

Глава 8. Дальнейшее формирование Солнечной системы и роль катастроф

8.1. Основные моменты достраивания и упорядочения Солнечной системы в первый миллиард лет после формирования планетной системы

О периоде «отладки» системы. Итак, согласно разным гипотезам, формирование первичной планетной системы могло занять всего несколько миллионов лет (Элкинс-Тантон 2017: 95), то есть происходить довольно быстро по астрономическим меркам⁹⁶. Но, возможно, оно заняло больше времени – до 50 или даже 100 млн лет, когда окончательно сформировались планеты земной группы (Лин 2008).

Но если, как делают многие космологи, разделить эволюцию Солнечной системы на две больших стадии: 1) образование протопланет из протопланетного и пылевого дисков; 2) их миграцию на устойчивые орбиты, соответствующие современному положению⁹⁷, то тогда, скорее всего, для формирования порядка в планетной системе, какой мы ее сейчас знаем, потребовались сотни миллионов лет (возможно, до 1 млрд лет или несколько больше). Тем более если исходить из того, что нынешнее поколение планет не было первым (см. выше).

И, повторим, этот период «отладки» и упорядочения был довольно бурным, включал в себя множество грандиозных катастроф, а также различные миграции, о части которых мы уже говорили. Одновременно это был период грандиозных геологических изменений в рамках планет и их спутников, в результате чего сформировались основы их структуры и оболочек.

⁹⁶ Но для этой длительности, видимо, точнее будет говорить все же о протопланетной системе.

⁹⁷ Сегодня появляются гипотезы (на основе компьютерного моделирования), которые стремятся объединить две основные модели формирования Солнечной системы: небулярную гипотезу, включающую возникновение протопланет из планетезималей, и динамическую модель (в том числе упомянутую выше модель Ниццы). Новые гипотезы говорят о том, что планетная система устанавливалась в процессе миграций протопланет. Авторы идеи объединения исходят из того, что если увеличить время на формирование ядер будущих планет, то компьютерное моделирование оказывается способным объяснить возникновение газовых гигантов (Levison *et al.* 2015).

«Массовое вымирание» планетезималей и тяжелая бомбардировка. Создание стабильного порядка, как это часто можно встретить в эволюционных процессах, потребовало ликвидации множества «излишних» объектов. А такая ликвидация происходит достаточно часто в виде «массовых вымираний» или других катастрофических событий, уменьшающих «население». О вымираниях в процессе эволюции жизни слышали все^{98*}. Бывали неоднократные «вымирания» (государств и политий, но также и населения)⁹⁹ и в социальной истории. В истории Солнечной системы такие «вымирания» происходили в результате резких движений крупных планет и общей перетасовки их местоположений.

В частности, следует упомянуть такое вероятное событие. Как мы помним, Юпитер и Сатурн вернулись во внешнюю часть Солнечной системы. При этом они оказались сцепленными на компактных, резонансных и почти круговых орбитах с Нептуном и Ураном (Батыгин и др. 2016: 23). Указанное вхождение Юпитера и Сатурна в резонанс (а произошло это в районе 600–700 млн лет от начала формирования Солнечной системы) создало мощнейшее влияние на Солнечную систему. Последняя вошла в гравитационное возбуждение, а это привело к тому, что Нептун и Уран поменялись местами и орбитами, так как ранее Уран находился дальше Нептуна.

Много времени накапливались возмущения со стороны внешнего пояса ледяных обломков, прежде чем они вывели двух гигантов из резонанса. Хаотическое взаимодействие между теперь уже нестабильными гигантами вызвало за несколько миллионов лет значительные изменения в «населении» Солнечной системы. В частности, в этом процессе они проредили пояс астероидов и пояс Койпера, в которых в результате стало в несколько раз меньше планетезималей (говорят о том, что их стало в сто раз меньше, однако это, вероятно, является преувеличением). В любом случае это, видимо, была грандиозная чистка, хотя разрушение и перенаправление планетезималей продолжалось и до, и после нее. И сегодня

⁹⁸ За последние чуть более полумиллиарда лет было пять великих массовых вымираний и около 20 менее масштабных. Наибольшее из них пермское, случившееся около 250 млн лет назад, в результате которого исчезло более 95 % морских видов и более 70 % видов наземных позвоночных (см.: Jin 2000; Shen *et al.* 2011; White 2002; Lau *et al.* 2016).

