внешнего края кольца для появления следующих спутников. По мере рассеивания кольца каждый новый спутник получался меньше предыдущего. Поэтому сначала кольцо породило 1000-километровую Тефию, потом Энцелад и Мимас с диаметрами 500 и 400 км, а затем еще более мелкие спутники. Мельчайшие из этих спутников, 20-километровый Пан и 7-километровый Дафнис, могут быть совсем молодыми – их возраст может составлять менее 10 млн лет.

Нерешенные вопросы в моделях происхождения планет

Хотя многие особенности строения Солнечной системы хорошо описываются моделями происхождения, которые были кратко рассмотрены выше, есть и несколько серьезных нерешенных вопросов. Вот основные из них:

- при образовании планет земной группы из зародышей орбиты планет в моделях получаются более вытянутыми и наклонными, чем в реальности;
- Марс в моделях оказывается крупнее, чем в реальности, часто – самой крупной планетой земной группы;
- осевое вращение планет земной группы определяется случайными событиями столкновения планетных зародышей, и в моделях оси вращения планет ориентированы случайно. В реальности оси вращения Меркурия и Венеры практически перпендикулярны к плоскости орбиты, а Земли и Марса – отклоняются от перпендикуляра не более чем на 30 градусов. Кроме того, реальное осевое вращение Меркурия и Венеры необъяснимо медленное;
- при образовании планет-гигантов начало поглощения газа (который, как мы помним, вращается со скоростью меньше орбитальной) должно приводить к быстрому (в течение тысяч лет) приближению планеты к Солнцу, которое может остановиться только в свободной от газа ближней окрестности Солнца, т. е. внутри орбиты Меркурия;
- в районе орбиты Нептуна не должно было быть достаточно материала для формирования планеты такой массы.

Первое затруднение связано с ограничениями численного моделирования. Чтобы вычисления заняли разумное время, приходится уменьшать число моделируемых объектов, при этом из рассмотрения выпадают мелкие планетезимали и обломки, образующиеся при столкновении планетных зародышей. Масса этих мелких тел хотя и меньше, чем масса моделируемых планетных зародышей, но сравнима (различие, по разным оценкам, составляет от двух до пяти раз). Взаимодействие растущих планет с мелкими телами в среднем приводит к скруглению и уменьшению наклона орбит планет, а мелкие тела при этом выбрасываются в пояс астероидов.

Причины различия массы Марса между моделями и реальностью пока непонятны. Историю осевого вращения планет мы вскоре рассмотрим. А два последних расхождения между моделями формирования планет и реальностью получили блестящее объяснение в рамках так называемой модели из Ниццы, названной по месту работы ее авторов, опубликованной в трех статьях в журнале *Nature* (Gomes et al., 2005; Tsiganis et al., 2005; Morbidelli et al., 2005). Эта

модель объясняет и другие особенности Солнечной системы – количество и параметры орбит нерегулярных спутников планет-гигантов, орбиты объектов пояса Койпера, комет, астероидов-тройянцев, а также «позднюю тяжелую бомбардировку» через резонансные взаимодействия Юпитера и Сатурна в первый миллиард лет существования Солнечной системы.

Осевое вращение планет земной группы и особенности Венеры и Меркурия

Вращение планет-гигантов имеет однозначное происхождение: оно определяется в основном вращением падавшего в них газа в период лавинообразного накопления, которое, в свою очередь, связано с исходным вращением протопланетного диска. Поэтому Юпитер и Сатурн вращаются в одну сторону с периодом около 10 часов. Периоды вращения большинства крупных астероидов тоже близки к этому значению, и происхождение этого вращения аналогичное – из газового вихря, в центре которого росла планетезималь (Pravec, Harris и Michalowski, 2002). Плохо понятно происхождение вращения Урана и Нептуна – их периоды практически равны и составляют около 16 часов, но ось вращения Урана лежит почти в плоскости его орбиты. Вращение планет земной группы при их образовании из планетезималей и планетных зародышей должно было сильно и непредсказуемо измениться при косых столкновениях планетных зародышей. Наклоны осей вращения планет в итоге должны были стать случайными, периоды вращения – тоже, в пределах от нескольких часов до нескольких суток, со средним значением примерно тех же 10 часов. Однако из четырех планет земной группы две (Земля и Марс) имеют наклоны в пределах 30 градусов и периоды вращения около 23–25 часов, а Венера и Меркурий – малые наклоны и огромные периоды вращения 243 и 59 суток. Хуже того, Венера вращается в обратную сторону. Теоретически Венера могла получить обратное вращение за счет удачных направлений скользящих ударов в процессе образования, но ось вращения тогда была бы направлена куда попало.

