

## **Часть II. ПРОТОСОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА ДО ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАНЕТ**

### **Глава 3. Формирование протосолнечной системы из газопылевого облака**

#### **3.1. Вводные замечания**

**Факты и гипотезы в истории Солнечной системы.** Уже более двухсот лет гипотезы о происхождении Солнечной системы опираются на идеи, высказанные И. Кантом и П. С. Лапласом, что она образовалась под воздействием гравитации из гигантской небулы, или туманности (*nebula* [лат.] – туман). Предложенные этими учеными механизмы образования Солнца и особенно планет сегодня отвергнуты. Но сама идея образования Солнечной системы из вращающейся туманности (или газопылевого облака) в процессе ее гравитационного сжатия стала общепринятой. Среди теорий, восходящих к небулярной гипотезе И. Канта и П. С. Лапласа, можно упомянуть теории Ф. Мультона и Т. Чемберлена, Дж. Койпера, Х. Альвена, Ф. Хойла, О. Шмидта, С. Всехсвятского и др. (Савченко, Смагин 2013: 8). Есть исследователи, полагающие, что имело место раздельное образование Солнца и протопланетного диска, из которого впоследствии сформировались планеты. Но согласно ведущей гипотезе, Солнце и его планеты образовались из единой протосолнечной туманности (Ривс 1976: 18; Макалкин, Дорофеева 1995: 99; Забродин и др. 2008: 298; Витязев, Печерникова 2010).

Как уже было сказано, вести речь об истории Солнечной системы в полном смысле слова не всегда возможно, поскольку для истории требуется большое число доказанных фактов, позволяющих выстроить историческое повествование. Относительно же формирования Солнечной системы таких фактов (хотя число их растет) пока явно недостаточно, зато существует много гипотез и моделей. Гипотезы лежат и в основе начальной фазы истории Сол-

нечной системы о ее формировании из газопылевого облака. Однако здесь ситуация меняется, поскольку с каждым годом гипотезы подкрепляются данными наблюдений за процессом возникновения молодых звезд и открытиями множества экзопланет. Это делает модели более надежными и позволяет сформировать базовый сценарий (см. ниже). Однако огромное количество процессов и проблем представляют собой исключительно спорные и дискуссионные моменты, особенно механизм формирования планет (см. об этом в *Части III*). Поэтому получается, как ни странно это звучит, что благодаря более полному знанию процессов формирования звезд мы лучше представляем самые начальные фазы истории Солнечной системы, чем период формирования планет и планетной системы. То же самое наблюдается в ситуации с историей Вселенной, где мы лучше представляем первые минуты, чем тысячи лет, а первые тысячи и миллионы лет лучше, чем первые миллиарды.

**О начальной точке истории.** Когда говорят об истории, всегда встает вопрос о хронологии и длительности процессов. По очень приблизительным подсчетам, возраст Солнечной системы определяется в 5 млрд лет, но более точные оценки «вращаются» вокруг меньших значений, приблизительно в районе 4,6 млрд лет. В частности, на основе радиоизотопных исследований древнейшего метеоритного вещества возраст Солнечной системы был определен в 4,56–4,57 млрд лет (Shukolyukov, Lugmair 2003; Витязев, Печерникова 2010: 168; Pflanzner *et al.* 2015)<sup>27</sup>. Встречаются и оценки, превышающие возраст 4,6 млрд лет. Так, например, Р. Хейзен говорит о возрасте метеоритных пород (хондр) в 4,656 млрд лет (Hazen 2012; Хейзен 2015: 17). К этой дате нужно добавить еще некоторый начальный период (несколько миллионов), в течение которого твердого вещества в Солнечной системе еще не было, а также время первичных процессов сжатия протосолнечного газопылевого облака.

**Первые периоды истории.** Благодаря накопленным данным удастся в самых приблизительных чертах описать первый период формирования Солнечной системы: от коллапса протосолнечного газопылевого облака до образования протосолнца и первичной системы протопланет. Считается, что Солнце и планеты произошли

---

<sup>27</sup> Возраст древнейших анортозитовых пород Луны и цирконов Земли лишь немного меньше и оценивается в 4,4 млрд лет (Imke, Lissauer 2001).

почти одновременно из общей газопылевой туманности (см., например: Тлатов 2010: 175). Почти одновременно означает, что разрыв между образованием протосолнца и протопланет был по масштабам современного возраста Солнечной системы небольшим, хотя оценки времени этого процесса значительно колеблются: от сотен тысяч лет до примерно 100 млн лет (Тлатов 2010). Как мы увидим ниже, эти оценки также связаны с различными точками зрения на то, сформировались ли все планеты одновременно или нет, находились ли они сразу вблизи своих орбит или нет и т. п. Возможно, первые протопланеты (часто думают, что это был протояпитер) сформировались в течение нескольких миллионов лет, а процесс формирования остальных планет мог затянуться на несколько десятков миллионов лет. Еще дольше могли продолжаться их миграции до обретения ими постоянных орбит. Но эти процессы пока недостаточно понятны, вокруг них создано много противоречивых и взаимоисключающих гипотез (см. *Главы 6 и 7*).

Как в процессе формирования планет и их спутников, так и в первые сотни миллионов лет история планетной системы складывалась из столкновений, слияний и бомбардировок древними метеоритами. Различаются две эпохи «тяжелых бомбардировок» планет и их спутников планетезималями и метеоритами. Ранняя эпоха имела место в период формирования планет, то есть в первые десятки миллионов лет (об этом подробнее сказано в *Главе 6*); поздняя началась примерно полмиллиарда лет спустя (см. *Главу 7*). Важной частью истории Солнечной системы были также приобретение шарообразной формы планетами и их спутниками и процессы конвекции в них. Последняя сформировала их структуру (в частности, ядра). Конечно, здесь очень многое зависело от состава планет (твердых или газовых), а также близости планеты к Солнцу. Так или иначе, в основных своих чертах Солнечная система сформировалась в первые несколько сотен миллионов лет, возможно, в пределах одного миллиарда лет (см., например: Альвен, Аррениус 1979: 50–51, подробнее см. в *Главе 7*). Кое-где на отдельных планетах и спутниках остались следы чудовищных столкновений с древними небесными телами (планетезималями или астероидами). Но в основном эти следы относятся к более позднему периоду.