⁹⁹ Наиболее известна эпидемия чумы «черной смерти» в 1347–1348 гг. (см.: McNeill 1998).

Уран и Нептун выбрасывают планетезимали наружу, в пояс Койпера, или же к Солнцу. А Юпитер своим мощным тяготением отсылает их в облако Оорта (в котором может содержаться около 100 земных масс вещества), на самый край области гравитационного влияния Солнца (Лин 2008).

Кроме того, с описанным событием, вероятно, связана и так называемая *поздняя эпоха тяжелой бомбардировки*, точнее, особый период этой эпохи (Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005; Early... 2012). Ранняя эпоха, как мы помним, была в начале формирования планетной системы в первые миллионы или десятки миллионов лет. Поздняя эпоха тяжелой бомбардировки – это важный период в истории Солнечной системы, когда на каменные планеты выпало огромное количество метеоритных осадков в результате вышеуказанных событий. Следы поздней тяжелой бомбардировки хорошо изучены на Луне, также они подтверждены на Меркурии и Марсе (например: Сурдин 2012; Кац и др. 1984). Первоначально считалось, что эта эпоха длилась 300 млн лет (с 4,1 млрд лет назад по 3,8 млрд лет назад). Однако относительно недавние исследования показали, что она оказалась более длительной. Благодаря новым методикам исследования (Johnson, Melosh 2012) удалось установить, что поздняя тяжелая бомбардировка закончилась не 3,8 млрд лет назад, а 3,2 млрд лет назад, то есть продолжалась почти один миллиард лет. И вызвана она была, повторим, вышеуказанным изменением орбит Юпитера и Сатурна.

Не так давно также было высказано предположение, что пояс астероидов в прошлом начинался на расстоянии 1,7 а. е. от Солнца вместо сегодняшних 2,1 а. е., то есть данный пояс благодаря гравитационным воздействиям был отодвинут (Bottke *et al.* 2012). В результате этого период катастрофических столкновений с астероидами и их мощного падения на планеты земной группы продолжался довольно долго. Дело в том, что в результате миграции этого пояса и гравитационного воздействия со стороны планет-гигантов астероиды на границе пояса перешли на орбиты с большим наклоном. В итоге они начали сталкиваться с каменными планетами Солнечной системы позже, чем другие небесные тела. Некоторые из этих тел продолжали падать на Землю вплоть до 2 млрд лет назад (см.: *Ibid.*; Глуховский, Кузьмин 2012).

8.2. Столкновения и катастрофы в ранний период Солнечной системы

Станислав Лем писал, что космос есть зона катастроф, а Земля вместе с жизнью своим возникновением обязана необычной серии таких катастроф*. В этой картине мира центральное место занимает творение посредством разрушения и вызванной им перестройки системы (Лем 2004). Это, конечно, верно только отчасти, так как, повторим, в эволюции органически сочетаются периоды быстрых трансформаций и разрушений и медленных накоплений изменений*. Сами по себе разрушения не могут быть созидательными. Они становятся созидательными, только когда проделана большая подготовительная работа*. И все равно часто сначала следует откат назад, и только потом – много времени спустя – эволюция, как бы разбежавшись, начинает новое движение вперед. Однако, вне всякого сомнения, катастрофы (особенно в некоторые периоды) играют исключительно важную роль*. Такова и их роль в ранний период истории Солнечной системы.

Можно привести еще довольно образный написанный в диалектическом ключе фрагмент о способе существования космических объектов.

На самом деле этот звездно-галактический мир – беспокойный мир: в нем происходят и будут происходить бурные, неистовые и яростные процессы бифуркационной катастрофы. В нем произошли и происходят непрерывные процессы смены хаоса и порядка, устойчивости и неустойчивости, стабильности и нестабильности, симметрии, асимметрии и спонтанного нарушения симметрии; происходит катастрофическая смена притяжения и сжатия, сжатия и коллапса, коллапса и реколлапса, реколлапса и антиколлапса; происходит в нем постоянная смена буйства, неистовства и ярости в катастрофическом взрыве сверхновой звезды, в ослепительной мощности светимости квазаров и незабываемой грандиозности чудовищной светимости ядер активных галактик (Хван 2008: 193).

