

Е. Л. Рускол, доктор физико-математических наук

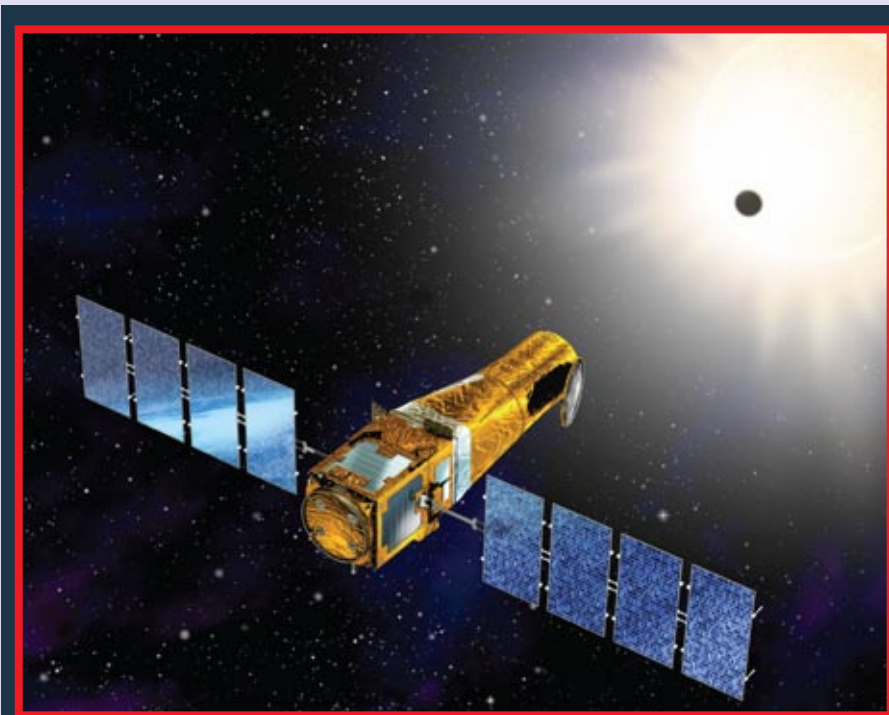
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ

Более полувека назад академик О.Ю. Шмидт назвал центральной задачей планетной космогонии исследование происхождения планет и спутников. С тех пор изучение Солнечной системы неизмеримо расширилось и обогатилось фактическими данными. Были открыты газово-пылевые диски у многих молодых звезд солнечной массы, а у некоторых звезд и планетоподобные спутники. И все же основные положения теории Шмидта, развитые его учениками и последователями, сохраняют силу как динамически обоснованный сценарий образования Земли и планет, а также спутников и других малых тел Солнечной системы.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ

Согласно современным представлениям, планеты и другие тела образовались в газово-пылевом протопланетном облаке, вращавшемся вокруг Солнца. Это облако должно было иметь форму диска. В последнее десятилетие газово-пылевые диски открыты у многих молодых звезд типа Т Тельца и у некоторых звезд главной последовательности. Массы дисков варьируют от одной тысячной до одной-двух десятых массы звезды, а размеры — от нескольких десятков до сотен астрономических единиц. Ранее, 50 лет назад, образ допланетного диска мог быть воссоздан лишь на основе данных о нашей собственной планетной системе, большие планеты которой принято делить на две группы: земного типа, состоящие из твердых каменных пород, и газо-жидкие планеты-гиганты. Уже тогда было ясно, что диск не мог быть только пылевым и в его составе должны были преобладать водород и гелий, поскольку именно они доминируют на Юпитере и Сатурне. Все остальные элементы и соединения могли находиться в конденсированной (твердой) фазе и входить в состав твердых частиц и тел, в зависимости от температуры, которая, главным образом, определялась расстоянием от Солнца. Минимальная масса диска была оценена в 0.01 МС (масса Солнца), но, с учетом выброса значительной части твердых тел с периферии, масса диска могла достигать 0.05-0.1 МС.

