

## Глава 6. Образование системы протопланет

### 6.1. Формирование системы крупных планет

Центральная задача планетной космологии: объяснить, как из множества тел и частиц образовалась планетная система с небольшим количеством планет (Витязев и др. 1990: 136). Однако здесь, кажется, способна помочь математика. Возвращаясь к формированию системы планет как в конечном итоге малого числа крупных планет, интересно обратить внимание на то, что и в численных расчетах на компьютерах эволюция диска приводит к формированию набора из (примерно) 10 планет на слабоэксцентричных орбитах (Язев 2011: 358)<sup>79</sup>.

В нашей Солнечной системе планеты хотя и распределены на большом пространстве, но они близки друг к другу, насколько это возможно. Если между планетами земного типа поместить еще одну планету с массой Земли, то она выведет из равновесия всю систему. Отсюда весьма вероятно, что планетные системы в начале своей жизни обладают большим количеством вещества, чем в конце. Некоторые объекты выбрасываются из системы прежде, чем она достигнет равновесия. Астрономы уже наблюдали свободно летающие планеты в молодых звездных скоплениях (Лин 2008). См. ниже гипотезу о девятой протопланете, «выбитой» за пределы Солнечной системы.

Следовательно, согласно такому взгляду, возникновение новой системы, системы планет, происходило, условно говоря, с выделением энергии (то есть потерей части вещества, которое уходило в космос). Образование звезд – также процесс, который идет с выделением вещества и энергии (точнее, сначала он происходит как процесс концентрации вещества на разных стадиях, но в итоге начинается его выделение). Как ни странно, но в социальной жизни образование

---

<sup>79</sup> Если принять во внимание гипотезу о девятой планете, которую Юпитер выбросил за пределы Солнечной системы, а также о несформировавшейся планете между Марсом и Юпитером (об обоих см. ниже), то число 10 становится тем более релевантным.

многих социальных систем также следует данной схеме: сначала концентрация, затем выделение энергии, например, путем экспансии на другие общества.

Таким образом, плотность «населения» планет (как и звезд) имеет свои ограничения, накладываемые законом гравитации. Выше мы уже говорили, что планетам требуется определенное пространство, жизненная зона\*, причем борьба за эту зону идет не менее (если не более) жестко, чем в биологической и социальной эволюции. *Таким образом, борьба за жизненное пространство, поиск системой оптимальной «плотности населения» есть универсальный закон\**.

Как пишет С. А. Язев (2011: 358), вышеуказанные расчеты о числе планет также приводят к реализации правила планетных расстояний (Тициуса – Боде) – отношение радиусов орбит сформировавшихся по соседству планет оказывается равным 1,4...2. Это очень важное правило, которое требует своего объяснения. «Таким образом, – делает интересный вывод Язев (Там же), – основные закономерности Солнечной системы объясняются стандартным сценарием. Детали сценария могут изменяться, но общая картина остается при этом в основном неизменной». Насколько все же стандартный сценарий работает – это вопрос.

## **6.2. Образование групп планет: проблемы и гипотезы**

**Формулирование проблем.** Поскольку планеты Солнечной системы делятся на две группы (земного типа и газовых гигантов), важным становится вопрос о разнице в механизмах их образования. Были ли они принципиально теми же в обеих группах, а различия определялись расстоянием от Солнца, либо сам процесс образования разных групп планет был во многом различным, либо имелись иные комбинации?

То, что расстояние от Солнца играло огромную роль в особенностях формирования планет, ни у кого не вызывает сомнений (но есть различия во мнениях, как именно это повлияло на механизмы планетообразования). Выше мы видели, что различия в длине орбит у зародышей планет (а чем дальше планета от Солнца, тем больше орбита) влияли на возможность захвата окружающих планетезималей и соответственно на радиус и массу протопланеты.

Выше мы также видели, что благодаря линии льда концентрация планетезималей и материи в определенных местах Солнечной системы была выше, что также могло повлиять на размеры планет разных областей.

Предполагается, что в протопланетном диске был состав, соответствующий космическому, то есть абсолютно преобладали водород и гелий. Другие элементы составляли приблизительно 1–2 % от общей массы. Конечно, уже с формированием пылевого субдиска состав вещества будущих планет не мог не измениться в пользу твердых пылевых частиц. Тем не менее важно объяснить несколько важных результатов, которые сейчас имеют место в Солнечной системе.

