### Происхождение Солнечной системы (планетная космогония)

### [1. Введение](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text%22%20%5Cl%20%221)[2. Развитие планетной космогонии](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text#2)[3. Современное состояние планетной космогонии:](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text#3)    [Образование Солнца и протопланетного облака](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text#3a)    [Процесс образования планет и их спутников](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text#3b)    [Начальное состояние и эволюция Земли](http://www.astronet.ru/db/msg/1188557/text#3c)

### 1. Введение

Солнечная система состоит из центральной звезды [Солнца](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%D1%EE%EB%ED%F6%E5) и окружающих его множества небольших спутников - [планет](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CF%EB%E0%ED%E5%F2%FB), [астероидов](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C0%F1%F2%E5%F0%EE%E8%E4%FB) (малых планет), [комет](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CA%EE%EC%E5%F2%FB), [метеоритов](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CC%E5%F2%E5%EE%F0%E8%F2%FB) и бесчисленных мелких метеорных частиц и пылинок. Девять планет явл. главными спутниками Солнца, но и у них суммарная масса в 743 раза меньше . Суммарная же масса всех остальных малых тел Солнечной системы, включая облако комет, составляет .

Поскольку Солнце явл. одной из [звезд](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C7%E2%E5%E7%E4%FB), вопросы его происхождения и развития рассматриваются теорией [эволюции звезд](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%DD%E2%EE%EB%FE%F6%E8%FF%20%E7%E2%E5%E7%E4), а в изучении происхождения Солнечной системы наиболее интересен вопрос об образовании планет, в частности Земли. Выяснение происхождения и развития Земли имеет большое принципиальное и практическое значение.

Предпринимаются попытки поиска планетных систем у ближайших к нам звезд (см. [Невидимые спутники звезд](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CD%E5%E2%E8%E4%E8%EC%FB%E5%20%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA%E8%20%E7%E2%E5%E7%E4)). В согласии с совр. представлениями о [звездообразовании](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C7%E2%E5%E7%E4%EE%EE%E1%F0%E0%E7%EE%E2%E0%ED%E8%E5) звезды с планетными системами могли бы составлять промежуточный класс между одиночными и двойными звездами. Не исключено, что строение планетных систем и способы их формирования могут быть весьма различными. Строение Солнечной системы обладает рядом закономерностей, указывающих на совместное образование всех планет и Солнца в едином процессе.

Такими закономерностями являются: движение всех планет в одном направлении по эллиптич. орбитам, лежащим почти в одной плоскости; вращение Солнца в том же направлении вокруг оси, близкой к перпендикуляру относительно центральной плоскости планетной системы; вращение в том же направлении большинства планет (за исключением Венеры, к-рая очень медленно вращается в обратном направлении, и Урана, к-рый вращается как бы лежа на боку); обращение в том же направлении большинства спутников планет; закономерное возрастание расстояний планет от Солнца; деление планет на родственные группы, отличающиеся по массе, хим. составу и количеству спутников (группа близких к Солнцу планет земного типа и далекие от Солнца планеты-гиганты, также подразделяющиеся на две группы); наличие пояса малых планет между орбитами Марса и Юпитера.

### 2. Развитие планетной космогонии

В 1775 г. нем. ученый И. Кант пытался объяснить единообразный характер движения планет формированием их из рассеянного вещества (пылевого облака), простирающегося до границ совр. планетной системы и вращающегося вокруг Солнца.

В 1796 г. франц. ученый П. Лаплас выдвинул гипотезу об образовании Солнца и всей Солнечной системы из сжимающейся газовой туманности. Согласно Лапласу, часть газового вещества отделилась от центрального сгустка под действием возросшей при сжатии центробежной силы, что следует из закона сохранения момента количества движения. Это вещество послужило материалом для образования планет. И Кант, и Лаплас рассматривали образование планет из рассеянного вещества, и поэтому часто говорят о единой гипотезе Канта-Лапласа. Гипотеза Лапласа долгое время владела умами ученых, но трудности, с к-рыми она встретилась, в частности при объяснении медленности совр. вращения Солнца, заставили астрономов обратиться к др. гипотезам. В конце 19 в. появилась гипотеза амер. ученых Ф. Мультона и Т. Чемберлена об образовании планет из мелких твердых частиц, названных ими планетезималями. Они ошибочно считали, что обращающиеся вокруг Солнца планетезимали могли возникнуть путем застывания вещества, выброшенного Солнцем в виде огромных протуберанцев. (Такое образование планетезималей противоречит закону сохранения момента количества движения.) В то же время в планетезимальной гипотезе были правильно обрисованы многие черты процесса образования планет. В 20-30-х гг. 20 в. широкой известностью пользовалась гипотеза англ. астронома Дж. Джинса, считавшего, что планеты образовались из вещества, вырванного из Солнца притяжением пролетевшей поблизости звезды. Однако в конце 30-х гг. выяснилось, что гипотеза Джинса не способна объяснить огромные размеры планетной системы. Чтобы вырвать вещество из Солнца, звезда должна была пролететь очень близко от него, а в таком случае это вещество и возникшие из него планеты должны были бы кружиться в непосредственном соседстве с Солнцем. Кроме того, вырванное вещество было бы весьма горячим, поэтому оно скорее рассеялось бы в пространстве, чем собралось в планеты. После крушения гипотезы Джинса планетная космогония вернулась к классич. идеям Канта и Лапласа об образовании планет из рассеянного вещества.

