

масс и скоростей допланетных тел. Сначала тела двигались по круговым орбитам 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 планетезималей). Гравитационное взаимодействие тел, усиливавшееся по мере их роста, постепенно изменяло их орбиты, увеличивая среднюю эксцентриситет и среднюю наклон к центру плоскости диска. Наибольшие массивные тела оказались зародышами будущих планет. При объединении в планеты многих тел произошло усреднение их индивидуальных характеристик движения, и поэтому орбиты планет получились почти круговыми и компланарными. Оценённые аналитически и получаемые в численных расчётах относительные расстояния между планетами, их массы и общее число, периоды собственного вращения, наклоны осей, эксцентриситеты и наклоны орбит удовлетворительно согласуются с наблюдениями.

Процесс образования планет-гигантов был более сложным, многие его детали ещё предстоит выяснить. Их образование осложнялось длительным присутствием газовой компоненты и эффектами выброса вещества во внешние зоны и даже за пределы СС. Согласно моделям, образование Юпитера и Сатурна протекало в два этапа. На первом этапе, длившемся десятки миллионов лет в области Юпитера и около ста миллионов лет в области Сатурна, происходила аккумуляция твёрдых тел, подобная той, что была в зоне планет земной группы. Когда крупнейшие тела достигали некоей критической массы ( $\geq 5 M_{\oplus}$ ,  $M_{\oplus}$  — масса Земли), начинался 2-й этап эволюции — аккреция газа на эти тела, длившийся  $10^5$ – $10^6$  лет. Из зоны планет земной группы газ рассеивался за время  $\sim 10^7$  лет, в зоне Юпитера и Сатурна он оставался неск. дольше. Образование твёрдых ядер Урана и Нептуна, находящихся на больших расстояниях, заняло сотни миллионов лет. К этому времени газ из их окрестностей был уже практически потерян. Температуры в этой внешней части СС не превышали 100 К, в результате, помимо силикатной компоненты, в состав этих планет и их спутников вошло много конденсатов воды, метана и аммиака.

Малые тела СС — астероиды и кометы — представляют собой остатки роя промежуточных тел. Крупнейшие из совр. астероидов (поперечником  $\geq 100$  км) образовались ещё в эпоху формирования планетной системы, а средние и мелкие — в большинстве своём обломки крупных астероидов, раздробившихся при столкновениях. Благодаря столкновениям астероидных тел непрерывно пополняется запас пылевого вещества в межпланетном пространстве. Другим источником мелких твёрдых частиц — испарение и распад кометных ядер при пролёте их вблизи Солнца. Ядра комет, по-видимому, представляют собой остатки каменисто-ледяных тел зоны планет-гигантов. Массы планет-гигантов ещё до завершения их роста стали столь большими, что своим притяжением начали сильно изменять орбиты пролетающих мимо них малых тел. В результате некие из этих тел приобрели очень вытянутые орбиты, уходящие далеко за пределы планетной системы. На тела, удалявшиеся дальше 20–30 тыс. а. е. от Солнца, заметное гравитационное воздействие оказали ближайшие звёзды. В большинстве случаев воздействие звёзд приводило к тому, что малые тела переставали заходить в область планетных орбит. Планетная система оказалась окружённой роем каменисто-ледяных тел, простирающимся до расстояний  $10^4$ – $10^5$  а. е. и являющимся источником ныне наблюдаемых комет (облако Оорта).

Происхождение системы регулярных спутников планет, движущихся в направлении вращения планеты по почти круговым орбитам, лежащим в плоскости её экватора, обычно объясняется процессами, аналогичными тем, к-рые привели к образованию планет. Согласно моделям, в ходе формирования планеты в результате неуверенных столкновений планетезималей часть из них могла быть захвачена на околопланетную орбиту,

образовав околопланетный допланетный диск. Оценки показывают, что характерные времена аккумуляции и разрушения небольших спутников при дроблении гораздо меньше характерного времени образования самой планеты. Вещество в допланетных дисках неоднократно обновлялось, прежде чем смогло образоваться относительно устойчивая спутниковая система. Согласно модельным расчётам, массы допланетных дисков  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  от массы планеты, что достаточно для формирования спутниковых систем планет-гигантов. 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 обеспечен выделением гравитационной энергии при аккреции газа. В системе спутников Сатурна, состоящих в осн. из льда, нет деления на две группы, что связывают с более низкой температурой в окрестностях Сатурна, при к-рой могла конденсироваться вода. Происхождение ирегулярных 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 торможения проявилось также в системах Земля — Луна и Плутон — Харон, где спутники, образуя с планетой двойную систему, всегда повернуты к планете одним и тем же полушарием.

Происхождение Луны чаще всего связывают с образованием её на околоземной орбите, однако продолжают обсуждаться и маловероятные гипотезы захвата Земли готовой Луны, отделения Луны от Земли. Разрабатывается и компромиссная гипотеза, связывающая появление массивного околоземного допланетного диска с гигантским выбросом вещества, вызванным столкновением протоземли с крупным телом (с размерами порядка Меркурия или даже Марса). Согласно расчётам, из массивного спутникового роя могла образоваться система из неск. крупных спутников, орбиты к-рых с разной скоростью эволюционировали под действием приливного трения, и, в конечном счёте, спутники объединились в одно тело — Луну.

Космохимические аспекты (эволюция состава). В основе физ.-хим. исследований ранних стадий эволюции СС лежат данные по составу межзвёздной и межпланетной пыли, планет и их атмосфер, астероидов и комет. Особое место принадлежит лабораторным исследованиям метеоритов — образцов астероидного вещества. Вещество, вошедшее в тела СС, проходило неоднократно физ.-хим. переработку и во многом утратило память о ранних стадиях эволюции. Однако от тел СС содержат вещество, хранящее ту или иную информацию в виде реликтовых минеральных фракций, включений и т. п. Образцы такого вещества используются как «космохронометры», «космотермометры», «космосбарометры».

Хим. состав первичного допланетного диска обычно полагают близким к солнечному («среднекосмическому»). В первичном диске газ (в осн. молекулы водорода и гелия) составлял 98–99% всей массы. Пыль (ферромагнетизальные силикаты и алюмосиликаты во внутренней части диска, к к-рым добавлялись льды во внешней части) вначале играла второстепенную роль. В ходе образования и эволюции допланетного диска происходили изменения элементного и изотопного состава газовой и конденсированной компонент, разнообразные процессы обмена между этими двумя осн. резервуарами. Согласно моделям, в процессе образования диска в ближней к Солнцу окрестности межзвёздная пыль в ходе аккреции испарялась и лишь после частичного охлаждения газа происходила реконденсация тугоплавких и умеренно тугоплавких соединений. Во внешней зоне СС в состав первичных тел могла войти межзвёздная пылевая