



С Е Р И Я
PRiMIUS

.....

Михаил Никитин

**Происхождение
ЖИЗНИ** От туманности
до клетки



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

МОСКВА 2016

УДК 573.5
ББК 28.01
Н62

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

Никитин М.

Н62 Происхождение жизни. От туманности до клетки / Михаил Никитин. — М.: Альпина нон-фикшн, 2016. — 542 с.

ISBN 978-5-91671-584-2

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 ученых 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.

УДК 573.5
ББК 28.01

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru.

ISBN 978-5-91671-584-2

© М. Никитин, 2016
© ООО «Альпина нон-фикшн», 2016

С Е Р И Я PRIMUS

Серию PRIMUS

составят дебютные просветительские
книги ученых и научных журналистов.

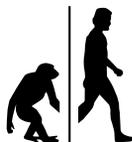
Серия появилась благодаря совместной
инициативе “Книжных проектов Дмитрия Зимина”
и фонда “Эволюция” и издается при их поддержке.

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	9
<i>Благодарности</i>	12

ЧАСТЬ I

ПЛАНЕТЫ, ПРИГОДНЫЕ ДЛЯ ЖИЗНИ

Глава 1. Строение Солнечной системы	17
Глава 2. Происхождение Солнечной системы. Экзопланеты.....	36
Глава 3. Геологическое строение Земли, Марса и Венеры	67
Глава 4. Атмосфера и климат Земли, Марса и Венеры	87

ЧАСТЬ II

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ

Глава 5. История идей о происхождении жизни	107
Глава 6. Место происхождения жизни, «первичный бульон», пицца и майонез.....	130
Глава 7. Получение нуклеотидов из продуктов атмосферной фотохимии.....	158
Глава 8. Происхождение хиральной чистоты	177
Глава 9. Механизмы копирования РНК и начало РНК-мира.....	191

Глава 10. Витамины, аминокислоты и пептиды в РНК-мире	210
Глава 11. Происхождение современных путей обмена веществ	225
Глава 12. Альтернативная биохимия и водно-углеродный шовинизм	257

ЧАСТЬ III

ОТ ДРЕВНЕЙШЕЙ ЖИЗНИ К СОВРЕМЕННЫМ КЛЕТКАМ

Глава 13. Происхождение рибосом, белков и генетического кода	291
Глава 14. Устройство геномов, механизмы копирования и происхождение ДНК	332
Глава 15. Происхождение мембран и мембранной энергетики	360
Глава 16. Происхождение фотосинтеза и древнейшие ископаемые следы жизни	387
Глава 17. Происхождение компонентов биоэнергетических систем	415
Глава 18. Происхождение эукариот	462

<i>Заключение: о случайности и закономерности в эволюции, внеземных цивилизациях и о том, зачем Земле люди.....</i>	511
<i>Библиография.....</i>	524

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 выросли 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 Мулкиджяна. 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ми, 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.

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 спут-

ник — 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 *πλανήτης* — «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.

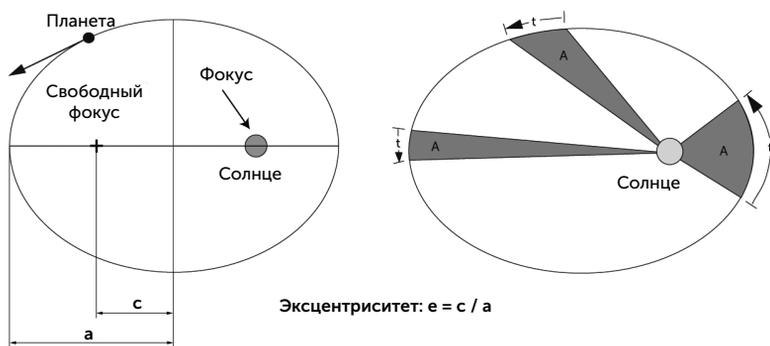


Рис. 1.1. Первый и второй законы Кеплера. Эллипсы.
 a – большая полуось эллипса, c – фокальный параметр (половина расстояния между фокусами)

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 половины межфокусного расстояния 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, — разгоняться! 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, натывающихся 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 приливному 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 орби-

ты, 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 стабилизировать 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.

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.

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).