Во-первых, почему состав планет земной группы особый? Почему их вещество представлено в основном ферромагнезиальным веществом, а водорода, гелия и других газов так мало? Имелись ли эти газы в их первоначальном составе; если имелись, то как и когда эти планеты потеряли основную часть летучего вещества?

Во-вторых, почему Нептун и Уран имеют не так много водорода, как Юпитер и Сатурн, но больше льда, чем последние?

В-третьих, почему Юпитер и Сатурн по своему составу ближе к Солнцу, чем другие планеты?

Ниже мы покажем, что в настоящее время имеется целый ряд конкурирующих гипотез, пытающихся объяснить эти факты. Но уже сейчас отметим, что вопрос о газе (и почему он был потерян во внутренней и дальней внешней частях Солнечной системы) является одним из самых сложных среди многих в планетной космогонии (Витязев и др. 1990: 77).

Этот «газовый» подход должен включать в себя решение проблемы переплавки вещества и образования хондр. А здесь следует иметь в виду, что в хондритах мало водорода (то есть его было мало в первичном твердом веществе), что может свидетельствовать о достаточно ранней диссипации газа (Там же: 86). И соответственно, если газ рассеялся рано, то в дальнейшем он уже оказывал существенно меньшее влияние на процесс формирования планет.

И вновь отметим, что в отношении состава планет, как и ряда других параметров (например, спутников, колец и прочего), распределение оказалось очень неравномерным. Напомним, что в об-

щем плане это не случайно. Неравномерность в распределении вещества – характернейшая черта эволюции, это мы наблюдаем и в живом мире, и в человеческом обществе, и в структуре планет, включая Землю, и во множестве других объектов и процессов. *Иными словами, распределение вещества, как и любых иных ресурсов, не бывает равномерным по определению\**! Но общее правило, конечно, не может объяснить конкретных механизмов, влияющих на особенности распределения вещества протопланетного диска.

**Гипотезы в отношении формирования планет земной группы.** Существуют три главных подхода, объясняющих, как образовались планеты земной группы.

1) Нарастивание массы планеты путем аккумуляции планетезималей (и метеоритов) до современных размеров, в результате чего постепенно произошла структуризация планет на ядро, мантию и кору (но не у всех планет). Иногда добавляется идея о том, что в ближней, внутренней зоне Солнечной системы, то есть до линии льда, под влиянием солнечного излучения и ветра газ протопланетного диска рассеялся, соответственно планеты земной группы получили мало водорода и гелия.

В частности, Витязев и др. (1990: 209) исходят из того, что в зоне земных планет диссипация газа произошла довольно рано, менее чем за  $10^7$  лет, то есть менее чем за 10 млн лет после начала процесса формирования Солнечной системы. При этом они считают, что в это время размеры крупнейших тел едва достигали 1000 км. Зато в зоне планет-гигантов газ сохранялся на порядок дольше, то есть в течение 100 млн лет. В результате более длительного периода формирования зародышей планет в этой зоне и ряда других факторов они приобрели большие начальные массы, что дало вместе с иными факторами и большие возможности для аккреции газа. Эти авторы считают, что планеты образовались неодновременно.

2) Образование планет земной группы по типу планет-гигантов. Но затем планеты земной группы потеряли свои газовые оболочки под воздействием Солнца, которое их рассеяло. Соответственно, железосиликатные ядра этих протопланет-гигантов превратились в самостоятельные планеты уже небольшой величины. Расслоение на железные ядра и прочные силикатные оболочки предотвратило их

взрывной распад<sup>80</sup>. Сторонники данной гипотезы даже считают, что с потерей этими протопланетами гигантских флюидных оболочек протопланеты потеряли и спутниковые системы (сохранились только Луна, Фобос и Деймос) (Маракушев и др. 2013: 133, 135–37; Маракушев, Зиновьева 2013). Этот процесс потери флюидных оболочек продолжался, по их мнению, довольно долго, около  $10^7$  лет, то есть порядка десяти миллионов лет (Язев 2011: 357).

3) Влияние Юпитера и Сатурна на формирование планет земной группы, поскольку первые забрали весь газ, но подтолкнули планетезимали ближе к Солнцу, в результате чего планетам земной группы удалось собрать всю массу<sup>81</sup>.

