

Инструкция по формированию

планет

Рисунок Южной европейской обсерватории



Кандидат физико-математических наук
С.М. Комаров

Счет экзопланетам идет на сотни. Более того, как свидетельствует анализ данных прибора HARPS, с помощью которого астрономы Южной Европейской обсерватории изучают планетные системы красных карликов, вероятность найти у такой звезды планету, подобную Земле, да еще в зоне жизни — области, где на ее поверхности может быть жидкая вода, — составляет 41% (пресс-релиз ESO от 28 марта 2012 года). А поскольку в Млечном Пути насчитывается 160 млрд. красных карликов, получается, что подобных нам миров может существовать очень много. Только в окрестностях Солнечной системы, на расстоянии не более 30 световых лет, должно быть около сотни подобных планет, и это не считая возможных каменных планет у звезд другого типа. Правда, условия у красных карликов не совсем такие, как у Солнца. Там нет газовых гигантов, а ведь считается, что роль Юпитера в формировании планет была весьма важной. Кроме того, зона жизни у этих холодных звезд имеет маленький диаметр, а сами они время от времени взрываются, порождая сильное жесткое излучение. Оно вполне может стерилизовать расположенные неподалеку планеты.

Тем не менее уже настало время для научно обоснованных рассуждений о том, что увидят звездопроходцы, когда человечество освоит межзвездные путешествия. Основой послужат знания химического состава этих планет. Считается, что узнать его можно и сейчас, если внимательнее посмотреть на звезды.

Постановка задачи понятна: содержание элементов в фотосфере звезды легко измерить по спектральным линиям, а химический состав маленьких каменных планет измерить невозможно, поскольку, во-первых, их никто еще не видел, а во-вторых, в лучшем случае удастся изучить состав атмосферы, через которую проходят лучи звезды. Однако человеческий разум столь изощрен, что, даже не отправляя к звездам автоматические станции, находясь в невообразимой дали от объектов своих исследований, и не будучи уверенными в их существовании, исследователи в состоянии сделать некоторые выводы. Проследим за ходом их рассуждений, воспользовавшись серией статей научной группы под руководством Джейд Бонд (ныне Картер-Бонд) и Дэвида О'Брайена из аризонского Института планетологии («Icarus», 2010, т. 205, с. 321, doi:10.1016/j.icarus.2009.07.037; «The Astrophysical Journal», 2010, т. 715, с. 1050, doi:10.1088/0004-637X/715/2/1050; arXiv:1201.1939v1, 2012).

То была очередная ординарная планета, которая строилась по заранее утвержденной смете, и, признаюсь, кое в чем я подхалтурил. Но вы бы слышали как разнылся новый владелец — можно подумать, что я украл у него последнюю корку хлеба... Я потерял бумажку с его дурацкими указаниями — больше мне делать нечего, как вникать в детали этих нелепых проектов малых планет!

Роберт Шекли. «Планета по смете»

Исходное облако

Для того чтобы создать планету земного типа, нужно иметь богатое металлами горячее протопланетное облако, обращающееся вокруг новорожденной звезды. История происхождения этого облака теряется в глубине миллиардов лет. Считается, что оно образуется в результате взрыва звезды второго поколения. Та же, в свою очередь, возникла на обломках взорвавшейся звезды первого поколения, сформировавшейся из первичного, оставшегося после Большого взрыва, облака. Оно состояло из водорода, гелия и следов бериллия с литием.

При горении звезды первого поколения возникали атомы металлов вплоть до железа, но в малом количестве. Звезды второго поколения, сгорая, существенно увеличивают концентрацию элементов от лития до железа. Что же касается элементов тяжелее железа, то они возникают непосредственно во время взрыва, а впоследствии (если не претерпят радиоактивного распада) окажутся в облаке, которое сформирует звезду следующего поколения и планеты вокруг нее.

Казалось бы, в таком, третьем, облаке есть все, что нужно для создания второй Земли: водород и кислород для воды, азот для наполнения атмосферы, углерод, сера, фосфор для жизни, кремний, магний, кальций, алюминий, титан для формирования горных пород, радиоактивные элементы для отопления. Однако в их поведении возможны нюансы, из-за которых может получиться совсем иной мир. А связаны эти нюансы с исходным химическим составом и кинетикой остывания облака.

