



Вода планет

Кандидат
физико-математических наук
С.М. Комаров

Наша Земля очень сухая: доля воды на ее поверхности составляет лишь 0,023% от массы планеты. А у внешних планет, лежащих за поясом астероидов, она доходит до 40%. Более того, судя по составу Солнца, в протопланетном диске вода была столь же распространенным веществом, как силикаты, слагающие каменные планеты. Почему же на внутренних планетах Солнечной системы так сухо? Поиски ответа на этот вопрос ведут в начало времен, когда не было еще ни планет, ни самого Солнца.

Облако

В 1755 году Иммануил Кант написал «Дайте мне материю, и я покажу вам, как из нее должен образоваться мир». И показал: наш мир сформировался из облака частиц, которое уплотнилось под действием силы тяжести. В 1796 году, после обнаружения астрономом Вильямом Гершелем множества туманностей, о некоторых подробностях этого процесса рассказал Пьер Симон Лаплас. Согласно его расчетам, при сжатии облака, из которого рождается звезда, вращающегося со все большим ускорением. В результате его разреженная внешняя часть сплющивается, а когда центробежная сила на экваторе становится равной силе тяжести, идущей от центра вращения (где и будет находиться звезда), облако принимает форму чечевицы. Вещество на внешнем крае перестает участвовать

в дальнейшем сжатии, оставаясь на месте и образуя газовый диск. Затем он дробится на кольца, и вещество каждого кольца становится планетой. Гипотеза эта ученым понравилась и, хотя была неспособна объяснить многие явления, легла в основу современной теории формирования звезд и планетных систем. Экспериментальное ее обоснование предоставили и продолжают предоставлять телескопы, которые позволяют разглядеть множество деталей в строении протозвездных и протопланетных дисков.

Детали строения протозвездных облаков рассматривают примерно с 70-х годов XX века, а сейчас обнаружено несколько сотен протозвездных облаков на разных стадиях развития. Их изучают с помощью новейших приборов, например таких, как космический телескоп ЕКА «Гершель», выведенный на орбиту в 2009 году. Он работает в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах — холодные частицы межзвездной пыли хорошо видны в этих областях спектра. Самый современный, построенный в 2013 году прибор — радиоинтерферометр АЛМА (Atacama Large Mirror Array) Южной европейской обсерватории. Он состоит из 66 радиотелескопов, разбросанных по пустыне Атакама и связанных в единую сеть. Данных, собранных этими и многими другими приборами, уже вполне достаточно, чтобы строить вполне адекватные компьютерные модели идущих в таких дисках процессов. А в компьютере можно внимательно рассматривать все тонкости без помощи дорогостоящих приборов. Например, следить за физико-химическими реакциями в облаке и, меняя его состав, понять, какие же планеты получатся. (О выявленном многообразии миров — углеродных с нефтяными реками в графитовых берегах с алмазными утесами; водных, покрытых синими океанами или усыпанных ослепительно-белыми кальцитовыми хребтами, — «Химия и жизнь» рассказывала в майском

номере за 2012 год.) А можно исследовать кинематику самого диска, наблюдать, как в нем появляются зародыши планет — планетозимали, сливающиеся потом в крупные небесные тела. Однако сначала нужно создать сам протозвездный диск из межзвездного облака.

Вот как выглядит свежестроенная математическая модель образования некрупной, меньше Солнца, звезды (Masahiro N. Machida, Takashi Hosokawa «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2012, 431, 2, 1719—1744; doi: 10.1093/mnras/stt291).

Исходно имеется межзвездное газово-пылевое облако, заполненное водородом и некоторыми молекулярными соединениями (см. «Химию и жизнь», 2013, № 2) — водой, угарным газом, углекислым, аммиаком, метаном, ароматическими углеводородами и другими органическими веществами разной степени сложности. Наличие углерода подсаживает, что это облако, по крайней мере, частично, — результат взрыва некой звезды, поскольку углерод в исходной Вселенной отсутствует, он образуется при термоядерном синтезе в звездных недрах. Тогда в облаке есть и другие продукты звездного нуклеосинтеза — тяжелые элементы вплоть до железа, а также продукты взрыва материнской сверхновой — радиоактивные элементы. Этих элементов тем больше, чем к более позднему поколению принадлежала породившая облако звезда. Облако не стоит на месте, но движется в определенном направлении и вращается. Под действием света других звезд вещество ионизируется — значит, у облака имеется электрическое поле, а также магнитное, ведь движение заряженных частиц неизбежно порождает его.