Исследования эволюции допланетного диска, организованные О.Ю. Шмидтом в Объединенном институте физики Земли, носящем сегодня его имя, на 10-15 лет опередили подобные исследования на Западе и в Японии. Шаг за шагом прослежены основные этапы превращения диска в систему планет. Было показано, что в диске не могли долго поддерживаться крупномасштабные турбулентные движения, в нем вследствие оседания пыли к центральной плоскости должен был образоваться пылевой субдиск. Найден критерий гравитационной неустойчивости



КОРОТ (англ. CoRoT — Convection Rotation and planetary Transits) — космический телескоп, созданный усилиями Национального Космического Сообщества Франции (CNES), при участии Европейского Космического Агентства, а также научно-исследовательских центров Австрии, Испании, Германии, Бельгии и Бразилии. Основной задачей телескопа является поиск экзопланет, в том числе и планет земного типа. Другой задачей телескопа является изучение внутреннего строения звезд

для дисков конечной толщины с кеплеровским вращением, позволивший оценить первичные сгущения, на которые субдиск мог распасться. Затем исследовано взаимодействие этих сгущений, их уплотнение и превращение в рой твердых тел, который, согласно первоначальному замыслу О.Ю. Шмидта, и стал исходным материалом для планет. Время образования роя — относительно короткое, порядка 10 тыс. лет.

Весьма важно было определить хаотические скорости твердых тел (планетезималей), накладывавшиеся на их упорядоченное кеплеровское движение вокруг Солнца, т.е. дисперсию скоростей. Выяснилось, что скорости определялись гравитаци-



онными возмущениями от крупнейших планетезималей, которые играли важнейшую роль в построении планет. Закономерности распределения масс (либо размеров) планетезималей выведены из известных уравнений коагуляции Смолуховского с учетом гравитации тел и их дроблений при столкновениях. Оказалось, что с увеличением размеров количество тел убывает по степенному закону (например, десятикилометровых тел в 1000 раз больше, чем стокилометровых, а число километровых тел — в 1000 раз больше, чем десятикилометровых), и при этом основная масса вещества сосредоточивается в нескольких наиболее крупных телах. Подобные закономерности прослеживаются для кратеров на поверхности Луны и других тел, а также у астероидов главного пояса. Крупнейшие тела — потенциальные зародыши планет. Они постепенно вычерпывали остальные планетезимали, а самые крупные могли захватывать также газ, если он еще присутствовал в диске. Как считал О.Ю. Шмидт, происходило осреднение наклонов и эксцентриситетов отдельных тел и выработывались почти круговые орбиты планет, лежащие в одной плоскости. Процесс роста планет — длительный, для планет земной группы — порядка 10^8 лет, а для наиболее удаленных планет — Урана и Нептуна — 10^9 лет. Время роста пропорционально периоду обращения планеты вокруг Солнца и обратно пропорционально поверхностной плотности питающих тел и гравитационному сечению растущей планеты. Поверхностная плотность в диске равна массе вещества вертикального столба над единицей поверхности диска. Гравитационное сечение означает способность планеты фокусировать орбиты сближающихся с нею тел. При большой массе планеты и небольших скоростях тел гравитационное сечение может многократно превышать геометрическое сечение.

Интересной особенностью образования планет из газопылевого диска оказалась возможность обгоняющего роста основного зародыша планеты, на которую еще в 1969 г. указывал В.С. Сафронов. Этот тип аккумуляции, «runaway growth» (слово введено Дж. Везериллом по аналогии с «runaway inflation», т.е. галолирующая инфляция), способен сократить время роста планеты. Некоторые ученые пытались с его помощью получить меньшее значение для времени роста Земли, оцененное В.С. Сафроновым в 10^8 лет по уточненной им формуле О.Ю. Шмидта еще в 1954 г. Однако анализ сценария обгоняющего роста («runaway»), сделанный Дж. Везериллом и В.С. Сафроновым, выяснил границы его применимости: только начальный этап, пока масса зародыша меньше общей массы остальных питающих тел. В целом же время роста определяется заключительной стадией упорядоченного роста, когда все тела увеличиваются соответственно своим гравитационным сечениям. Оценка длительности роста (98% массы Земли за 10^8 лет) сохранилась, она под-

тверждается и динамическими расчетами, и данными изотопной геохимии. Рост Земли и других планет земной группы происходил в основном уже при отсутствии газовой части допланетного облака, на что указывает состав этих планет. Атмосферы и гидросферы должны были выделиться на них при дегазации и дефлюидизации первоначально твердых планетезималей, в том числе и ледяных, забрасываемых с периферии Солнечной системы возмущениями планет-гигантов.