Наиболее известны две предполагаемые катастрофы, которые произошли в период первых ста миллионов лет. Первая – столкновение Меркурия с крупным астероидом. В результате этого касательного удара Меркурий потерял большую часть своей мантии и оболочки (Язев 2011: 48). Как известно, эта маленькая планета

имеет непропорционально большое железоникелевое ядро, в результате чего его металлическая часть составляет 60 % или более от всей его массы (Solomon 2003). Это также причина очень высокой плотности вещества планеты. Объяснения этому разные: особенности концентрации вещества в протопланетном облаке¹⁰⁰, испарение (поскольку планета близка к Солнцу) либо столкновение (*Ibid.*). Меркурий действительно загадочная планета. Существует еще более экзотическая версия, согласно которой он первоначально был расположен дальше от Солнца, однако был не самостоятельной планетой, а спутником Венеры, но затем «убежал» от нее. Эта версия объясняет сразу две проблемы: малый размер Меркурия, но более чем приличный для спутника; обратное другим планетам вращение Венеры (по отношению к вращению вокруг Солнца). Обратное вращение Венеры вызывает вопросы: почти все прочие крупные тела Солнечной системы вращаются в одном и том же направлении, совпадающем с направлением вращения самого Солнца вокруг своей оси. Основная версия по этому поводу – приливное воздействие в далеком прошлом массивного спутника, то есть Меркурия, которое не только затормозило вращение планеты, но даже слегка «раскрутило» ее в обратном направлении (Язев 2011: 57–58). Эту версию подтверждает и так называемый резонанс Меркурия и Венеры: солнечные сутки Венеры равны удвоенным звездным суткам Меркурия. Если Меркурий в прошлом был спутником Венеры, то в этой системе из двух довольно массивных тел действовали мощнейшие приливные силы (Там же: 42; см. также: Сурдин 2012: 124–25). Это должно было вызвать плавление коры обоих тел, затормозить их вращение и за несколько сотен миллионов лет поднять орбиту спутника до 420 тыс. км, что неизбежно должно было закончиться потерей Меркурия (Сурдин 2012: 124–25). Эта версия любопытна еще и тем, что показывает: число планет Солнечной системы не было предзадано в момент дефрагментации протопланетного диска.

Но есть и версия о сравнительно недавнем встречном касательном ударе крупного небесного тела (размерами не менее 200 км). Версия маловероятная, поскольку ось вращения

¹⁰⁰ Идея состоит в том, что вблизи Солнца, где формировался Меркурий, соотношение железных и каменных частиц было сдвинуто в сторону первых, и избыток железа отразился на строении планеты (Язев 2011: 48).

планеты в этом случае, скорее всего, изменила бы свое положение (перпендикулярное к плоскости орбиты). Кроме того, такое гипотетическое тело-ударник, скорее всего, не принадлежало Солнечной системе, поскольку должно было двигаться во встречном направлении (Сурдин 2012: 58).

Другой известной гипотезой о катастрофе является идея, что между 30 и 100 млн лет после формирования Солнца зародыш размером с Марс врезался в протоземлю и породил гигантское количество обломков, из которых сформировалась Луна. Столь мощный удар, конечно же, разбросал огромное количество вещества по Солнечной системе. Этот сильный удар должен был сорвать первичную атмосферу Земли. Ее современная атмосфера в основном возникла из газа, заключенного в планетезималиях. Из них сформировалась Земля, а позже этот газ вышел наружу при извержении вулканов (Лин 2008; Lin 2008). Но данная гипотеза имеет варианты. Есть красивая теория, предложенная еще в 1975 г. Уильямом Хартманом и Дональдом Дэвисом, что рядом с протоземлей миллионы лет относительно близко вращалась протопланета Тейя (Тея). В конце концов планеты столкнулись. Считается, что столкновение произошло почти по касательной и на относительно низкой скорости. Поэтому часть вещества земной мантии и Тейи были выброшены на околоземную орбиту. Из этих обломков и сформировалась Луна, которая начала обращаться по круговому пути. Интересно, что у Луны небольшое содержание железа, и это может подтверждать, что она образовалась из земной мантии (если к этому времени у Земли уже сформировалось ядро, что, согласно современным взглядам, могло иметь место).

