

Глава 4. Образование допланетных тел

4.1. Основные вопросы главы и их значение

Главные события, которые рассматриваются в данной главе:

- образование протопланетного диска из остатков аккреционной оболочки протосолнечной системы;
- образование в структуре диска так называемого пылевого субдиска, в котором сконцентрировалось твердое вещество;
- образование в пылевом субдиске сгущений и твердых тел;
- рост и столкновения этих допланетных тел.

Это весьма сложные процессы. Они включают в себя: а) образование и эволюцию допланетного газопылевого турбулентного диска; б) радиальный перенос и температурное фракционирование дискового вещества; в) фазовые переходы с выделением высоко- и низкотемпературных конденсатов; г) рост, объединение и оседание пылевых частиц к экваториальной плоскости диска, где образуется обогащенный пылью слой (субдиск); д) радиальное сжатие, уплотнение и гравитационную неустойчивость субдиска, вплоть до возникновения первичных пылегазовых кластеров, служащих основой образования зародышей планет – планетезималей⁴⁶; е) ряд других фазовых переходов и процессов (перечисление дается по: Маров и др. 2008: 223).

Основные вопросы, затронутые в данной главе, связаны с дискуссионными проблемами, касающимися, во-первых, образования протопланетного диска. Здесь крайне важными и спорными вопросами являются:

1. Был ли этот диск горячим (или даже очень горячим) либо холодным. От этого зависит решение проблемы, когда и каким образом переплавилось первичное вещество, из которого начали образовываться зародыши планет и планеты, а сегодня оно представлено в метеоритах.

⁴⁶ Планетезимали (англ. *planetesimal* от *planet* – планета, *infinitesimal* – бесконечно малая величина). Планетезималиями называют как мельчайшие, так и крупные и очень крупные сгустки вещества.

2. Масса, состав и другие характеристики этого протопланетного диска. Здесь практически все является дискуссионным, а от подходов зависит решение проблем образования сгущений и формирования крупных допланетных тел.

3. Вопрос о конденсации пыли в так называемом пылевом субдиске (если, конечно, признавать само его наличие, что делают далеко не 100 % исследователей). Именно в этой структуре, как предполагается, образовались сгущения и начались процессы формирования плотных допланетных тел. Понятно, что от решения вопросов о химическом составе этого субдиска, соотношения количества пыли и газа, скорости вращения диска зависит решение вопроса о том, как именно образовались планеты, а также почему планеты внутренней и внешней части образовались по-разному, о рамках этих групп и особенностях формирования подгрупп, например Юпитера – Сатурна и Урана – Нептуна.

4. Вопрос о параметрах поведения газа и пыли в процессе вращения протопланетного и пылевого дисков, о том, как эта газопылевая среда влияла на формирование допланетных тел в разных областях Солнечной системы, скорости их движения к Солнцу и т. п.

5. Как именно начинался и происходил процесс образования твердого вещества в рамках пылевого субдиска и протопланетного диска. Эта проблема является центральной в планетной космогонии, мы будем ее касаться и в последующих главах.

Здесь имеется целый ряд гипотез. От формирования контуров планет как бы сразу за счет фрагментации и дальнейшего сжатия указанных дисков до идеи своеобразного наращивания планет путем медленного собирания сначала крошечных, затем небольших фрагментов вещества, а потом и все более крупных. А. В. Витязев и Г. В. Печерникова (2010: 171) по этому поводу замечают: вот уже более 30 лет исследователи не могут выбрать – росли ли планетезимали от пылинок размером $\sim 10^{-5}$ см до десятикилометровых путем слипания при взаимных столкновениях или на определенной стадии (порядка 1–10 см) они прошли через стадию Джинсовской неустойчивости в пылевом субдиске. На конференцию по «дискам и планетам» на Гавайях в 2009 г., например, собралось более 150 участников (равное количество представителей Америки, Японии и Старого Света). Но к согласию исследователи не пришли.

6. Вопрос о природе наиболее распространенных в метеоритах элементов (так называемых хондритов), а также о физических причинах и времени их спекания. Поскольку данные, полученные при исследовании метеоритов, являются важнейшими в объяснении ряда аспектов образования древнейшего вещества Солнечной системы, указанный вопрос становится одним из центральных в объяснении процессов образования допланетных тел.

7. Наконец, процесс движения, столкновений, роста и фрагментации допланетных тел представляет собой исключительно важную (но также дискуссионную) проблему.

Сложность реконструкции процесса образования планет Солнечной системы связана с тем, что у нас мало данных, подтверждаемых прямыми наблюдениями или анализом вещества с различных планет. И, как это обычно и бывает, сложность проблемы и недостаток данных компенсируются огромным количеством гипотез и теорий, которых за два столетия выдвинуто множество⁴⁷. Тем не менее пока ни одна из этих гипотез не может объяснить все факты, относящиеся к планетам (Савченко, Смагин 2013: 8). Но число установленных фактов довольно быстро растет. В частности, в некоторых околозвездных дисках наблюдаются газопылевые клампы (сгущения), указывающие на возможное образование протопланет в аккреционных дисках молодых звезд (Дудоров и др. 2015: 11).

4.2. Образование допланетного диска

Предварительные сведения. Протопланетные/допланетные облако или диск – это в принципе одно и то же понятие. Ранее в планетной космогонии употреблялось первое понятие, в современный же период идея «диска» отражает осесимметричную и уплощенную форму этого образования, толщина которого не постоянна, а увеличивается с расстоянием от звезды (Маров и др. 2008: 225; о терминологии см. также: Витязев и др. 1990: 5). Но можно также считать, что протопланетное облако и протопланетный диск – это разные стадии эволюции. Иными словами, после того, как основная масса аккреционной оболочки сконцентрировалась в Солнце, а часть вещества рассеялась в пространстве, оставшаяся газопылевая

⁴⁷ По наблюдениям А. В. Витязева, только известных ему авторов, предлагавших собственные теории происхождения Солнечной системы, насчитывается около ста. Разумеется, речь идет не о полностью независимых концепциях: во всей совокупности теорий имеются и сходные, и различающиеся элементы (Язев 2011: 348).