Важнейшей задачей планетной космогонии О.Ю. Шмидт считал изучение начального состояния Земли и планет на основе данных о способе их образования. По идее О. Ю. Шмидта, Земля формировалась из твердых холодных тел и вначале была холодной. Сейчас, после проделанных расчетов начальной температуры Земли, можно сказать, что наша планета никогда не была полностью расплавленной, а ее недра стали горячими уже в процессе роста. Наибольший вклад в первоначальный нагрев Земли давали удары крупнейших допланетных тел, энергия которых не полностью излучалась поверхностью, а частично накапливалась на глубине гигантских ударных кратеров в сотни и даже тысячи километров. Эти удары, кроме того, создавали первичные неоднородности в строении верхней мантии Земли. Дополнительными источниками разогрева Земли служили тепло радиоактивных источников и сжатие недр под давлением вышележащих слоев. К концу аккумуляции в верхней мантии Земли уже должны были находиться разогретые очаги с температурой порядка 1500 К, в которых происходило плавление силикатных пород и шел процесс сегрегации железа в земное ядро. При этом поверхность Земли никогда не разогревалась выше 350 К.

Решающим тестом для теории образования планет служит объяснение происхождения планет-гигантов Юпитера и Сатурна, заключающих в себе 92% массы всей планетной системы и состоящих в основном из водорода и гелия. Планеты должны были поглотить газы из допланетного диска до того, как ультрафиолетовое и корпускулярное излучение Солнца рассеяло их в пространстве, т.е. за время порядка 10^7 лет. Наиболее скорый способ — это распад газового диска на сгустки вследствие гравитационной неустойчивости и последующее сжатие этих сгустков в планеты. Но тогда масса диска должна была бы достигать по крайней мере 30% массы Солнца и одновременно должны были бы появиться десятки «юпитеров», имеющих первичный космический состав, идентичный с составом Солнца. Не исключено, что в системах других звезд с более массивными дисками планет-гиганты могли возникнуть в один этап, путем гравитационной неустойчивости в газовой среде со своими сценариями дальнейшего развития. Так, несколько условных «юпитеров» должны оказывать взаимные гравитационные возмущения, приводящие к образованию планет с большими эксцентрисите-

тами орбит. Орбиты могут пересекаться и способствовать слиянию «юпитеров» в еще более крупные тела. Возможно, что у некоторых звезд наблюдаются именно такие планеты-гиганты на довольно близких к звездам и вытянутых орбитах. Будущие исследования покажут, какова природа этих тел, получивших название «экзопланеты».

Между тем в Солнечной системе существует лишь один Юпитер, в составе которого доля тяжелых элементов в несколько раз превышает их долю в Солнце, и один Сатурн, у которого примесь тяжелых элементов еще в несколько раз выше. У наиболее удаленных планет, Урана и Нептуна, совсем мало газов (лишь оболочки, содержащие около 10% массы планет). Орбиты всех четырех планет-гигантов весьма близки к круговым, с закономерно увеличивающимися расстояниями. Такое строение и расположение планет-гигантов совместимо лишь с их образованием в два этапа: сначала аккумуляция ядер планет из конденсируемых элементов, по типу аккумуляции планет земной группы, а затем присоединение (аккреция) газа в той пропорции, в которой это было возможно в постепенно диссипирующем газовом диске.