Относительно судьбы Тейи имеются различные спекуляции. По одной из них, ее вещество слилось с земным, образовав единую планету. Кроме того, Земля в результате столкновения получила резкий прирост скорости вращения и заметный наклон оси вращения.

Но, естественно, имеются и ярые противники этой гипотезы. Например, Э. М. Галимов (2008) утверждает, что она сегодня искусственно поддерживается представителями западной, главным образом американской, научной школы.

Прочие гипотезы о столкновениях. Выше мы говорили, что Нептун в районе 600–700 млн лет от коллапса протосолнечного облака мигрировал и стал менять свою орбиту. Не так давно астрономом Юго-Западного исследовательского института в Боулдере (Колорадо) Дэвидом Несворны была выдвинута гипотеза о том, что в Солнечной системе существовало не четыре, а пять планет-гигантов. И что эта пятая планета столкнулась с Нептуном в период его миграции. Это сдвинуло Нептун к его современной орбите, а пятая планета-гигант распалась на кластер обломков, которые были выброшены Нептуном в пояс Койпера, то есть на окраину Солнечной системы¹⁰¹.

Однако этот кластер (“kernel”, то есть ядро), представляющий собой группу численностью около тысячи ледяных скал, держится достаточно сплоченно и никогда не меняет орбитальное направление, как и планеты. Он представляет собой загадку, и его наличие указывает на существенные ограничения моделей ранней Солнечной системы (Petit *et al.* 2011), которую и пытается разгадать гипотеза Несворны о распавшейся пятой планете – ледяном гиганте (см. подробнее: Taylor Redd 2015; Nesvorný 2011). Этот кластер также можно рассматривать как аналог малой планеты (подобно тому, что мы говорили о поясе астероидов).

Наконец, есть еще гипотеза об Уране. Уран, обращаясь по орбите вокруг Солнца, словно лежит на боку. Все остальные планеты обращаются на своих орбитах более «вертикально». Неизвестно, почему ось Урана так странно расположена на орбите; наиболее правдоподобная гипотеза связана с тем, что когда-то очень давно, миллиарды лет назад, он столкнулся с блуждающей планетой примерно такого же размера, как Земля, имеющей орбиту с очень большим эксцентриситетом. Такое столкновение, если оно когда-либо происходило, должно было учинить настоящий хаос в системе Урана (Саган 2016).

¹⁰¹ Обычно считалось, что Нептун при своей миграции выбросил туда планетезимали, а не обломки разрушенной им планеты. Впрочем, в настоящее время о формировании Урана и Нептуна известно так мало, что, по мнению одного астронома, «число возможных вариантов формирования Урана и Нептуна огромно». Тем более бесконечно число гипотез о неизвестных планетах. Выше уже упоминалось о девятой (пятом гиганте) планете Солнечной системы, которая должна была быть либо выброшена из Солнечной системы (став планетой-сиротой), либо перейти на ее далекие окраины (став гипотетической планетой Тюхе/Тюхеей или другой «Планетой X» в облаке Оорта). Гипотезу о планете Тюхе выдвинул в 1999 г. Д. Матис.

Таким образом, если собрать все катастрофы, то получается впечатляющая картина потерь, в результате которых только и стало возможным возникновение в Солнечной системе более или менее устойчивого состояния. Две из девяти планет (Тейя и пятый гигант) разрушены и исчезли, зато Меркурий превратился в самостоятельную планету (либо был сильно деформирован и уменьшен в размерах, если находился на современном месте); Венера стала вращаться в обратном направлении; Нептун заметно отделился от Солнца, выбросив остатки разбитой планеты на ее окраину в пояс Койпера; а резонанс Юпитера и Сатурна вызвал мощную бомбардировку земных планет и расчистил пояс астероидов и пояс Койпера.

Происходили ли эти конкретные катастрофы или нет, но мы вправе ожидать, что формирование столь мощной системы, как Солнечная, должно было сопровождаться катастрофами (Кусков и др. 2009: 143). История космоса, Земли, жизни и общества насыщена катастрофами. У Айзека Азимова даже есть научно-популярная книга с характерным названием «Выбор катастроф» (Азимов 2000)¹⁰². Поэтому ожидать, что формирование Солнечной системы шло гладко и мирно, было бы наивным. Ее история представляет собой длинный перечень состоявшихся и несостоявшихся столкновений (Хейзен 2015: 44). Катастрофы – это важнейшая часть эволюции, а также отбора¹⁰³. И формирование спутников планет также не обошлось без них*.