Таким образом, повторим, конкретная история первых нескольких сотен миллионов лет Солнечной системы пока остается во многом белым пятном (она крайне отрывочна и недостоверна), тем более что на Земле древнейших пород не сохранилось (они могут существовать, но недоступны для изучения при современном уровне технологий). Тем не менее относительно этого периода создано много предположений о различных катастрофах и, если можно так выразиться, борьбе за ресурсы, а также о влиянии метеоритных бомбардировок на формирование планет.

Что касается дальнейших периодов, то в отношении Солнца на сегодняшнем уровне развития науки здесь вряд ли можно говорить о какой-то истории вообще, хотя едва ли не каждый пятый астроном посвятил себя изучению Солнца (по крайней мере, так было в 1980-х гг., согласно Саймону Миттону [1984])<sup>28</sup>. Иное дело планеты и другие тела. Поэтому фактически с периода 3,5 млрд лет назад история Солнечной системы распадается на отдельные истории планет и их спутников. Кое о чем мы можем судить по данным о древнейшей геологии Земли, а также о наблюдениях и исследованиях Луны, Марса, Венеры, Меркурия и других планет. Это касается катастроф и столкновений, смены климата, геологических процессов и катастроф и т. п. Сказанное позволяет сделать самый общий очерк сходств и различий в судьбах планет. Но понятно, что для полноценной истории этого недостаточно. По мере совершенствования астрономической техники, а также данных о планетах и спутниках, полученных космическими аппаратами, наши знания об этой истории будут расширяться.

Помимо наблюдений астрономов, в том числе с помощью космических телескопов, данных и артефактов, добытых космическими аппаратами (фотографии, анализ грунта с Луны, планет и их спутников, атмосферы, химического состава и прочего), важным источником является анализ космических посланцев на Землю – метеоритов. В частности, многое дают найденные в их составе изотопы. Эти химические маркеры позволяют открывать отдельные моменты самой далекой истории Солнечной системы. Таким обра-

---

<sup>28</sup> Но об эволюции Солнца на основе научно установленных фактов (в частности, превращения водорода в гелий в центральных областях, диффузионного осаждения гелия к ядру и т. п.) говорить вполне можно (см., например: Горшков, Батулин 2010; Сеницын 2010; Наговицын 2010).

зом, представляется возможным создавать, хотя очень неполные и фрагментарные, истории развития отдельных планет<sup>29</sup>. Но, как уже было сказано, какой-то ведущей линии истории Солнечной системы сформировать не представляется возможным. Тем не менее даже такая история является огромным достижением современной космологии и позволяет уже очень многое понять в плане того, насколько история Земли типична, а насколько уникальна. Но если мы не всегда можем говорить об историческом (с точной хронологией) времени в период формирования Солнечной системы, то говорить об «эволюционном» времени, определяемом числом возникших макроэволюционных изменений (Буровский 2013: 40), мы можем более определенно\*.

**Эволюционные сходства.** В истории Солнечной системы есть сходства с историей Вселенной. В частности, взрыв (коллапс) в начале образования присутствует и в той и в другой. Подобно тому как первые звезды стали формироваться из крошечных элементов, собравшихся в газопылевые облака, планеты также стали формироваться из весьма малых тел. Процесс самоорганизации материи наблюдается и при формировании крупномасштабной структуры Вселенной, и при преобразовании планет и других космических тел из аморфного протопланетного диска в Солнечную систему. Наконец, имеет сходство приобретение как первыми звездами, так и планетами сферической формы. Также можно говорить о процессах саморегуляции как в звездах, так и в планетах.

Напомним, что главная задача данной книги, помимо рассказа об истории Солнечной системы и ее объектов, – искать общие принципы, способы и механизмы эволюции, универсальные и в каждом случае особые. На первый взгляд в развитии Вселенной и Солнечной системы не так много общего с эволюцией более высо-

---

<sup>29</sup> Но в этой истории даже давно установленные факты, когда их узнаешь, производят сильное впечатление. Таков, например, факт, что расстояние между Землей и Луной постепенно увеличивается и изначально Луна была намного ближе к Земле (что существенно влияло на силу приливов земной массы). В частности, в архейскую эру (то есть в период от 4 до 2,5 млрд лет назад) дистанция между Землей и Луной была значительно меньше – от 4 до 20 радиусов Земли, по сравнению с настоящим временем (60 радиусов). Поэтому скорость осевого вращения Земли была от 4 до 10 часов в сутки (Глуховский, Кузьмин 2012; см. также: Азимов 2000). Таким образом, простой в плане астрономии факт, что земные сутки не всегда были 24 часа (а меньше) и не всегда будут 24 часа (а больше), очень многое говорит об истории Земли и Луны.

кого уровня, то есть биологической и социальной. Но при более внимательном анализе заметно, что *эволюция везде использует те же универсальные инструменты*: вариативность и многолинейность, создание систем эволюционно магистрального и бокового (аналогового) типа, самоорганизацию (хотя и разного качества для разных объемов тел) и саморегуляцию (о последней см.: Гринин 2016a), концентрацию материи и ресурсов, индивидуальность и рождение «близнецов» и т. п. \* Выше мы также говорили об особенностях принципа распределения вещества, когда основное количество вещества концентрируется в наиболее крупных телах при преобладании по численности мелких тел; о концентрации редких веществ и свойств и др. \*

Важно отметить, что в планетах можно увидеть некий эволюционный мостик между космической и биологической формами эволюции, поскольку в рамках планет начинается геологическая форма эволюции (неразрывно связанная на Земле с биологической), а также активно развивается химическая форма движения материи.

### **3.2. Рождение звезд и базовый сценарий образования Солнечной системы**

**Наблюдения за рождением звезд.** Наблюдения молодых дозвездных и звездных объектов в настоящее время проводятся в широчайшем спектре длин волн: от рентгеновского до радиодиапазона (Маров и др. 2008: 225). При этом ведутся наблюдения за всеми стадиями процесса звездообразования. Наблюдения производятся за сотнями объектов формирующихся сгущений и молодых звезд. Эти наблюдения подтверждают эволюционное *правило о наличии континуума состояний и характеристик*, так как весьма часто резких переходов между ними не отмечается. От крайних форм число переходных велико, порой огромно \*. В то же время всегда существует и некоторая дискретность (как проявление закона перехода количества в качество) \*.