Образование Юпитера на орбите, удаленной от Солнца на 5.2 а.е., обусловлено физико-химическими условиями в допланетном диске. Приблизительно на этом расстоянии находился фронт конденсации водяного льда. Известно, что все тела, обращающиеся внутри орбиты Юпитера, либо безводны, либо содержат мало воды, но крупнейшие спутники Юпитера Ганимед и Каллисто наполовину состоят из воды, и по мере удаления от Солнца вода становится главной составной частью тел. Она преобладает на спутниках Сатурна, на Уране и Нептуне и их спутниках, а также в ядрах комет. Именно за счет конденсации льдов воды и других летучих веществ рост планетезималей в районе Юпитера мог опередить рост таковых в более близкой к Солнцу зоне астероидов. Возмущения со стороны Юпитера и крупных тел из его зоны питания могли воспрепятствовать аккумуляции «нормальной» планеты в зоне астероидов, так что ускоренный рост Юпитера (10^7 лет) подкрепляется еще одним аргументом. Из двух основных этапов роста планет-гигантов более длительный — аккумуляция ядер из конденсируемых элементов. Ядра должны достичь массы по крайней мере в 10 М_Е (10 масс Земли), чтобы началась эффективная аккреция газов. Процесс аккреции идет на порядок быстрее, пока поступает газ.

Оказалось, что темп «runaway» замедляется примерно в два раза уже на первом этапе роста ядра Юпитера до массы 10 М_Е, который занимает немногим более 10^6 лет. Это связано в основном с ростом дисперсии скоростей планетезималей вследствие гравитационных возмущений, вызванных растущим зародышем. Гравитационное сечение Юпитера уменьшается, но все еще остается много большим, чем его геометрическое сечение. Рост ядра до критической массы (условно 20 М_Е) укладывается в срок 10^7 лет. За это время хаотические скорости планетезималей достигают 2-3 км/с, так что планетезимали в перигелиях залетают в зону астероидов. Будучи крупнее тел астероидного пояса, залетевшие тела либо «выметают» последние, либо возмущают их движения, увеличивая дисперсию скоростей и тем самым замедляя или прекращая рост астероидов. Именно таким представляется сейчас влияние Юпитера, не позволившее образоваться единой планете вместо многих тысяч малых планет. О том, что пояс астероидов — несформировавшаяся планета, еще в 1954 г. писал О.Ю. Шмидт, но конкретный механизм, с помощью которого Юпитер помешал ее росту, тогда еще не был раскрыт.

Разумеется, при дальнейшем росте Юпитера пространственный разброс планетезималей его зоны увеличивается.



Поверхность Луны

Многие из них покидают Солнечную систему, часть попадает в облако комет Оорта, простирающееся до 200 тыс. а.е. Поэтому зону Юпитера нельзя считать замкнутой, как в численной модели в работе Поллака с соавторами. Принятые этими авторами значения поверхностной плотности соответствуют полной массе допланетного диска около 0.03 М_С. С учетом потери части твердых тел из зоны планет-гигантов (включая Уран и Нептун), начальная масса диска могла составлять 0.05-0.1 М_С. Даже в этом случае Уран и в особенности Нептун росли медленнее других планет, за время порядка 10^9 лет. За орбитой Нептуна могли также вырасти Плутон и тела пояса Койпера, с радиусами до 1000 км, обращающиеся по почти круговым орбитам на расстоянии около 45 а.е. от Солнца. Под действием возмущений всех планет-гигантов многие ледяные планетезимали выбрасывались на очень большие расстояния, образуя резервуары будущих комет. Оценки показали, что самым активным «выбрасывателем» тел в облако Оорта был Нептун, тогда как возмущения Юпитера наиболее эффективны в выбрасывании тел за пределы Солнечной системы.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

В настоящее время открыто более 90 спутников планет. В эпоху О.Ю. Шмидта их было известно в три раза меньше. В 3-м издании его «Четырех лекций о теории происхождения Земли» (1957 г.) высказана общая идея о происхождении спутников:

«При образовании планет, в процессе сближения частиц с крупными зародышами планет, некоторые из частиц, сталкиваясь, настолько теряли скорость, что выпадали из общего роя и начинали обращаться вокруг планеты. Таким образом, около планетного зародыша образуется сгущение — рой частиц, обращающихся около него по эллиптическим орбитам. Эти частицы также сталкиваются, изменяют свои орбиты. В уменьшенном масштабе в этих роях будут происходить те же процессы, что и при образовании планет. Большинство частиц упадет на планету (присоединится к ней), часть же их будет образовывать околопланетный рой и объединяться в самостоятельные зародыши — будущие спутники планет... При осреднении орбит частиц, образующих спутник, последний приобретает симметричную, т.е. близкую к круговой, орбиту, лежащую в плоскости экватора планеты.»