Существуют и другие, менее популярные версии. Так, В. В. Кузнецов (2011: 608) пишет о быстром сжатии вещества за счет самогравитации как о возможном механизме образования планет. При этом вещество планеты, в том числе и Земли, оказывается нагретым до высокой температуры, а тепло, выделяющееся при образовании, запасается в ее недрах (Там же). Но проблема самогравитации вызывает сомнения даже для планет-гигантов (см. ниже), не то что небольших планет. В отношении теории самогравитации Кузнецов исходит из того, что вполне логично допустить: каждая из планет образовалась из того вещества, которое было сосредоточено в кольце, ограниченном собственным радиусом  $n$ -ой планеты и радиусом внутренней относительно нее планеты  $n - 1$ , где  $n$  – порядковый номер планеты (Там же: 613)<sup>82</sup>. О родственных этой теории взглядах, когда каждая

<sup>80</sup> Эта гипотеза (см.: Маракушев, Зиновьева 2013: 135–37) затрагивает и формирование пояса астероидов. Планеты земной группы своими прочными силикатными оболочками отличались от гипотетических хондритовых планет, о которых мы уже упоминали выше. Последние были расположены дальше от Солнца и после потери их протопланетами флюидных оболочек подвергались взрывному распаду на астероиды (в основном хондриты) под действием флюидов, сконцентрировавшихся в их недрах на протопланетной стадии развития.

<sup>81</sup> Если такая глыба притянет к себе много газа, она превращается в газовый гигант, как Юпитер, а если нет – в каменистую планету типа Земли (Лин 2008). Таким образом, данная концепция, по сути, делает упор на процесс борьбы за ресурсы в период формирования планет: побеждает тот, кто захватывает больше газа\*.

<sup>82</sup> В другой своей книге В. В. Кузнецов объясняет образование двух групп планет следующим оригинальным образом. Уже в течение первого миллиона лет произошла некая бифуркация в области пояса астероидов, в тот момент, когда Солнце еще полностью не сформировалось, и его радиус был больше современного примерно в 7 раз (курсив мой. – Л. Г.; речь, по-видимому, идет о периоде, когда формировалось внутреннее ядро протосолнца). Бифуркация разделила вещество протосолнечного «облака» на две части: из одной сфор-

планета произошла из определенного сгущения или кольца при дефрагментации протопланетного облака, мы уже говорили. Она довольно изящна, но не объясняет многих вещей, включая и разный химический состав планет.

Как мы увидим ниже, подход в объяснении процессов образования планет земной группы значительно зависит от того, считают ли исследователи, что образование всех планет Солнечной системы шло более или менее одновременно или же что планеты образовывались в разное время. Ниже в следующем разделе этому будет уделено много внимания.

**Общие соображения в отношении планет внешней зоны.** Процесс образования планет, особенно планет-гигантов, во многом не ясен. При этом в теории планетообразования Юпитеру и Сатурну, двум газовым планетам-гигантам, на которые приходится 92 % массы всей планетной системы, особенно Юпитеру, уделяется исключительное внимание (Рускол 2002; Кусков и др. 2009: 129). Что касается общих условий формирования планет во внешней зоне, то очень важное место отводится низким температурам и недостаточному потоку солнечного света в этой зоне, что препятствовало рассеянию газа в межзвездное пространство. Это помогло Юпитеру и Сатурну захватить много водорода и гелия.

...планеты-гиганты могут формироваться только достаточно далеко от Солнца: там, где сейчас находится Юпитер, и дальше. Ближе к Солнцу льдинки (из воды, метана, аммиака и других летучих соединений) из-за более высокой температуры не образуются, и аккреция газа неэффективна (Засов, Постнов 2011: 279).

Несколько по-иному, чем у Юпитера и Сатурна, сложилась ситуация у более далеких планет. По мнению некоторых исследователей, дело в том, что Уран и Нептун очень долго формировали свои твердые ядра, и за это время газ в данной зоне оказался потерянным (рассеялся в межзвездном пространстве). Как уже сказано в *Главе 1*,

---

мировались планеты-гиганты, вторая «пошла» на формирование Солнца и планет земного типа. Особенности внутреннего строения и эволюция планет и спутников определялись одним параметром – величиной их массы (Кузнецов 2008: 8). Весьма своеобразная гипотеза изложена в работе: Ферронский В. И., Ферронский С. В. 2012. Здесь речь, в частности, идет о том, что формирование тел в Солнечной системе происходило из внешних оболочек их прародителей по достижении невесомости.