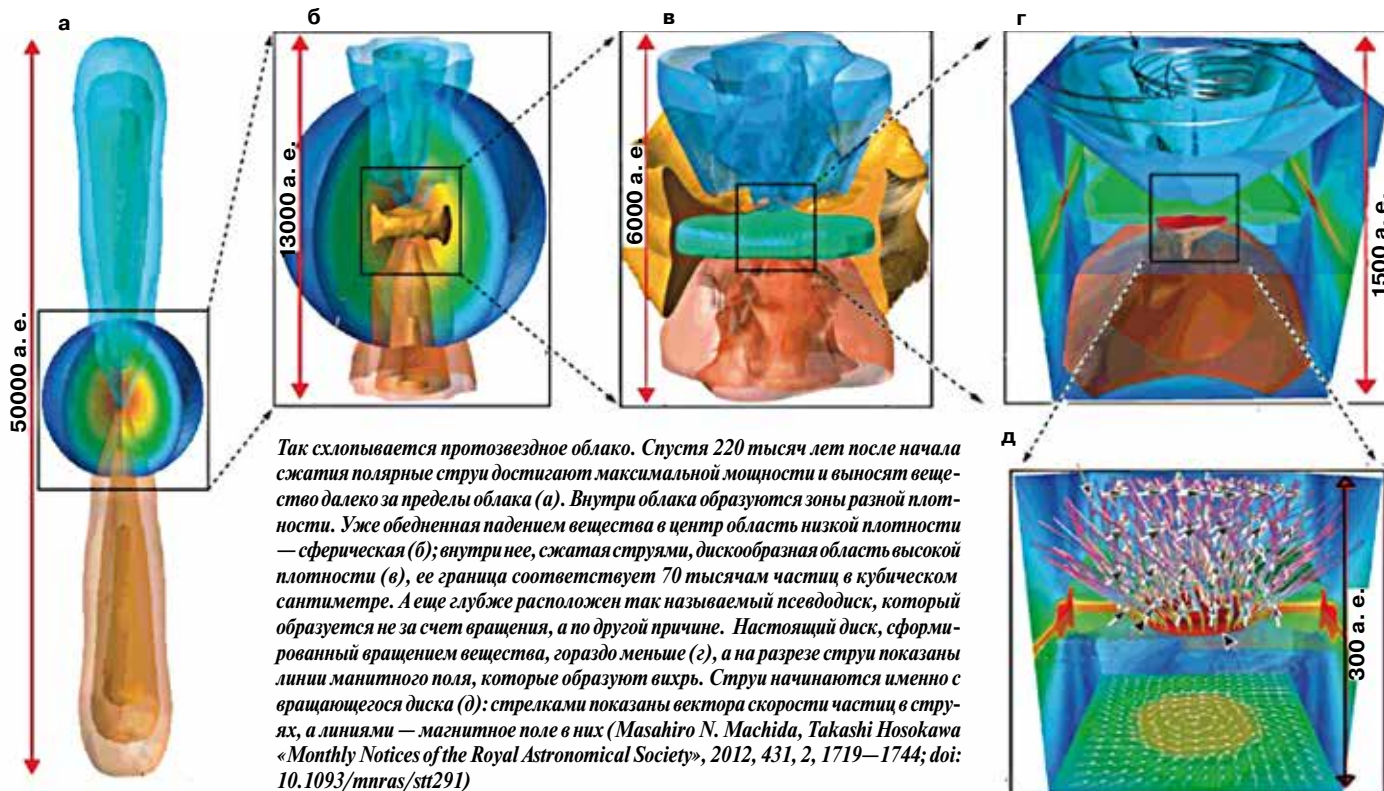
Облако отличается немалой стабильностью, которую обеспечивают две противоборствующие силы — гравитация и тепловое движение слагающих его частиц. Поскольку теплообмен с межзвездным космосом затруднен (он идет только за счет излучения, которое как приходит к облаку от звезд, так и уходит от него при переизлучении квантов энергии), их идилия может длиться бесконечно долго. Нарушить же ее способно внешнее обстоятельство, например взрыв какой-то далекой звезды. Он порождает ударную волну, на фронте которой плотность вещества многократно возрастает. В результате может возникнуть сгусток вещества, гравитация которого окажется выше, чем кинетическая энергия слагающих частиц.



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

Кроме того, и само облако неоднородно: как показывают наблюдения, при средней плотности межзвездных облаков, измеряемой тысячами частиц на кубический сантиметр, в них имеются уплотнения — так называемые глобулы с плотностью в сотни раз большей. Из таких образований уже могут формироваться звезды.

Для построения модели японские исследователи взяли облако с температурой 10 К и плотностью 600 тысяч частиц в кубическом сантиметре. Чтобы облако начало сжиматься под действием собственной силы тяжести, его масса должна превосходить предел Боннора — Эбберта, предложенный в 1955 году немцем Рольфом Эббертом и англичанином Уильямом Боннором. В реальности речь идет не о массе (ее можно выбрать любой, в частности авторы расчета взяли 1,05 солнечных), а о радиусе сферы, по которой эта масса распределена с указанной плотностью. Он получается равным 6100 а. е. (одна астрономическая единица — радиус земной орбиты). Для сравнения: пояс Койпера, где собрались остатки материала, пошедшего на создание Солнечной системы, имеет радиус 30—50 а. е., а облако Оорта, откуда прилетают долгопериодические кометы, — 50—100 тысяч а. е., или почти один световой год. Скорость вращения облака взяли равной 10^{-13} оборотам в секунду, или около одного оборота в миллион лет. При этом отношение энергии вращения к гравитационной составило 0,01 — исследования астрономов дают среднее значение 0,02 при разбросе в пределах от 10^{-4} до 1,4. Отношение магнитной энергии к гравитационной было 0,06. В центр поместили зародыш звезды массой в тысячную долю массы Солнца. Вот результаты расчета.