масса представляла собой сначала протопланетное облако. Но последнее, будучи неустойчивым, становилось все более плоским и в итоге сконденсировалось в уплотненный диск (Найдыш 2007). Естественно, что этот диск по массе составлял только небольшую часть предшествующего ему аккреционного диска. И из этого протопланетного диска в процессе его вращения и фрагментации образовались планеты путем нового цикла аккумуляции вещества в протопланетных телах.

Период формирования протопланетного облака-диска, по данным ряда работ, по длительности оценивается примерно в 10^6 – 10^7 лет, то есть в пределах от 1 до 10 млн лет (Забродин и др. 2008: 298; см. также: Макалкин, Дорофеева 1995: 100; Larson 1972a; 1972b; Ривс 1976: 207)⁴⁸. 10 млн, вероятно, для образования протопланетного диска являются все же чрезмерным сроком. Ряд исследователей в 10 млн лет укладывают все процессы от коллапса протосолнечного облака до образования планет-гигантов в газопылевом протопланетном диске (см., например: Маров и др. 2008: 225; Кусков и др. 2009: 57)⁴⁹.

Размеры, масса и состав допланетного диска. Протопланетный диск называют маломассивным околосолнечным диском (см., например: Витязев и др. 1990: 101 и др.), поскольку он сохранил лишь несколько процентов от массы аккреционного диска. Массу протопланетного диска обычно рассматривают в интервале нескольких процентов от массы Солнца до 10 % (см., например: Ви-

⁴⁸ А. В. Витязев с соавторами (1990: 28) придерживаются меньшей цифры. Они считают, что коллапс протосолнечного облака (туманности) продолжался 10^5 – 10^6 лет, то есть от 100 тыс. до 1 млн лет, и за это же время должен был сформироваться протопланетный (околосолнечный) диск. Другими словами, согласно мнению этих авторов, 1 млн лет – это предельный срок. Таким образом, любые определения длительности процессов в эволюции планетной системы вызывают активные и длительные дискуссии (тем более что весьма часто длительность определяется компьютерным моделированием и компьютерными симуляциями).

⁴⁹ Но расхождения по поводу длительности периода образования планет, как мы еще увидим ниже, достаточно велики, некоторые исследователи расширяют этот период до 10^8 , то есть до 100 млн лет (см. об этом, например: Тлатов 2010: 175; Витязев и др. 1990: 6). Период образования планет от десятков миллионов до ста миллионов лет определял и О. Шмидт (см.: Там же: 269). Первые сто миллионов лет исключительно важны, считал И. Шкловский (1987: 45–46). Однако в пользу идеи, что по крайней мере первые планеты образовались в период до 10 млн лет, свидетельствуют наблюдения за молодыми звездами, в которых протопланетный диск вокруг звезды исчезает за достаточно быстрый период порядка ~ 10 млн лет (Кусков и др. 2009: 89; Вибе 2012; Тлатов 2010: 175; Muzerolle *et al.* 2010). Впрочем, есть мнения, что иногда исчезновение протопланетного диска у звезд занимает гораздо больше времени – десятки миллионов лет (Адушкин, Витязев 2007: 397; см. также выше).

тяжев и др. 1990: 7, 20–21; см. также: Макалкин, Дорофеева 1995). Это важно. Если бы его масса превышала 0,15 массы Солнца, оно аккумулировалось бы не в систему планет, а в звездообразный спутник Солнца (Найдыш 2007), то есть получилась бы двойная звезда.

Таким образом, в процессе образования Солнечной системы, как и везде в процессе самоорганизации и эволюции, количество определяет качество процесса. От того, больше или меньше вещества, энергии, населения и т. п., очень часто зависит, какая именно система образуется и какая ее ждет судьба*. И кстати заметить, такая вариативность показывает сосуществование разных линий эволюции. С одной стороны, планеты – это, образно говоря, результат нехватки материала для второй звезды, это неудавшиеся звезды (если планеты достаточно большие, как Юпитер), тела, собранные из обломков и остатков материи (то есть аутсайдеры, которые подбирали то, что осталось). Но с другой – потенциально возможности эволюции в них возрастают благодаря меньшим температурам и сохранению в результате этого молекул или атомов, а также меньшему размеру, вследствие чего «эксперименты» эволюции требуют намного меньше энергии (об этом см. ниже)*.

Хотя протопланетный диск был не слишком массивен по сравнению с газопылевым облаком, из которого родилась Солнечная система, тем не менее пространственно он был достаточно велик и весьма неоднороден. Размеры аккреционных дисков молодых звезд составляют 100–1000 а. е. (Дудоров и др. 2015: 11).

Горячий или холодный диск. По вопросу о том, был ли он горячим или холодным, давно ведутся споры. Долгое время считали, что планеты образовались из горячего газа, который постепенно охлаждался; позже вещество перешло в жидкую фазу и далее образовало твердую оболочку (Видьмаченко, Мороженко 2014: 14). Но у этой гипотезы были существенные сложности. В настоящий момент большинство космологов исходят из того, что при этом планеты сформировались из холодного материала, который позже был разогрет другими процессами.