В 1943 г. О.Ю. Шмидт выдвинул идею об аккумуляции планет из роя холодных тел и частиц, к-рый, по его представлениям, был захвачен Солнцем. В отличие от предшествующих космогонич. гипотез, рассматривавших образование планет из раскаленных газовых сгустков, согласно гипотезе Шмидта, Земля образовалась из холодных твердых тел и сначала была относительно холодной.

Шмидт считал, что вопросы происхождения допланетного облака, образования планет и их эволюции могут рассматриваться в нек-рой степени независимо. Работами Шмидта и ряда др. советских ученых (Л.Э. Гуревича, А.И. Лебединского, Б.Ю. Левина, В.С. Сафронова) выяснены осн. черты эволюции протопланетного облака и процесса формирования планет.

Весь процесс можно условно разделить на два этапа. На первом этапе из пылевого компонента облака образовалось множество "промежуточных" тел размером в сотни км. Этот процесс мог идти следующим путем. Во вращающемся газово-пылевом облаке пыль под действием гравитации опускалась к центральной плоскости, что вело к образованию пылевого субдиска; при достижении в пылевом слое критич. плотности в результате [гравитационной неустойчивости](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C3%F0%E0%E2%E8%F2%E0%F6%E8%EE%ED%ED%E0%FF%20%ED%E5%F3%F1%F2%EE%E9%F7%E8%E2%EE%F1%F2%FC) субдиск распался на множество пылевых сгущений; столкновения сгущений вызывали объединение и сжатие большинства из них и образование компактных тел астероидных размеров. На втором этапе из роя "промежуточных" тел и из обломков аккумулировались планеты. Сперва тела двигались по круговым орбитами в плоскости породившего их пылевого слоя. Они росли, сливаясь друг с другом и вычерпывая окружающее рассеянное вещество - остатки "первичной" пыли и обломки, образовавшиеся в процессе столкновений "промежуточных" тел с большой относительной скоростью. Гравитационное взаимодействие "промежуточных" тел, усиливавшееся по мере их роста, постепенно изменяло их орбиты, увеличивая ср. эксцентриситет и ср. наклон к центральной плоскости диска. Те из тел, к-рые вырывались вперед в процессе роста, оказались зародышами будущих планет. При объединении многих тел в планеты произошло усреднение индивидуальных св-в движения отдельных тел, и поэтому орбиты планет получились почти круговыми и компланарными. Самые крупные планеты - Юпитер и Сатурн - на осн. стадии аккумуляции вбирали в себя не только твердые тела, но и газы. Анализ процесса аккумуляции планет из роя твердых тел позволил Шмидту и его последователям указать путь к объяснению прямого вращения планет и закона планетных расстояний.

Одним из главных экспериментальных доводов в пользу образования планет земной группы не из газовых или газово-пылевых сгустков, а путем аккумуляции твердого вещества явл. большой дефицит на Земле, а также на Венере и Марсе тяжелых инертных газов Ne, Ar (за исключением радиогенного изотопа 40Ar), Kr и Xe по сравнению с их солнечным и космич. [обилием](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CE%E1%E8%EB%E8%E5).

Изучение процесса аккумуляции планет земной группы показало, что практически все твердое вещество из зоны формирования этих планет вошло в их состав и только ничтожно малая доля была выброшена из этой зоны гравитац. возмущениями растущих планет. Количество твердого вещества, выброшенного из зоны планет-гигантов, было больше, но не превышало массу самих планет. Это явл. веским доводом в пользу того, что общая масса протопланетного облака составляла всего неск. % от .

Особой проблемой, служившей пробным камнем для многих космогонич. гипотез, оставалась проблема распределения момента количества движения в Солнечной системе: хотя масса планет составляет менее 1% массы Солнца, в их орбитальном движении заключено более 98% общего момента количества движения всей Солнечной системы.

В 60-х гг. 20 в. появились первые приближенные количеств. теории совместного образования Солнца и протопланетного облака (Ф. Хойл, Великобритания, 1960 г.; А. Камерон, США, 1962 г.; Э. Шацман, Франция, 1967 г.). В этих теориях в той или иной форме рассматривалось отделение вещества от сжимающегося протосолнца вследствие наступления у него ротац. неустойчивости (при уравнивании на экваторе центробежной силы и силы притяжения).