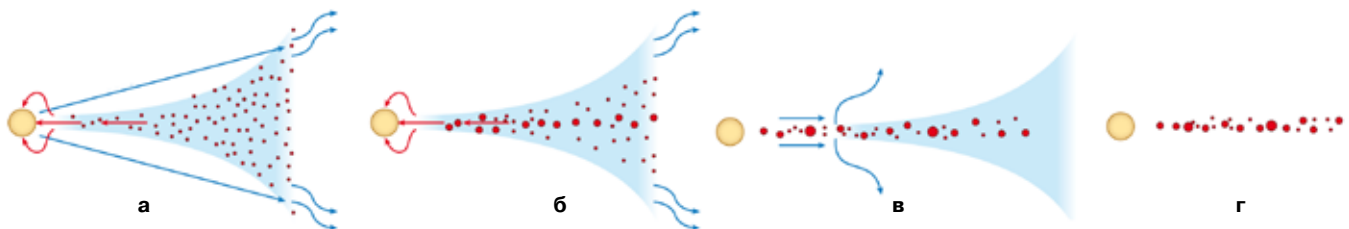
Так схлопывается протозвездное облако. Спустя 220 тысяч лет после начала сжатия полярные струи достигают максимальной мощности и выносят вещество далеко за пределы облака (а). Внутри облака образуются зоны разной плотности. Уже обедненная падением вещества в центр область низкой плотности — сферическая (б); внутри нее, сжатая струями, дискообразная область высокой плотности (в), ее граница соответствует 70 тысячам частиц в кубическом сантиметре. А еще глубже расположен так называемый псевдодиск, который образуется не за счет вращения, а по другой причине. Настоящий диск, сформированный вращением вещества, гораздо меньше (г), а на разрезе струи показаны линии магнитного поля, которые образуют вихрь. Струи начинаются именно с вращающегося диска (д): стрелками показаны вектора скорости частиц в струях, а линиями — магнитное поле в них (Masahiro N. Machida, Takashi Hosokawa «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2012, 431, 2, 1719—1744; doi: 10.1093/mnras/stt291)

Первые 68 тысяч лет после начала сжатия ничего существенного не происходит: частицы облака перемещаются в пространстве и постепенно увеличивают плотность в центральной части. Но затем начинаются качественные изменения: практически мгновенно появляется вращающийся плотный диск с массой в 0,2 солнечных. Причина его образования — закон сохранения углового момента движения; по мере того как в него падает материал из все более дальних областей облака, вращение ускоряется, а плоскость вращения стабилизируется перпендикулярно одному направлению. Оно и станет в будущем осью вращения звезды и всей планетарной системы; сам же диск окажется основой протопланетного диска. Но пока что вещество из окружающего облака концентрируется в диске и, проходя сквозь него, падает в центр. Плотность вещества в центре становится все выше, и вот спустя 73 тысячи лет после начала сжатия появляется протозвезда. В ближайшие 20 тысяч лет масса диска будет больше массы звезды, а потом — и уже навсегда — она окажется главным игроком, именно ее гравитационное поле теперь стабилизирует диск. (Ранее он держался за счет вращения и давления падающего газа.)

Однако между образованием диска и формированием протозвезды происходит еще одно событие: в момент 70,5 тысяч лет на границе диска начинают формироваться полярные струи, уносящие вещество прочь от протозвездного облака. Причина их появления, как указывают авторы работы, до сих пор не ясна, тем более что различают два вида струй — быстрые и медленные, однако телескопы фиксируют их практически в каждом облаке, где образуется звезда. В качестве рабочей принята гипотеза, что падающие из облака на диск частицы ускоряются и их выбрасывает прочь вдоль оси вращения. Этому способствует и магнитное поле, линии которого выходят под углом из центра вращения диска. Высота, на которую бьет струя, со временем меняется. Спустя 25 тысяч лет после образования протозвезды она достигает границы исходного облака и выходит в межзвездное пространство. А еще через 75 тысяч лет максимальный диаметр струи (она имеет форму сигары) сравняется с диаметром облака, высота же превышает его в несколько раз (практически струя добивает до места расположения облака Оорта). Угол на границе облака достигает 130° , то есть струя существенно ограничивает ту его часть, которая может поставлять материал на звезду. Более того, струи уносят вещество прочь, предотвращая падение на звезду всего облака.