Забегая вперед, скажем, что в отношении первичного состояния планет, когда они уже сформировались, развитие представлений шло по гегелевскому закону отрицания отрицания*. В 1950-х гг. произошел отказ от идеи первичной огненно-жидкой Земли (которую поддерживали О. Ю. Шмидт,

В. И. Вернадский, Г. К. Юри) и сформировалась идея о холодном начальном состоянии планет. В последние же десятилетия идет поворот к идее умеренно горячего состояния планет. Однако это горячее состояние достигалось теперь не за счет того, что планеты возникли из горячего газа диска, а за счет разогрева вещества уже в процессе его аккумуляции в зародышах планет и радиоактивности. Таким образом, можно говорить об условности понятия «начальное состояние планет» (Витязев и др. 1990). Отсюда вытекает задача моделирования состояния планет с учетом ее одновременно роста и структурирования, поскольку параллельно с наращиванием вещества в протопланетах шла и его дифференциация. Это сложная задача, которая тем не менее показывает *объемность эволюции* (Там же). Объемность – интересная характеристика, особенно важная при генезисе и росте систем, которая описывает развитие, усложнение, качественное изменение в разных уровнях, направлениях и линиях эволюции одновременно*. Так зарождение и рост первичных крупных надобщественных образований (мир-систем) в IV–II тыс. до н. э. происходили одновременно с усложнением политических и социальных структур, качественным ростом технологий, экономик, культуры и структуры поселений.

Вероятно, распределение температур в протопланетном диске было различным, диск был сильнее нагрет во внутренних своих частях. А внешние области диска оставались относительно холодными. В них стали развиваться уплотнения, которые и явились локальными гравитационными центрами формирования планет. Но сам механизм этого процесса исключительно спорный. Протопланетный диск, по-видимому, на 98 % состоял из того же газа, что и протосолнечное облако. А в последнем, напомним, молекулярный водород, гелий и все остальные вещества представлены по массе соответственно как 0,71; 0,28; 0,01. На пылевые частицы приходится по массе от 0,5 до 1,5 %. Но именно пылевые частицы сыграли особую роль (см. ниже)⁵⁰.

⁵⁰ Попутно отметим, что существуют прямые наблюдательные указания на то, что звезды образуются в областях с особенно большим количеством межзвездной пыли (Видьмаченко, Мороженко 2014: 18). Таким образом, пыль играет важную роль на всех стадиях эволюции космических тел. Этим подтверждается необходимость наличия разнородных компонентов в системе для реализации тех или иных трансформаций*.

От тех или иных параметров, например длительности и скорости процессов в протопланетном диске, зависела сама возможность образования планетной системы. Отсюда вытекает и важность определения длительности фаз, аналогично, как и при образовании Вселенной. Выше мы уже видели, что если бы масса протопланетного диска была существенно больше, то образовалась бы скорее вторая звезда. Кроме того, при реконструкции эволюции протопланетного диска важное значение приобретает проблема длительного поддержания турбулентности (неупорядоченных хаотических движений) в протопланетном диске, поскольку от интенсивности турбулизации вещества на разных этапах его эволюции в значительной степени зависят механизмы и сама возможность формирования планет (Маров и др. 2008: 240). Турбулентная природа является одним из ключевых свойств околозвездных газопылевых аккреционных дисков (см.: Маров и др. 2008; Zeldovich 1981; Фридман 1989; Dubrulle 1993; Balbus, Hawley 1998; Richard, Zahn 1999). Впрочем, сходные по типу процессы, которые можно назвать турбулентными, наблюдаются и на других уровнях эволюции.

4.3. Образование пылевого субдиска

Концентрация пыли как возможность для формирования твердой материи. Процессы образования и эволюции протопланетного диска выступают как ведущие для понимания того, как формировались планеты, и для представления об исходном материале, из которого они образовывались. Напомним, что на пылевые частицы в солнечном протопланетном диске приходилось по массе от 0,5 до 1,5 % (Пикельнер 1976: 13; Забродин и др. 2008: 298; Засов, Постнов 2011: 99; Маров и др. 2008; Сурдин 2011; Reipurth *et al.* 2007). Но для образования планет такой концентрации было, скорее всего, недостаточно. Соответственно, предполагается, что она усилилась. Как мы уже говорили, концентрация определенного вещества (редких ресурсов) – важнейший паттерн эволюции и важнейшее основание для перехода к какому-либо новому качеству. Вот почему в процессе эволюции протопланетного диска очень важным было формирование так называемого субдиска, в котором в результате турбулентных и иных процессов происходила концентрация пыли.

Эта пыль представляла собой хотя и микроскопические, но твердые частицы водяного льда и слипшихся молекул и атомов,

в частности углерода (например, в виде графита и карбида кремния), железа и других твердых веществ микронного размера. В результате аккумуляции в молодом Солнце основной части газа концентрация пыли в протопланетном диске на более поздней стадии его эволюции возросла (см., например: Засов, Постнов 2011: 199). Но она стала еще более высокой в результате оседания пыли к средней плоскости диска. Ряд космологов считают, что наиболее вероятный путь образования зародышей планет связан с оседанием пылевых частиц к средней, экваториальной плоскости диска, в которой образуется тонкий слой (субдиск). По их мнению, пыль играет ключевую роль в образовании планет (Там же).

Газ и пыль. Как образовался пылевой субдиск? Важно понимать, что допланетный диск постоянно находился в движении (в нем были турбулентные движения и неравномерности), поскольку существовало притяжение его к молодому Солнцу и оставалась инерция вращения. На эволюцию протопланетного диска и образование пылевого субдиска могли оказать влияние различные физические силы (ультрафиолетовая активность протосолнца, солнечный ветер, излучение, магнитные и электрические поля и т. п.). Те или иные факторы могли сыграть свою роль в конденсации вещества (см.: Витязев и др. 1990: 269). Особое значение имело то, что пылинки в составе диска вращались в окружении газа. Но, поскольку скорости вращения и другие параметры у пыли и газа были разными и газовое окружение могло влиять на замедление скорости приближения пылинок к Солнцу, это способствовало тому, что, опускаясь сквозь газ, частицы пыли двигались к центру диска⁵¹. Таким образом, в центре допланетного диска складывался пылевой субдиск. Но в нем возникло уже совсем иное соотношение пыли и газа. В частности, по разным оценкам, оно меняется в 10–1000 раз по сравнению с космическим (Там же: 116). Уже на стадии образования субдиска пылинки могли увеличиваться в размерах (за счет слипания и притягивания), о чем мы еще скажем ниже. Таким

⁵¹ Относительно различных физических параметров движения пылинок, особенно слипающихся, в газе существует масса неясностей и дискуссионных моментов, множество конкурирующих моделей. Кроме того, пыль является основным поглощающим и рассеивающим электромагнитное излучение агентом. Присутствие в межзвездной среде пыли влияет на характеристики излучения исследуемых небесных тел, на тепловой баланс межзвездного газа, причем пылинки могут содействовать как его нагреву, так и охлаждению (Жукова и др. 2012: 59).