Хойл и Шацман стремились показать расчетами, что протопланетное облако имело минимально допустимую массу. Для объяснения распределения момента количества движения между Солнцем и планетами Хойл использовал интересную идею шведского астрофизика Х. Альвена о возможности магн. сцепления вращающегося Солнца и ионизованного вещества протопланетного облака, благодаря к-рому Солнце может передать момент близлежащим частям протопланетного облака. На б'ольших расстояниях, где магн. поле ослаблено, перенос вещества и момента осуществлялся, по его мнению, с помощью [турбулентности](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%D2%F3%F0%E1%F3%EB%E5%ED%F2%ED%EE%F1%F2%FC). Эти идеи используются и в современных моделях образования Солнечной системы.

Медленность вращения совр. Солнца Шацман объяснял потерей нек-рой части вещества с поверхности Солнца, происшедшей уже после превращения протосолнца в Солнце. Улетающее ионизованное вещество вплоть до больших расстояний продолжает взаимодействовать с магн. полем вращающегося Солнца и приобретает значит. момент количества движения, к-рый и уносит с собой. Это объяснение медленности вращения Солнца считается наиболее вероятным.

Камерон в своих работах 60-х гг. предполагал, что Солнечная система возникла в результате сжатия (коллапса) межзвездного облака с массой , и развивал теорию эволюции такого облака, обходя молчанием встречающиеся трудности. Массивное протопланетное облако, отделившееся от протосолнца, должно было дополнительно разогреться в результате выделения [гравитационной энергии](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C3%F0%E0%E2%E8%F2%E0%F6%E8%EE%ED%ED%E0%FF%20%FD%ED%E5%F0%E3%E8%FF) при его сжатии к центральной плоскости. При этом все вещество облака должно было перейти в газовую фазу. По мере последующего остывания протопланетного облака в нем должна была происходить конденсация сначала наименее летучих, т.е. наиболее тугоплавких, веществ, а затем все более летучих. В более поздних работах Камерон рассматривал протопланетное облако умеренной массы, для к-рого начальная темп-ра в зоне формирования планет земной группы и метеоритов должна была составлять всего неск. сотен oС. В наиболее общем случае 'облака малой массы темп-ра должна быть еще ниже. Следствия, вытекающие из этих представлений, были подвергнуты проверке при анализе вещества метеоритов.

Начиная с 70-х гг. 20 в. лабораторные анализы метеоритов, к-рые на протяжении всей своей истории не подвергались сильному нагреву, указывали на присутствие в них вещества, напоминающего, по-видимому, [межзвездную пыль](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CC%E5%E6%E7%E2%E5%E7%E4%ED%E0%FF%20%EF%FB%EB%FC). Его присутствие в количестве хотя бы неск. % теперь уже не вызывает сомнений. Согласно Д. Клейтону (США, 1978 г.), почти вся пыль в первичном протопланетном облаке имела межзвездное происхождение.

Определения изотопного состава земных образцов и метеоритов, а также лунных образцов показали его высокую однородность (за исключением следов фракционирования изотопов при образовании отдельных образцов). Это указывает на хорошую перемешанность осн. массы протопланетного вещества. Однако ряд обнаруженных изотопных аномалий в нек-рых метеоритах свидетельствует о том, что в протопланетном облаке присутствовали порции вещества, не перемешанные с осн. массой вещества. По-видимому, в протопланетном облаке не было полного испарения межзвездной пыли, при к-ром различия изотопного состава были бы сглажены. Еще в 1960 г. исследования изотопного состава Xe из метеоритов выявили присутствие в нем дочернего продукта распада - короткоживущего радиоактивного изотопа 129I, а в 1965 г. - продуктов распада 244Pu (периоды полураспада и лет соответственно). Присутствие газообразных химических инертных продуктов распада показывает, что нек-рое время после нуклеосинтеза этих изотопов образовалась твердая фаза, где и произошел распад сохранившейся части этих изотопов. Одним из важнейших процессов нуклеосинтеза и единственным процессом синтеза Pu явл. взрывы [cверхновых звезд](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%D1%E2%E5%F0%F5%ED%EE%E2%FB%E5%20%E7%E2%E5%E7%E4%FB). Возникло естеств. предположение, что незадолго до сжатия межзвездного газово-пылевого облака, приведшего к образованию протосолнца с протопланетным диском, неподалеку произошел взрыв сверхновой, инжектирующей в облако свежие продукты нуклеосинтеза. Присутсвие в метеоритах продуктов распада изотопов 129I и 244Pu интерпретировалось как указание на то, что между взрывом сверхновой и образованием твердого метеоритного вещества прошло всего неск. периодов полураспада, т.е. время ~ 107-108 лет. Этот промежуток времени, названный интервалом формирования, был сокращен до 106-107 лет, когда удалось выявить в ряде метеоритов присутсвие продуктов распада еще более короткоживущих изотопов - 26Al и 107Pd (периоды полураспада и лет).