Модель образования Луны, разработанную на основании этой идеи, стали позднее называть моделью коаккреции (на Западе «accretion» обозначает и «аккумуляция» и «аккреция», тогда как в русскоязычных работах «аккреция» обычно обозначает присоединение газовой среды, а «аккумуляция» — объединение твердых тел). Эта модель может быть применима к планетам земного типа, но она не исчерпывает всех разновидностей образования спутников. Так, у планет-гигантов на стадии аккреции газа должны образовываться не околопланетные рои, а аккреционные газопылевые диски. В поясе астероидов, где процессы аккумуляции давно сменились разрушительными столкновениями, образование спутников возможно лишь путем фрагментации более крупных родительских тел. Наконец, для системы Земля-Луна в последние два десятилетия рассматривается катастрофическое происхождение как альтернатива коаккреции. Ниже мы кратко обрисуем эти разновидности на примере

Луны, галилеевых спутников Юпитера и астероидной пары Ида-Дактил.

Освоение Луны во второй половине XX в. позволило изучить ее внутреннее строение, состав, возраст многих участков поверхности, их геологию, а также приливную историю лунной орбиты. К сожалению, не удалось выработать единое мнение о происхождении Луны. Была отвергнута гипотеза Дарвина об отрыве Луны от быстро вращающейся Земли, отпала гипотеза о захвате готовой Луны. Есть общее представление, что Луна образовалась в околоземном диске, но по поводу возникновения диска существуют две крайние версии.

В одной из них, согласно идее О.Ю. Шмидта, предполагается постепенное пополнение диска (роя) допланетным веществом, сопутствующее росту Земли, т.е. коаккреция. Модель разработана в ОИФЗ и позднее развита группой американских ученых из Арizonского университета и Института планетных наук в г. Тусоне, США. Показано, что в околоземный рой могло быть захвачено достаточно вещества для аккумуляции Луны, если во время роста Земли плотность частиц в ее непосредственной близости в несколько раз превышала плотность «фона» допланетных частиц. Массивный спутник с прямым направлением обращения вокруг Земли мог образоваться на расстоянии в 3-4 раза меньше, чем современное расстояние до Луны, что вполне согласуется с ее последующим приливным отодвиганием. Главное отличие химического состава Луны от Земли — низкое содержание железа в Луне (6-10% по сравнению с 35% в Земле) — объясняется преимущественным захватом в околоземный рой наиболее мелкой фракции допланетных частиц, которые чаще сталкиваются друг с другом. При столкновениях сильнее дробятся каменные породы, и мелкая пыль обогащается силикатами по отношению к железу. Одновременно теряются за счет испарения летучие и полuletучие компоненты, которыми, как известно, Луна обеднена. По определению Тусоновской группы, околоземный рой работает как «композиционный фильтр», и таким образом решается проблема различий химического состава Луны и Земли.

Сторонники катастрофического происхождения околоземного диска предполагают, что этот диск образовался при столкно-



Спутник Юпитера Ио в исполнении художника

вении Земли с крупным допланетным телом, в 1,5-2 раза более массивным, чем Марс, — мегаимпакте. При надлежаще направленном касательном соударении выброшенный диск обладает и большой массой, и достаточным угловым моментом для формирования в нем Луны. Решение проблемы химического состава Луны авторы гипотезы мегаимпакта видят в том, что и Земля, и ударившее тело уже успели расслоиться на ядро и мантию. Их железные ядра остались в Земле, затем объединились в одно ядро, а диск образовался из силикатных мантий. Необходимо сказать, что, как бы решая проблемы Луны в один прием, мегаимпакт сам создает проблемы. Так, энергия мегаимпакта при столкновении ударника с Землей со скоростью 14-15 км/с составляет более 10^{39} эрг. Этого достаточно, чтобы расплавить большую часть Земли, а также испарить какую-то ее часть. Образуется горячая силикатно-магниева атмосфера, и Земля в течение 10 - 100 лет светит как коричневый карлик — звезда с температурой фотосферы 2000 К. Необходим критический анализ возможности такого этапа в ранней истории Земли. Гипотеза мегаимпакта не объясняет почти круговой характер орбиты Земли.