Согласно базовой теории формирования планет, которую предложил В.А.Сафронов в 50-х годах XX века, по мере того как облако остывает, составляющее его вещество конденсируется. При этом образуются частицы не только чистых элементов, но и их соединений, например оксидов, сульфидов, карбидов или карбонатов. Этим процессом управляет свободная энергия, которая определяет, какие соединения и в каком агрегатном состоянии существуют при той или иной температуре. В принципе, задав элементный состав протопланетного облака, можно было бы в компьютере проследить весь этот процесс конденсации (благо свободные энергии для огромного числа соединений давным-давно измерены), но такая работа потребует слишком много времени, ведь в облаке идут сложные процессы. Главные из них — возникновение уплотнений (они порождают гравитационную нестабильность и вызывают слипание сконденсировавшихся частиц во что-то большее) и их исчезновение из-за конвективного перемешивания. Точно промоделировать весь этот процесс конденсации можно, но столь мощного компьютера сейчас в распоряжении астрофизиков нет. Поэтому приходится идти обходным путем.

Предположим, что в каждый момент времени из облака выпадают те твердые вещества, которые соответствуют термодинамическому равновесию. Оно определяется достигнутыми к тому времени температурой и давлением в облаке. Из этих веществ и состоят зародыши планет, возникшие в этот момент времени. По мере удаления от звезды

состав закономерно меняется: количество летучих элементов увеличивается, а тугоплавких — падает. Взяв эти данные за исходные, как раз и удастся миновать первый этап слипания и сразу перейти ко второму и третьему этапу планетотворчества, а именно построить километрового размера небесные объекты (их называют планетозимали) и более крупные зародыши планет размером с Луну и Марс.

Вода на Земле

Когда возникли планетозимали и зародыши планет, основным процессом становится выпадения вещества на них, и чем крупнее зародыш, тем быстрее он растет, поскольку движущей силой служит гравитация, а она пропорциональна массе объекта. Под ее действием начинается эпоха яростных столкновений: планетозимали и зародыши планет врезаются друг в друга и либо сплавляются, либо разлетаются на мириады осколков, а потом, опять-таки удерживаемые гравитацией от чрезмерного разлета, соединяются в новые небесные тела. При этом теряется немалая часть летучих веществ, способных улететь во внешние, холодные, части облака. Рассчитывать поведение таких крупных объектов уже гораздо проще и вполне по силам современным компьютерам.

Первый подход к осуществлению такой программы совершили японские исследователи во главе с Ида Сигеру из Токийского института технологий: 1996 году их расчеты показали, что на расстояниях в одну астрономическую единицу от звезды (орбита Земли) зародыши каменистых планет формируются менее чем за один миллион лет, а на расстоянии в 10 а. е. — в 300 раз дольше. Впрочем, последнее не актуально. Дело в том, что примерно на этом расстоянии находится граница испарения льда в ранних звездных системах, подобных Солнечной. Что это значит? А то, что из более близких к звезде участков облака все, что может находиться на Земле в газообразном состоянии, улетит на периферию. На больших расстояниях эти газы сформируют газовые гиганты (или хотя бы один). Время их формирования таково, что во внутренней части Солнечной системы успевают образоваться те самые несколько десятков зародышей планет и много тысяч планетозималей.

Газовые гиганты играют свою роль в этой пьесе, причем здесь возможны два сценария. Согласно первому, гигант, сформировавшись на периферии планетной системы, в силу тех или иных причин мигрирует к своей звезде, превращаясь в горячий юпитер и попутно расталкивая зародыши каменистых планет в облаке. Шансов сохраниться у них при этом остается очень мало. По второму сценарию гигант стабилизируется на дальней от звезды орбите. Именно такую, не самую типичную для Галактики конфигурацию имеет Солнечная система, и именно ее расчет служит проверкой работоспособности алгоритма, применяемого создателями планетных систем. Подобной проверкой алгоритма стал расчет, предпринятый в 2003 году Шоном Рэймондом с коллегами из Вашингтонского и Аризонского университетов, которые хотели получить на Земле воду.

