

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Краткое изложение истории Солнечной системы

1.1. Формирование протосолнечной системы из газопылевого облака

В отношении истории Солнечной системы пока имеется больше гипотез, чем доказанных фактов, но в некоторых аспектах, например, начала формирования Солнечной системы из протосолнечного газопылевого облака, гипотезы с каждым годом подкрепляются данными наблюдений за процессом возникновения молодых звезд и открытиями множества экзопланет.

На основе радиоизотопных исследований древнейшего метеоритного вещества возраст Солнечной системы был определен примерно в 4,57 млрд лет.

Более или менее общепринято считать, что Солнце и планеты произошли почти одновременно из газопылевой туманности в едином процессе. В основных своих чертах Солнечная система сформировалась в первые несколько сотен миллионов лет, но конкретная история этого периода пока остается во многом белым пятном (она крайне отрывочна и недостоверна).

За последние 20–30 лет был разработан так называемый стандартный сценарий формирования планетной системы из протопланетного газопылевого диска, окружающего протосолнце, который позволяет очертить общие контуры процесса.

Модель рождения звезд, подкрепленная многочисленными прямыми наблюдениями, по общему мнению, может быть использована для реконструкции появления протосолнца. Обычно звезды образуются в наиболее плотных областях молекулярных газопылевых облаков. Последние состоят в основном из водорода и гелия и имеют температуру, приближающуюся к абсолютному нулю. Газ может находиться в облаках миллионы и десятки миллионов лет без изменения своего состояния. Для начала процесса его сгущения (и впоследствии коллапса) нужен какой-либо толчок (триггер). Таким триггером для рождения Солнца, возможно, стал взрыв сверх-

новой в относительной близости от протосолнечного облака примерно за два миллиона лет до начала его коллапса.

Вместе со сгущением газопылевого облака начинается процесс его сжатия, или свободного падения под действием самогравитации, который, по некоторым предположениям, длится в пределах 10 тыс. лет. В процессе сжатия исходный фрагмент облака распадается на более мелкие сгустки, поэтому из облака обычно рождается много звезд. В сгустке процесс концентрации продолжается, а его вещество, все уплотняясь, готовится превратиться в протозвезду. Процесс сжатия сопровождается нагревом, формируется структура будущей звезды: ее ядро и другие оболочки. Постепенно температура в центре протозвезды повышается.

После того как внешнее и внутреннее ядра протосолнца сформировались, оставшееся вещество периферии начало частично падать на ядро, которое за счет этого стало увеличиваться в размерах. *Процесс выпадения вещества (в данном случае газа) на поверхность какого-либо тела называется аккрецией.* После того как аккреционная оболочка в основном выпадает на протозвезду (или уходит в пространство), последняя превращается в молодую звезду. В это время температура в ней достигает нескольких миллионов градусов, и начинаются термоядерные реакции. Возможно, формирование Солнца как звезды произошло за промежуток времени, равный примерно миллиону лет, но встречаются оценки временного интервала как в меньшую, так и в большую сторону.

1.2. Образование допланетных тел

Протопланетный диск и его эволюция. При образовании молодой звезды часто образуется околозвездный диск, который можно наблюдать в видимом и более коротковолновом диапазоне. Оставшееся вещество из аккреционного диска частично рассеивается в пространстве, а частично идет на формирование протопланетного диска. Длительность существования такого диска вокруг звезд, по наблюдениям, от 5 до 25 млн лет.

Сложность реконструкции процесса образования планет Солнечной системы компенсируются огромным количеством гипотез и теорий, которых за два столетия выдвинуто множество. Но пока ни одна из гипотез не может объяснить всех фактов, относящихся к планетам.

Однако абсолютное большинство космологов считает, что Солнце и планеты образовались из единого облака (протосолнечной туманности, или небулы). Вещество последнего дифференцировалось на собственно Солнце и его протопланетную оболочку, которая в результате вращения стала диском. Из этого-то протопланетного диска в процессе его вращения и фрагментации образовались планеты путем нового цикла аккумуляции вещества в протопланетных телах. Большинство космологов исходят из того, что планеты сформировались из холодного материала, который позже был разогрет ударными и другими процессами. Длительность периода формирования протопланетного диска оценивается в пределах от одного до нескольких миллионов лет.

Массу протопланетного диска оценивают в интервале 3–10 % от массы Солнца. При этом он был достаточно пространственно велик и весьма неоднороден. Размеры аккреционных дисков молодых звезд составляют 100–1000 астрономических единиц.