В случае Земли на основе закона сохранения момента импульса можно рассчитать, что сразу после образования Луны на орбите высотой 25 000–30 000 км период вращения Земли должен был быть около шести часов. Это лучше согласуется со «средним по системе» 10-часовым периодом вращения. У Марса подобных тормозящих спутников нет, Фобос немного ускоряет осевое вращение Марса, но его влияние пренебрежимо мало. С Венерой и Меркурием же ситуация совершенно непонятная.

Возможно, их медленное вращение – это результат приливного торможения? Но обе планеты не имеют спутников, а приливное торможение Солнца вроде бы недостаточно сильно. Есть, однако, старая, еще XIX века, гипотеза, что Меркурий когда-то в древности был спутником Венеры. Так как его масса в пять раз больше массы Луны, то и приливные эффекты должны быть мощнее. Численное моделирование системы Венера – Меркурий (Van Flandern, Harrington, 1976) показывает, что при сравнимом с Землей приливном торможении Венеры Меркурий должен был за 0,5–1,5 млрд лет отдалиться от Венеры на расстояние около 450 000 км и перейти на эллиптическую орбиту вокруг Солнца. При этом период осевого вращения Меркурия к моменту расставания с Венерой должен был составлять около 40 суток, период вращения Венеры – меньше, порядка 20 суток. Опасных сближений Меркурия с Венерой в дальнейшем не происходит. Последующее замедление вращения Меркурия и скругление орбиты объясняется приливным взаимодействием с Солнцем, однако эксцентриситет (мера вытянутости) его орбиты остается самой большой из всех планет.

Гипотеза о Меркурии как о бывшем спутнике Венеры объясняет сильную потерю вращения этими планетами и вытянутость орбиты Меркурия, но вызывает другие сложные вопросы. Например, орбита Меркурия после расставания с Венерой оказывается гораздо больше, чем в реальности, и нет никаких причин для уменьшения ее размеров. Непонятно, как могла обра-

зоваться система Венера – Меркурий. Меркурий слишком велик и, главное, слишком богат железом, чтобы, подобно Луне, сформироваться из обломков, выброшенных при косом столкновении планетного зародыша с Венерой. Возможно, если удар был совсем скользящим, то планетный зародыш полетел дальше, оставив на Венере часть своей силикатной мантии, но в таком случае он должен был бы упасть на планету окончательно на следующем обороте. Условия для захвата спутника при скользящем столкновении пока не удалось подобрать.

Другое возможное объяснение изменения осей вращения планет – их слабые приливные взаимодействия друг с другом. Расчеты этих взаимодействий (Laskar и Robutel, 1993) показывают, что в широком диапазоне периодов вращения (приблизительно от 100 до 400 часов для Меркурия и от 20 до 100 часов для Венеры) положение оси вращения испытывает хаотические колебания на промежутках времени в миллионы лет, при этом наклон оси может изменяться от 0 до 90 градусов. Следовательно, когда периоды вращения Меркурия и Венеры проходили эти диапазоны, положение их осей изменилось и стерло все следы исходного положения. Когда приливное трение Солнца затормозило их вращение сильнее и вывело из диапазона неустойчивости, наклоны осей Меркурия и Венеры перестали изменяться и застыли на современных значениях.

Для Марса аналогичные хаотические колебания наклонения от 0 до примерно 60 градусов должны происходить и при его современном периоде вращения (24,5 часа), и мы не видим их только из-за большой длительности. Впрочем, свидетельства этих колебаний могут быть найдены при изучении геологии и климата Марса. Земля формально тоже находится в зоне неустойчивости, но наличие Луны подавляет колебания наклона земной оси, благодаря чему климат Земли на протяжении миллиардов лет был более устойчив, чем климат прочих планет.

Чрезвычайно медленное обратное вращение Венеры пока не нашло окончательного объяснения. Не исключено, что причиной его послужило взаимодействие гравитационных и тепловых приливов, действующих со стороны Солнца на очень массивную атмосферу Венеры.