И в заключение параграфа вновь повторим, что развитие на всех уровнях эволюции идет как за счет эволюционных медленных процессов вроде конвекции, образования коры и т. п., которые создают структуру систем планет и прочего, так и за счет быстрых изменений, включая рывки в развитии, резкие трансформации, а также коллапсы и катастрофы, которые могут радикально изменить ситуацию*.

¹⁰² Существуют и математические теории катастроф. Математическое описание катастроф – скачкообразных изменений, возникающих в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий, дается теориями особенностей и бифуркаций (см.: Арнольд 2004). Математическое описание катастроф прилагает математический аппарат к одному из проявлений гегелевского закона перехода количества в качество, о котором мы несколько раз говорили*.

¹⁰³ Неудивительно, что история космогонии насчитывает немало гипотез, связанных с катастрофами, начиная с теории Ж. Бюффона XVIII в. о том, что комета выбила из Солнца струю раскаленной материи, из которой и образовались планеты.

8.3. Образование спутников

Выше мы говорили об одной из ведущих гипотез образования Луны. Однако есть и более прозаичные, в частности образование ее на околоземной орбите, возможно, из нескольких крупных спутников, которые в конечном счете объединились в одно тело – Луну (что обеспечило ее быстрое нагревание), а также и еще более экзотические, хотя и маловероятные, в частности захвата Землей готовой Луны (Найдыш 2007). В этой последней гипотезе мы видим эволюционный паттерн – захватов, насильственных инкорпораций, объединений, – о котором уже вели речь (например, при упоминании захвата Марсом двух своих спутников; а также иррегулярных спутников вообще – см. ниже)*. Можно также обратить внимание на статью астронома Лейденского университета С. П. Цварта с говорящим названием «Как Солнце похитило карликовые планеты из чужой Солнечной системы» (Zwart 2016). В ней он рассказывает о своей теории, согласно которой малая планета Седна и ее семья (порядка дюжины объектов) первоначально не принадлежали к Солнечной системе¹⁰⁴. Голландский астроном делает вывод, что странные орбиты некоторых тел во внешней Солнечной системе показывают, что они являются добычей Солнца от межзвездного захвата.

О звездных захватах, грабежах и насильственных включениях в свои системы уже шла речь в первой книге монографии (Гринин 2013: 119–21). В частности, мы писали:

Формирование галактик происходит различным путем, в том числе за счет поглощения крупными галактиками мелких, в частности при столкновении галактик. «Если маленькая галактика сталкивается с намного большей, она поглощается ею и полностью теряет свою идентичность; каждый раз при прохождении около большой галактики от нее буквально отдираются звезды» (Мэй и др. 2007: 140). В этом случае под одной крышей объединяются и старые, и молодые скопления и группировки звезд. Другой способ – объединение. Галактики более молодых генераций могли иногда

¹⁰⁴ Седна имеет весьма необычную сильно вытянутую орбиту, которая в ближайшей от Солнца точке находится на расстоянии 76 а. е., а в дальней – на 900 а. е. Это делает Седну одним из наиболее удаленных известных объектов Солнечной системы, за исключением долгопериодических комет. Ей необходимо примерно 11 400 лет для того, чтобы совершить полный оборот по своей орбите.

возникать путем объединения маленьких, слабых и компактных галактик. Они становились в этом случае **«строительными блоками»**, из которых сформировывались галактики, существующие в настоящее время. Наконец, есть еще вариант, когда сталкиваются две большие галактики. Столкновение может длиться миллиарды лет, сопровождаясь активным звездообразованием и созданием массивных очень ярких звезд. Последнее означает, что это короткоживущие звезды, то есть будет много взрывов новых и сверхновых. В конце концов, галактики могут разойтись вновь, но уже сильно измененные, при этом может образоваться за счет оторвавшегося вещества и новая галактика (см.: Мэй и др. 2007: 142)*.