эти планеты и множество кометных тел за орбитой Нептуна содержат преимущественно воду.

Если же считать, как некоторые космологи, что температура в этой области все же была относительно высокой (200 К), то доминирование льда здесь можно объяснить тем, что вода сконденсировалась, образовав кометные ядра и насытив оболочки Урана и Нептуна, а более легкие газы (водород и гелий) улетучились. Холодные легкие элементы были вынесены на периферию Солнечной системы, где могли быть сформированы объекты пояса Койпера и облака Оорта (Язев 2011: 357–58).

Конкурирующие концепции также используют идею о разделении водных и водородных компонентов, происходящем за счет быстрого вращения протопланетного диска. При этом водные компоненты «отгонялись» на его периферию, а водородные оставались в центральной части (из них и возникли газовые гиганты). Водные компоненты на периферийной части Солнечной системы соответственно представлены ледяными структурами. Соответственно разделялись и возникающие затем ледяные массы с вмержшей в них космической пылью (планетезимали). Стяжениями водных планетезималей образованы ледяные аккумуляции в окружении Солнечной системы – в поясах Оорта, Хиллса и Койпера, непосредственно окружающего Солнечную Систему. Они служат источником комет, периодически вторгающихся в Солнечную систему. К типу ледяных тел относятся Плутон (диаметр 2320 км) в динамической системе с Хароном (диаметр 1270 км). Они образуют как бы внешнюю орбиту Солнечной системы (Маракушев, Зиновьева 2013).

**Некоторые мнения по поводу образования Юпитера и Сатурна.** Есть две основные гипотезы относительно способа образования Юпитера и Сатурна, которые содержат много водорода и гелия (Видьмаченко, Мороженко 2014: 22; Кусков и др. 2009: 129–30). Первая гипотеза, *контракции*, объясняет «солнечный», то есть газовый состав планет-гигантов тем, что в протопланетном диске образовались массивные газопылевые сгущения – гигантские препланетезимали, которые позже в процессе гравитационного сжатия

превратились в протопланеты-гиганты<sup>83</sup>. При этом температура планет-гигантов на ранней стадии была высокой. Однако эта гипотеза не объясняет удаления из Солнечной системы значительных излишков вещества, не вошедшего в планеты, а также причины отличия состава Юпитера и Сатурна от состава Солнца (в Сатурне содержится больше тяжелых химических элементов, чем в Юпитере, где, в свою очередь, их несколько больше, чем в Солнце).

Согласно второй гипотезе, *последовательной аккреции*, образование Юпитера и Сатурна проходило в два этапа. На первом этапе в области Юпитера и позже в области Сатурна происходила аккумуляция твердых тел таким же образом, как и в области планет земной группы, а когда масса крупнейших тел достигла критического значения<sup>84</sup>, начался второй этап – аккреция газа на эти уже достаточно массивные тела, – который длился не менее  $10^5$ – $10^6$  лет. На первом этапе из области Юпитера диссипировала часть газа, его состав начал отличаться от солнечного, и это еще больше проявилось в области формирования Сатурна. На стадии аккреции самая высокая температура внешних слоев Юпитера достигала 5000 К, а Сатурна – около 2000 К. Значительно более сильное прогревание Юпитером своих окраин определило силикатный состав его близких спутников.

Образование Урана и Нептуна, где содержится меньше водорода и гелия, объясняется гипотезой *аккреции* тем, что большая часть газа уже покинула пределы Солнечной системы по достижении этими планетами критической массы.

**О возможности гравитационного коллапса в процессе образования планет-гигантов.** Однако нужно ясно понимать, что процесс образования планет за счет аккреции на ядро является достаточно медленным и происходит за время не менее нескольких миллионов лет (Дудоров и др. 2015: 11). Иногда называются и вовсе огромные длительности образования критической массы: в области

---

<sup>83</sup> Выше мы говорили о наличии такой концепции, которая предполагает, что судьба планет была предрешена уже в момент фрагментации протопланетного диска, при этом некоторые исследователи ведут речь о фрагментации уже пылевого субдиска, а другие – об образовании огромных сгущений или колец именно в допланетном диске, и цитируемые авторы имеют в виду как раз такой подход, поскольку водородно-гелиевый состав в своей основе должен был быть в допланетном диске, а в пылевом, естественно, состав сильно изменился.