Поздняя тяжелая бомбардировка и миграция планет-гигантов

Поверхность Луны, Меркурия и в меньшей степени Марса покрыта ударными кратерами. Измерение возраста лунных кратеров показало, что большинство из них появились практически одновременно, 3,9 млрд лет назад – примерно через 650 млн лет после начала образования Солнечной системы. На Земле следы этой бомбардировки были стерты последующей геологической активностью. Распределение размеров кратеров показывает, что большая часть массы выпадавших тел приходится на объекты размером от 1 до 50 км, т. е. планетезимального размерного класса. Причины такого резкого повышения количества столкновений через 500 млн лет после окончания формирования планет земной группы и стабилизации пояса астероидов долгое время были непонятны.

Модели формирования планет-гигантов указывают на неизбежность их миграции к Солнцу при быстром накоплении газа. В 2000-е годы уже было понятно, что это не фантазия теоретиков, – были открыты многочисленные «горячие Юпитеры» у других звезд. Температура этих планет может превышать 2000 °С, а период обращения вокруг звезды – измеряться часами.

Миграция планеты-гиганта приводит к рассеиванию планетезималей и не позволяет образоваться планетам земного типа. Впрочем, если миграция происходит в течение менее 10 000 лет, то заметная часть скальных планетезималей остается во внутренней части системы, и к ним добавляются ледяные планетезимали из внешних областей. В этом случае в зоне жизни возможно образование водяных планет с массой от одной до пяти масс Земли и покрытых океаном толщиной в сотни километров. Такие планеты также были обнаружены у других звезд.

Следовательно, модели формирования планет-гигантов верны хотя бы для части планетных систем, а для описания нашей Солнечной системы надо вводить дополнительные механизмы, предотвратившие миграцию планет к Солнцу. Одна из подсказок тоже была получена из исследований экзопланет – «горячие Юпитеры» часто являются единственной гигантской планетой в системе, а у нашего Солнца планет-гигантов четыре. Возможно, дело в их взаимодействии?

Расчеты показали, что несколько планет-гигантов действительно могут удерживать друг друга от падения к Солнцу. Однако для этого необходимо, чтобы их орбиты были гораздо ближе друг к другу, чем в реальности. В этом случае Юпитер и Сатурн в процессе быстрого накопления газа проделывают в газовом диске общее разреженное кольцо. Сатурн не мигрирует внутрь, так как внутри него газ уже поглощен Юпитером, а миграция Юпитера останавливается, когда он оказывается в орбитальном резонансе 3:2 с Сатурном. Для системы из четырех планет-гигантов миграция тоже останавливается, если орбиты планет были близки друг к другу. Моделирование показало наличие шести устойчивых конфигураций, общей чертой которых является орбитальный резонанс 3:2 между Юпитером и Сатурном.

Авторы «модели из Ниццы» начали с попытки объяснить строение пояса Койпера, позднюю тяжелую бомбардировку и согласовать устойчивые конфигурации планет-гигантов с наблюдаемой в реальности, где Юпитер и Сатурн близки к резонансу 5:2 и все расстояния между планетами-гигантами гораздо больше, чем в устойчивых конфигурациях (рис. 2.3).