Считается, что хотя скорость звездообразования в Галактике могла меняться, сам этот процесс миллиарды лет назад принципиально не отличался от современного (Адушкин, Витязев 2007; Elmegreen, Efremov 1998). А это означает, что результаты современных наблюдений за рождением звезд можно экстраполировать

и на процесс рождения Солнечной системы около 5 млрд лет назад. Такие же экстраполяции применяются и при реконструкции биологических и социальных процессов (в частности, в истории первобытного общества активно используются данные этнографии). Правда, исторический момент появления той или иной системы всегда крайне важен, так как его особенности иногда способны дать ключ к пониманию тех или иных вещей<sup>30\*</sup>. В этой связи нельзя не обратить внимание на то, что темп звездообразования в галактиках изменяется. Временами они переживают эпизоды бурного звездообразования, когда очаги формирования звезд покрывают всю галактику. В нашей Галактике последний подобный эпизод произошел 5–7 млрд лет назад. Возможным триггером для таких эпизодов может служить слияние галактик (Бочкарев 2010: 25). И если 5 млрд лет назад происходил особо активный процесс звездообразования, это могло вызвать пока неизвестные нам влияния на особенности нашей Солнечной системы.

Так или иначе, уже очень много известно о том, как звезды образуются из огромных облаков газа и пыли, разогреваясь при сжатии<sup>31</sup>. Такие процессы даже можно наблюдать, хотя из-за плотной оболочки светимость молодых протозвезд мала. Наибольшие трудности в объяснении связаны с образованием планетной системы.

В итоге за последние 20–30 лет был разработан так называемый стандартный сценарий формирования планетной системы из протопланетного газопылевого диска, который окружал протосолнце 4,6 млрд лет назад. В нем рассмотрены основные физико-химические процессы, а также созданы компьютерные модели формирования планет из различных тел астероидных размеров. Также удалось сделать оценки времени формирования планет с учетом более достоверных, в том числе изотопных данных. Все это подкрепляется открытием многих тысяч дисков около молодых звезд, обнаружением многих сформировавшихся планетных систем (Адушкин, Витязев 2007: 397). Этот сценарий, конечно, имеет множество лагун и вариаций, однако он позволяет очертить общие контуры процесса, особенно если говорить об образовании Солнца и планет.

<sup>30</sup> Так, народы, жившие несколько тысяч лет назад, по своей энергии (пассионарности) могли быть намного выше, чем этнографически описанные племена, отсюда и их разная роль в истории.

<sup>31</sup> Теория эволюции звезд считается почти завершенной и сейчас не находится в центре внимания (Бисноватый-Коган 2010: 27).

Сегодня невозможно установить (хотя это важно и могло бы дать ключ к объяснению тех или иных особенностей Солнечной системы), родилось ли Солнце в составе молодого рассеянного скопления звезд или возникло в результате сжатия одиночной глобулы. Последнее является хотя и более редким, однако вполне возможным вариантом. И астрономами давно обнаружены *глобулы* – маленькие темные туманности с массами, не сильно отличающимися от массы Солнца, и значительными (для туманностей) плотностями (Громов 2012). При этом, по предположительным расчетам, некоторые из наблюдаемых глобул в перспективе должны начать сжиматься (а возможно, они уже сжимаются, но при наблюдениях это незаметно)<sup>32</sup>.

Отметим, что альтернатива – возникновение одиночной системы или группы взаимодействующих систем – существует при образовании новых систем на всех уровнях (биологические виды; государства, вожества и пр.). Системы одного типа могут образовываться более или менее одновременно, поскольку складываются сходные условия и в рамках этих условий идет дифференциация. Образование в сравнительно близкое время в результате особых условий ряда биологических родов или видов называется типогенезом. А в результате каких-либо политических событий, например подъема революционного движения, могут почти одновременно образовываться политические партии. Так было, например, в России в конце XIX – начале XX в. Но, конечно, системы могут образовываться индивидуально. Таким образом, даже типичные объекты не появляются всегда одним и тем же образом. Напротив, вариативность условий рождения – неперенный атрибут появления различных систем. А от конкретных условий во многом зависят их характеристики и судьбы\*.

Если использовать социальные характеристики, то у звезд и планет имеется своего рода «кастовость» или «ранговость». А если использовать биологические характеристики, то налицо особенность соединения генотипа и фенотипа в особую и неповторимую комбинацию. И эта «ранговость» и аскриптивность (то есть пред-

<sup>32</sup> В первом случае (рождение в молодом рассеянном скоплении звезд) важно учитывать, что эти скопления не вечные. Сегодня только примерно каждая десятая входит в состав скопления, содержащего от сотен до десятков тысяч звезд в области диаметром несколько световых лет. Но фактически большинство звезд родилось в таких группах, которые обычно распадаются за миллиарды лет, а звезды «разбредаются» по всей Галактике (Цварт 2013).

писанность) исключительно присуща космическим объектам. Отклониться от траектории своей типичной судьбы (типичной для данного класса объектов) они могут только в особых случаях (в частности, при катастрофах, захватах их более крупными объектами и т. п.) или при каких-либо совсем исключительных обстоятельствах, которые ведут их вверх по ступеням эволюции, как случилось с Землей.

Но при всей этой предписанности, как мы уже говорили, существует огромная вариативность и даже индивидуальность в судьбах объектов (см. об этом: Гринин 2013: 134 и далее). Мы уже указывали, что, по сути, в Большой истории впервые встречается в столь явно выраженной форме проблема вариаций жизненного цикла индивидуальных объектов. При этом судьба и длительность жизни, а также тип смерти, с одной стороны, зависят от начальных параметров, они как бы запрограммированы «генетически» (и, следовательно, могут быть предсказаны), а с другой – они могут быть изменены рядом случайных обстоятельств (Там же)\*. Но сказанное едва ли не в еще большей степени относится к планетам и их спутникам.

**Об облаках.** Звезды образуются из газопылевых облаков. Последние в основном состоят из водорода и в меньшей степени гелия, в них также есть другие элементы и твердые (пылевые) частицы. Облака бывают атомарные и молекулярные. Дело в том, что в плотных и холодных межзвездных облаках, готовых к сжатию, часть вещества объединяется в молекулы. Таким образом, возникают молекулярные облака. Главной молекулой межзвездной среды является молекула водорода ( $H_2$ ). После него наиболее распространенной космической молекулой является оксид углерода (CO) (Вибе 2016: 50). Но в облаках также обнаружены десятки других молекул, порой довольно сложных. Массы этих облаков огромны, только в нашей Галактике, возможно, они составляют миллиард масс Солнца (Пикельнер 1976: 12).