<sup>84</sup> По разным интерпретациям, от двух до десяти масс Земли (Там же) или даже до 30 масс (см.: Засов, Постнов 2011: 279).

Юпитера 30 млн ( $3 \times 10^7$ ), и 200 млн лет ( $2 \times 10^8$ ) в области Сатурна (Відьмаченко, Мороженко 2014: 22). Такие длительности входят в противоречие с другими фактами, поэтому появляются иные теории о происхождении планет-гигантов. В частности, есть гипотезы, которые можно рассматривать как разновидности теории контракции. Согласно этой точке зрения газовые гиганты формируются путем внезапного коллапса, приводящего к разрушению первичного газопылевого облака (Лин 2008). То есть к формированию планет может приводить гравитационная неустойчивость в плотных и холодных областях диска<sup>85</sup>.

Оценки показывают, что образование планет за счет гравитационной неустойчивости может происходить за время порядка  $10^5$ – $10^6$  лет – значительно меньшее, чем за счет аккреции на ядро. Важную роль в динамике аккреционных дисков играет магнитное поле. Дело в том, что вблизи экваториальной плоскости образуется область низкой степени ионизации и эффективной диффузии магнитного поля – мертвая зона, вследствие чего не развивается МГД-турбулентность. Мертвые зоны представляют интерес в первую очередь с точки зрения образования планет. Из-за слабой турбулентности аккреция внутри них замедлена, что делает возможным накопление вещества и формирование планет. Магнитное поле оказывает стабилизирующее, а пыль – дестабилизирующее действие на гравитационную устойчивость протозвездных и аккреционных дисков (Дудоров и др. 2015: 11).

Внимательный читатель способен увидеть, что предполагаемый процесс гравитационной неустойчивости и коллапса, в результате чего происходит сгущение вещества и образование ядра планеты, напоминает процесс формирования звезд. Однако разница в массе между Юпитером и небольшой звездой – коричневым карликом – десятки раз. Поэтому в планетах сильная неустойчивость, которая возникает в формирующейся звезде (сжавшемся облаке), может и не наступить. Вот почему эта гипотеза, по мнению других, выглядит весьма спорной (Лин 2008).

---

<sup>85</sup> Хотя возможность коллапса для образования планет обычно отрицается, поскольку планеты, а тем более спутники, слишком малы для того, чтобы их образование могло быть вызвано гравитационным коллапсом.

Планеты, даже очень крупные, такие как Юпитер, существенно отличаются даже от совсем малых звезд. И промежуточной массы между очень крупными планетами и самыми маломассивными звездами просто не существует (Лин 2008). Таким образом, согласно Д. Лину, здесь налицо перерыв постепенности, разрыв между объектами разной природы, разных классов. Примерно такой, добавим, как между одноклеточным и многоклеточным животным, насекомым и млекопитающим, сельской общиной и государством. Однако хотя разрывы и имеют место, все же чаще мы встречаем некий континуум различных форм и размеров, когда этот разрыв постепенности почти исчезает, так как формы разных типов перехлестывают друг друга\*. И в отношении гигантских планет и малых звезд есть вполне компетентные исследования, которые говорят о том, что хотя существует принципиальная разница в механизмах образования коричневых карликов (очень маленьких звезд), обычно с массой всего в 10–20 больше Юпитера, тем не менее существует область перекрытия масс коричневых карликов и планет-гигантов, которые могут быть существенно крупнее Юпитера (Masset, Kley 2006: 247).

### **6.3. Последовательность образования планет**

**Кто был первым?** Чаще исходят из того, что планеты образовались более или менее одновременно. Но некоторые исследователи полагают, что одни из них сформировались раньше других. Например, А. А. Маракушев и др. (2013: 133, 136–37) считают, что планеты земной группы – древнейшие, образовались заметно раньше Юпитера. Выше мы видели, что А. В. Витязев и др. (1990), по сути, также полагают, что планеты земной группы сформировались раньше планет-гигантов. И напротив, другие исследователи считают, что первым сформировался Юпитер, и это произошло уже через 2 млн лет после начала процесса трансформации протосолнечного облака (Лин 2008).