Если исходить из идеи о сохранении межзвездных пылинок, понятие "интервал формирования" теряет свой смысл. Конденсация твердого веществав и образование пылинок начинаются еще на стадии разлета продуктов взрыва сверхновой, и количество продуктов распада короткоживущих изотопов, присутствующих в метеоритном веществе, зависит от доли свежей пыли, инжектированной в межзвездное облако либо перед его сжатием (коллапсом), либо в уже сформировавшееся допланетное облако. Камерон и С. Труран (США, 1970 г.) предложили, что взрыв близко расположенной сверхновой не только инжектировал свежее вещество в протосолнечную туманность, но и содействовал ее сжатию.

Достижения астрофизики и планетологии в 70-х гг. 20 в.: первые расчеты коллапса, учитывающие вращение сжимающихся протозвезд; исследование областей совр. звездообразования в Галактике; снимки поверхностей планет Солнечной системы и их спутников, изобилующих ударными кратерами, - наглядно свидетельствуют о правильности общих основ совр. теории формирования планет.

Наряду с исследованиями, определяющими генеральную линию развития планетной космогонии, существуют представления, не пользующиеся широким признанием. Так, Альвен разрабатывает с 40-х гг. 20 в. гипотезу о том, что образование планетной системы на всех этапах определялось в основном эл.-магн. силами. Для этого молодое Солнце должно было обладать очень сильным магн. полем, в тысячи раз более сильным, чем современное. Газы межзвездного облака, падавшего к Солнцу под действием его притяжения, постепенно ионизовались и по мере ускорения своего падения под влиянием магн. поля Солнца переходили от падения к обращению вокруг Солнца. Первыми на больших расстояниях от Солнца должны были ионизоваться металлы и др. вещества, обладающими низкими потенциалами [ионизации](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C8%EE%ED%E8%E7%E0%F6%E8%FF), а последним ближе всего к Солнцу должен был ионизоваться водород. Хим. состав планет дает обратную картину распределения водорода и более тяжелых элементов. Вследствие этого и искусственности ряда др. предположений гипотеза Альвена почти не имеет сторонников.

Англ. ученый М. Вульфсон в 60-70-х гг. 20 в. пытался развивать гипотезу, согласно к-рой приобретение Солнцем протопланетного вещества объяснялось сочетанием приливного воздействия и захвата: Солнце захватило сгустки вещества, вырванного его притяжением из пролетавшей мимо разреженной протозвезды. Как и гипотеза Джинса, эта схема имеет много слабых мест и не пользуется популярностью.

### 3. Современное состояние планетной космогонии:     Образование Солнца и протопланетного облака

Данные, накопленные астрофизикой, говорят о том, что звезды, в т.ч. и звезды солнечного типа, образуются в газово-пылевых комплексах с массой . Примером такого комплекса явл. известная туманность Ориона, где звезды продолжают образовываться. По-видимому, и Солнце образовалось с группой звезд в ходе сложного процесса сжатия и фрагментации подобной массивной туманности.

Начавшее сжиматься массивное облако, участвующее в общем вращении Галактики, не может сжаться до высокой плотности из-за большого момента вращения. Поэтому оно стремится распасться на отдельные фрагменты. Часть момента вращения при этом переходит в момент относительного движения фрагментов. Процесс последовательной фрагментации, сопровождаемый беспорядочными (турбулентными) движениями, ударными волнами, запутыванием магн. полей, приливным взаимодействием фрагментов, сложен и понят далеко не достаточно. Однако эволюция изолированного фрагмента, имеющего массу и обладающего не слишком большим начальным моментом вращения *K* (), уже может быть прослежена путем расчетов на ЭВМ. Расчеты показывают, что при большом моменте вращения вместо протозвезды может возникнуть неустойчивое кольцо, разбивающееся на фрагменты. Таким путем, возможно, формируются кратные звезды. При много меньшем значении *K* более вероятно образование одиночной звезды. В 80-е гг. 20 в. появились детальные расчеты по образованию около сжимающейся протозвезды (Солнца) уплощенного газово-пылевого диска. В экваториальной области сжимающейся протозвезды должна существовать область с интенсивным перераспределением момента вращения. В случае эффективной турбулентности, вызванной продолжающейся аккрецией газа, все новые порции вещества с избыточным моментом выносятся наружу, образуя вращающийся газово-пылевой диск. Часть вещества из сжимающейся оболочки аккрецирует непосредственно на диск. Не исключено, что в зависимости от начальных условий в туманности, влияния соседних фрагментов, а также вспыхивающих поблизости новых и сверхновых звезд массы и размеры образующихся дисков могут варьировать в широких пределах. Важную роль в ранней эволюции таких дисков играет активность молодой звезды - ее излучение в рентг. и УФ-диапазонах, общая светимость и интенсивность [звездного ветра](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C7%E2%E5%E7%E4%ED%FB%E9%20%E2%E5%F2%E5%F0). Имеются данные, что рентг. и УФ-излучение молодых звезд солнечной массы может на порядки превышать интенсивность коротковолнового излучения совр. Солнца. С использованием ур-ний гидродинамики были построены модели околосолнечного газово-пылевого диска, вращающегося вокруг такого активного Солнца. Согласно этим моделям, темп-ра в центральной плоскости диска падает с расстоянием от Солнца как *r*-1-*r*-1/2, составляя 300-400 К на расстоянии *r*=1 а.е. и лишь десятки кельвинов на а.е. Внеш. разреженные слои диска могли нагреваться коротковолновым излучением Солнца до очень высоких темп-р, что вело к потере газа (его рассеянию в межзвездное пространство). Этому процессу способствовал также интенсивный солнечный ветер. Однако структуру внутренних, более холодных областей диска хорошо отражает модель, положенная в основу исследований Шмидта и его сотрудников.