Диск был сильнее нагрет во внутренних своих частях, а его внешние области оставались относительно холодными. В них стали развиваться уплотнения, которые и явились отдельными гравитационными центрами формирования планет. Но сам механизм этого процесса исключительно спорный.

Образование пылевого субдиска. Протопланетный диск, по видимому, на 98 % состоял из того же газа, что и протосолнечное облако. А в последнем доминировали молекулярный водород и гелий (на все остальные вещества приходилось менее 1 %). На пылевые частицы приходится по массе от 0,5 до 1,5 %. Но именно они сыграли особую роль. Эта пыль представляла собой микроскопические твердые частицы (водяного льда, слипшихся молекул и атомов, в частности железа и других твердых веществ). В результате образования протосолнца и аккумуляции в нем основной части газа концентрация пыли в протопланетном диске на более поздней стадии его эволюции повысилась. Но она стала еще более повышаться в результате оседания пыли к средней плоскости диска.

Часть космологов считает, что наиболее вероятный путь образования зародышей планет связан с оседанием пылевых частиц к экваториальной плоскости допланетного диска. В результате в центре диска складывался пылегазовый субдиск, но в нем уже соотношение «пыль – газ» меняется во много раз по сравнению с

космическим. Также и пылинки могли увеличиваться в размерах (за счет слипания и притягивания). Таким образом, произошел очень важный для будущей планетной системы переход – концентрация твердого вещества (пока в виде пыли), что сыграло определяющую роль в росте сначала допланетных тел, а затем и планет. Согласно некоторым моделям, эволюция околозвездного протопланетного диска до образования обогащенного пылью субдиска занимала от 1 до 2 млн лет.

Пылевой субдиск реально представлял собой довольно тонкий диск (по сравнению с его радиусом), толщиной 10^{-3} – 10^{-4} от его радиуса. Он должен был быть непрозрачным для солнечных лучей, и поэтому они не достигали периферии диска. Это определяло в том числе разные условия образования планет в зависимости от близости к протозвезде.

Начало образования допланетных тел. Как предполагают некоторые космологи, в течение определенного времени в связи с силами гравитации и турбулентности, возможно, происходило сжатие субдиска и образование в нем пылевых сгущений и далее сгустков. Но вопрос, образовались ли планеты из этих газовых сгустков или уже из твердого вещества, является дискуссионным.

Теория образования планет из твердого вещества называется *теорией последовательной аккреции (или аккумуляции)*. Многие, если не большинство космологов, считают ее более вероятным сценарием. Согласно ей крошечные частицы пыли слипаются, образуя сначала мелкие частицы твердого вещества, а затем крупные глыбы, которые постепенно выросли в зародыши планет. Частицы твердого вещества (от мелких до крупных километровых глыб и даже более) называются *планетезималиями*.

Другая теория *сгущений* (которой в значительной мере придерживаются отечественные ученые) исходит из того, что в условиях гравитационной неустойчивости плотного пылевого слоя и турбулентности происходила фрагментация пылевого субдиска, а затем возникли допланетные пылевые сгущения. В результате образовались большие сгущения-*препланетезималии*, которые потом трансформировались в крупные планетезималии, а согласно некоторым вариациям этого направления, даже сразу в зародыши планет.

Важнейшим этапом в процессе образования зародышей планет является образование крупных твердых (сплошных) тел-планете-

зималей. В этом согласны все теории и гипотезы. Однако по поводу числа, размеров и иных параметров этих крупных тел имеются существенные расхождения. Есть различия и в оценке рубежных (критических для процесса) размеров планетезималей. *Сторонники теории последовательной аккумуляции вещества планетезималами* условно считают таким образование миллионов и миллиардов километровых тел, которые в процессе роения постепенно укрупняются. Согласно *теории сгущений*, крупнейшие тела могли достигать тысячекилометровых размеров.

Среди множества сил, которые влияли на процессы концентрации и аккумуляции материи, превращения вещества протооблака в твердые тела, установление орбит и в целом на формирование протопланет, особую роль, конечно, играли две: гравитация и сила солнечного излучения. И обе они в прямой пропорции зависели от величины расстояния объекта от Солнца. 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. На ней накапливаются молекулы воды, испарившиеся из пылинок. *Линия льда превращается в полюсу его скопления* и способствует созданию планетезималей.