Согласно Д. Лину, формирование этой крупной планеты не просто важнейший момент в истории планетной системы. Чтобы сформировался гигант, в диске должно быть много не только газа, но и твердого вещества. *Но если такая планета сформировалась, она начинает управлять всей системой.* С одной стороны, газовый гигант стимулирует образование других гигантов и планет земного типа. Но с другой – Юпитер за счет того, что сформировался рань-

ше, забрал основную часть газа диска<sup>86</sup>. Кроме того, он «выметает» астероиды первого поколения и собирает много масс планетезималей и астероидов. Причина, по которой у Сатурна масса меньше, чем у Юпитера, банальна. Это случилось просто потому, что он сформировался на несколько миллионов лет позже.

**О роли системообразующей планеты.** Д. Лин замечает интересный момент. Астрономы обнаружили дефицит экзопланет с массами от 20 масс Земли (это масса Нептуна) до 100 земных масс (масса Сатурна). Это может стать, по его мнению, ключом к восстановлению картины эволюции. В течение последующих 8 млн лет после формирования Юпитера тот помогал сформироваться остальным планетам-гигантам. К этому времени почти весь газ диска расходуется, соответственно планеты земной группы, образовавшиеся последними и заметно позднее (см. ниже), газа почти не получают (Лин 2008; см. также: Савченко, Смагин 2013: 11).

Таким образом, в этой гипотезе с эволюционной точки зрения ситуация выглядит довольно интересно. Формирование одной системообразующей планеты оказывает существенное влияние на формирование других – как в позитивном, так и в негативном плане. Система рождается и развивается. С другой стороны, достаточно часто новые объекты рождаются более или менее одновременно. Выше мы говорили о довольно распространенной ситуации, когда появление сходных объектов в сходных условиях случается практически одновременно\*. Но если рассматривать такой механизм более детально, то в ряде случаев может обнаружиться, что единый процесс имеет различные фазы, и появление тех или иных объектов и соответственно формирование их особенностей связано с тем, какой из объектов и почему родится первым. Образно говоря, возникает «право первородства», которое обычно ассоциируется с человеческим обществом, например с правом наследования в монархических режимах<sup>87</sup>, но, как мы видим, его можно проследить и в отношении некоторых космических объектов\*.

<sup>86</sup> Другие планетологи согласны в том, что уже после 3 млн лет газа и пыли в Солнечной системе оставалось мало (Элкинс-Тантон 2017: 95).

<sup>87</sup> Библейская легенда об Исаве, который обменял право первородства на чечевичную похлебку, сваренную его братом Иаковом, также всем известна. В некоторых случаях, вероятно, можно говорить о «праве первопоселения». Очевидно, если планета заняла определенную орбиту, то другой планете занять ее будет существенно труднее. В биологии, если какой-то вид занял нишу или территорию, то занять ее другому виду будет намного слож-

Каким образом в концепции, изложенной Д. Лином, Юпитер способствует формированию планет-гигантов? Первый газовый гигант создает условия для рождения следующих. Расчищенная (от планетезималей) им полоса действует как крепостной ров, который не может преодолеть вещество, движущееся снаружи к центру диска. Гравитация первого газового гиганта часто отбрасывает соседние с ним планетезимали во внешнюю область системы. Это вещество собирается на внешней стороне разрыва. Получается, что второе поколение планет формируется из вещества, собранного для них первым газовым гигантом. При этом большое значение имеет темп: даже небольшая задержка во времени может существенно изменить результат (см. ниже). В случае Урана и Нептуна, по мнению Лина, аккумуляция планетезималей была чрезмерной. Зародыши стали слишком большими, 10–20 земных масс, что отсрочило начало аккреции газа до момента, когда в диске его почти не осталось. В итоге получились уже не газовые, а ледяные гиганты, которые могут оказаться самым распространенным типом во Вселенной. Возможно, Юпитер помог Сатурну сформироваться быстрее, чем это произошло бы без его помощи. Кроме того, Уран и Нептун без него не достигли бы своей нынешней массы. На их расстоянии от Солнца процесс формирования без посторонней помощи шел бы очень медленно: диск рассосался бы еще до того, как планеты успели набрать массу (Лин 2008).

Согласно излагаемой версии, планеты земной группы образовались последними, что произошло в период от 10 до 100 млн лет<sup>88</sup>. И естественно, что эти планеты опоздали к разделу газа, соответственно им досталось мало газа, да и твердого вещества было не так много. Словом, кто не успел, тот опоздал, *раздел ресурсов в космическом мире столь же несправедлив, как в мире биологическом и социальном*\*. Сегодня планетологи, считающие, что формирование планет происходило довольно быстро, формулируют ситу-

---

нее. В истории и этнографии известно много фактов, когда группы людей, первыми поселившихся в какой-либо местности, становятся привилегированной группой (сословием) по сравнению с теми, кто пришел позже. Эти привилегии могут стать наследственными. Наиболее известны первопоселенцы и пришедшие позже, это древнеримские патриции и плебеи.