В период между формированием диска и звезды мощность струй только нарастает, затем на некоторое время стабилизируется и, по мере обеднения облака, начинает падать. Моде-

Распад протопланетного диска. Сначала вещество в большом количестве падает на звезду, а ее излучение, главным образом дальний ультрафиолет и рентген, вызывает фотоиспарение внешних частей диска (а): вещество диска слишком плотное, чтобы лучи могли сквозь него пройти и вызвать испарение внутри. В это же время частицы пыли укрупняются и оседают в центральной части диска (б). Когда объем падающего вещества уменьшится до критического значения, сильное фотоиспарение из внутренней части диска очищает от газа ближайшую к звезде область (в). Падение вещества на звезду прекращается, и начинается стремительный распад диска. После того, как весь газ испарится, в диске остались лишь крупные частицы и планеты; всю мелкую пыль вымело за счет давления света или увлекло звездным ветром (г). Теперь диск стал невидимым для астрономов («Annual Review in Astronomy and Astrophysics», 2011, 49, 67–117; doi: 10.1146/annurev-astro-081710-102548)



лирование подсказывает, что медленные струи вылетают с поверхности околозвездного диска, а быстрые — с поверхности самой протозвезды. Всего же эти струи способны унести примерно половину того вещества, что было в исходном облаке. Дальнейшая его судьба остается неясной: рассеется ли оно по межзвездному пространству или, связанное гравитацией звезды, станет ее спутником. Небезынтересно отметить, что, согласно наблюдениям космического телескопа «Гершель» (<http://arxiv.org/abs/1012.4570v1>), эти струи уносят огромное количество воды, содержащейся в протозвездном облаке: концентрация водяного пара (измеряемая относительно содержания водорода) в струях в десятки тысяч раз выше, нежели в остающемся диске. Связано ли это с тем, что вода в диске находится большей частью в замороженном состоянии, или действительно струи иссушают звездную систему, пока не ясно.

Струи, препятствуя падению вдоль оси вращения, приводят к тому, что весь перенос материала из облака на звезду идет только через диск. В результате его масса перестает расти — по данным астрономов, она составляет 0,02–0,1 от солнечной. Расчет японских исследователей позволяет узнать подробности. Так, масса диска в их модели держится на уровне 0,2 солнечных до тех пор, пока масса протозвезды не сравняется с массой оставшегося облака, а затем начинает падать и к концу процесса составляет 0,1 солнечной. И все это время диск служит путепроводом для переправки вещества облака в звезду. В начале формирования протозвезды скорость падения на нее вещества составляет 10^{-5} солнечных масс в год, и так продолжается около 100 тысяч лет. Затем скорость падения снижается до 10^{-7} солнечных масс в год. Впрочем, время от времени приток оказывается больше оттока, диск перегружается, теряет гравитационную стабильность, и на короткое время объем выпадающего из него материала на звезду резко возрастает: это можно заметить по значительному, но непродолжительному увеличению ее яркости, что и наблюдают астрономы, например, у хорошо им известной системы FU Ориона. Считается, что в процессе своего образования звезда испытывает десяток таких событий.

Звезда в это время еще не загорелась — давления и температуры не хватает для запуска термоядерного синтеза. Однако вещество, падая на звезду, сильно нагревается за счет трения и начинает светиться. Эта светимость очень высока — в первые 50 тысяч лет она достигает примерно десятикратного значения по сравнению с Солнцем. Затем, по мере сокращения падающего на протозвезду потока, светимость падает. А когда плотность вещества в звезде оказываются достаточно высокой, в ней начнется термоядерный синтез и накопленное вещество будет гореть на протяжении миллиардов лет. К этому времени, по данным модели, из исходного облака массой в 1,05 солнечных образовалась звезда массой 0,5 солнечных, протопланетный диск массой 0,1 солнечных, от исходного облака остается еще почти 0,1 солнечной массы, а все остальное улетело прочь, унесенное полярными струями.

Диск

Спустя 500 тысяч лет после начала падения ресурсы облака заканчиваются: оно либо полностью выпадает на околозвездный диск и потом на звезду, либо уносится струями в межзвездное пространство, покидая пределы сферы Боннора — Эбберта.

После этого начинается история протопланетного диска, и проследить за превращениями веществ можно с помощью телескопов. Свежие данные таких наблюдений собраны в обзоре Джонатана Уильямса и Лукаса Сиэца из Гавайского университета («Annual Review in Astronomy and Astrophysics», 2011, 49, 67–117; doi: 10.1146/annurev-astro-081710-102548).

Диски наблюдают в инфракрасном и радиодиапазоне. Причин тут две. Во-первых, именно такие лучи лучше всего проходят сквозь остатки исходного облака. А во-вторых, диск нагрет неравномерно, и именно по тепловому излучению можно судить о происходящих в нем процессах: выпадение вещества на звезду, фотоиспарение от ее света и света других звезд и сдувание вследствие гравитационного взаимодействия. Данные многолетних наблюдений показывают такую хронологию событий.