Таким способам формирования галактик можно найти многочисленные аналогии в биологической и геологической, но особенно в социальной эволюции. Поскольку звезды и галактики состоят из более или менее однородного вещества, достаточно легко объединяющегося и делящегося, этим они сходны с обществами, состоящими из людей, которые также могут быть легко включены путем интеграции или захвата. Однако захваты распространены и среди социальных животных, например муравьев. Небезынтересно напомнить, что некоторые астрономы даже считают, что наш Млечный Путь за миллиарды лет «захватил, разграбил и покорил» сотни мелких галактик, поскольку в нашей галактике наблюдаются явные «переселенцы», и среди них вторая по блеску звезда на северном небе Арктур (Гибсон, Ибата 2007: 30)*.

Если вернуться к гипотезе о Тейе, то это гигантское столкновение (то есть столкновение Земли с ней или другим телом, в результате которого образовалась Луна) было, по-видимому, самым разрушительным в истории Земли. И с учетом формирования Луны оно обусловило далеко идущие последствия.

Окажись параметры того древнего столкновения Тейи с Землей слегка иными, процесс, приведший к формированию Луны, происходил бы совершенно по-другому. Если бы столкновение произошло не по касательной, а лобовым ударом по центру, то Тейя смешалась бы с Землей и стала ее частью. Весьма вероятно, в таком случае Земля и Тейя образовали бы большую планету без спутника. Тейя могла бы также разминуться с Землей, а ее орбита изменилась бы настолько, что направилась либо в сторону Венеры, либо Марса и навсегда удалась бы от Земли. Наконец, удар по кас-

тельной мог прийти под таким незначительным углом, что образовавшееся облако осколков сформировало бы вокруг Земли множество более мелких лун, которые украсили бы ночное небо над Землей (Хейзен 2015: 44).

Происхождение систем регулярных спутников (то есть движущихся в направлении вращения планеты по почти круговым орбитам, лежащим в плоскости ее экватора) авторы космогонических гипотез обычно объясняют повторением в малом масштабе того же процесса, который они предлагают для объяснения образования планет Солнечной системы. Такие спутники есть у Юпитера, Сатурна, Урана (см., в частности: Кусков и др. 2009: 30–34). Однако происхождение иррегулярных спутников (то есть таких, которые обладают обратным движением) эти теории объясняют захватом (Найдыш 2007).

Иррегулярными называют спутники, орбиты которых отличаются от общих правил: ретроградное (обратное) движение; большой эксцентриситет (вытянутость) орбиты; большой наклон орбиты к экваториальной плоскости планеты. Иррегулярные орбиты имеют многие спутники «астероидных» размеров. Из «больших» спутников только Тритон, спутник Нептуна, движется по ретроградной орбите.

В Солнечной системе известно чуть более 100 нерегулярных спутников у всех четырех планет-гигантов в Солнечной системе, многие из них были открыты в 1990-х гг. и позднее (см.: Уральская 2005); у Юпитера нерегулярных спутников 52 из 67; у Сатурна в настоящее время известно 24 регулярных и 38 нерегулярных спутников; у Урана 9 из 27 спутников – иррегулярные (Sheppard *et al.* 2005).

Формирование массивных спутников планет-гигантов является процессом, комплементарным генерации и развитию их хондритовых ядер, что отражает две стороны единого проявления их эндогенной активности.

Особенно интересен спутник Ио, вулканы и образование вулканических депрессий на котором сосредоточены на стороне, обращенной к Юпитеру. Он является во всех отношениях современным аналогом Луны, древнейшая (4,6–3,2 млрд лет) вулканическая активность которой была обращена аналогичным образом к ее материнской протоземле (наблюдается на видимой стороне Луны). Ио имеет массу на 20 %

больше массы Луны. Он обращается по круговой орбите на расстоянии 422 тыс. км от Юпитера совместно с облаком водорода, отделившегося вместе с ним от Юпитера и не успевшего рассеяться (Маракушев и др. 2013: 135).

Поскольку спутники оказывают гравитационное влияние на планеты, то эта система «планета – спутник(и)» с течением времени эволюционирует. Так, вследствие приливных явлений эволюционировали системы «Земля – Луна» и «Нептун – Тритон» (Альвен, Арениус 1979: 16).