<sup>88</sup> Но, напомним, другие планетологи считают, что планеты земной группы или по крайней мере часть из них образовались раньше, должно быть, в течение первых 10 млн лет (Элкис-Тантон 2017: 95).

ацию таким образом: «Чтобы вырасти, в распоряжении малой планеты есть примерно 3 млн лет. Все пыль и газ, не успевшие к этому времени осесть на космические глыбы (то есть не захваченные другими протопланетами. – *Л. Г.*), либо захватываются звездой, либо рассеиваются по просторам Вселенной, и строительного материала для планет не остается» (Элкинс-Гантон 2017: 95).

Однако, согласно вышеизложенной гипотезе, то, что весь газ забрали Юпитер и Сатурн, на определенном этапе способствовало формированию планет земной группы. При этом не исключено, что последовательность формирования планет земной группы находилась в зависимости от их близости к Юпитеру. Радиоизотопные измерения указывают, что астероиды сформировались первыми (спустя 4 млн лет после образования Солнца), затем – Марс (через 10 млн лет) как наиболее близкая к Юпитеру планета, и лишь много позже – через 50 млн лет – Земля (Лин 2008).

Впрочем, сам Д. Лин признает, что многие планетологи не считают роль Юпитера решающей в формировании твердых планет. При этом он указывает на то, что большинство солнцеподобных звезд лишено планет типа Юпитера (см. об этом далее).

Итог многих процессов планетообразования зависит от начального состава вещества. Примерно треть звезд, богатых тяжелыми элементами, имеет планеты типа Юпитера (в то время как в целом астрономы открыли планеты типа Юпитера только примерно у 10 % исследованных солнцеподобных звезд, см. ниже). Ядра таких планет могут быть редкими зародышами, выжившими из многих поколений – «последними из могикан». Возможно, у таких звезд были плотные диски, позволившие сформироваться массивным зародышам, у которых не было проблем с теплоотводом. И, напротив, вокруг звезд, бедных тяжелыми элементами, планеты формируются редко (Там же)<sup>89</sup>.

Теория образования Юпитера в качестве первой и системообразующей для остальных планеты Солнечной системы выглядит довольно интересно, хотя имеет и немало слабых мест. В частности, ее популяризатор говорит о том, что сложно объяснить, как систе-

---

<sup>89</sup> О том, что именно у звезд, обогащенных атомами металлов, возрастает возможность появления планет, по крайней мере, газовых гигантов, см.: Ramírez *et al.* 2011; Setiawan *et al.* 2012.

ма себя стабилизирует и как планеты земной группы оказались на их нынешних почти круговых орбитах. Об установлении орбит и его объяснении см. в разделе ниже. Но отметим, что идея образования планет-гигантов в результате коллапса (о котором мы рассказывали выше) могла бы объяснить, почему Юпитер, а за ним другие планеты-гиганты образовались раньше планет земной группы, ведь планеты земной группы образоваться путем коллапса из-за малых размеров вряд ли могли.

**Образование планет-гигантов и элементы отбора, везения и совпадения условий.** В некоторых гипотезах газовому потоку в формировании планет, особенно крупных и крупнейших, отводят не просто важную, но в чем-то определяющую роль. При этом процесс отбора «везунчиков», которым удастся стать из зародыша планеты планетой-гигантом, включает в себя и местоположение протопланеты, и время ее формирования, и роль газовой среды, и многое другое.

Вот как Дуглас Лин описывает этот процесс в своей интерпретации. Вероятно, Юпитер начинался с зародыша, сравнимого по размеру с Землей, а затем накопил еще около 300 земных масс газа. Такой внушительный рост обусловлен различными конкурирующими механизмами. Гравитация зародыша притягивает газ из диска, но сжимающийся к зародышу газ выделяет энергию, и чтобы осесть, он должен охлаждаться. Следовательно, скорость роста ограничена возможностью охлаждения. Если оно происходит слишком медленно, звезда может «сдуть» газ обратно в диск прежде, чем зародыш образует вокруг себя плотную атмосферу. Ранние модели показали, что зародыш планеты для достаточно быстрого охлаждения должен иметь массу не менее 10 масс Земли. Такой крупный экземпляр может вырасти лишь вблизи линии льда, где ранее собралось много вещества. Возможно, поэтому Юпитер расположен как раз за этой линией. Но крупные зародыши могут образоваться и в любом другом месте, если диск содержит больше вещества, чем обычно предполагают планетологи.

