

Артём Туницов

НА ПЕРЕПУТЬЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ДОРОГ

У эволюции любой планетной системы есть две магистральные дороги, и обе они ведут к крайностям, не допускающим появления ничего похожего на Землю. Правда, теория появления и миграции планет не гарантирует, что рука какого-то неведомого пока закона природы не ставит нас заранее на узкую, но верную тропку.

Пока человечество знало лишь одну планетную систему — Солнечную, астрономы веками упражнялись в попытках объяснить ее происхождение естественным образом. Их усилия были направлены на то, чтобы модель «сама собой» предсказывала появление вокруг звезды планет, подобных нашим, и в тех местах, где они находятся у нас. Сначала идут небольшие планеты земной группы, за ними — планеты-гиганты вроде Юпитера и Сатурна, еще дальше — середнячки вроде Урана и Нептуна.

Неудивительно, что эти модели, в общем и целом, достигали своей цели — в конце концов, глупо было бы публиковать теорию, которая уже опровергнута единственным известным фактом. Наверное, самый показательный пример здесь — теория Джинса, выдвинутая в начале прошлого века. Британец Джеймс Джинс предположил, что своим появлением Солнечная система обязана тесному сближению Солнца с другой звездой, вытянувшей из Солнца сигарообразную струю вещества, из которой потом образовались все планеты.

Согласно расчетам, под действием гравитационной неустойчивости в центре этой струи образовались бы крупные планеты, а по краям — более мелкие. Теория допускала даже зрительное истолкование: сама струя в центре была более толстой, чем к краям — так где, как не в центре, образовывались крупным телам. И хотя сейчас эти построения, сделанные в эпоху, когда даже источник энергии звезд не был известен, кажутся как минимум наивными, они хорошо иллюстрируют стремление ученых найти объяснение тому, что было перед их глазами.

Более серьезные теории образования планет предполагают, что Солнечная система образовалась из газопылевого диска, окружавшего нашу звезду на заре ее существования.

Все они восходят к идеям, выдвинутым Кантом и Лапласом еще на рубеже XVIII и XIX веков; уточнялись лишь детали. К середине XX века стало ясно, что процесс идет в несколько стадий: сначала крохотные пылинки слипаются в песчинки, те, собирая на себя газ и пыль, образуют бульжники и глыбы. Эти камни собираются в так называемые планетезимали — объекты размером порядка километра, из которых — слипанием друг с другом и аккрецией окружающих газа и пыли — образуются планеты такими, какими мы их знаем.

Успехи в изучении строения вещества и его взаимодействия с излучением позволили предположить, что солнечный свет быстро выметет все легкие газы из горячих центральных областей Солнечной системы, и здесь будут формироваться в основном скалистые тела из тяжелых элементов. В то же время планеты, появляющиеся на окраинах, где холоднее, соберут на себя большую часть водорода и гелия.

Наблюдения, казалось, лишь подтверждали эти модели.

МИГРАЦИЯ ПЛАНЕТ

Основных причин миграции две — это взаимодействие сконденсировавшихся из газа и пыли планет с еще не рассеявшимся газопылевым облаком и гравитационное взаимодействие между самими планетами. Первый процесс похож на трение, но не обычное, связанное с непосредственным торможением планеты в потоке частиц, а динамическое. Вклад обычного трения невелик и более важен для самого газа. А вот планета, двигаясь среди газа и пыли и сгребая это вещество на себя, делает это несимметрично, в результате чего в ее кильватере оказывается больше вещества, чем перед носом; это вещество и тормозит движение. В результате планета медленно опускается все ближе к своему солнцу.

Второй процесс, связанный с гравитационным взаимодействием между отдельными телами — более случайного свойства. Такое «рассеяние» планет друг на друге может вести к миграции как внутрь; здесь, как в псевдонауке астрологии, все зависит от того, в каких конфигурациях соберутся и как будут двигаться планеты.