Плотность молекулярных облаков в сотни раз больше, чем у облаков атомарного водорода (Абрамова, Пшеничнер 2014: 43; см. также: Вибе 2016: 48). При этом звезды образуются в наиболее плотных их областях. Температура в молекулярных облаках всего на несколько градусов выше абсолютного нуля. Но именно при таких условиях возникают неустойчивые к гравитационному сжатию

отдельные уплотнения в облаке массой порядка массы Солнца и становится возможным формирование звезд. Около половины межзвездного газа содержится в молекулярных облаках (Абрамова, Пшеничнер 2014: 43). Вновь мы видим, что неравномерность, в том числе в концентрации вещества, является универсальным паттерном существующего порядка и эволюции\*. При этом даже там, где концентрация низкая, различия могут быть колоссальными, в частности, как сказано выше, плотность молекулярных облаков на два с лишним порядка больше, чем атомарных (таковы возможности структурирования материи). И так везде: структурированная система намного компактнее, и именно в ней, благодаря концентрации, возможны какие-либо новые качественные процессы\*. Также здесь налицо состояние неустойчивости – важная характеристика для тех объектов, которые находятся в точке выбора разных путей (бифуркации). От того, какой путь система сумеет избрать, и зависит ее эволюция\*.

Как уже было сказано, молекулярные облака образуются из разреженного атомарного газа, который по каким-то причинам уплотняется, остывает, и атомы в нем начинают объединяться в молекулы. Очень интересно, что в результате образования звезд их энергетическое воздействие рассеивает родительское облако и переводит его обратно в разреженное атомарное состояние (Вибе 2016: 49). Таким образом, происходит некий круговорот состояний, который, как мы полагаем, можно наблюдать на других уровнях эволюции. Так, смерть растений создает плодородные почвы, торф или угольные пласты; распад империй – возможность возникновения новых государств и культур\*.

**Возможности и условия рождения звезд.** Но следует понимать, что звезды образуются не автоматически. Для этого нужны условия. С. Миттон (1984: 97) подчеркивает, что образовать звезду из газа непросто, иначе весь газ давно бы превратился в звезды. При этом легче образовать 200 звезд, чем 20. Это значит, что звезды чаще возникают сразу большими скоплениями<sup>33</sup>. Как установил еще Джеймс Джинс в 1902 г., для сжатия облака необходимы опре-

<sup>33</sup> Фрагменты молекулярных облаков, которые обособляются гравитационной неустойчивостью и начинают сжиматься, обычно имеют массы от 100 до 1000 масс Солнца (Бочкарев 2010: 13). См. выше обсуждение вопроса о том, как образовалось наше Солнце – в составе целого ряда звезд или как одиночная звезда. Больше шансов на то, что в составе многих звезд. Но тогда интересно понять, кто является братьями и сестрами Солнца.

деленные его масштабы, в несколько десятков парсек в поперечнике (Громов 2012: 18). Здесь можно говорить о переходе количества в качество\*. Но можно сделать вывод, что для ряда процессов нужны общий вектор, общность. А затем после совершения процесса общность распадается (так из огромного облака образуются отдельные самостоятельные звезды). Так, в одиночку люди не будут переселяться, но племенами или группами (караванами, как двигались на запад переселенцы) смогут это сделать. А потом могут и разойтись кто куда. Так и птицы собираются стаями, а потом разлетаются\*.

Газ может находиться в газообразном состоянии в облаках очень долго, для его сгущения нужен какой-то толчок<sup>34</sup>. Да, для сгущения облака, в результате чего позже образуются протозвезды, как и для начала многих процессов, требуется толчок, или *триггер* (например, ударная волна от взрыва сверхновой или другие факторы, способствующие началу конденсации облака). Иначе в таком состоянии потенциальной готовности к трансформациям облака могут находиться многие миллионы и даже десятки миллионов лет. Это подобно тому, как порох может лежать длительное время, не производя никакого эффекта, но всегда при этом готов к взрыву. И стоит искре попасть в него, как происходит взрыв.

*Триггерность*, таким образом, необходимый элемент эволюционных процессов. Напомним, в первой книге нашей монографии мы отмечали (Гринин 2013: 151–152), что по многим параметрам молекулярные облака выступают как аналоги звезд (а в *Главе 6* мы говорим о поясе астероидов как об аналоге планеты). При этом, поскольку толчок – это нередко внешний фактор, его характеристики во многом случайны и в то же время значительно влияют на особенности запускаемых им процессов. Здесь налицо соединение внутренних/эндогенных и внешних/экзогенных процессов как неразрывного единства. Триггер не сработает без внутренней готовности системы, но даже высокий уровень внутренней готовности не может сам собой запустить процесс трансформации, как не может порох взорваться без огня\*. Триггерность отличается от ката-

---

<sup>34</sup> Это касается как сгущений, из которых потенциально могут образоваться большие скопления звезд, так и зародышей одиночных звезд – глобул. Последние с «пограничным» значением радиуса, массы и температуры могут весьма долго пребывать в «подвешенном» состоянии, не сжимаясь и не рассеиваясь (Громов 2012).

лизаторности в химических процессах тем, что химическая реакция может идти и без катализаторов, только намного медленнее, тогда как без триггера процесс не запустится.

В вышеописанном примере с кистеперыми рыбами, которые стали предками сухопутных животных, можно отметить как готовность рыб к выходу на сушу (поскольку они имели преадаптации – конечности-плавники, которые можно было использовать для перемещения по дну), так и триггерность. Возможно, окончательным толчком для выхода на сушу стали изменения климата и более сильное пересыхание неглубоких водоемов, чем обычно. Можно предположить и другие качественные переходы при образовании новых видов или даже родов. С одной стороны – готовность в случае, когда все ниши заняты и популяции готовы к трансформациям, с другой – какие-либо достаточно быстрые и резкие изменения, запускающие процесс видообразования (включая и повышенную мутагенность, например в результате повышения радиационного фона). Подобное происходит и при возникновении государства. С одной стороны, необходима ситуация, когда внутренние процессы усложнения управления и социальной стратификации достигают нужного уровня сложности. С другой – какое-либо резкое ее изменение, например война, вынужденное переселение или открытие данного общества для внешнего мира (как случилось с гавайцами в конце XVIII в., когда их острова открыл Джеймс Кук). В отсутствие же необходимого триггера образуются аналоги эволюционно типичных/признанных систем.