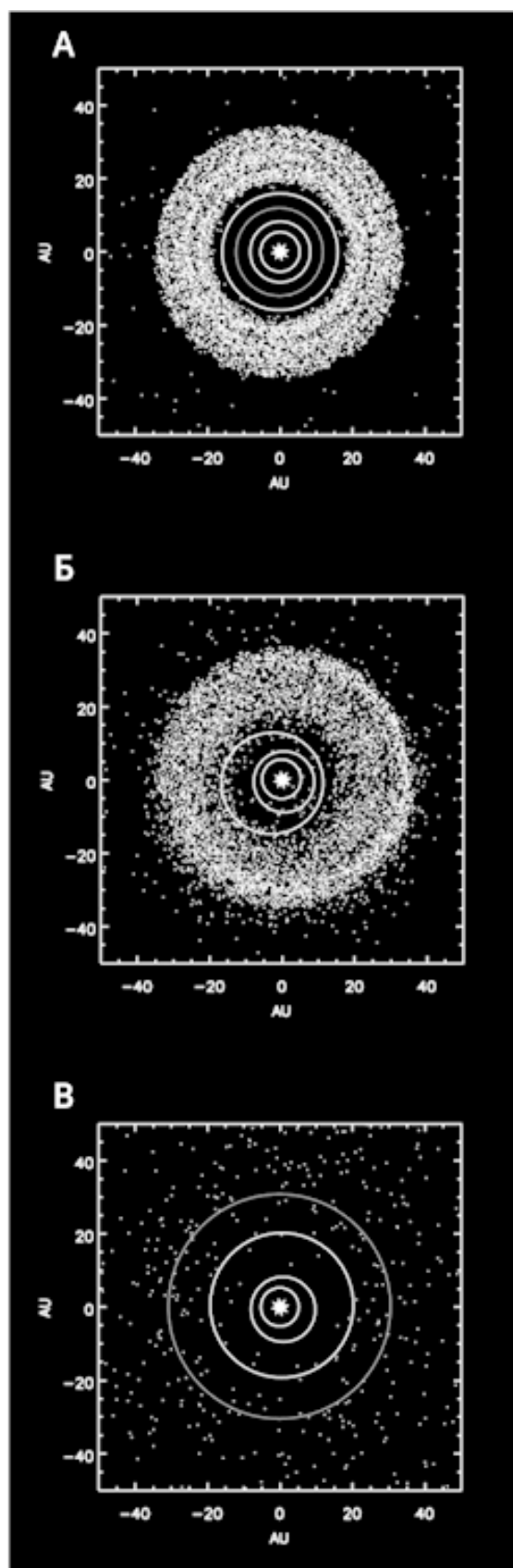


Рис. 2.3. Орбиты планет-гигантов (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна) к моменту рассеивания межпланетного газа (А), в период поздней метеоритной бомбардировки (Б) и современные (В).
Белые точки — объекты пояса Койпера

Во всех этих конфигурациях радиус орбиты внешней планеты-гиганта не превышает 17 а. е. (астрономических единиц, 1 а. е. = 150 млн км – радиус орбиты Земли). Для сравнения: современная орбита Нептуна проходит в районе 30 а. е. от Солнца. Причиной изменения орбит планет в «модели из Ниццы» является обширный, плотный древний пояс Койпера, состоящий из ледяных планетезималей общей массой примерно 35 масс Земли. Близкие проходы планетезималей около Урана и Нептуна переводят планетезимали на более близкие к Солнцу и более вытянутые орбиты, а орбиты планет, напротив, отдаляются от Солнца. Заброшенные внутрь планетезимали далее проходят вблизи Сатурна, расширяя и его орбиту. Близкие встречи с Юпитером приводят к другим последствиям – планетезимали оказываются выброшенными из Солнечной системы либо переходят на очень вытянутые эллиптические орбиты с огромными периодами обращения, переходя в облако Оорта. Часть планетезималей попадает на орбиты, проходящие близко к Солнцу, где сталкивается с планетами земной группы. Обмен импульсом между Юпитером и выброшенными планетезималами приводит к тому, что Юпитер, в отличие от других планет-гигантов, немного приближается к Солнцу. Наконец, примерно через 500–600 млн лет смещение Сатурна наружу и Юпитера внутрь приводит к тому, что они попадают в дестабилизирующий резонанс 1:2. Орбиты Юпитера и Сатурна становятся эллиптическими и приводят к близким прохождениям Сатурна и двух внешних планет. Их орбиты, в свою очередь, тоже вытягиваются. Нептун быстро начинает проходить в густонаселенной части пояса Койпера, и поток планетезималей во внутренние области Солнечной системы возрастает тысячекратно. На планетах земной группы в это время происходит поздняя тяжелая бомбардировка. Динамическое трение Нептуна в поясе Койпера приводит к тому, что его орбита опять скругляется, но на гораздо большем расстоянии от Солнца. Радиус орбиты Сатурна тоже растет, и он уходит от резонанса 1:2. Пояс Койпера разрушается, его ледяные объекты частью выброшены из Солнечной системы, частью столкнулись с планетами и спутниками, частью перешли на вытянутые кометные орбиты или в облако Оорта. В поясе Койпера остается около 1 % его первоначальной массы. В процессе миграции Юпитера внутрь и во время резонанса 2:1 с Сатурном пояс астероидов опять дестабилизируется, астероиды рассеиваются ближе и дальше к Солнцу и тоже вносят вклад в позднюю тяжелую бомбардировку внутренних планет. Это вторая стадия обеднения пояса астероидов, в процессе которого его масса падает примерно с 1 до 0,1 % массы Земли.