### Процесс образования планет и их спутников

При моделировании отдельных стадий эволюции протопланетного облака и образования планет (рис.) большое внимание уделяется начальной стадии - опусканию пылинок в центральной плоскости диска и их слипанию в условиях допланетного облака. От быстроты роста пылинок зависит время их опускания и образование уплощенного пылевого диска. Последующий распад пылевого диска, образование пылевых сгущений и их превращение в рой компактных тел астероидных размеров с космогонич. точки зрения был весьма быстрым (<106 лет). Следующий этап - аккумуляция планет из роя "промежуточных" тел и их обломков - занял гораздо больше времени. При исследовании этого этапа все шире используется моделирование на ЭВМ. Результаты расчетов наглядно продемонстрировали зависимость конечного числа планет от массы вещества в допланетном облаке. С. Доул (США) нашел, что при массе облака > 0,15 аккумулирующиеся тела сливаются в единый звездообразный спутник Солнца. Это явл. еще одним подтверждением правильности модели маломассивного допланетного облака. Численное моделирование в принципе позволяет определять одновременно распределение масс и распределение скоростей допланетных тел. Однако сложность учета гравитац. взаимодействия многих тел долгое время не позволяла получать надежные результаты. Недавно Дж. Везерил (США) проделал весьма трудоемкие расчеты динамики роя тел в "зоне питания" планет земной группы, к-рые подтвердили как характер распределения скоростей на заключительном этапе роста планет, так и время аккумуляции Земли (~ 108 лет), оценивавшиеся ранее аналитич. методами. Процесс образования планет земной группы прослежен уже достаточно детально. Получаемым методом численного моделирования расстояния между планетами, их массы, периоды собств. вращения, наклоны осей удовлетворительно согласуются с наблюдениями.



|  |
| --- |
|  |
| **Эволюция допланетного облака: а - опускание пыли к центральной плоскости; б - формирование пылевого субдиска; в - распад пылевого субдиска на пылевые сгущения; г - формирование из пылевых сгущений компактных тел; д - эволюция роя тел, сопровождающаяся столкновениями, дроблением и объединением тел; е - формирование зародышей планет; ж - диссипация газа из облака и его аккреция на Юпитер и Сатурн; з - современная планетная система. (По Б.Ю. Левину, 1964 г.)**  |

Процесс образования планет-гигантов был более сложным, и многие его детали еще предстоит выяснить. Существуют две гипотезы о пути формирования Юпитера и Сатурна, содержащих много водорода и гелия (по своему составу они ближе к Солнцу, чем др. планеты). Первая гипотеза ("контракции") объясняет "солнечный" состав планет-гигантов тем, что в протопланетном диске большой массы образовались массивные газово-пылевые сгущения - протопланеты, к-рые затем в процессе гравитац. сжатия превратились в планеты-гиганты. Эта гипотеза не объясняет удаления из Солнечной системы больших излишков вещества, не вошедшего в планеты, а также причин отличия состава Юпитера и Сатурна от солнечного (Сатурн содержит больше тяжелых хим. элементов, чем Юпитер, к-рый, в свою очередь, содержит их относительно больше, чем Солнце). Согласно второй гипотезе ("аккреции"), образование Юпитера и Сатурна протекало в два этапа. На первом, длившемся ок. лет с области Юпитера и лет в области Сатурна, происходила аккумуляция твердых тел таким же образом, как в области планет земной группы. Когда самые крупные тела достигли критич. массы (ок. двух масс Земли), начался второй этап - [аккреция](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C0%EA%EA%F0%E5%F6%E8%FF) газа на эти тела, длившийся не менее 105-106 лет. На первом этапе из области Юпитера диссипировала часть газа, и его состав оказался отличным от солнечного; еще больше это проявилось у Сатурна. На стадии аккреции наибольшая темп-ра наружных слоев Юпитера достигала 5000 К, а у Сатурна - ок. 2000 К. Значит. прогревание Юпитером своей окрестности определило силикатный состав его близких спутников. Согласно гипотезе контракции на ранней стадии планеты-гиганты также имели высокие темп-ры, однако динамика процессов в рамках гипотезы аккреции более обоснована. Образование Урана и Нептуна, содержащих всего 10-20% H и He, также лучше объясняется второй гипотезой. К моменту достижения ими критич. массы (за время ~ 108 лет) б'ольшая часть газа уже покинула Солнечную систему.