**Этапы образования звезд.** В самом общем виде процесс образования протозвезды, равной массе Солнца, выглядит следующим образом. На сегодняшний день эта модель во многих аспектах подтверждена астрономическими наблюдениями<sup>35</sup>, поскольку сейчас удается наблюдать практически все стадии образования звезд (Бочкарев 2010: 11).

**Первый этап**, о котором уже было сказано, – это медленный процесс ожидания начала интенсивного сжатия. Но, по сути, это и подготовительный процесс. При этом облако может просто находиться в своего рода равновесии (газ не рассеивается и не сгущается). Но сжатие может и происходить, однако очень медленно, так

<sup>35</sup> Впервые подобную модель исследовали Ч. Хаяши и Т. Накано в 1965 г. (Громов 2012).

что обнаружить его в наблюдаемых объектах не удастся. Длительность данного этапа зависит от того, когда произойдет спусковое (триггерное) событие. Но в среднем этот процесс длится миллионы лет.

**Второй этап** – процесс сжатия облака, который также называют этапом свободного падения. Сжатие происходит неравномерно, центральные части сжимаются быстрее и оказываются более плотными, чем внешние (Бочкарев 2010: 13). Неравномерность протекания процессов – характернейший паттерн функционирования материи и эволюции. При этом многие процессы, в том числе и в социальной жизни, активнее идут в центре, чем на периферии\*.

Если первый этап формирования звезд – подготовка облака к сжатию – измеряется в миллионах лет, то второй – коллапс облака и его быстрое сжатие – довольно быстрый по космическим меркам процесс. Сжатие облака происходит за время порядка  $10^4$  лет, то есть около 10 000 лет (Маров и др. 2008: 225; Motoyama Kazutaka, Tatsuo Yoshida 2003; Belloche *et al.* 2006). При этом чем дальше, тем выше скорость сжатия<sup>36</sup>. Здесь мы видим пример смены эволюционных (медленных) периодов революционными (быстрыми, стремительными). Длительное время объект или система готовится к трансформациям, которые, кажется, никогда не произойдут. И вдруг количество переходит в качество и начинаются быстрые изменения\*.

Существенно, что нагрева облака пока не происходит: избыток энергии благополучно канализируется в окружающее пространство (Бочкарев 2010: 12–13)<sup>37</sup>, поскольку оболочка, которая будет этому препятствовать, еще не сформировалась (соответственно, облако еще прозрачно для наблюдения). О роли оболочек, которые формируют границы системы и контролируют обмен веществом и энергией со средой, мы уже говорили в первой книге нашей моно-

<sup>36</sup> Так же происходит и в ряде социальных революций: скорость изменений в революционном процессе может в течение некоторого времени нарастать, пока сопротивление этому процессу не станет столь сильным, что революционеры окажутся вынужденными бросить все силы на борьбу с «контрреволюцией».

<sup>37</sup> Это происходит благодаря особенностям углерода, который, поглощая высокоэнергичные фотоны, затем испускает кванты излучения с энергиями, соответствующими инфракрасному диапазону (поскольку облако для него пока еще прозрачно). Вообще углерод в космическом пространстве и ряде процессов играет роль «холодильника» (Громов 2012: 17), что, как мы видим, в ряде случаев имеет важнейшее значение.

графии (Гринин Л. Е. 2013: гл. 5), но упомянем еще не раз. Наличие оболочек/границ – это важнейший способ отделения системы от внешней среды\* (см. подробнее: Гринин А. Л. 2016б; Grinin A. 2016).

В процессе сжатия (или даже до его начала) исходный фрагмент облака распадается на более мелкие сгустки. Такой процесс называется иерархической фрагментацией и может повториться несколько раз, прежде чем сгусток становится непрозрачным для своего излучения (Бочкарев 2010: 13)<sup>38</sup>. Сколько звезд образуется из уже конечного сгустка, зависит от его массы, скорости вращения, дальнейшей фрагментации и других обстоятельств. Примерно половина звезд рождаются одиночными; остальные образуют двойные, тройные и более сложные звездные системы. Чем больше компонентов, тем реже встречаются такие системы. Известны звездные системы, содержащие до семи связанных звезд, более сложные пока не обнаружены (Абрамова, Пшеничнер 2014: 45). Нетрудно заметить сходство с рождением потомства у одноплодных животных, в частности у людей. Хотя в общем случае, как правило, рождается один ребенок, тем не менее близнецы (от двух и до шести-семи детей) составляют 2,5 % всех рожденных детей. Конечно, это не половина, как у звезд. Но зато у многоплодных животных, напротив, рождение одного детеныша – значительно более редкое событие, более характерное для очень молодых или, наоборот, старых матерей. Но так или иначе, в случае рождения звезд мы видим еще один распространенный паттерн мироздания – появление либо одиночных, либо парных (групповых) объектов. Видимо, это одно из фундаментальных свойств природы – формировать группы из объектов близкого масштаба с определенным родственным набором качеств (Павлов 2006: 50). Это в полной мере относится и к формированию группы планет\*.

Если не произошло дальнейшего распада на фрагменты, то развитие коллапса приводит к образованию сгустка. Увеличиваясь и уплотняясь, он превращается в одиночную протозвезду, находящуюся в состоянии гидростатического равновесия.

**Третий этап** – собственно образование протозвезды, которая на дальнейших этапах будет трансформироваться в молодую звезду.

---

<sup>38</sup> Фрагментация, как и объединение прежде автономных элементов (сегментов), также очень характерный паттерн функционирования систем и множеств во Вселенной, животном и социальном мире\*.

ду. В процессе сжатия вещество (газ) облака стремится к центру и продолжает сжиматься. Когда плотность достигает величины, превышающей первоначальную плотность примерно в сто раз, начинается своего рода фазовый переход. Такая плотность облака ведет к тому, что оно становится непрозрачным к собственному инфракрасному излучению. В результате происходят важные изменения. Продолжающийся процесс сжатия будет теперь сопровождаться нагревом (но при нагреве сжатие станет происходить уже гораздо медленнее, чем на этапе свободного падения). Нагрев также прекращает фрагментацию. Соответственно, недра облака станут горячее его поверхности, и в результате начнется конвекция<sup>39</sup>. Конвекция – это вид теплообмена в жидкостях и газах, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками. Это очень распространенный процесс в природе, в частности, характерный и для внутренних частей планет (например, мантии Земли). В сжавшемся облаке горячие «пузыри» газа будут всплывать из глубин к поверхности, отдавать избыток тепла межзвездной среде и снова «нырять» обратно (Громов 2012). В результате этих и других процессов облако теряет однородность, его центральные области становятся более плотными и горячими, чем периферия.