По поводу ее происхождения на нашей планете есть много разных гипотез. Основных среди них две. Поскольку Земля явно формировалась в тех условиях, когда вода была газом и должна была улететь к Юпитеру, одни исследователи предполагают, что слой воды сформировался на позднем этапе, когда планета уже была большой и могла притянуть к себе пролетающие мимо молекулы вещества. Альтернативой служит кометная бомбардировка. Обеим этим гипотезам трудно совладать с экспериментальными данными, а именно с измеренным соотношением содержания дейтерия и водорода: в кометах оно в 12 раз больше, чем было в протопланетном облаке, и в два раза больше, чем в водах нашей планеты. Стало быть, кометы могли принести лишь десятую часть земной воды. Поэтому возникла мысль, что ее источником послужили несколько влажных планетозималей, прилетевших из близких к Юпитеру мест.



Эту-то гипотезу и проверял расчет Рэймонда. Ввиду слабости компьютеров — под рукой 700-мегагерцевые процессоры, лучшие для 2003 года, — ему пришлось ограничиться полутора сотнями планетозималей. Они были равномерно распределены между Солнцем и Юпитером. Сам же модельный Юпитер имел разные массы — от десяти земных до трех настоящих юпитерианских (каждая из которых в 318 раз больше земной). Орбита Юпитера тоже бывала разной, она то приближалась к линии снега (за ней вода в протопланетном облаке существует в твердом состоянии), то удалялась от нее. Свое влияние может оказать и эксцентриситет, то есть степень эллиптичности орбиты Юпитера.

Меняя все перечисленные параметры, исследователи стали следить за движением планетозималей. Всего было проведено 44 расчета, причем каждый длился по месяцу, а в случае легкого Юпитера, массой в десять земных, он составлял три месяца. В моделируемых же планетных системах пролетало 200 млн. лет.

За это время в большинстве случаев от планетозималей оставались лишь смутные воспоминания. Как правило, выжидали три—четыре планеты, расположенные на расстоянии 1—2 а. е. от звезды. Их массы менялись от марсианской до слегка большей, чем у Земли. Лишь в одном случае выросла огромная единственная планета в три Земли, да к тому же покрытая глубоким океаном. Бывали и случаи, когда в поясе астероидов сохранялось несколько планет размером с Луну. Главный же вывод работы гласил: каменистые планеты земного типа в таких условиях формируются всегда и по несколько штук, как правило, занимая орбиты, близкие к орбитам Венеры, Земли и Марса. Единственное, орбиты получались чрезмерно вытянутыми (иначе расчет был еще дольше).

Что же касается предмета расчета — воды, ее содержание менялось в очень широких пределах: были случаи совсем сухих планет, были и такие, когда на планете разливался океан объемом в три сотни земных. Зависело же это, прежде всего от вытянутости орбиты Юпитера, — чем ближе она к окружности, тем больше воды оказывалось на земных планетах. Понять это несложно. В своем движении планетозимали сталкиваются и либо направляются в сторону Солнца, либо улетают прочь. Богатые водой планетозимали, сформировавшиеся в холодных, влажных слоях облака неподалеку от Юпитера, летя к Солнцу, сталкиваются с расположенными на внутренних орбитах зародышами планет и приносят им воду. Чем сильнее отличается орбита Юпитера от окружности, тем сильнее он дестабилизирует орбиты ближайших планетозималей. Они начинают подчиняться его воле, и в конце концов Юпитер поглощает их, либо они отлетают с большой скоростью в сторону Солнца и поглощаются им. Планеты же земной группы их перехватить не успевают. А вот от массы Юпитера или его положения относительно линии снега результат зависел сравнительно слабо. То есть если в системе есть газовый гигант, который движется по сильно эллиптической орбите, то, хотя там и будут планеты земного типа, искателям жизни не стоит долго здесь задерживаться: скорее всего, планеты окажутся сухими и пустынными.

Проход Юпитера

Следующий подход, совершенный опять-таки Рэймондом с коллегами в 2006 году, позволил рассчитать уже несколько известных систем с горячими юпитерами. Напомним, что в отличие от Солнечной системы в большинстве обнаруженных планетных систем газовый гигант находится очень близко к звезде и должен сильно нагреваться. Поэтому его и назвали горячим юпитером. Считается, что образоваться в таком месте газовый гигант не может, отсюда возникает версия, что он сформировался, как и положено, на периферии облака, за линией снега, а затем прилетел к звезде. По дороге он разогнал большинство планетозималей прочь, а кроме того, собирал на себя значительную часть рассеянного вещества облака: выжившим зародышам не из чего было расти. Поэтому в большинстве расчетов получались сухие планеты размером с Луну. Однако бывали и исключения: две—четыре каменные планеты размером между Землей и Марсом, причем порой на них было довольно много воды. Главное условие очевидно: газовый гигант должен быстро мигрировать к звезде. Вот почему системы с горячими юпитерами не надо выбрасывать из списка мест, пригодных для жизни.