Малые тела Солнечной системы - [астероиды](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%C0%F1%F2%E5%F0%EE%E8%E4%FB) и [кометы](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CA%EE%EC%E5%F2%FB) - представляют собой остатки роя "промежуточных" тел. Астероиды - это каменистые тела внутр. околосолнечной зоны, кометы - каменисто-ледяные тела зоны планет-гигантов. Массы планет-гигантов еще до завершения их роста стали столь большими, что своим притяжением начали очень сильно изменять орбиты пролетавших мимо них малых тел. В результате нек-рые из них приобрели очень вытянутые орбиты, в т.ч. и орбиты, уходящие далеко за пределы планетной системы. На тела, удалявшиеся дальше 20-30 тыс. а.е. от Солнца, заметное гравитац. воздействие оказывали ближайшие звезды. В большинстве случаев воздействие звезд приводило к тому, что малые тела переставали заходить в область планетных орбит. Планетная система оказалась окруженной роем каменисто-ледяных тел, простирающимся до расстояний 105 а.е. (~ 1 пк) и являющимся источником ныне наблюдаемых комет. Существование кометного облака установил нидерландский астроном Я. Оорт (1950 г.). Влияние ближайших звезд может иногда столь сильно возмутить орбиту каменисто-ледяного тела, что оно уйдет совсем из Солнечной системы, а иногда может перевести его на орбиту, проходящую в окрестности Солнца. Вблизи Солнца ледяные тела начинают испарятсья под действием его лучей и становятся видимыми - возникает явление кометы.

Астероиды сохранились до нашего времени благодаря тому, что подавляющее большинство их движется в широком промежутке между орбитами Марса и Юпитера. Аналогичные каменистые тела, некогда существовавшие во всей зоне планет земной группы, давно присоединились к этим планетам либо разрушились при взаимных столкновениях, либо были выброшены за пределы этой зоны благодаря гравитац. воздействию планет.

Крупнейшие из совр. астероидов - поперечником в 100 км и более - образовались еще в эпоху формирования планетной системы, а средние и мелкие в большинстве своем явл. обломками крупных астероидов, раздробившихся при столкновениях. Благодаря столкновениям астероидных тел непрерыво пополняется запас пылевого вещества в межпланетном пространстве. Др. источником мелких твердых частиц явл. распад комет при пролете их вблизи Солнца.

Недра "первичных" крупных астероидов подвергались, по-видимому, разогреву примерно до 1000oС, что отразилось на составе и структуре их вещества. Мы знаем об этом благодаря тому, что на поверхность Земли выпадают мел-кие обломки астероидов - [метеоритов](http://www.astronet.ru/db/FK86/search.html?where=gl&words=%CC%E5%F2%E5%EE%F0%E8%F2%FB), состав и физ. св-ва к-рых указывают, что они прошли стадии нагрева и дифференциации вещества. Причины разогрева астероидов до конца не ясны. Возможно, нагрев был связан с выделением теплоты при распаде короткоживущих радиоактивных изотопов; астероиды могли быть также нагреты взаимными столкновениями.

Нек-рые метеориты представляют собой наилучшие из доступных нам образчиков "первичного" планетного вещества. По сравнению с земными горными породами они несравненно меньше изменены последующими физ.-хим. процессами. Возрасты метеоритов, определяемые по содержанию радиоактивных элементов и продуктов их распада, характеризуют в то же время возраст всей Солнечной системы. Он оказывается равным ок. 4,6 млрд. лет. Следовательно, длительность процесса формирования планет незначительна по сравнению с временем их дальнейшего существования.

Происхождение систем регулярных спутников планет, движущихся в направлении вращения планеты по почти круговым орбитам, лежащим в плоскости ее экватора, авторы космогонич. гипотез обычно объясняют повторением в малом масштабе того же процесса, к-рый они предлагают для объяснения образования планет Солнечной системы. Системы регулярных спутников имеются у Юпитера, Сатурна и Урана, к-рые обладают также кольцами из мелких твердых частиц. У Нептуна нет регулярной системы спутников и, по-видимому, нет колец. Совр. планетная космогония объясняет образование регулярных спутников эволюцией протоспутниковых дискообразных poев частиц, возникших в результате неупругих столкновений вблизи данной планеты планетезималей, двигавшихся по околосолнечным орбитам.

В системе регулярных спутников Юпитера имеется деление на две группы: силикатную и водно-силикатную. Различия в хим. составе спутников показывают, что молодой Юпитер был горячим (нагрев мог быть обусловлен выделением гравитац. энергии при аккреции газа). В системе спутников Сатурна, состоящих в основном из льда, нет деления на две группы, что связано с более низкой темп-рой в окрестностях Сатурна, при к-рой могла конденсироваться вода.

Происхождение иррегулярных спутников Юпитера, Сатурна и Нептуна, т. е. спутников, обладающих обратным движением, а также небольшого внеш. спутника Нептуна, обладающего прямым движением по вытянутой орбите, объясняют захватом.