образом, произошел очень важный для будущей планетной системы переход – концентрация твердого вещества (пока в виде пыли), которая сыграла определяющую роль в росте сначала допланетных тел, а затем и планет.

Здесь, кстати, стоит отметить, что особо активно слипаются в пылинки атомы углерода. Уже из сотни атомов может возникнуть пылинка, пусть и наноразмера. В частности, углерод образует сложные структуры типа фуллеренов (ныне активно используемые в нанотехнологиях), которые найдены в космической пыли (Громов 2012: 17)⁵². Мы уже говорили о том, что углерод играет роль холодильника. Таким образом, налицо различная специализация элементов в природе, причем на самых ранних стадиях истории Вселенной.

Согласно некоторым моделям, эволюция околозвездного протопланетного диска до образования обогащенного пылью субдиска занимала от 1 до 2 млн лет (Маров и др. 2008: 268).

Пылевой субдиск реально представлял собой довольно тонкий диск (по сравнению с его радиусом). Расчет показывает, что пыль собирается в диск толщиной 10^{-3} – 10^{-4} от его радиуса (Видьмаченко, Мороженко 2014: 19). Важно также, что он должен быть непрозрачным для солнечных лучей, и поэтому они не достигают периферии диска (Там же). Это определяло в том числе разные условия образования планет в зависимости от близости к протозвезде. О дальнейшей его эволюции см. ниже.

4.4. Начало образования допланетных тел

Основные теории формирования планет. Вопрос, образовались ли планеты из газовых сгустков (см. выше) или уже из твердого вещества, обсуждается давно⁵³.

⁵² О фуллеренах в нанотехнологиях см.: Рыбалкина 2005; Балабанов 2010; Гринин Л. Е., Гринин А. Л. 2015: гл. 10.

⁵³ Образование планет из газовых сгустков (протяженных массивных сгущений-протопланет) предполагается в работах П.-С. Лапласа, Дж. Джинса, Дж. Койпера, В. Г. Фесенкова, А. Камерона, а образование планет из твердого вещества – в работах Лигендеса, Ф. Мультона и Т. Чемберлена, О. Ю. Шмидта, Х. Альвена, Г. Аррениуса, К. Эджворта, Л. Э. Гуревича и А. И. Лебединского и др. (Витязев и др. 1990: 4; Витязев, Печерникова 2010: 161). В рамках этих подходов существуют различные модификации моделей. Конечно, эти подходы различаются не полностью, в частности, и в рамках теории газовых сгустков накопление твердого вещества также имеет место.

Теория пылевых сгущений исходит из того, что в течение определенного времени (на протяжении примерно 100 тыс. лет) в связи с силами гравитации и турбулентности происходило сжатие субдиска и образование в нем пылевых сгущений (Маров и др. 2008: 268). В условиях гравитационной неустойчивости плотного пылевого слоя и турбулентности в нем могли образовываться допланетные пылевые сгущения (Гуревич, Лебединский 1950; Сафронов 1969; Витязев и др. 1990). А уже в рамках этих сгущений происходили процессы конденсации, слипания, соединения вещества, которые стали основой формирования более крупных тел (Витязев и др. 1990; Забродин и др. 2008: 298, 314; см. также: Савченко, Смагин 2013: 8; Найдыш 2007).

Образование планет из твердого вещества рассматривается в рамках теории последовательной аккреции (или аккумуляции)⁵⁴. Многие космологи, если не большинство, считают ее более вероятным сценарием (Лин 2008). Согласно теории последовательной аккреции, крошечные частицы пыли слипаются, образуя крупные глыбы. Ниже мы подробнее разберем обе гипотезы.

Однако добавим, что помимо этих теорий есть и иные, например возможность образования крупной планеты (такой как Юпитер) путем коллапса (примерно так, как образуются звезды; этот процесс мы описывали в предыдущей главе). О возможности коллапса мы поговорим в следующих главах⁵⁵.

4.4.1. Теория пылевых сгущений и препланетезималей

Дискуссии об эволюции пылевого субдиска. Сгущения и препланетезимали. Гипотеза о формировании пылевого субдиска достаточно распространена среди сторонников разных взглядов на природу образования планет. Пылевой субдиск – это субстанция, из которой и возникали планетезимали и зародыши планет. Однако по поводу того, как происходила эволюция этого пылевого субдиска, мнения расходятся радикально.

⁵⁴ Отметим, что когда говорят об *аккреции*, чаще имеют в виду выпадение на поверхность газа, а выпадение на поверхность допланетного тела твердого вещества или объединение твердых тел часто называют *аккумуляцией*. Но это в отечественной традиции, а на Западе слово “accretion” обозначает и аккумуляцию, и аккрецию (см., например: Рускол 2002).

⁵⁵ Существуют и малопопулярные теории. Так, Х. Альвен с 1940-х гг. разрабатывал гипотезу, согласно которой образование планетной системы на всех этапах определялось в основном электромагнитными силами (Видьмаченко, Мороженко 2014: 16).

В частности, есть идея о возможности сильного уплощения газопылевого слоя (пылевого субдиска), важная для объяснения возможности возникновения в нем гравитационной неустойчивости и соответственно формирования крупных пылевых сгущений. Некоторые считают, что могли существовать очень крупные сгущения с массами, достигавшими нескольких масс Марса (см. подробнее: Ипатов 2015: 389 и др.).