Считается, что половина тепловой энергии облака уйдет в пространство, а вторая половина израсходуется на нагрев газа, который произойдет прежде всего в центральных областях. Итак, мы видим, как за счет прекращения теплообмена с внешней средой и центростремительных сил, поддерживаемых гравитацией, формируется структура будущей звезды, ядро и другие оболочки.

Перед нами одна из тайн самоорганизации – превращение аморфной материи в организованную, способную в дальнейшем к сложному функционированию, саморегуляции и эволюции. Именно к таким случаям относится знаменитый закон Г. Спенсера (о котором мы уже говорили в первой книге этой монографии: Гринин 2013: 71) – закон перехода вещества по мере его качественного развития из неопределенной (недифференцированной, неспециализированной) однородности к определенной (более специализированной) разнородности\*. «Эволюция, – писал Г. Спенсер, – изменение от неопределенной, несвязной однородности к определенной,

<sup>39</sup> Конвекция (от лат. «перенесение») – вид теплообмена, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками за счет неравномерного нагревания.

связной разнородности через постоянную дифференциацию и интеграцию» (Spencer 1972: 216). Правда, напомним, что сам Спенсер внезапных трансформаций не признавал, предпочитая медленные и незаметные изменения. А здесь, в процессе образования звезды, мы наблюдаем именно резкую трансформацию, момент перехода (быстрого, катастрофического, революционного) накопленного количества (в данном случае энергии и плотности) в качество, возникновение протозвезды из облака\*.

**Формирование протоструктуры.** Процесс формирования структуры будущей звезды связан: а) с притягиванием вещества периферии к ядру; б) рассеиванием части вещества периферии.

Формирующееся ядро пока еще слабо похоже на ядро звезды. Оно, по расчетам, будет иметь массу порядка всего 0,01 солнечной, зато радиус, равный 6000 солнечных, и температуру около 2100 К. Но процесс уже запущен. Падая на ядро, газ тормозится, а его кинетическая энергия переходит в тепло и разогревает ядро еще и снаружи (Громов 2012). Масса ядра растет, что приводит к его сжатию и выделению тепла по всему объему. Затем происходит следующий фазовый переход. После достижения температуры 10 000 К вещество начинает менять свою структуру. Атомы начинают ионизовываться (а диссоциация молекул и разрушение пылинок произошли раньше). В результате нагрева и изменения структуры вещества *центральная часть ядра вновь резко сжимается*. Образуется более плотное и горячее внутреннее ядро. После полной ионизации температура и давление во внутреннем ядре стабилизируются. Сжатие внутреннего ядра на время останавливается при массе опять-таки около 0,01 солнечной и радиусе порядка 1000 солнечных (Там же). Таким образом, структура формирующейся звезды усложняется: в ней появляются внутреннее и внешнее ядро, а также сложная периферийная часть. В целом по сравнению с самыми начальными данными давление повышается более чем в тысячу раз (Абрамова, Пшеничнер 2014: 43).

**Четвертый этап** связан уже с формированием молодой звезды и выходом ее на главную последовательность. Как известно, когда температура в центре протозвезды достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции. Выделяющееся при этом тепло полностью компенсирует охлаждение протозвезды с поверхности, сжатие прекращается.

При образовании молодой звезды часто образуется околозвездный диск, который может стать протопланетным. По поводу этого диска ведется много дискуссий, мы о нем еще скажем далее.

Такова теоретическая модель образования звезд (базовый сценарий), частично подтвержденная прямыми наблюдениями. Во многих основных чертах, вполне возможно, данный сценарий справедлив и для процесса образования Солнца. Однако переход от теории к конкретной истории всегда непростой. Тем более что в отношении образования планетной системы намного больше неясностей, чем собственно самого Солнца.

### 3.3. История формирования Солнца

В настоящей главе нас особенно интересует самый первый период формирования протосолнечной системы из газопылевого облака. Предположительно, он длился в пределах 10 млн лет. Возможно, период формирования занимал меньше времени (хотя, по некоторым оценкам, он мог быть и более длительным). Так, по современным данным, продолжительность существования дисковых структур около молодых звезд составляет 5–7 млн лет (Адушкин и др. 2008: 277). Наиболее древние системы, имеющие дисковые структуры, имеют возраст около 25 млн лет (он измеряется возрастом их звезды [Там же]). Но процент числа звезд, имеющих диски, зависит от возраста звезды и резко снижается с 80 % для молодых звезд до 10 % для более старых (Momose *et al.* 2003). Поэтому есть вероятность, что все события от начала процесса звездообразования в молекулярном облаке до образования планет-гигантов в газопылевом протопланетном диске укладываются в промежуток времени в 10 млн лет (Маров и др. 2008: 22, 225; см. также: Элкинс-Гантон 2017: 95)<sup>40</sup>. Однако, как мы увидим в *Главах 6 и 7*, временные оценки зависят от особенностей гипотез о формировании планет и сильно колеблются.

**Триггерное событие и рождение Солнечной системы.** Сколько времени понадобилось, чтобы протосолнечное облако начало сжиматься, разумеется, сказать невозможно. Вероятно, миллионы лет. Что могло стать для него триггерным событием? Непосред-

<sup>40</sup> Но процессы окончательного формирования самого нашего светила – Солнца – до выхода его на главную последовательность могли длиться дольше. Встречаются мнения, что период медленного сжатия звезды до выхода ее на главную последовательность длится до 50 млн лет (Суркова 2005: 50).

ственно спусковым механизмом становится небольшое (спонтанное) уплотнение вещества газопылевого облака. Однако важнее, что именно вызывает такое уплотнение, которое ведет к сжатию облака и коллапсу ядра. Его могут вызвать: взрыв вблизи него сверхновой и последовавшие за ним выброс вещества и ударная волна; сжатие молекулярного облака при его прохождении через спиральный рукав Галактики; потоки газа из формирующихся по соседству массивных звезд или расширяющиеся области низкой плотности, то есть ионизованного водорода (Маров и др. 2008: 225). Допускается также, что первичное уплотнение вещества протосолнечного газопылевого облака могла вызвать и естественная динамика облака, которое стало центром притяжения для окружающего вещества – центром гравитационного коллапса.