Образование крупных планетезималей. По мере возрастания масс планетезималей у них появилась способность удерживать близко находящиеся частички за счет тяготения. Множество километровых планетезималей активно подбирают первичную пыль. По мере их роста образовался так называемый *протопланетный рой объектов*, где роились планетезимали самых разных размеров. Постепенно выделилась и небольшая по количеству «элита», тела размером с Луну или даже Меркурий. Существует множество гипотез о механизме их выделения. Со временем орбиты крупнейших тел стали приближаться к круговым, а сами они становились центрами притяжения всего окружающего их вещества, явившись зародышами планет.

Количество крупных зародышей планет, по разным предположениям, было различным – от единиц до сотен. Образование планетезималей длилось, согласно расчетам, десятки и сотни тысяч лет, протопланетных тел из планетезималей – несколько миллионов лет.

Для понимания процессов формирования протопланет важен вопрос о первичном веществе, из которого были сложены планетезимали. В этом отношении первостепенное значение имеют данные о метеоритах и их составе, многие из которых образовались в первые миллионы лет существования Солнечной системы. Метеориты, называемые хондритами, содержат мелкие зерна миллиметрового размера – хондры, некоторые из которых имеют стеклообразное строение (Лин 2008; Шкловский 1987). Это самый древний и самый распространенный тип метеоритов – 85 % от общего их числа. Хондритовые метеориты аналогичны по своим физическим свойствам большинству астероидов, они могут дать ключ к пониманию природы планетезималей и того, как образовывались планеты, они есть вещественный материал для суждения о происхождении планет.

1.3. Образование зародышей планет и протопланет

Гипотезы о росте планетезималей и борьба за ресурсы. Рост планетезималей происходил за счет как аккреции вещества, включая и газ, так и взаимного притяжения и случайных столкновений. Но чем больше становится планетезималь, тем сильнее ее гравитация, тем интенсивнее она поглощает своих маломассивных соседей. Когда массы отдельных планетезималей становятся сравнимы с массой Луны, их гравитация значительно возрастает, и они отклоняют окружающие тела в стороны еще до столкновения. В итоге борьбы, столкновений и объединений образуется небольшое количество крупных космических тел – зародышей планет, которые господствуют в своих орбитальных зонах и борются за оставшееся вещество.

При этом в процессе роста планетезималей они постоянно сталкивались и под воздействием ударов иногда объединялись и росли, иногда – дробились. Процессы дробления приводили к тому, что наиболее крупные объекты захватывали все больше ресурсов. Росли те объекты, которые и без того были крупными. Постепенно в этом хаосе стали возобладать процессы самоорганизации.

1.4. Образование системы протопланет

Проблемы и гипотезы образования групп планет. Большинство исследователей считают, что период до образования первых планет занял как минимум несколько миллионов лет. Но расхождения в определении длительности процесса очень велики.

Поскольку планеты Солнечной системы делятся на две группы (земного типа и планет – газовых гигантов), важным становится вопрос о разнице в их образовании. Было ли это образование принципиально одинаковым в обеих группах, а различия определялись расстоянием от Солнца, либо сам процесс образования разных групп планет был во многом различным, либо имелись иные комбинации?

То, что расстояние от Солнца играло огромную роль в особенностях формирования планет, сомнений ни у кого не вызывает. Различия в длине орбит у зародышей планет (а чем дальше планета от Солнца, тем больше орбита) влияли на возможность захвата окружающих планетезималей и соответственно на радиус и массу протопланеты. Благодаря линии льда концентрация планетезималей и материи в определенных местах Солнечной системы была выше, что также могло повлиять на размеры планет разных областей.

Есть три главных подхода в отношении формирования планет земной группы.

1) Нарастивание массы планеты путем аккумуляции планетезималей (и метеоритов) до современных размеров, в результате чего постепенно произошла структуризация планет на ядро, мантию и кору (но не у всех планет).

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

3) Влияние Юпитера и Сатурна на формирование планет земной группы, поскольку первые забрали весь газ, но подтолкнули планетезимали ближе к Солнцу, в результате чего планетам земной

группы удалось собрать свою массу (см., например: Лин 2008; Батыгин и др. 2016).

Но подход в объяснении процессов образования планет земной группы в значительной степени зависит от того, считают ли исследователи, что процесс образования всех планет Солнечной системы шел более или менее одновременно или же что планеты образовывались разновременно.