Но идея о фрагментации пылевого субдиска и образовании в результате пылевых сгущений принимается далеко не всеми и многими ставится под сомнение (см. об этом, например: Витязев и др. 1990: 269). Основной проблемой здесь является сама возможность возникновения гравитационной неустойчивости. В частности, сопротивление газа тормозит пылевые частицы и их высокопористые агрегаты, образовавшиеся путем слипания более мелких частиц. Турбулентное движение газа вызывает турбулентную диффузию твердых частиц, которая противодействует развитию гравитационной неустойчивости в пылевом слое (Макалкин и др. 2016). Тем не менее эти же авторы считают возникновение гравитационной неустойчивости возможным, особенно для плотного пылевого слоя, в котором масса пыли много больше массы газа (Там же).

Для дальнейшего изложения здесь важно пояснить, что для объяснения первичных процессов формирования протопланет в рамках теории фрагментации пылевого субдиска был введен термин *препланетезимали* – сгущения материи в рамках крупных фрагментов или колец протопланетного диска (когда такая фрагментация случилась). Препланетезималиями также называют самогравитирующие пылевые сгущения. В них – за счет сложных процессов гравитации и других влияний – возникают уплотнения и неоднородности. И далее идет процесс образования из этих сгущений твердых тел (см., например: Ипатов 2015: 389). В этом смысле резонно представлять препланетезимали как предшественников планетезималей⁵⁶. Если рассматривать это в аспекте, что препланетезимали – пылегазовые сгущения, а планетезимали – твердые тела, то это выглядит логично, поскольку сгущения могли

⁵⁶ Так, В. С. Сафронов считал, что крупные допланетные пылевые сгустки (препланетезимали), которые образовались в результате распада допланетного пылевого слоя (субдиска) после его уплотнения, достаточного для гравитационной неустойчивости (ГН) в слое, являются предшественниками первичных планетезималей (Сафронов 1969; см. также: Geretshauer *et al.* 2011; Макалкин и др. 2016).

трансформироваться в твердые тела. Однако они трансформировались уже в крупные твердые тела, то есть *крупные* планетезимали. Но поскольку планетезималями называют также мельчайшие и мелкие объекты (крошечные слипания космической пыли), то здесь возникает противоречие. Препланетезимали не могли быть предшественниками таких мелких планетезималей, а способны были стать предшественниками только уже крупных планетезималей. Иными словами, препланетезимали формировались в планетезимали, но уже минуя стадию мелких тел. В этом подходе как бы комбинируются идеи образования протопланет из газовых сгущений и из плотного вещества.

В некоторых работах препланетезимали выступают сразу как предшественники планет. Эти подходы предполагают, что в процессе дефрагментации протопланетного диска образовалось небольшое количество сгущений или колец, крупных по размеру, которые и стали в будущем планетами. Однако мы сейчас рассматриваем теорию сгущений пылевого субдиска, в которой число сгущений не равно числу будущих планет, а существенно больше. То есть в данном случае препланетезимали – это сгущения пыли и газа, которые после ряда трансформаций превращаются в твердые тела разных размеров и масс и начинают роиться.

В любом случае в гипотезах о препланетезималях уже пылевые агрегаты в рамках сгущений должны быть достаточно крупными, измеряемыми в сантиметрах (не менее 10 см на расстоянии Земли и до полуметра на расстоянии Юпитера). А самогравитирующие пылевые сгустки должны иметь размеры на расстоянии Земли не менее ~ 10 тыс. км и массу, как у астероидов с радиусом ~ 10 км. На расстоянии Юпитера образуются самогравитирующие пылевые сгустки с размерами ~ 0,1 млн км и массами, соответствующими массам ледяных планетезималей с радиусом ~ 30 км (Макалкин и др. 2016).

Процесс превращения сгущений-препланетезималей в твердые тела не был простым и быстрым, одномоментным. Сначала сгущения должны были сократиться в первоначальном размере минимум в 3–4 раза, достигнуть определенного равновесия. Далее они могли сжиматься лишь при столкновениях. Так, при столкновениях сгущений одинаковой массы плотность их могла увеличи-

ваться в два раза или даже более, что вело к возникновению более крупных тел и одновременно их разогреванию (Витязев и др. 1990: 58). Препланетезимали еще до превращения в твердые тела могли значительно увеличиваться по массе путем притяжения и втягивания окружающих пыли и газа. Но механизмы превращения сгущений в твердые тела ясны не полностью.

В целом представления о размерах препланетезималей, скоростях уменьшения радиуса этих будущих протопланет, длительности процесса превращения их в твердые тела и о многом другом противоречивы и взаимоисключающи. Разброс мнений здесь огромен, поскольку все эти параметры выведены в основном за счет моделирования. Так, по времени образования первичных препланетезималей моделирование дает период от десятков до миллионов лет. Даже в меньшем разбросе мнений срок превращения сгущений в тела (зародыши планет) в зоне земных планет колеблется между сотнями тысяч и миллионами лет (Там же; Відьмаченко, Мороженко 2014: 21). В отношении определения длительности процесса также возможны вариации в связи с местоположением и параметрами планеты. Огромна и амплитуда – от нескольких оборотов вокруг протосолнца до десяти миллионов лет – в разных моделях в отношении сгущения препланетезималей до твердых тел. Неясно также, образовывались ли эти сгущения одновременно или нет, на каком расстоянии от протосолнца и т. п.

Важным вопросом является и то, насколько часто препланетезимали сталкивались между собой (а столкновения могли вести к изменению размеров, фрагментации, изменению процессов). По мнению С. И. Ипатова (2015: 389), до периода сжатия до плотности твердых тел большинство препланетезималей не участвовало в столкновениях с другими препланетезималами.