В исходном диске, который сформировался при сжатии облака, плотность вещества высока: весь свет, исходящий от протозвезды, поглощается на расстоянии 20 а. е. от ее центра. Вещество же это состоит из двух компонентов: газа, прежде всего водорода, и пыли, которой в сто раз меньше, чем газа. Пыль — это главным образом частицы силикатов размером менее десятой доли микрона, графитовые зерна и сконденсировавшиеся полициклические углеводороды. Холодные пылинки покрыты льдом из налипших на них молекул всевозможных газов и жидкостей. Под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучений звезды газ ионизируется, намерзшие на пыль летучие компоненты, нагретые, испаряются и также ионизируются. По идее, под действием света звезды и эти ионы, и нейтральные молекулы газа должны бы улететь прочь, но, до тех пор, пока сквозь диск идет поток вещества с падающего облака, этого не происходит. И длится этот период небыстрого падения остатка обедненного облака несколько миллионов лет. А вот когда облако настолько истощится, что скорость падения вещества на звезду и скорость его оттока в виде звездного ветра сравняются (по одним оценкам это 10^{-10} — 10^{-9} солнечных масс в год, а по другим — 10^{-8}), сразу же возникает расслоение диска на внешнюю и внутреннюю части. Внутренний диск стремительно, за 100 тысяч лет, с одной стороны испаряется, а с другой — падает на звезду, расчищая от газа пространство радиусом в несколько астрономических единиц (где, собственно, и будут формироваться основные планеты). В результате излучение проникает все глубже и глубже внутрь диска, фактически выметая прочь все больше газа. В этом процессе участвуют и внешние звезды: их излучение также ионизирует и нагревает газ, и тот улетает прочь уже с внешней поверхности диска. Наибольшую опасность представляют мощные голубые гиганты: если они располагаются слишком близко, в пределах десятой доли светового года от протозвезды, их излучение может попросту сдуть протопланетный диск (этот процесс изображен на заставке к статье: мощная звезда, показанная в правом верхнем углу сдула диск у ближайшей протозвезды, а расположенная дальше от нее протозвезда может сформировать планетную систему). Впрочем, обычно соседние звезды сдувают не более десятой его части.

Иной процесс происходит с пылинками. Маленькие пылинки легко увлекаются потоком улетающего прочь от звезды газа, а давление света их еще и подталкивает. Однако при этом пылинки сталкиваются друг с другом и слипаются, чему сильно способствует покрывающий их лед. А чем больше размер пылинки, тем меньше отношение ее поверхности к объему, то есть тем меньше парусность. Поэтому по мере укрупнения пылинки тормозятся и сваливаются поближе к центру диска. Казалось бы, должен получиться идеально плоский тонкий диск, но этому препятствует турбулентность, которая вызывает перемещения и крупных частиц поперек диска. Процессу слипания частиц противодействует их дробление при слишком энергичных столкновениях. Это создает проблему перехода от микронных пылинок к объектам метрового размера: казалось



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

бы, из-за дробления они не могут образоваться. Проблема до сих пор не разрешена; есть предположения, что зародыши планет формируются в долгоживущих вихрях или что условия для сбора мелких частиц в крупные обеспечивают какие-то гравитационные неустойчивости. Доподлинно же известно: все пылинки размером менее 100 мкм за 10 тысяч лет от начала распада диска либо склеиваются в более крупные образования, либо улетают из диска прочь.

К тому времени, как внутренняя часть диска очищается от газа, объем вещества в нем оказывается практически ничтожным — его масса падает с десятой доли солнечной до сотых ее долей. В среднем оставшегося материала хватает на формирование пяти Юпитеров, но чаще всего — не более чем на одну-две таких планеты. В Солнечной системе, например, суммарная масса планет составляет полторы массы Юпитера. Весь распад диска занимает от силы миллион лет, хотя порой затягивается и на десять миллионов. В конце концов никаких видимых следов диска вокруг звезды не остается, поскольку вся пыль собралась в планетах, планетозималях и в менее крупных обломках, которые интересны охотникам за экзопланетами.

Линия снега

И вот теперь мы приближаемся к загадке воды. Протозвездное облако состоит из газа и пыли. Облако холодное, и на поверхности частиц намерзают молекулы тех веществ, что имеются в облаке. Кроме того, поскольку облако в значительной своей части — продукт взрыва какой-то сверхновой, в состав пылинок входят различные тяжелые металлы, включая образовавшиеся непосредственно в момент взрыва радиоактивные элементы.

При падении на звезду эта пыль нагревается как за счет трения, так и излучением протозвезды, и осевшие на ней летучие вещества испаряются. Судьба этих летучих компонентов неясна: с одной стороны, они, толкаемые излучением и обладая повышенной кинетической энергией (мерой которой и служит температура), должны бы улететь прочь, а с другой — поток падающего в звезду вещества этому препятствует. Видимо, устанавливается динамическое равновесие, которое поддерживает некое постоянное распределение летучих компонентов по объему диска. При распаде же протопланетного диска, когда поток падающего вещества иссякает, свет звезды начинает выдувать летучие компоненты, и они летят прочь до тех пор, пока не достигнут линии снега: зоны диска, где температура поверхности пылинки меньше температуры сублимации того или иного компонента этого газа. Там соответствующий летучий компонент получает возможность намерзнуть на поверхность пылинок и прочих твердых тел. Все это приводит к неравномерному распределению вещества по протопланетному диску.