И все же в качестве такого события для рождения Солнечной системы чаще всего называют взрыв сверхновой. Чисто психологически кажется, что именно такое неординарное событие больше подходит для начала формирования Солнечной системы. Напомним, имеется предположение, что Солнечная система образовалась в плотной звездной ассоциации с присутствием массивных звезд, где должны были происходить более частые взрывы сверхновых (Адушкин и др. 2008: 276). А это давало больше шансов будущему Солнцу и особенно планетам Солнечной системы на более богатый химический состав и концентрацию некоторых элементов, без чего не могла бы возникнуть жизнь на Земле.

Есть и материальные основания говорить о взрывах сверхновых в качестве триггерных событий. В метеоритах найдены изотопы, которые образуются при таких взрывах. В частности, изучение метеорита Альенде показало наличие вымершего  $^{26}\text{Mg}$  (на основании анализа аномального  $^{26}\text{Al}$ ). Этот короткоживущий (время полураспада – 720 тыс. лет) изотоп рождается при вспышках сверхновых (Там же).

Такие данные позволяют уже реконструировать и некоторые датировки, хотя, как и бывает в таких случаях, когда фактов мало, реконструкции существенно различаются. Наличие указанных изотопов говорит о том, что максимум за два миллиона лет до рождения Солнечной системы рядом в комплексе была вспышка сверхновой. Но здесь могли быть варианты (Там же). И эта сверхновая либо послужила триггером для начала формирования Солнца (и его

«соседей»), либо вприснула некую долю вещества в уже формирующуюся Солнечную систему (то есть формирование Солнечной системы в этом случае имело другой триггер, взрыв еще одной сверхновой или что-либо еще). Также есть мнение, что спустя миллион лет после начала формирования Солнечной системы была еще одна вспышка сверхновой, вприснувшей короткоживущий  $^{60}\text{Fe}$  (Bizzarro *et al.* 2007). Отметим попутно, что анализ изотопов дает возможность реконструировать и доказывать факты любой истории (Вселенной, Солнечной системы), а не только жизни и общества (как известно, радиоуглеродный и другие методы активно используются для исторических датировок и определения возраста биологических останков и окаменелостей).

Возвращаясь к вопросу о том, возникло ли протосолнце в молодой ассоциации звезд (или появилось как одиночная звезда), можно сказать, что взрыв сверхновой, если именно он был триггерным событием, скорее всего, должен был стать причиной появления множества звезд. Таким образом, у Солнца должны были быть родственники и соседи. Естественно, очень хотелось бы знать, кто они.

Обнаружение даже одного родственника Солнца даст очень важную информацию о самых первых этапах жизни Солнечной системы, которые, казалось бы, давно уже канули в Лету. Теоретики смогут более точно вычислить место рождения Солнца и определить, например, сильно ли изменилось гравитационное поле Галактики. К тому же окрестности родственников Солнца станут отличным местом для поиска пригодных для жизни планет. Хотя мы выглядим очень одинокими в Галактике, так было не всегда. Многие особенности Солнца – хотя бы то, что оно взрастило жизнь, – могут стать более понятными при знакомстве с его семьей (Цварт 2013; см. также: Zwart 2009; 2016; Pfalzner *et al.* 2015). Однако найти таких родственников крайне сложно, поскольку звездная жизнь разбрасывает звезды из одного помета за счет вращений и пертурбаций среди миллиардов других звезд по всей нашей Галактике, подобно тому, как земная жизнь разбрасывает родственников по разным странам. Российские астрономы Юрий Мишуров и Ирина Ачарова считают возможности найти родственников Солнца маловероятными (В поиске... 2010).

Напомним заодно, что сверхновые могут быть гигантскими звездами, а они «живут» недолго (миллионы лет), тогда как небольшие звезды, такие как Солнце (желтые карлики), – миллиарды (Солнце – 10 млрд) лет. Следовательно, здесь наблюдается сочетание комбинации короткого и долгого века звезд, когда звезда с коротким веком становится причиной для рождения звезд с долгим веком.

Из сказанного также ясно, что взрыв сверхновой выступил не только в качестве триггера начала процесса формирования Солнечной системы, но и как источник ее химического состава. В недрах Солнца синтезируются только легкие элементы, так что наблюдаемый химический состав Солнечная система во многом унаследовала от своей предшественницы – гигантской звезды – и при взрыве сверхновой (Маракушев и др. 2013: 133). Таким образом, именно от особенностей химического состава сверхновой (или сверхновых) зависела вся судьба Земли<sup>41</sup>.

**Стадии коллапса, образования протосолнца и аккреционного диска.** Итак, первая стадия образования Солнечной системы длилась несколько миллионов лет, пока не началось сжатие облака. Вторая стадия – сжатия, как мы помним, очень короткая, примерно 10 000 лет. На этой стадии Солнце окружено непрозрачной аккреционной оболочкой, которая поглощает интенсивное излучение молодого Солнца и переизлучает его в инфракрасном диапазоне (Забродин и др. 2008: 298). То есть разогрева облака еще не происходит. Третья стадия начинается, когда сжатие приводит к прекращению теплоотдачи и формированию протоструктуры Солнечной системы. При этом, поскольку за счет гравитационного сжатия размеры облака уменьшались, должна была расти скорость его вращения (в силу закона сохранения углового момента). Сжатие приводило к росту плотности, что увеличивало температуру особенно в центре диска, в том числе и за счет роста интенсивности столкновений частиц вещества друг с другом. Важно учитывать, что увеличение скорости вращения и другие процессы привели к

---

<sup>41</sup> Точнее было бы сказать, что Солнечная система унаследовала небольшой процент химического состава от сверхновой. Но это определило важные моменты ее формирования, поскольку некоторые из этих элементов сконцентрировались в отдельных телах, включая Землю. Кстати, недавние открытия в области того, что *Homo sapiens* унаследовал до 2 % генов от неандертальцев, показывают, что своего рода «дрейф генов» – также общеэволюционный паттерн<sup>7</sup>.