4.4.2. Теория последовательной аккреции планетезималей и ее проблемы

Суть теории последовательной аккреции/аккумуляции. Однако стадия пылевых сгущений – больше отечественная версия, и в работах зарубежных исследователей она почти не рассматривается (Витязев и др. 1990: 269). Основной подход многих зарубежных (и части отечественных) ученых связан с теорией последовательной аккумуляции. Последняя начинается с того, что мелкие пылин-

ки слипаются и захватывают газ. Довольно давно такие образования, то есть мелкие твердые частицы, вокруг которых уже могло нарастать вещество, получили название *планетезималей*. Последние, по мнению многих, образовались в диске в результате конденсации вещества, поскольку в облаке участились столкновения отдельных пылинок. В итоге начался процесс слипания пылинок и формирования из них сначала мелких, а затем все более крупных планетезималей, которые постепенно выросли в зародыши планет.

Суть теории последовательной аккреции образно выразил Д. Лин (2008), сказав, что даже гигантские планеты начинались со скромных тел – микронных пылинок, плавающих во вращающемся газовом диске.

Особенности пылевой структуры и роста. Насколько, однако, возможны слипания пылинок и их рост до довольно крупных размеров? Ведь в межзвездных облаках не только не образуются изолированные планетные тела, более того, в них не наблюдается рост частиц пыли более 10^{-5} – 10^{-4} см, то есть не больше 1 мкр (Гринберг 1970; Забродин и др. 2008: 298). Предполагается, что в облаках межзвездного пространства существуют процессы, препятствующие росту пылевых частиц (Маров и др. 2008: 256). Между тем, по данным работ (Макалкин, Дорофеева 1995; Макалкин и др. 2016), в протопланетном диске Солнца частицы достигают распределения по размерам, в котором имеются и мелкие частицы размером около 1 мкм, поддерживающие высокую непрозрачность вещества диска, и крупные – около 1 см. Средний размер пылевых частиц составляет несколько десятков микрон, то есть существенно больше, чем в межзвездных облаках (между 10^{-3} и 10^{-2} см; см. также: Витязев и др. 1990: 31).

Высказываются разные предположения. Возможно, планетезимали быстрее росли в более холодных зонах. Сначала пылевые частицы оседают к плоскости диска, где в условиях низких температур и низких скоростей движения газ намерзает на пылинки. Пылинки слипаются при столкновениях, образуя постепенно растущие макроскопические объекты – хлопья размером в сантиметр и более (см.: Засов, Постнов 2011: 99). Так или иначе, ключевым пунктом проблемы образования планет в настоящее время является *физический* механизм, позволивший пылевым частицам в протопланетных

дисках объединиться с образованием планетезималей и планет. Нужно объяснить рост размеров частиц и возможность образования достаточно крупных тел, способных далее расти с помощью своего тяготения. Этот вопрос относится к числу наиболее сложных и не решенных до настоящего времени. По существу, от его решения зависит представление о путях эволюции планетной системы Солнца.

Ряд авторов утверждает, что в протопланетном диске мог происходить рост размеров частиц при столкновении их между собой за счет слипания (Ривс 1976; Сафронов 1969; Забродин и др. 2008)⁵⁷. М. Я. Маров, А. В. Колесниченко, А. Б. Макалкин и др. (2008: 256) также указывают, что согласно предположению (Weidenschilling 1980; 1984), которое разделяет ряд специалистов, пылевые частицы могли вырасти до размеров планетезималей в результате объединения (слипания) при взаимных столкновениях. Действительно, на самой ранней стадии эволюции протопланетного диска частицы субмикронных и микронных размеров (межзвездного происхождения) могли слипаться под действием поверхностных сил при скоростях соударения. Но потенции такого роста по мере увеличения размеров планетезималей, по сегодняшним представлениям, весьма слабые.

Дело в том, что экспериментальные данные не подтверждают возможности такого объединения для тел в интервале размеров от 1–10 см до 100 м, так как в этом интервале не эффективны ни поверхностные, ни гравитационные силы (Маров и др. 2008: 256). Отсюда рост комков упирается в так называемый метровый барьер. Не успев набрать и 1 м в диаметре, эти наращивающие массу глыбы становятся слишком большими, чтобы их могли удержать электростатические силы, но еще слишком малы, чтобы их смогли удержать от разрушения силы гравитации (Элкинс-Тантон 2017: 97). Есть и другие аргументы против возможности мелких планетезималей вырасти. Поэтому против идеи о дальнейшем росте планетезималей за счет слипания имеются серьезные возражения.

⁵⁷ Предлагаемые возможные механизмы слипания частиц пыли: вандерваальсовы силы; разные типы «радиационного» спекания (Ривс 1976: 413); эффект холодной сварки (Сафронов 1969: 139) и др. Произойдет ли слипание или дробление частиц при столкновении, зависит от их относительной скорости.

4.4.3. Сравнение двух гипотез с точки зрения эволюции

Истинным критерием определения ценности рассматриваемых теорий будут установленные когда-нибудь на основе моделирования, экспериментов и наблюдений факты, которые и позволят создать базовый сценарий планетообразования. В условиях же конкуренции потенциально равных гипотез и с учетом направленности книги имеет смысл применить и эволюционный критерий их оценки.

С точки зрения эволюционистики более привлекательна первая теория. Второй же подход – формирование из малого все более крупного – очень примитивная, плоская эволюция, так как в ней нет перерывов постепенности, перехода количества в качество путем резких трансформаций, смены скорости изменений и т. п. Обычно новые структуры так не образуются⁵⁸. Подобное медленное и постепенное изменение в виде аккумуляции может быть только частью более сложного процесса формирования более или менее крупных структур, который приводит к коренным трансформациям и появлению нового качества системы, переходу к новому аттрактору.