Самая первая «линия снега» находится вблизи от звезды и определяется испарением наиболее тугоплавкого вещества, присутствующего в составе пыли в значительном количестве. Это графит, испаряющийся при нагреве до 4600 К, что нена-

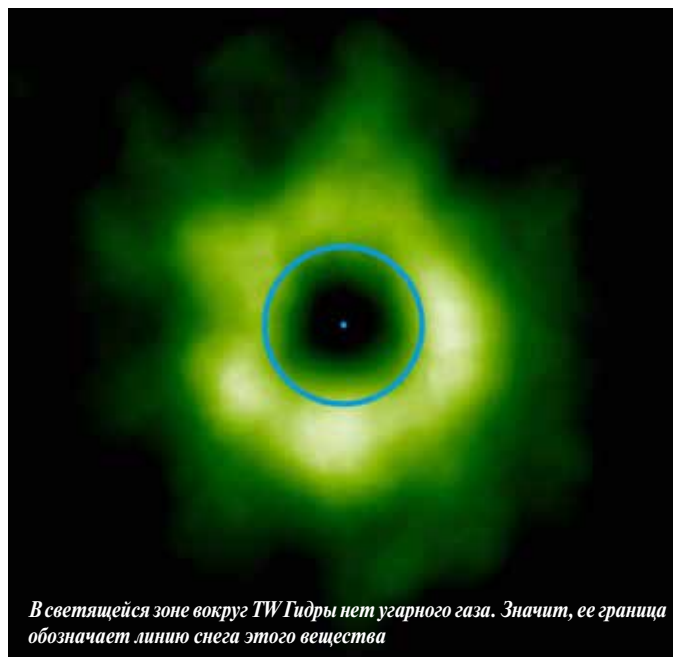
много меньше температуры поверхности Солнца — 5500 К. То есть графитовые планетозимали могли бы (с точки зрения физической химии) сформировать планету в непосредственной близости от светила, чего в Солнечной системе не наблюдается. Следующая линия определяется сублимацией самого распространенного вещества, составляющего пылинки межзвездного облака, — диоксида кремния: в вакууме он начинает интенсивно испаряться при нагреве до 1600 К. Ближе этой линии (если забыть про графит) планет быть не может, во всяком случае, долго они не проживут, весь строительный материал для них быстро улетает на периферию планетного диска. Третья линия наиболее интересна для нас — это линия конденсации воды. Она соответствует температуре 145—170 К в зависимости от давления водяного пара в диске. Сейчас линия такого — настоящего — снега находится в поясе астероидов на расстоянии 2,7 а. е. от Солнца: до нее астероиды каменные, дальше — водянистые. Ближе к Марсу расположена зона сухого льда — углекислый газ замерзает при 190 К. Зону воды и углекислого газа перекрывают углеводороды — от парафинов, становящихся твердыми в общем-то при нагреве ниже точки кипения воды (а это в районе орбиты Венеры) до линии конденсации метана — 111 К (где-то между Сатурном и Ураном). Следующая важная снеговая линия — угарного газа — проходит в районе орбиты Нептуна, а далее следуют линии затвердевания азота и водорода.

И вот так получается, что чем ближе к звезде формируется планета, тем меньше на ней будет летучих веществ — за пределами снеговой линии они могут встречаться только в следовых количествах. В принципе летучие элементы, тот же кислород, может присутствовать и недалеко от звезды, но в составе тугоплавких веществ, тех же оксидов. Наверное, аналогичная история позволяет сохранить и водород в виде гидридов.

Впервые линию снега из угарного газа наблюдали астрономы Южной европейской обсерватории с помощью уже упомянутого прибора АЛМА (агентство «AlphaGalileo», 18 июля 2013 года). Изучали они оранжевого карлика TW Гидры — молодую звезду возрастом 10 миллионов лет, весьма близкую по своим параметрам к Солнцу. Наблюдать линию снега не просто — ледяные частицы спрятаны внутри диска, и их не видно, а на его видимой поверхности лед испаряется под светом звезд. Поэтому ученые следили за молекулой N_2H^+ : она излучает свет в миллиметровом диапазоне, который отлично проходит сквозь пыль диска. Эта молекула охотно реагирует с угарным газом и присутствует только в той части диска, где такого газа нет, то есть он весь вымерз на поверхности частиц пыли. Как оказалось, линия снега угарного газа у этой звезды находится на расстоянии 30 а. е. от нее, в соответствии с теорией протопланетных дисков.