Гипотезы и теории в отношении планет внешней зоны. Двум газовым планетам-гигантам, на которые приходится 92 % массы всей планетной системы (то есть Юпитеру и Сатурну, но особенно Юпитеру), в теории образования планет уделяется особое внимание.

Есть две основные гипотезы относительно способа образования Юпитера и Сатурна, которые содержат много водорода и гелия. Первая гипотеза, *контракции*, объясняет газовый состав планет-гигантов тем, что в протопланетном диске большой массы образовались массивные газопылевые сгущения – протопланеты, которые позже в процессе гравитационного сжатия превратились в планеты-гиганты. Однако эта гипотеза не объясняет причины различия состава Юпитера и Сатурна от состава Солнца и некоторые другие проблемы.

Согласно второй гипотезе, *аккреции*, образование Юпитера и Сатурна проходило в два этапа. На первом этапе продолжительностью около тридцати миллионов лет в области Юпитера и двухсот миллионов лет в области Сатурна происходила аккумуляция твердых тел, так же как и в области планет земной группы, а когда масса крупнейших тел достигла критического значения (от двух до 10 и более масс Земли), начался второй этап – аккреция газа на эти уже достаточно массивные тела, – который длился не менее 10^5 – 10^6 лет. На первом этапе из области Юпитера диссипировала часть газа, его состав начал отличаться от солнечного, и это еще больше проявилось в области формирования Сатурна.

Согласно конкурирующей гипотезе *контракции*, температура планет-гигантов на ранней стадии также была высокой, однако динамика процессов в рамках гипотезы *аккреции* оказалась более обоснованной. Образование Урана и Нептуна, где содержится меньше водорода и гелия, также лучше объясняется гипотезой *ак-*

креции, так как большая часть газа уже покинула пределы Солнечной системы по достижении критической массы.

Но процесс образования планет за счет аккреции на ядро является достаточно медленным (требует порядка нескольких миллионов лет). Некоторые исследователи помимо сценария аккреции на ядро рассматривают также сценарий, согласно которому к формированию планет может приводить гравитационная неустойчивость в плотных и холодных областях диска. Образование планет за счет гравитационной неустойчивости может происходить за время значительно меньшее, чем требуется при их образовании за счет аккреции на ядро. Данная гипотеза предполагает, что газовые гиганты формируются путем внезапного коллапса, приводящего к разрушению первичного газопылевого облака. Но большинство космологов отрицают возможность гравитационного коллапса для планет из-за их относительно малой массы (а признают это только для звезд).

Последовательность образования планет. Чаще всего предполагают, что планеты образовались более или менее одновременно. Но некоторые исследователи исходят из того, что одни планеты образовались раньше других. Так, одни считают, что первым сформировался Юпитер, затем Сатурн, а планеты земной группы – много позже, зато другие полагают, что сначала образовались планеты земной группы. Некоторые исследователи думают, что последние первоначально были похожи на планеты-гиганты, но затем потеряли свои флюидные оболочки. Они объясняют это тем, что вблизи Солнца большая часть легких газов из атмосфер планет была «выметена» солнечным излучением на периферию, в более далекие области, в открытое космическое пространство.

И напротив, другие исследователи считают, что первым сформировался Юпитер, что произошло уже через 2 млн лет после начала процесса трансформации протосолнечного облака. Согласно данным взглядам, формирование этой крупной планеты – не просто важнейший момент в истории планетной системы. Если такая планета сформировалась, она начинает управлять всей системой. С одной стороны, газовый гигант стимулирует формирование других гигантов и планет земного типа. Но с другой, Юпитер за счет того, что сформировался раньше, забрал основную часть газа диска, кроме того, он «выметает» астероиды первого поколения, то есть собирает много масс планетезималей и астероидов. В течение

последующих 8 млн лет после своего формирования Юпитер помогает сформироваться остальным планетам-гигантам. К этому времени почти весь газ диска расходуется, соответственно планеты земной группы, образовавшиеся последними и заметно позднее, газа почти не получают. Согласно этой версии, планеты земной группы образовались последними, в период от 10 до 100 млн лет. Эти планеты опоздали к разделу газа, да и твердого вещества было не так много. Словом, кто не успел, тот опоздал, раздел ресурсов в космическом мире столь же несправедлив, как в мире биологическом и социальном.