Постепенные изменения в рамках теории последовательной аккумуляции напоминают эволюцию в духе Г. Спенсера и эволюционистов XIX в. Выше мы говорили о его законе изменения от неопределенной, несвязной однородности к определенной, связанной разнородности через *постоянную* дифференциацию и интеграцию (то есть процессы, согласно этому закону, идут постоянно и незаметно)*. Но такие подходы давно отвергнуты. В рамках современных взглядов на эволюционные процессы они выглядят примерно так же, как представления некоторых политических философов прошлого, что государства образуются путем постепенного разрастания семей, а царская власть над подданными сродни власти домохозяина над домочадцами. Однако для образования самого примитивного государства должны произойти очень сложные социальные и иные процессы в формирующемся варварском обществе (см., например: Гринин 2011). Либо

⁵⁸ Что-то новое может вырасти из малого, как, например, синтетическая теория эволюции свидетельствует о том, что новые популяции и даже виды способны происходить от отдельных пар особей. Но здесь процессы развиваются (до определенного экологией уровня, конечно) в геометрической прогрессии, когда число особей увеличивается не постепенно, а довольно быстро, а в случае пылинок увеличение массы идет все-таки путем арифметического прибавления (по крайней мере, пока тела не достигнут определенного объема).

это можно сравнить с наивными попытками экономистов XIX в., взяв за начало пример Робинзона Крузо, вывести из этого макроэкономические процессы.

Поэтому более диалектический и более правдоподобный паттерн – смена медленных изменений быстрыми, радикальными, нередко связанными с катастрофами, резкими пертурбациями, коллапсами и т. п., и наоборот: за быстрыми процессами резких изменений следует медленная эволюция*. Например, сначала происходит формирование новой субстанции из предшествующей ей путем достаточно резкого изменения параметров в последней, а потом наблюдается длительный путь накопления изменений, который приводит к формированию уже полноценного объекта с качественно новыми характеристиками. Именно так протосолнце образовывалось из облака: сначала довольно быстро под влиянием гравитации, сгущения и разогрева, то есть резкого изменения параметров, а затем постепенно за счет аккреции. В рамках теории сгущений схожим образом происходил процесс образования планетезималей. Сначала в результате фрагментации диска образовались препланетезимали-сгущения. Затем они стали уплотняться в результате столкновений и других процессов (все это – фаза быстрых изменений). А уже превращение сгущений в первичные элементы твердой материи могло идти более медленно, сменяясь еще более медленной аккумуляцией вещества в планетезималиях.

Отметим, что описанный в теории сгущений процесс дефрагментации уплощенного субдиска являет собой один из примеров эволюционного паттерна – разрушения существующей структуры (хотя структура там аморфная) для образования новой структуры. Но это еще не творческое разрушение (по выражению Й. Шумпетера)* – о нем мы скажем далее, а паттерн циклов смены порядка и хаоса (о нем см. в *Главе 7**). Это также несколько напоминает процесс формирования горшка из куска глины. При этом даже напрашивается сравнение вращения гончарного круга с вращением диска. И, продолжая сравнение, скажем, что гравитация повсюду выступает как искусный гончар.

Важнейший принцип (и паттерн) формирования нового – появление неоднородностей. Аристотель считал, что природа не терпит

пустоты. Действительно, абсолютной пустоты во Вселенной нет, даже в вакууме. Аналогично можно сказать, что *эволюция не терпит однородности и равномерности*. Равномерность в природе, конечно, есть, но не она открывает возможности для эволюционных изменений, а именно неоднородности⁵⁹. Для эволюционного изменения (даже в рамках типичной трансформации без качественного эволюционного роста) нужно возникновение *критической* неоднородности, которая способна стать *ядром изменений**. Так, абсолютно эгалитарное общество, если таковое можно было бы представить, неспособно развиваться. Для образования какой-то структуры, даже аморфной, может требоваться инородность, появление чужой субстанции (во главе стада овец идет козел; в образовании многих этносов важную роль сыграл инородный субстрат, то есть группы иноземцев). Неоднородности способны стать триггером, запускающим процесс.

Обратим еще внимание, что едва ли не любые фазовые переходы и эволюционные трансформации требуют какой-то неординарной ситуации, неустойчивости (бифуркации), которая и позволяет изменить структуру (природу, системную форму и т. п.) объекта или процесса*. Чаще всего такая неустойчивость есть результат предшествующего накопления изменений, хотя часто и трудноуловимых*.

4.4.4. Процесс формирования зародышей планет

Отличия разных взглядов на сгущения. Важнейшим этапом в процессе образования зародышей планет является формирование крупных твердых (сплошных) тел-планетезималей. В этом сходны все теории и гипотезы. Однако по поводу числа, размеров и иных

⁵⁹ Напомним, что в первой книге монографии (Гринин 2013: 87) много внимания было уделено неоднородностям. В частности, после эпохи рекомбинации водорода и остывания Вселенной стала закладываться ее крупномасштабная структура. Однако она могла сложиться только благодаря возникающим неравномерностям в газе атомно-молекулярной материи, наполнявшей Вселенную. Это происходило благодаря силам гравитации, которые сразу же подхватывали и многократно наращивали эти неравномерности. Мало того, теория инфляции даже утверждает, что вся последующая крупномасштабная структура Вселенной была в некотором роде предопределена мельчайшими флуктуациями плотности, возникшими уже на стадии инфляции в чрезвычайно короткие доли миллисекунд (Там же: 42). Мы считаем такой подход малореальным, однако роль флуктуаций и неравномерностей в эволюции в любом случае очень велика.

параметров этих крупных тел, как мы отмечали, имеются существенные расхождения. Есть различия и в оценке рубежных (критических для процесса) размеров планетезималей. Ниже мы увидим, что, согласно теории последовательной аккумуляции вещества планетезималями, условно считают таким образование километровых тел. Теория сгущений в интерпретации, например, А. В. Витязева и др. (1990: 58) свидетельствует о больших размерах, отмечается, что крупнейшие тела могли достигать размеров в тысячи километров.

Так или иначе, важно понимать, что образовался рой тел с самыми разными спектрами масс и размеров. Действительно, правило достаточного разнообразия требует наличия огромного спектра объектов или явлений, нередко их континуума*.