Ее эксцентриситет в настоящее время равен 0,017, что согласуется с участием в аккумуляции Земли крупных тел вплоть до лунной массы, но не марсианской. Подсчет В.С. Сафронова и А.М. Фридмана показал, что при мегаимпакте эксцентриситет орбиты Земли был бы в 5-10 раз больше. Наконец, гипотеза мегаимпакта придумана специально для Луны, хотя, по мнению Д. Стивенсона, наилучшим «кандидатом» на такое происхождение служит система Урана с его спутниками. Не исключено, что сильный наклон оси Урана к оси эклиптики вызван ударом тела с массой, сравнимой с массой Земли, и следствием такого удара могло быть образование диска в одной плоскости с экватором Урана. Идентичность химического состава Урана и его спутников могла бы стать подтверждением этой идеи, но достоверных данных об этом пока нет.

Гипотеза коаккреции носит более универсальный характер. Спутники должны были появиться у всех четырех планет земной группы. Исчезновение спутников Венеры и Меркурия объясняется тем, что вращение этих планет сильно замедлено солнечными приливами, и их спутники, испытывая приливное воздействие своих планет, должны были приблизиться к ним и выпасть на поверхность. Особое место, которое занимает Луна среди спутников по величине ее орбитального углового момента, — также результат приливной эволюции. В прошлом Луна находилась в несколько раз ближе к Земле, а Земля вращалась быстрее, чем сейчас, так что соотношение моментов в системе Земля-Луна было иным. Луна на много порядков массивнее, чем спутники Марса. Масса Марса равна всего 0.1 М_Е, но модель коаккреции как раз предсказывает сильную нелинейную зависимость массы спутников от массы планеты. Наконец, газопылевые аккреционные диски вокруг растущих планет-гигантов можно считать аналогами околопланетных роев, состоящих из двух компонентов.

Систему спутников Юпитера часто сравнивают с миниатюрной Солнечной системой. Регулярный характер орбит галилеевых спутников и четырех малых спутников, обращающихся



Вид на Юпитер с поверхности Ио в исполнении художника

вблизи Юпитера, говорит об их образовании из газопылевого диска, хотя спутники не содержат легких газов. Их состав варьирует от безводного каменистого у Ио и малых спутников к каменистой Европе с ее ледяным покрытием в десятую долю массы и к смешанному составу Ганимеда и Каллисто, у которых примерно поровну льда и силикатов. Еще по наземным наблюдениям было известно закономерное убывание плотности спутников с расстоянием от Юпитера, и это правильно понималось как результат прогревания зоны спутников его излучением. Ранний Юпитер уподоблялся маленькому Солнцу. Космические исследования укрепили эту точку зрения, дав точные определения плотностей и химического состава спутников. В сочетании с моментами инерции эти данные позволяют сегодня уже строить вполне реальные многослойные модели внутреннего строения галилеевых спутников! Прообраз газопылевого диска Юпитера приходится создавать теоретически, на основании данных о массах спутников и в предположении о единстве состава диска и Юпитера, опираясь при этом на существующие модели аккреционных дисков у молодых звезд и Солнца. Масса диска могла достигать 10 М_Е, с учетом водорода и гелия; значительная часть этой массы выпала на Юпитер и рассеялась в пространство. Прямое вращение диска обуславливалось угловым моментом, которым обладал объем газа, забираемый из допланетного облака. Эта величина невелика, поскольку радиус диска в несколько десятков раз меньше размера гравитационной сферы Юпитера. Вещество спутников — это последние порции вещества, захваченного в диск, на заключительной стадии аккреции Юпитера, когда его фотосфера была еще горячей, до 1000 К. Одновременно с аккумуляцией спутников шла термическая диссипация газов из диска, для чего также было необходимо тепло от Юпитера. Происхождение маленьких нерегулярных спутников Юпитера, обращающихся далеко за пределами галилеевой системы, никак не связано с газопылевым диском. По предположению, это захваченные при взаимных столкновениях небольшие астероиды или их фрагменты.