1.5. Смена местоположения планет

Менялось ли положение планет в Солнечной системе? Раньше считалось (и это мнение часто встречается сегодня), что все планеты сформировались приблизительно на тех орбитах, где сейчас находятся. Но с начала этого века стали набирать популярность мнения, согласно которым, чтобы планеты приняли современные орбиты, потребовался большой интервал времени, до 1 млрд лет.

В самый ранний свой период Солнечная система была иной, чем сейчас, возможно, внешняя Солнечная система была гораздо компактнее по размеру, а пояс Койпера располагался гораздо ближе к Солнцу. Все нижеописанные варианты смены орбит, конечно, пока являются гипотезами, фактов, их подтверждающих, почти нет. Ни одну из них нельзя считать доминирующей.

Об орбитах и смене местоположения планет земной группы. Те, кто считает, что планеты земной группы образовывались неодновременно и под влиянием Юпитера, также утверждают, что влияние его гравитации вызвало у формирующихся планет земной группы миграцию, передвигая их в области ближе к Солнцу. Есть также идея, что *существовало не одно, а два или более поколений первичных планет, поскольку Юпитер и Сатурн «сбросили» их на Солнце или «выбросили» за пределы Солнечной системы. Соответственно, пространство внутри Солнечной системы стало более свободным, а планетные орбиты – более круговыми. То есть современный порядок потребовал двух или более попыток создания системы.*

Смена орбиты Юпитера и других планет. Есть разные предположения о возможных направлениях этих миграций самой круп-

ной планеты Солнечной системы. Согласно одной из них, этот газовый гигант должен был формироваться во внутренней части планетной системы, вблизи линии льда, пока в диске было еще достаточно газа. Кроме того, он должен был переместиться к месту своего нынешнего расположения. Когда Юпитер дрейфовал к центру и увлекал за собой Сатурн, он действовал как гравитационный бульдозер, «толкая» несколько земных масс льдистого вещества внутрь системы. Имеется гипотеза, что в районе 700 млн лет от начала формирования Солнечной системы в результате дрейфа Юпитер и Сатурн вошли в орбитальный резонанс. Резонанс изменил движение этих планет: затормозил их миграцию внутрь и направил обратно к внешней части Солнечной системы. Резонанс оказал мощнейшее влияние на всю Солнечную систему. В частности, Нептун и Уран поменялись местами и орбитами, так как ранее Уран находился дальше Нептуна.

Далеко не сразу планеты вышли из резонанса. Хаотическое взаимодействие между теперь уже нестабильными гигантами за несколько миллионов лет «толкнуло» Юпитер внутрь, на его нынешнее место, а другие планеты «отодвинуло» наружу. При этом, согласно одной из самых экзотических гипотез, один из гигантов мог быть выброшен в межзвездное пространство. Речь идет о гипотетической девятой планете, которая могла существовать в то далекое время.

1.6. Дальнейшее формирование Солнечной системы и роль катастроф

Появление шарообразной формы и усиление геологических процессов. По мере развития процессов аккумуляции вещества зародышами планет, роста их объемов и массы происходили и важные формообразующие процессы.

Уже на стадии планетообразования начался процесс дифференциации вещества в формирующихся *протопланетах*. Тепло импактов вместе с теплом радиоактивных элементов должно было привести к разогреву, частичному плавлению вещества, оседанию к центрам масс будущих планет тяжелых частиц (преимущественно железоникелевых) и выдавливанию к поверхности более легких ча-

стиц (преимущественно силикатных). Так формировались первичные ядра, мантии и кора будущих планет (Язев 2011: 357).

Предварительные расчеты показывают, что образующиеся тела – зародыши планет – имеют вытянутую форму. Однако постепенно форма менялась, протопланеты становились шарообразными. Наблюдается шарообразность практически всех космических тел, чей поперечник превышает 250–300 км. Она может возникнуть под действием сил собственного тяготения через нагрев и размягчение его недр. И если масса космического тела настолько велика, что собственная сила тяжести придала ему сфероидальную форму, это означает, что в его недрах протекает геологическая эволюция. В результате вещество разделяется по плотности (легкое поднимается вверх, тяжелое опускается вниз), выделяется тепло, происходят химические реакции и т. п. (Громов 2012: 47).

Основные моменты достраивания и упорядочения Солнечной Системы. Как уже было сказано, для формирования порядка в планетной системе, какой мы ее сейчас знаем, возможно, потребовались сотни миллионов лет. И этот период «отладки» и упорядочения был довольно бурным, включал в себя множество грандиозных катастроф, а также различные миграции, о части которых мы уже говорили выше. Одновременно это был период грандиозных геологических изменений в рамках планет и их спутников.