У медленно вращающихся планет Меркурия и Венеры спутников нет. Они, по-видимому, испытали приливное торможение со стороны планеты и упали в конце концов на её поверхность. Действие приливного трения проявилось также в системах Земля-Луна и Плутон-Харон, где спутники, образуя с планетой двойную систему, всегда повёрнуты к планете одним и тем же полушарием.

Объяснение происхождения Луны потребовало детального исследования св-в околоземного роя частиц, существование к-рого поддерживалось в течение всего времени аккумуляции Земли неупругими столкновениями частиц в ее окрестностях.

Образование роя достаточной массы возможно лишь за счёт многочисл. столкновений наиболее мелкой фракции межпланетных частиц. Динамика роя позволяет подойти к объяснению различий в хим. составе Луны и Земли, черпавших вещество из одной и той же зоны. Преимуществ. попадание в рой мелких частиц могло одновременно привести к обогащению роя силикатным веществом, т. к. именно каменистые тела при столкновениях образуют мелкую пыль (в отличие от металлич. тел). На стадии мелкодисперсного вещества могли быть частично потеряны и летучие вещества, дефицит к-рых был обнаружен в лунных породах. Из спутникового роя могла образоваться система из неск. крупных спутников, орбиты к-рых с разной скоростью эволюционировали под действием приливного трения и к-рые в конечном счете объединились в одно тело - Луну. Анализ состава и определения возраста доставленных в 70-х гг. 20 в. на Землю лунных пород показал, что Луна еще в ходе своего образования или вскоре после этого была разогрета и прошла магматич. дифференциацию, в результате к-рой сформировалась лунная кора. Изобилие крупных ударных кратеров на материковой части лунной поверхности показывает, что кора успела затвердеть ещё до того, как затухла интенсивная бомбардировка Луны формировавшими ее телами. Слияние Луны из неск. крупных тел (протолун) дает быстрое нагревание до 1000 К ее поверхностного слоя толщиной в сотни км, что лучше согласуется с ранней дифференциацией вещества Луны. При медленной аккумуляции Луны из мелких частиц выделившейся гравитац. энергии недостаточно для требуемого нагрева Луны. Альтернативные гипотезы нагрева Луны в результате распада короткоживущих радиоактивных изотопов и нагрева электрич. токами, индуцированными интенсивным солнечным ветром, требуют неприемлемо быстрого образования Луны на самом раннем этапе формирования Солнечной системы. Итак, наиболее вероятным представляется образование Луны на околоземной орбите, однако в литературе продолжают обсуждаться и маловероятные гипотезы захвата Землей готовой Луны и отделения Луны от Земли.

Заметное различие ср. плотности планет земного типа связано, по-видимому, со значит. различием общего содержания Fe и содержания металлич. Fe. Высокая плотность Меркурия (5,4 г/см3) указывает на то, что он содержит до 60-70% металлич. никелистого железа, тогда как низкая плотность Луны (3,34 г/см3) указывает на отсутствие в ней значит. количеств металлич. железа (менее 10-15%). Содержание богатого железом сплава в Земле составляет ок. 32%, в Венере - ок. 28%.

В 70-е гг. 20 в., одновременно с развитием представлений о последовательной конденсации различных веществ в остывающем протопланетном облаке, появилась гипотеза неоднородной (гетерогенной) аккумуляции планет, согласно к-рой полная аккумуляция нелетучих веществ в несколько крупных тел - ядер будущих планет - успевала произойти до заметного дальнейшего остывания облака и конденсации других, более летучих веществ. По этой гипотезе, формирующиеся планеты с самого начала оказываются слоистыми. В сочетании с предположением о конденсации сначала металлич. железа, а затем силикатов гипотеза гетерогенной аккумуляции объясняла возникновение железных ядер у Земли и Венеры. Однако она игнорировала надежные астрофизич. оценки скорости остывания облака: остывание должно происходить несравненно быстрее, чем аккумуляция продуктов конденсации. Выдвигалась также гипотеза, что ядра Земли и Венеры состоят в основном из силикатов и окислов, перешедших под действием давления вышележащих слоев в плотное металлич. состояние. В этом случае ядра Земли и Венеры содержали бы всего неск. % металлич. железа, т.е. приблизительно столько же, сколько ядро Луны, но меньше, чем ядро Марса (давление в недрах Марса и Луны заведомо слишком мало для перехода силикатов в металлич. состояние). Эксперименты по статич. сжатию вещества до давлений, близких к давлениям в ядрах Земли и Венеры, пока не позволяют сделать определенного вывода о возможности таких фазовых переходов с достаточно большим скачком плотности.

По-видимому, образование ядер у планет земной группы произошло вследствие отделения богатого железом расплава от ферромагнезиальных силикатов. Физикохимия процесса отделения железного расплава и динамика опускания его к центру планеты изучены пока недостаточно. В работах, посвященных анализу процесса расслоения первично однородных планет, наибольшее число расчетов проводится для Земли.