Вода

Линия снега отнюдь не стоит на месте, о чем свидетельствуют результаты численного моделирования — они описаны, например, в статье Ребекки Мартин и Марио Ливии из Балтиморского Научного института космической астрономии, подготовленной в июле 2012 года (<http://arxiv.org/abs/1207.4284>). Сначала, когда внутренняя часть диска еще не освободилась от газа, линия снега постепенно движется к звезде. Причина в том, что по мере ослабления идущего к ней потока вещества уменьшается трение в диске и соответственно падает вызванный им нагрев. В Солнечной системе минимальный радиус линии водяного снега составляет 0,6 а. е., то есть в этой зоне оказывается не только Земля, но и Венера, отстоящая от светила на 0,72 а. е. Затем, при очистке диска от газа за счет фотоиспарения, когда начинает преобладать нагрев от звезды, линия опять сдвигается к наружным слоям. Поэтому в зависимости от того, на каком этапе распада диска сформи-



В светящейся зоне вокруг TW Гидры нет угарного газа. Значит, ее граница обозначает линию снега этого вещества

ровалась Земля и своим полем тяготения сумела удерживать испаряющуюся от нагрева воду, получаются две модели — сухой и мокрой Земли. Вокруг этих моделей и ломают сейчас копыя планетологи.

В протопланетном облаке воды довольно много: так, свежие наблюдения за TW Гидры обнаружили столько воды, что ее хватает на несколько тысяч земных океанов (<http://arxiv.org/pdf/1110.4600.pdf>). Однако сформировать Землю из сухих планетозималей оказывается не так просто, как кажется. Если попытаться создать сухие планетозимали до того, как линия снега при движении к Солнцу прошла через них, то выяснится, что на это не хватает времени: слишком горячая пыль не хочет собираться в крупные образования. Если же попытаться сделать это потом, когда линия снега уйдет к Юпитеру, то не хватит строительного материала, поскольку нужные для этого пыль и газ уже улетят за пределы земной орбиты. Попытки высушить влажные планетозимали до того, как они слились в планету, успехом также не увенчались — все равно воды остается слишком много. В поисках выхода исследователи решили углубиться в сам протопланетный диск, тем более что упомянутые результаты телескопа «Гершель» прямо указывают: вода в основном содержится в виде крупных ледяных или обледеневших частиц в середине диска. Обычно считается, что в нем существуют достаточно мощные турбулентные потоки, которые перемешивают вещество по всей толще, обеспечивая равную температуру в середине и по краям. Однако эти потоки могут быть не столь сильными — телескопы в глубь диска смотреть не могут, и объективных данных об идущих там процессах нет. Если же перемешивание неполное, то в середине формируются мертвые зоны, которые меняют поля температур. Расчет Мартин и Ливии, проведенный для этого случая, показал, что линия водяного снега перестает пересекать орбиту Земли.

В их модели возникает еще один интересный результат: в мертвой зоне совсем рядом со звездой появляется еще одна область, где настолько холодно, что вода не испаряется. В случае гравитационной неустойчивости и катастрофического падения внутренней части диска (о чем речь шла выше), эта область вместе со всей водой падает на звезду. Но неустойчивости может и не случиться, и тогда в ней сформируется горячий юпитер — планета того самого типа, с которых и началась экзопланетная астрономия: обращающаяся вокруг своей звезды за несколько дней по орбите, в пять—десять раз более

близкой, чем Меркурий. Сейчас считается, что такая планета формируется на периферии, а потом дрейфует к звезде. Попытка объяснить сухость Земли позволяет взглянуть на проблему по-другому: они всегда были на своих местах, просто в Солнечной системе не сформировались.

Как бы то ни было, гипотеза влажной Земли — отнюдь не главная (а предположение В.Н.Ларина, что вода появляется в результате распада оксидов и гидридов уже на вполне сформировавшейся Земле, и вовсе мало кто принимает всерьез), преобладает же гипотеза Земли сухой. И тогда не остается никакого иного механизма ее обводнения, кроме как доставка воды (и других летучих компонентов) из-за нынешней снеговой линии. Там, на периферии Солнечной системы, в кометах сосредоточены сотни из упомянутых тысяч водных океанов (остальные пошли на формирование атмосферы планет-гигантов). Главным же источником земной воды при таком подходе оказывается астероидно-кометная бомбардировка, случившаяся спустя полмиллиарда лет после образования Солнечной системы, а точнее, 4,1—3,2 миллиарда лет тому назад. Почему она произошла, что дестабилизировало орбиты небесных тел пояса Койпера и/или облака Оорта, неизвестно, но следы бомбардировки отлично видны на поверхности Марса и Луны.