Физическая химия Солнечной системы

Шло время, компьютеры в соответствии с законом Мура исправно увеличивали свою мощность, и появилась возможность рассчитывать пути не десятков, а сотен планетозималей. Благодаря этому удалось учесть эффект динамического торможения небесных объектов, и вот Рэймонд, а также конкурирующая группа, возглавляемая Дэвидом О'Брайеном из аризонского Института планетологии, получают системы, более похожие на Солнечную, содержащие в среднем 3,5 планеты земного типа со вполне круговыми орбитами. Причем время формирования — примерно 60 млн. лет — вполне соответствует оценкам для Земли. Теперь, разобравшись с динамикой многих тел, можно было усложнять расчет — вносить в него физическую химию: рассчитывать свободные энергии веществ и смотреть, как со временем меняется химический состав планетозималей и получающихся из них небесных тел. Для решения этой задачи и возникла группа с участием О'Брайена и Джейд Бонд, работавшей тогда в Аризонском университете.

Для начала в 2010 году они посчитали Солнечную систему, распределив в зоне 0,5—4 астрономических единицы от Солнца 25 зародышей планет массой в десятую долю земной и тысячи планетозималей, которые в сумме могли дать еще две с половиной Земли. Для облегчения задачи было принято, что планетозимали гравитационно взаимодействуют с зародышами, с Солнцем, Юпитером, Сатурном, но не друг с другом. Юпитер и Сатурн поставили немного ближе, чем ныне, и рассмотрели два случая: когда их орбиты слегка вытянуты и наклонены, как сейчас, и когда они почти округлые и лежат в плоскости эклиптики, как, возможно, было в древности. Есть мнение, что свою нынешнюю орбиту гиганты обрели из-за взаимодействия с транснептуновой частью протопланетного облака. Да и результаты предыдущих расчетов подсказывали: вытянутая орбита гигантов не очень способствует обретению влажных миров.

Динамический расчет особо впечатляющих открытий не дал: как и прежде, каждый раз появлялось по несколько планет земной группы, причем на вполне подходящих орбитах. В одном случае со слегка вытянутыми орбитами гигантов возникла почти в точности Солнечная система с Венерой, Землей и Марсом подходящих масс и на нужных расстояниях. Кроме того, в ней присутствовал еще и Фаэтон на месте пояса астероидов, причем с сильно вытянутой и наклоненной орбитой (недаром он распался на куски...). При круговых орбитах гигантов столь точного совпадения получить не

удалось. Однако надо учитывать, что точные значения орбит и масс планет — все-таки игра случая, ведь они порождены весьма непредсказуемыми движениями и столкновениями планетозималей.

Узнав пути всех планетозималей, можно было приступить к физической химии. Для этого взяли протопланетное облако того же состава, что ныне у солнечной фотосферы. Из общего числа элементов выбрали наиболее значимые — углерод, азот, кислород с серой и фосфором, а также главные металлы горных пород — кремний, магний, алюминий, кальций, натрий, титан, хром, железо и никель. А затем применили стандартную программу для расчета термодинамических потенциалов веществ при различных давлениях и температурах. Температура в облаке распределена крайне неравномерно: на дальней части рассматриваемой зоны вода замерзает, а на ближней к Солнцу плавятся даже силикаты. Соответственно солнечный ветер выметает все газообразные компоненты из горячей зоны в холодную.

Не нужно думать, что облако нагревается Солнцем, этим фактором авторы как раз пренебрегли. Оно греется за счет вязкого трения при движении частиц пыли и газа. Облако эволюционирует, его температура и давление падают, что можно рассчитать исходя из модели вращения вязкого диска, а стало быть, понять, где, что и когда будет конденсироваться. Период расчета — от 250 тысяч лет после начала остывания облака до 3 млн. лет, когда облако должно распасться. Всего были рассчитаны составы планетозималей для семи точек с шагом в полмиллиона лет.