### Начальное состояние и эволюция Земли

Земля росла из роя "промежуточных" тел, двигавшихся в широкой области между орбитами Венеры и Марса. Отличия в составе и плотности планетезималей были достаточно велики, на что указывает разность ср. плотностей этих планет. При падении тел на протоземлю они от удара разрушались, происходил нагрев вещества, сопровождавшийся дегазацией и дегидратацией. В результате перемешивания вещества при ударах хим. неоднородности частично сглаживались. Удары тел с размерами в десятки и более км приводили к накоплению существенной доли энергии на большой глубине, что являлось осн. источником нагрева планеты. Дополнит. разогрев происходил вследствие распада радиоактивных элементов и сжатия вещества под увеличивающимся давлением вышележащих (нарастающих) слоев. Согласно расчетам, центральная область Земли к концу ее образования была нагрета до 1000-1500 К, что меньше темп-ры плавления пород на этих глубинах. (В недрах планеты темп-ра плавления увеличивается с глубиной вследствие роста давления.) На глубинах 50-2000 км темп-ра превосходила темп-ру плавления железа, однако в целом ещё дифференцированное вещество вряд ли находилось в жидком состоянии. Поверхность же Земли вследствие быстрой теплоотдачи имела достаточно низкую темп-ру, уже тогда допускавшую существование первичных водных бассейнов. По-видимому, уже на заключит. этапах аккумуляции Земли началась крупномасштабная дифференциация вещества - отделение и уход в нижние горизонты тяжелых компонентов. Гравитац. энергия, выделявшаяся при расслоении Земли, в результате конвективных движений масс переносилась к поверхности Земли и содействовала ее обновлению, о чем говорит отсутствие на земной поверхности древнейших пород, с возрастами 3,8-4,5 млрд. лет. Не исключено, что разрушение первичной коры связано, как и у Луны, с поздней бомбардировкой падавшими телами. Наиболее легкие вещества всплывали ("выдавливались") на поверхность, постепенно слагая наружный слой земного шара - земную кору. Это был длит. процесс (неск. млрд. лет), к-рый в разных местах земного шара протекал по-разному, что привело к образованию участков с толстой корой (материков) и участков с тонкой корой (океанич. впадин). Земная кора отличается и по составу, и по плотности от подстилающего ее вещества мантии Земли. Плотность коры составляет 2,7-2,8 г/см3, а плотность верхней мантии (приведённая к нулевому давлению) ок. 3,3-3,5 г/см3. Скачок плотности на границе ядра превышает 4 г/см3. Плотность вещества ядра несколько меньше плотности Fe при этих давлениях, что указывает на присутствие в нем какой-то более легкой примеси.

Разогревание Земли сопровождалось выделением газов и водяных паров, содержащихся в небольшом количестве в земных каменистых веществах. Прорвавшись на поверхность, водяные пары сконденсировались в воды морей и океанов, а газы образовали атмосферу, состав к-рой первоначально существенно отличался от современного. Состав совр. земной атмосферы в значит. мере обусловлен существованием на Земле жизни (биосферы). Нек-рую роль в образовании гидросферы и атмосферы, возможно, сыграли падавшие на Землю ледяные ядра комет.

Процесс хим. расслоения земных недр происходит и сейчас. Легкие расплавы в виде магмы поднимаются из мантии в кору. Они частично застревают и застывают внутри земной коры, а частично прорывают кору и в виде лавы изливаются наружу при вулканич. извержениях. Перемещения вещества в недрах Земли проявляются в виде подъемов и опусканий больших участков поверхности, горизонтальных перемещений отдельных плит, на к-рые расчленена земная кора, в виде процессов вулканизма и горообразования, а также землетрясений.

Лит.:
Шмидт О.Ю., Четыре лекции о теории происхождения Земли, 3 изд., М., 1957; Левин Б.Ю., Происхождение Земли и планет, 4 изд., М., 1964; Сафронов В.С., Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет, М., 1969; Вуд Дж., Метеориты и происхождение солнечной системы, пер. с англ., М., 1971; Рускол Е.Л., Происхождение Луны М., 1975; Альвен X., Аррениус Г. Эволюция солнечной системы, пер. с англ. М., 1979; Спутники планет, пер. с англ., М. 1980; Протозвезды и планеты, пер. с англ, ч. 1-2, М., 1982.

(*Б.Ю. Левин, А.В. Витязев*)

|  |
| --- |
| Страницы спонсоров: Строительное оборудование [группа компаний Альфа-Сервис](http://www.ptoservis.ru/), Москва | KINO.RU - [фильмы, кино театры, кино, расписание кино](http://www.kino.ru) в г. Москва | Печать и [полиграфия](http://www.ukr-print.net) в Украине | Дизайн квартир и [дизайн интерьера](http://www.chaoslend.ru) | Роскошный [банкет](http://www.noevkovcheg.ru/) в ресторане Москвы! | Поможем продать! Маркетинговое агентство Leader Team: [btl](http://www.leaderteam-msk.ru/), мерчендайзинг и кадровый аутсорсинг. | Купить игры [psp](http://www.offo.ru/), nintendo wii, ps3 в интернет- |