«Модель из Ниццы» предсказывает, что Нептун до момента поздней тяжелой бомбардировки с большой вероятностью был ближе к Солнцу, чем Уран, что согласуется и с большей массой Нептуна. Предсказываемые близкие прохождения планет-гигантов объясняют происхождение нерегулярных спутников – это были пролетавшие мимо планетезимали, которые были захвачены на орбиты спутников при прохождении около двух планет. Еще одна странная деталь Солнечной системы, получающая объяснение в рамках этой модели, – астероиды-тройяны. Это мелкие объекты, которые движутся по орбите Юпитера на 60 градусов окружности впереди и позади планеты, в так называемых Лагранжевых точках L4 и L5. В настоящее время они находятся в устойчивом равновесии: тройяны не могут покинуть свои орбиты под воздействием других планет, но и новые тела не могут попасть в их ряды. Однако в момент резонанса 1:2 Сатурна и Юпитера объекты в точках L4 и L5 были неустойчивы. Мигрирующие планетезимали могли входить и выходить в эти точки, но после выхода Юпитера из резонанса с Сатурном оставшиеся астероиды были заперты там на миллиарды лет.

Прыгающий Юпитер

При всех достоинствах «модели из Ниццы», объясняющей очень многие свойства Солнечной системы, в ней есть к чему придраться. Прежде всего, в процессе миграции Юпи-

тера он проходит орбитальные резонансы с Марсом. Хотя это не очень опасные резонансы, такие как 1:7, но их достаточно, чтобы орбита Марса вытянулась и стала заходить в пояс астероидов. Ничего подобного в Солнечной системе мы не видим. Второй недостаток относится к судьбе нерегулярных спутников. Модель хорошо предсказывает захват планетезималей на орбиты нерегулярных спутников Сатурна, Урана и Нептуна, но система нерегулярных спутников Юпитера устроена точно так же и, видимо, должна иметь такое же происхождение – путем захвата планетезималей при близких проходах двух планет-гигантов. В классической «модели из Ниццы» близких встреч Юпитера с другими планетами не было. Однако в 10–20 % запусков моделирования происходили близкие проходы Урана или Нептуна мимо Юпитера, отчего его орбита изменялась скачкообразно, пропуская опасный резонанс с Марсом, а ледяной гигант (т. е. Уран или Нептун) попадал на удаленную от Солнца орбиту или оказывался выброшенным из системы. В дальнейшем авторы «модели из Ниццы», изучая структуру орбит астероидов, показали, что «прыгающий Юпитер» лучше соответствует реальности, чем плавное изменение орбит в исходной модели (Morbidelli et al., 2010). Более того, сценарий, в котором ледяной гигант выбрасывается из Солнечной системы, тоже возможен: не исключено, что исходно в ней был еще один ледяной гигант, подобный Урану и Нептуну. Такие выброшенные планеты, свободно плавающие в межзвездном пространстве, в последние годы были обнаружены астрономами.

Солнечная система – норма или исключение?

На сегодня ученым известны тысячи различных экзопланет, и можно попытаться сравнить их с планетами Солнечной системы и оценить, насколько устройство нашей системы типично в галактике. Большинство открытых на сегодня экзопланет обнаружены либо методом лучевых скоростей, либо методом транзитов. Чем ближе планета к звезде, тем больше шансов ее обнаружения этими методами, потому что и затмение, и изменение скорости звезды происходит с периодичностью в один оборот планеты.

Кроме того, массивные планеты при любом способе поиска найти легче, чем малые. Поэтому не удивительно, что в начале поиска экзопланет было открыто множество «горячих Юпитеров», очень близких к звезде. С появлением более чувствительных приборов были открыты также легкие экзопланеты с массой порядка земной и даже меньше. Но в целом наши знания о других звездных системах очень отрывочны. Например, если бы мы наблюдали Солнечную систему с расстояния в 100 световых лет нашими современными приборами, то обнаружили бы только Венеру и Землю.

Даже по таким отрывочным данным понятно, что в галактике есть множество звездных систем, не похожих на Солнечную. Например, в системе HD 80606 планета-гигант обращается по сильно вытянутой эллиптической орбите, и расстояние от нее до звезды меняется в 30 раз. Есть системы, в которых одна из планет обращается вокруг звезды не в ту сторону, что остальные. Эти и другие ситуации, кстати, наблюдались во время некоторых запусков «модели из Ниццы». В период нестабильности очень малые отличия начальных условий могут привести к совершенно разным результатам, так что судьба нашей Солнечной системы могла быть совсем другой.

В Солнечной системе есть четкое разделение планет по массам: самая тяжелая силикатно-железная планета (Земля) и самая легкая из гигантов (Уран) отличаются по массе в 14 раз. Среди экзопланет очень многие имеют массу в промежутке между массами Земли и Урана. Ученым удалось измерить диаметр и рассчитать плотность части таких планет. Оказалось, что среди них есть и «мини-Нептун» с малой плотностью, и «суперземли» с плотностью примерно как у Земли.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.