Как нетрудно догадаться, чем позже формировались планетозимали, тем больше была в них относительная доля летучих элементов и тем меньше доля относительно тугоплавких составляющих, например кальция, алюминия и титана. Так, разница в возрасте формирования всего в полмиллиона лет (3 млн. лет и 2,5 млн. лет) увеличила содержание кислорода в конечных планетах на треть.

Поскольку при всех расчетах можно было найти аналогии Венеры, Земли и Марса, с их составами и проводили сравнение. Тут и оказалось, что лучше всего соответствие получается при раннем образовании планетозималей, всего спустя 500 тысяч лет после начала остывания облака. В этом случае сформировавшиеся в компьютере планеты почти не отличались от реальных: отклонение в абсолютных составах было менее одного весового процента для всех элементов за исключением магния (2%), железа и кислорода (2,5%) и серы (5%). Когда же речь зашла об относительных составах (измеренных относительно содержания кремния, основного элемента горных пород), то выяснилось, что хуже всего на всех трех планетах земной группы себя ведут натрий и сера — для них расчетное соотношение оказалось соответствием в четыре и восемь раз больше, чем в реальности. С учетом весьма приблизительных представлений о том, как формируются планеты, такое хорошее совпадение — количественное, а не качественное — выглядит совсем не плохо.

В целом оказалось, что планеты земной группы на треть состоят из кислорода, на четверть с лишним — из железа, кремния было примерно 16 весовых %, а магния — 14%. Серы в разных расчетах оказалось от 1 до 7 %, а кальций, алюминий и никель слегка не дотягивали до 2% каждый. Остальные элементы давали менее процента. Если же сравнивать соотношения основных элементов коры, то есть магния с кремнием, алюминия с кальцием и кальция с кремнием, то получается, что созданные в компьютере планеты в среднем лежат между Землей и Марсом и при этом слегка обогащены кальцием.

Орбиты гигантов, как и ранее, не отразились на общем минеральном составе планет земной группы. А вот о воде этого сказать было нельзя. Все планеты формировались при температурах выше 1200 K, в результате основными минералами оказались пироксен ($MgSiO_3$) и оливин ($MgSiO_4$). А у планет на

дальней периферии было немало серпентина ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$). Серпентин вместе со льдом и послужил основным источником воды на земных планетах.

Если орбиты гигантов были вытянуты, воды на планетах земной группы не было при условии, что планетозимали возникали ранее срока в 1 млн. лет. Позднее линия снега смещалась и приносила с собой воду. Большинство планет получало свою воду уже на начальной стадии, а это плохо — при все новых и новых столкновениях горные породы плавилась, и вся эта вода могла улететь. Впрочем, без учета этого обстоятельства планеты земной группы содержали от 0,6 до 24,8 земных океана, то есть вполне достаточно воды, чтобы обойтись без всякой ее доставки кометами. Рекорд же поставили бы планеты, если бы они формировались из самых поздних планетозималей, возникших на третьем миллионе лет: 1200 земных океанов. А вот углерод и азот должны были улететь при столкновениях небесных тел и вновь вернуться на планеты уже после того, как все планетозимали исчезли.

Химия дальних миров

И вот настал час, когда по отлаженной методике можно было приступать к расчету планет у других звезд. Это и сделала все та же группа, к которой на заключительном этапе присоединились испанские астрономы из Астрофизического института в Тенерифе. Исходным материалом для расчета им послужили результаты спектрального анализа света других звезд, содержащих планетные системы. Не без труда (например, линии кислорода расшифровывать не так уж просто) им удалось задать исходный химический состав протопланетных облаков и закрутить в компьютере тот же сценарий формирования планет с учетом местных особенностей, и так по несколько раз для каждой системы — для набора статистики. При этом время формирования планетозималей было выбрано равным 500 тысяч лет — что сработало в Солнечной системе, должно сработать и у других звезд.

Местные же особенности оказались весьма значительными. После того как был собран массив данных о химическом составе нескольких десятков звезд, окруженных экзопланетами, и созданы планеты во всем их многообразии, — оказалось, что их можно разделить на группы по соотношениям основных элементов, образующих минералы. Ключевыми были отношения содержания углерода к кислороду и магния к кремнию. Различия для судьбы планеты тут такие.