Не исключено, что подобное явление астрономы наблюдают в режиме реального времени. В марте 2014 года в Южной европейской обсерватории обнаружили у звезды Бета Живописца пояс из угарного газа, расположенный на расстоянии в 100 а. е., что в три раза больше, нежели орбита Нептуна (агентство «AlfaGalileo», 6 марта 2014 года). С учетом возраста звезды (20 миллионов лет) никакого угарного газа там быть не должно, поскольку он распадается от фотодиссоциации за сотню лет. Значит, идет постоянный поток газа. Откуда? Есть два предположения. Или астрономы увидели уникальное событие в жизни звезды — буквально на их глазах столкнулись два больших планетных тела подобных Марсу, и из их обломков вылетел весь этот угарный газ. Или же это вполне рутинные столкновения комет друг с другом. Частота таких столкновений должна быть велика — раз в пять минут. В этом случае кометы в столь тесную группу собирает неоткрытая планета массой в Сатурн. Исследователи надеются в ближайшее время разглядеть еще и органику, попадающую в космос при таких столкновениях.

Кометы нашей системы — не единственный возможный источник воды и прочих летучих веществ. Определенной популярностью пользуется идея А.А.Баренбаума из Института проблем нефти и газа РАН о периодических бомбардировках системы галактическими кометами (подробности можно найти в автореферате его докторской диссертации, подготовленной в 2007 году). Согласно этой гипотезе, совершая оборот вокруг центра Галактики, Земля выполняет сложные движения: пересекает галактическую плоскость, попадает в области звездообразования или преодолевает струйные течение в галактических рукавах. При этом периодически мы попадаем в области с существенно повышенной плотностью небесных тел разного рода, с которыми возможны столкновения. Наиболее опасны прохождения рукавов (напомним, что Млечный Путь принадлежит к числу эллиптических галактик, представляющих плоский диск, вращающийся вокруг центра. Диск не сплошной, а состоит из рукавов с повышенной плотностью звезд и межзвездного газа. Солнечная система находится на периферии галактического диска.) По мнению Баренбаума, рукава насыщены не только газом, пылью или звездами, но и мелкими небесными телами, например галактическими кометами, то есть такими, которые не связаны ни с одной звездной системой. Их никто не видел, но ничего удивительного в предположении о таких телах нет. Например, в 2013 году астрономы нашли сразу две планеты, существующие вне какой-либо звездной системы (агентство «AlfaGalileo»,



9 октября 2013 года). Их массы довольно велики — 5 и 12 масс Юпитера, но это меньше, чем масса мельчайшей звезды — коричневого карлика (12—80 масс Юпитера). Более того, у второй планеты, расположенной в области активного звездообразования, был найден аналог протопланетного диска, то есть она формируется по тому же самому механизму, что и звезда, а именно возникает при схлопывании облака газа, соответствующего условию Боннора — Эбберта, только облако имеет меньший размер и соответственно оно более плотное, чем протозвездное. Вполне можно себе представить образование таких компактных облаков при столкновении ударных волн в межзвездном облаке. Но тогда ничто не мешает представить и образование мелких объектов в еще более плотных участках облака.

Проходя через рукава, наша планета подвергается кометному ливню: за 1—5 миллионов лет выпадает от десяти тысяч до миллиона комет диаметром 100—2500 м. Впрочем, другие исследователи утверждают, что размер галактических комет может исчисляться и десятком-другим километров. Очевидно, что такие ливни приносят на Землю и воду, и углекислый газ, и, по мнению Баренбаума, нефть.

Эта гипотеза не пользуется большой популярностью, однако факт периодических вымираний, подозрительно совпадающих с периодичностью прохождения рукавов (19—37 миллионов лет) или областей звездообразования (40—80 миллионов лет) отрицать трудно. В любом случае прохождения через области с более плотным расположением небесных тел могут дестабилизировать собственную кометную свиту Солнечной системы, а она насчитывает от сотен миллиардов до десятков триллионов кометных ядер. Такая дестабилизация и без галактических комет способна отозваться кометным ливнем. Впрочем, есть идеи, что кометы не только воду принесли на Землю, но и внесли более существенный вклад в формирование поверхности нашей планеты, только он не очень заметен.

Предложенная Баренбаумом нефть с небес — из числа таких неочевидных следов. Дело в том, что кометы — не астероиды, они слишком непрочны, поэтому не могут образовать хорошо заметный кратер. Это и путает охотников за их следами. Так, гипотетическую кометную бомбардировку позднего дриаса приходится всем миром обосновывать за счет находки мельчайших частичек, рассеянных по поверхности Земли, и то этот факт признают отнюдь не все. Смелые египетские геологи утверждают, что они-таки нашли след упавшей 23 миллиона лет тому назад кометы (агентство «AlfaGalileo», 8 октября 2013 года). Это камни из расплавленного диоксида кремния, которые находят в районе Кебира, что на южной границе между Ливией и Египтом. Их с давних времен используют для изготовления украшений, а образоваться они могли при атмосферном взрыве, вызвавшем на большой площади нагрев песка до 2300°С. Еще один претендент на бесследный взрыв кометы — Тунгусский феномен. Видимо, для поиска следов древних кометных бомбардировок, которые позволят установить, когда и при каких обстоятельствах на нашу планету свалилась вода, требуются изрядное упорство и изворотливость ума.