уплощению облака и превращению его диска<sup>42</sup>. Таким образом, из облака возникла новая структура: протосолнце с зародышевым диском и аккреционная оболочка (Маров и др. 2008: 225). Теперь процесс должен был пойти по пути все большего сжатия и формирования ядра, затем внутреннего ядра, где плотность и температуры постоянно возрастали.

**Аккреция и рост массы протосолнца.** Итак, ядро протосолнца (в том числе и внутреннее ядро) сформировалось. А оставшееся вещество периферии начало частично падать на ядро, которое за счет этого стало увеличиваться в размерах. *Данный процесс выпадения вещества на поверхность какого-либо тела, как мы помним, называется аккрецией.*

Процесс аккреции, или переноса вещества в данном случае из аккреционной оболочки (то есть периферии сжимающегося облака) на ядро формирующейся звезды, проходит несколько этапов. Соответственно, масса аккреционной оболочки постоянно убывает. «В силу закона сохранения углового момента, меньшая часть массы диска, расположенная в его периферийной, удаленной от звезды части, перемещается в противоположном направлении, увеличивая радиус диска» (Кусков и др. 2009: 66). В целом эволюция аккреционных дисков определяется в основном взаимодействием гравитации центральной звезды, вращения, магнитного поля и турбулентности (Дудоров и др. 2015: 11).

Вот как М. Я. Маров и соавторы (2008: 225–226) описывают процесс аккреции в соответствии со множеством прямых наблюдений за звездами. Сначала масса аккреционной оболочки больше массы протозвезды (это класс 0), поэтому протопланетный диск на этой стадии еще не обнаруживается спектрально, но его существование и аккреция вещества из него на протозвезду проявляется в наблюдаемых мощных потоках газа, истекающих из протозвездного объекта. После того как больше половины массы коллапсирующего протозвездного объекта оказывается в протозвезде, темп аккреции замедляется. Наблюдаемый объект переходит в спектральный класс I. Благодаря меньшей массе оболочки на этой стадии спектрально удастся распознать диск вокруг протозвезды и аккре-

---

<sup>42</sup> При сжатии диска во много раз момент вращения сохраняется неизменным, а момент инерции уменьшается пропорционально квадрату степени сжатия, и, значит, во столько же раз должна возрасти скорость вращения (Савченко, Смагин 2013: 7).

цию газа на нее из диска<sup>43</sup>. Открытие потоков-истечений у протозвезд и молодых звезд явилось очень веским аргументом в пользу совместного и одновременного образования звезд и окружающих их дисков<sup>44</sup>. Наконец, после того, как аккреционная оболочка в основном выпадает на протосолнечный диск, протозвезда превращается в молодую звезду, окруженную газопылевым диском, которую можно наблюдать в видимом и более коротковолновых участках спектра. При этом аккреция вещества из диска на звезду продолжается. Такие звезды с дисками по спектральным характеристикам относят к классу II.

Относительно времени процесса аккреции мнения различаются, поскольку сделать оценки весьма сложно (Засов, Постнов 2011: 308). Формирование Солнца как звезды, по некоторым предположениям, произошло за промежуток времени, равный примерно  $0,1 \cdot 10^6$  (то есть 100 тыс.) лет. Солнце за этот период аккумулировало около 90 % своей массы (Макалкин, Дорофеева 1995: 101). Встречаются также оценки интервала времени как меньше этой цифры, так и намного больше, порядка нескольких миллионов лет (Дудоров и др. 2015: 11; см. также: Засов, Постнов 2011: 279). Возможно, более правильной оценкой будет средняя, то есть период в районе 1 млн лет<sup>45</sup>.

**Обмен вещества и начало образования протопланетного диска.** Мало того, что не все вещество из аккреционного диска выпадало на ядро протосолнца, часть выпавшего вещества вновь уходило из него в виде солнечного ветра и истечения (см. выше; см. также: Забродин и др. 2008: 298). Происходил своего рода обмен

<sup>43</sup> К настоящему времени проведены наблюдения десятков объектов звезд спектрального класса I в нескольких областях звездообразования (White *et al.* 2007).

<sup>44</sup> При аккреции вещества из диска звезде передается угловой момент, ускоряющий ее вращение. Если бы все вещество из диска поглощалось протозвездой, то она, постоянно ускоряя вращение, потеряла бы устойчивость. Этого не происходит из-за образования во внутренней части диска, близко к поверхности звезды, двух потоков ионизованного газа, представляющих собой протозвездный и/или дисковый ветер (Маров и др. 2008: 226). То есть возникает противоположное движение, которое устанавливает некоторое равновесие.

<sup>45</sup> Как определяют Т. Монтмерль и его соавторы (Montmerle *et al.* 2006), первый миллион лет в истории Солнечной системы – звездная эра. Главные изменения – это формирование Солнца в звездный кластер в процессе аккреции материала из протосолнечного диска и постепенное исчезновение окружающей оболочки. Они рассматривают следующий период длительностью 10 млн лет как эру протопланетного диска, когда этот диск постепенно исчезает и начинают формироваться планеты; третий период длительностью до 100 млн лет – «земная» эра, когда образуются планеты земной группы (каменистые планеты) (*Ibid.*).

веществ в рамках системы, но общий баланс был в пользу роста массы протосолнца. Масса, которая уносится протозвездным ветром, составляет примерно 0,1–0,03 массы, которая поступает к протозвезде из окружающего диска (Маров и др. 2008; Hollenbach *et al.* 2000; Pudritz *et al.* 2007).

В настоящее время Солнце содержит в себе 99 % всей материи Солнечной системы. Какую часть аккумулировало в себе протосолнце от протосолнечного облака, можно говорить только очень предположительно, но, по всей видимости, где-то 60–80 %. Часть вещества диссипировала в космическое пространство в процессе образования протосолнечной системы. Часть оставалась в протопланетном диске, но, как мы увидим ниже, и основная часть вещества протопланетного диска либо рассеялась в космическом пространстве, либо упала на Солнце.

Собственно, процесс трансформации вещества или энергии нигде не имеет 100 % КПД, всегда открывается несколько вариантов его распределения, что и дает возможность для проявления многообразия и разнообразия комбинаций\*. Оставшееся вещество аккреционного диска частично рассеивается в пространстве, а частично формируется в протопланетный диск. С образованием протопланетного диска начинаются процессы, связанные с формированием допланетных тел и протопланет, о чем будет сказано в другой главе.