Если C/O меньше 0,8, тогда на планете преобладают оксидные соединения, прежде всего с учетом главенствующей роли кремния в составе горных пород — оксиды кремния и соли его кислот. А если этот предел превышен, то кремний уже не может образовывать оксиды и присутствует в виде карбида. Когда углерода очень много, основными минералами планеты оказываются карбиды и углеродные фазы — графит, алмазы. Таких планет — белые утесы твердого карбида кремния, возвышающиеся над черными равнинами, засыпанными графитовым песком с алмазными блестками — никто никогда не видел: в Солнечной системе ничего похожего нет и быть не может. Но спектральные данные свидетельствуют, что системы с протопланетными облаками, содержащими немало наноалмазов, действительно существуют. При моделировании планеты в углеродных системах выходили небольшими, скорее недоросшими зародышами размером с Луну, зато некоторые из них на две трети состояли из углерода. На них отсутствовали карбонаты, полевой шпат и фосфаты — эти соединения важны, поскольку именно в них сосредоточиваются радиоактивные калий, торий и уран. Значит, после того как первичное тепло было рассеяно, внутреннего источника энергии не осталось. У таких планет, скорее всего, не должно быть никакой расплавленной мантии, вулканов, движения континентов, а также магнитного поля. Кроме того, моделирование показало, что богатые углеродом планеты после завершения их формирова-



ния из планетозималей оказываются лишенными воды, разве что она свалится на них позже в виде комет.

Впрочем, отнюдь не у всех звезд, богатых углеродом, формировались такие углеродные планеты. Дело в том, что большая часть углеродного материала в те первые полмиллиона лет, которые были признаны оптимальным временем для проведения расчета, оказывалась сосредоточенной гораздо ближе к звезде, чем место расположения планет земного типа. Поэтому углерод в них и попадал в гораздо меньшем количестве, чем следовало из состава звезды. В некоторых случаях планеты формировались на периферии потому, что вблизи звезды место было занято горячим юпитером, который вбирал в себя материал из окрестных частей облака. В таких обедненных углеродом планетах получалась кора, состоящая из карбидов и пироксенов. Это гораздо более похоже на Землю. Правда, и в этом случае воды на планете не было.

Отношение содержания магния к кремнию управляет более знакомыми по земным условиям горными породами на основе солей кремния. Если кремния гораздо больше, чем магния, тогда главными минералами коры планеты оказываются пироксены и полевые шпаты — алюмосиликаты вида $(K, Na, Ca)(AlSi_3O_8)$. Когда отношение содержания магния к кремнию больше 1, но меньше 2, то полевые шпаты заменяются на оливины. Если же магния становится еще больше, остаются одни оливины, а избыток магния уходит в его оксид и сульфид.

У Земли C/O составляет 0,55, а Mg/Si — 1,05. Поэтому у нас графитовых пустошей нет, карбид кремния — экзотический материал для изготовления резцов и подложек для выращивания графена. Зато мантия неплохо плавится, а изобилующая пироксенами кора достаточно тонкая для того, чтобы не слиться в монолит и обеспечить тектонику плит.

Средняя по всем изученным системам планета (C/O равно 0,77, а Mg/Si — 1,32) вполне подобна Земле. Главные отличия: возможно, несколько большее содержание углерода (если он не улетит в процессе формирования), а в коре окажется равное содержание оливинов и пироксенов.

Иначе обстоит дело у планет, обедненных кремнием. Расчет состава минералов показал, что у такой планеты, как и у Земли, ядро будет из никеля, железа и серы, зато мантия — из расплавленной шпинели и оливина, и все это покрыто слоем толстой коры с преобладающими соединениями алюминия и кальция. У этих планет вулканы возможны, а вот тектоники плит не будет — слишком толстая и прочная кора вряд ли станет трескаться.

В целом же особых сюрпризов расчет не принес. Как и предполагалось, составы планет вполне соответствовали составу звезды. Так это или не так, проверить удастся только в далеком будущем. Однако авторы считают, что никакими планетными системами не нужно пренебрегать, если речь идет о поисках аналогов Земли, ведь время от времени в их моделях планеты, похожие на нашу, формировались при, казалось бы, невозможных для этого составах звезд.