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

ПЛАНЕТЫ, ПРИГОДНЫЕ ДЛЯ ЖИЗНИ

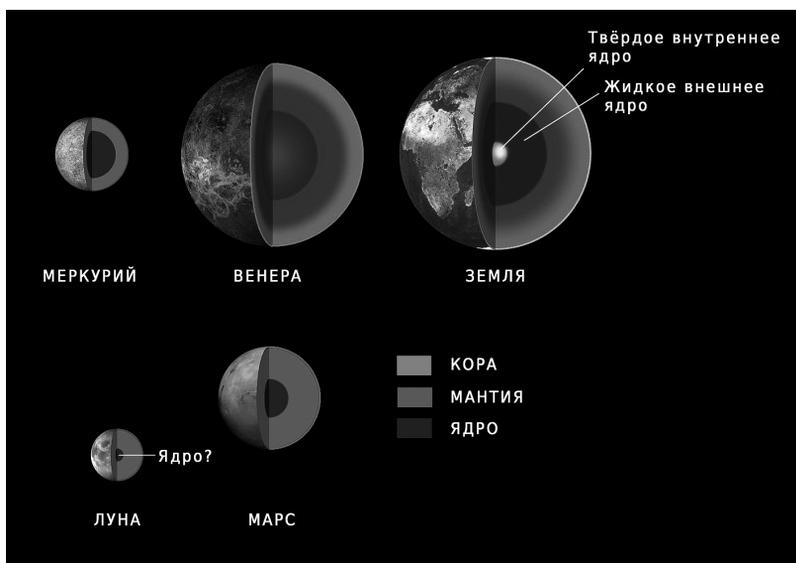


Рис. 1.2. Относительные размеры и внутреннее строение планет земной группы

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 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

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).

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 плот-

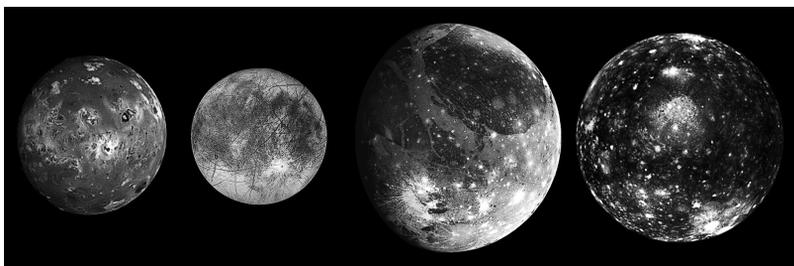


Рис. 1.3. Четыре крупнейших спутника Юпитера. Слева направо: Ио, Европа, Ганимед, Каллисто. Размеры Ио примерно равны размерам Луны

ности 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.

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 — Тетфия, 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. 1.4. Крупные спутники Сатурна.

Верхний ряд, слева направо: Мимас, Энцелад, Тетия, Диона, Рея, Титан.
Нижний ряд: Гиперион, Япет, Феба

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

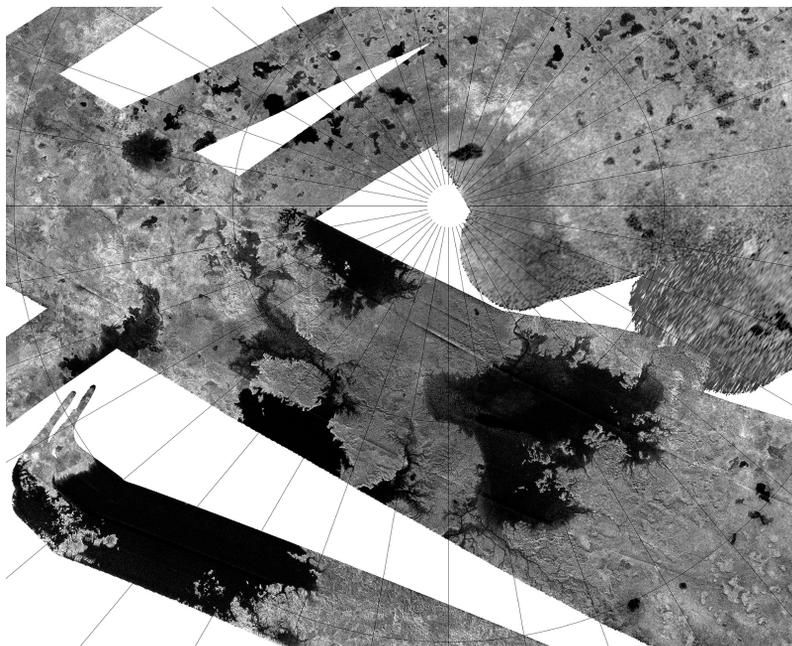


Рис. 1.5. Карта северного полушария Титана по данным радарных съемок «Кассини» (NASA)

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.

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,