Хаос и возникновение предпосылок для формирования порядка. Роль газа и льда. Роль газовой компоненты в образовании допланетных тел и особенно в динамике роя тел была весьма важной. Она влияла на замедление скоростей, направление движения к Солнцу малых тел, помогала осуществлять и своего рода сортировку их по размеру (Там же: 77). Дело в том, что движение частиц в протооблаке (и субдиске) было весьма хаотичным, хотя движение в основном было направлено к Солнцу как главному гравитационному центру. Из-за баланса давления, гравитации и центробежной силы скорость движения газа была меньше, чем у пылинок. Пылинки размером более нескольких миллиметров опережают газ, поэтому встречный ветер тормозит их и вынуждает по спирали опускаться к звезде. Чем крупнее становятся эти частицы, тем быстрее они движутся вниз (Лин 2008).

Таким образом, в этом хаосе частицы движутся с разной скоростью. Однако это является предпосылкой для начала самоорганизации. Как мы уже говорили, абсолютная гомогенность делает невозможными эволюционные процессы. Наличие какой-либо разницы, даже небольшой, способно запустить процессы разделения вещества, что начинает сепарировать разные фракции. А на этой базе возникают иная структура и иной порядок*.

Среди множества сил, которые влияли на процессы концентрации и аккумуляции материи, превращения протооблака в твердые тела, формирования орбит и т. п., особую роль, конечно, играли

две: гравитация и сила солнечного излучения. И обе они в прямой пропорции зависели от расстояния объекта от Солнца. Формирование двух групп планет внутренней и внешней зон Солнечной системы также в огромной степени зависело от этих сил. Уже величина орбиты протопланеты значительно влияет на ее возможности аккумуляции массы.

Как мы уже говорили, между расстоянием 2–4 а. е. от Солнца, примерно посередине между орбитами Марса и Юпитера, возникает так называемая линия льда, или снеговая линия. Линия льда означает замерзание воды в этом районе, так как сила излучения Солнца слабеет. Вода – весьма распространенный компонент в Солнечной системе (и не только). Приближаясь к Солнцу, частицы нагреваются, и постепенно вода и другие вещества с низкой температурой кипения, называемые летучими, испаряются (Лин 2008). *Линия льда делит, таким образом, Солнечную систему на внутреннюю область, лишенную летучих веществ и содержащую твердые тела, и внешнюю, богатую летучими веществами и содержащую ледяные тела*⁶⁰. На самой линии льда накапливаются молекулы воды, испарившиеся из пылинок, что служит пусковым механизмом для целого каскада явлений. В итоге под влиянием различных факторов частицы начинают скапливаться, и *линия льда превращается в полосу его скопления*. Скапливаясь, частицы сталкиваются и растут. Некоторые из них прорываются за линию льда и продолжают миграцию внутрь; нагреваясь, они покрываются жидкой грязью и сложными молекулами, что делает их более липкими. Некоторые области настолько заполняются пылью, что взаимное гравитационное притяжение частиц ускоряет их рост (Там же).

Соответственно, линия льда способствует созданию планетезималей. К месту будет заметить, что всегда есть условия, более или менее подходящие для каких-либо процессов. Эта удачность/неудачность крайне важна для эволюции и понимания ее процессов*.

⁶⁰ Известно, что крупнейшие спутники Юпитера Ганимед и Каллисто наполовину состоят из воды, и по мере удаления от Солнца вода становится главной составной частью тел. Она преобладает на спутниках Сатурна, на Уране и Нептуне (и их спутниках), а также в ядрах комет (Рускол 2002).

Образование крупных планетезималей. По мере возрастания масс планетезималей и достижения ими километрового размера у них появилась способность удерживать близко находящиеся частички за счет тяготения. Образуется огромное количество (миллиарды) километровых планетезималей, которые на последней стадии формирования планет «сгребают» почти всю первичную пыль (Лин 2008). По мере роста планетезималей образовался так называемый *протопланетный рой объектов* (само слово очень емкое, вызывает ассоциации с роем насекомых!). В протопланетном рое присутствовали планетезимали самых разных размеров. Естественно, что среди них было намного больше мелких, меньше средних. Постепенно выделилась и небольшая по количеству «элита», тела размером с Луну или даже Меркурий. Но механизм их выделения пока неясен (одну из версий см.: Schlichting, Sari 2011). И соответственно, здесь много противоречивых гипотез (см.: Витязев и др. 1990: 269). Эта важная и пока физически не объясненная стадия формирования планет называется *взрывным ростом протопланет* (runaway growth during planet formation).

С эволюционной точки зрения, с точки зрения протекания сложных процессов, развитие множества однотипных объектов не может происходить равномерно (особенно обидна эта закономерность для социальных реформаторов, которые хотели бы уничтожить неравенство, но в любой ситуации оно возвращается в том или ином виде)*. Однако физические и космологические причины здесь неясны. Возможно, для формирования зародышей планет требовалось одновременно несколько совпадающих процессов. Так или иначе, с некоторого времени начался кумулятивный процесс увеличения масс зародышей планет, поскольку крупные и крупнейшие тела в системе допланетных тел растут при столкновениях с любыми другими объектами, чего нельзя сказать о телах меньшей массы (Там же: 75).

Количество крупных зародышей планет, по разным предположениям, было различным – от единиц до сотен. Для понимания соотношения крупных, менее крупных и мелких тел среди планетезималей можно опираться на правила распределения вещества, согласно которым с увеличением размеров количество тел убывает по степенному закону: например, десятикилометровых тел

в 1000 раз больше, чем стокилометровых, а километровых – в 1000 раз больше, чем десятикилометровых (Рускол 2002)⁶¹.

Образование планетезималей длилось, согласно расчетам, десятки и сотни тысяч лет, протопланетных тел из планетезималей – несколько миллионов лет. Со временем орбиты крупнейших тел стали приближаться к круговым, а сами они становились центрами притяжения всего окружающего их вещества, явившись зародышами планет (см., например: Савченко, Смагин 2013: 8, 32).

⁶¹ Это важный штрих к неоднократно упомянутому нами правилу о том, что большие объекты всегда представляют собой малочисленное меньшинство.