Когда, согласно некоторым космологам, примерно спустя 700 млн лет после образования Солнечной системы Юпитер и Сатурн вступили в резонанс (помимо вышесказанного), эти планеты проредили пояс астероидов и пояс Койпера, в которых в результате стало во много раз меньше планетезималей. Это, видимо, была грандиозная «чистка», хотя разрушение и перенаправление планетезималей продолжалось и до, и после нее.

Кроме того, с указанным событием, вероятно, связана и так называемая поздняя эпоха сильной бомбардировки, точнее, особый период этой эпохи (см.: Bottke *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2005). Ранняя эпоха пришлась на начало формирования планетной системы в первые миллионы или десятки миллионов лет. Во время поздней эпохи тяжелой бомбардировки на каменные планеты выпало огромное количество метеоритных осадков. Относительно недавние исследования показали, что это была длительная эпоха, кото-

рая закончилась 3,2 млрд лет назад, то есть продолжалась она почти один миллиард лет.

Образование спутников. Происхождение систем регулярных спутников (то есть движущихся в направлении вращения планеты по почти круговым орбитам, лежащим в плоскости ее экватора) обычно объясняют повторением в малом масштабе того же процесса, который предлагают для объяснения образования планет Солнечной системы. Такие спутники есть у Юпитера, Сатурна, Урана. Однако происхождение иррегулярных спутников (то есть таких, которые обладают обратным движением) эти теории объясняют захватом.

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

Столкновения и катастрофы в ранний период Солнечной системы. Наиболее известны две предполагаемые катастрофы, которые произошли в период первых ста миллионов лет. Первая связана с Венерой и Меркурием. Венера имеет обратное вращение (противоположное движению Солнца вокруг собственной оси), тогда как почти все прочие крупные тела Солнечной системы вращаются в одном и том же направлении, совпадающем с направлением вращения самого Солнца вокруг своей оси. Меркурий имеет непропорционально большое железоникелевое ядро, в результате чего его металлическая часть составляет 60 % или более от всей его массы. Объяснения этому разные. Одно из них – столкновение Меркурия с крупным астероидом; в результате этого касательного удара Меркурий потерял большую часть своей мантии и оболочки (Язев 2011: 48). Существует и еще более экзотическая версия, согласно которой Меркурий первоначально был расположен дальше от Солнца, однако был не самостоятельной планетой, а спутником Венеры, но затем «убежал» от нее. Эта версия объясняет сразу две проблемы: малый размер Меркурия, но более чем приличный для спутника; обратное другим планетам вращение Венеры. Основная версия по этому поводу – приливное воздействие в далеком прошлом массивного спутника, то есть Меркурия, которое не только затормозило вращение планеты, но даже слегка «раскрутило» ее в обратном направлении.

Другой известной гипотезой о катастрофе является идея, что между 30 и 100 млн лет после формирования Солнца зародыш размером с Марс врезался в протоземлю и породил гигантское количество обломков, из которых сформировалась Луна. Но это предположение имеет варианты. Есть красивая гипотеза, что рядом с протоземлей миллионы лет относительно близко вращалась протопланета Тейя (Тея). В конце концов планеты столкнулись. Считается, что столкновение произошло почти по касательной и на относительно низкой скорости. Поэтому часть вещества земной мантии и Тейи были выброшены на околоземную орбиту. Из этих обломков и сформировалась Луна, которая начала обращаться по круговому пути.

Еще гипотезы о столкновениях. Выше мы говорили, что Нептун приблизительно 600–700 млн лет после коллапса протосолнечного облака мигрировал и стал менять свою орбиту. Недавно была выдвинута гипотеза о том, что в Солнечной системе существовало не четыре, а пять планет-гигантов и что эта пятая планета столкнулась с Нептуном в период его миграции. Это сдвинуло Нептун к его современной орбите, пятая планета-гигант распалась на кластер обломков, которые были выброшены Нептуном в пояс Койпера, то есть на окраину Солнечной системы.

Около 3,8 млрд лет назад гиганты успокоились в их современном положении. Считается, что после установления современной системы планет и спутников значительных изменений в Солнечной системе уже не происходило. Происходили большие изменения на самих планетах, в их геологии, климатологии, составе атмосферы и прочем.