Рост зародыша, его миграция и потеря газа из диска происходят почти в одном и том же темпе. Какой процесс победит, зависит от везения. Возможно, несколько поколений зародышей пройдут через процесс миграции, не будучи способными завершить свой рост. За ними из внешних обла-

стей диска к его центру движутся новые партии планетезималей, и это повторяется до тех пор, пока в конце концов не образуется газовый гигант или же пока весь газ не рассосется, и газовый гигант уже не сможет сформироваться.

В некий момент масса планеты начинает расти чудовищно быстро: за 1000 лет планета типа Юпитера приобретает половину своей конечной массы<sup>90</sup>. При этом она выделяет так много тепла, что сияет почти как Солнце. Процесс стабилизируется, когда планета становится настолько массивной, что сама начинает изменять движение газа в диске и в итоге уничтожает запас строительного материала (Лин 2008).

Завершая раздел, можно сказать, что состояние современных взглядов на проблему последовательности формирования планет Солнечной системы, равно как и в целом на механизмы их формирования, находится еще на уровне, на котором приходится довольствоваться сосуществованием множества конкурирующих и противоположных гипотез. Тем не менее такой набор гипотез позволяет увидеть основные контуры этого интереснейшего и в чем-то уникального процесса.

**Аналог планеты.** Но, естественно, не вся материя могла собраться в крупные тела. Так никогда не бывает в миропорядке, всегда остается часть неоформленного материала, абсолютного идеального порядка быть не может, тем более, как мы уже говорили, должно выполняться правило преобладания численно малых объектов над крупными\*. Рост массы протопланет сопровождался динамическим «разбрасыванием» планетезималей и малых фрагментов из области формирования крупных планет на периферию Солнечной системы или в межзвездное пространство. Остатки газа и пыли также «выметаются» из области между орбитами планет. В итоге планетезимали, которые так и не успели слипнуться в большие тела, а также фрагменты столкновений протопланет остались в Солнечной системе как астероиды, метеороиды и кометы (Засов, Постнов 2011: 279).

Астероиды и метеориты, имеющиеся в огромном количестве в Солнечной системе, таким образом, вероятно, являются остатками материала, из которого формировались планеты. Астероиды сохра-

---

<sup>90</sup> Обратим здесь внимание на подтверждение вышеописанного паттерна, что в эволюции органично сочетаются процессы медленного, почти незаметного и взрывного роста\*.

нились до нашего времени благодаря тому, что подавляющее большинство их движется в широком промежутке между орбитами Марса и Юпитера (Найдыш 2007). Таким образом, пояс астероидов – это, скорее всего, несформировавшаяся планета, образованию которой помешало гравитационное влияние Юпитера (Абрамова, Пшеничнер 2014: 16). Тем не менее распределение масс наблюдается и в этом множестве тел\*. Почти 80 % общей массы пояса астероидов содержится в четырех самых больших телах (Альвен, Аррениус 1979: 60). Этот пояс не стал планетой и не претерпел особых изменений за время существования Солнечной системы; предполагается, что его объекты по составу представляют собой лед с небольшими примесями органических веществ, то есть близки к веществу комет (Данилова, Кожевников 2008: 96).

Это интересный пример аналога планеты (по массе), сформироваться которой помешало неудачное для этого место, где мощное гравитационное влияние мешало консолидации. Как образно писал Л. В. Ксанфомалити (1997: 231), возможно, эти «заготовки» и могли бы стать Фазтоном (гипотетической планетой, о которой мы говорили в *Главе 1*), если бы им не помешало соединиться притяжение Юпитера, который «взбалтывал» весь пояс астероидов на каждом обороте. Также, возможно, помешало и неудачное для консолидации время. Если бы эта планета сформировалась раньше Марса, то она могла бы занять его место, либо иметь собственную орбиту наравне с ним. Теперь же Марс захватывает некоторые тела оттуда. Возможно, его спутники Фобос и Деймос были захвачены им из пояса астероидов (Шевченко 2014; см. подробнее: Кусков и др. 2009: 18).