Однако гравитационное рассеяние планет друг на друге выполняет очень важную функцию: только оно способно превращать изначально круговые орбиты в сильно эллиптические. Для этого в большинстве случаев надо либо сильно взаимодействовать сразу с несколькими крупными телами, либо попасть в резонанс с одним из них. После этого эксцентриситет — мера вытянутости орбиты — накачивается очень быстро. Судя по результатам наблюдений за внесолнечными планетами, эти процессы должны происходить и в действительности.

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

Астрономам известны пять основных методов обнаружения внесолнечных планет. Во-первых, это метод прямых наблюдений — мы можем элементарно увидеть планету рядом с другой звездой, подобно тому, как видим планеты нашей звездной системы. Впрочем, хотя сфотографировать гигантскую планету у другой звезды таким способом однажды удалось, обнаружена она была другим способом. Тем не менее развитие телескопов позволяет надеяться, что скоро метод прямых наблюдений станет именно методом обнаружения.

Во-вторых, это доплеровский метод: измеряя смещение линий различных элементов в спектре звезды, астрономы могут заметить периодические изменения ее скорости, связанные с обращением светила вокруг центра масс системы звезда-планета. Этот метод особо чувствителен к массивным планетам, расположенным рядом со своими светилами. При этом желательно видеть орбиту системы «с ребра» — в противном случае никаких изменений скорости не будет. Этим методом были открыты большинство внесолнечных планет. Его небольшая модификация — измерение моментов прихода импульсов от пульсаров — работает для этого типа небесных объектов.

Третий метод — астрометрический: астрономы измеряют смещение положения звезды, также вызванное ее обращением вокруг общего с планетой центра масс. Выглядит такое смещение, как «виляние» звезды в стороны от средней траектории ее перемещения по небу относительно более далеких звезд. Этот метод также чувствителен к массивным спутникам звезды, однако расположенным, напротив, на относительно большом от нее расстоянии. Кроме того, он работает лишь для близких звезд. Пока таким методом открывались лишь спутники-звезды, планеты слишком маломассивны, чтобы вызвать заметное смещение.

Четвертый метод, активно развивающийся в настоящее время — метод транзитов. Астрономы следят за блеском большого количества звезд. Если плоскость орбиты планеты пересекает диск звезды, будут происходить регулярные «частные затмения» или прохождения планеты по диску звезды. Хотя заметить крохотный диск планеты на неразличимом в телескоп диске звезды нельзя, блеск звезды чуть ослабнет. Этот метод чувствителен к крупным спутникам, однако требует, чтобы мы смотрели на систему «с ребра»: в противном случае затмений не будет. Данным методом большинство внесолнечных планет открывается в настоящее время.

Пятый метод — гравитационное линзирование. Если звезда с планетой проходит перед какой-то далекой звездой, блеск последней будет увеличиваться за счет эффекта гравитационного линзирования. Наличие планеты четко отметится на кривой блеска в виде дополнительного пика. Так были открыты несколько планет массой, близкой к массе Земли. Кроме того, возможны различные вариации этого метода — например, можно наоборот, искать планету у звезды-источника с помощью расположенной на луче зрения звезды-линзы. Недостаток этого метода — единичность каждого события. Поймав одно событие гравитационного линзирования, от данной звезды-линзы, следующего события нужно ждать очень долго



Когда же стало ясно, что практически все звезды в процессе своего формирования были окружены газопылевыми дисками, возник даже вопрос: где все эти многочисленные планетные системы, которые должны быть так похожи на нашу? И астрономы принялись их искать.

Вот только когда первые планетные системы начали находить — а первая внесолнечная планета была открыта лишь в 1995 году — выяснилось, что они совсем не похожи на Солнечную.

Сейчас известно чуть более 300 планет, обращающихся вокруг двух сотен звезд, в том числе несколько десятков систем, в которых известно более одной планеты. Но вместо близнецов Солнечной системы мы увидели одних уродцев, в которых планеты-гиганты с массой больше Юпитера кружатся внутри орбиты нашего Меркурия, «нептун» занимает место Земли, а орбиты их совсем не круглые, а сильно вытянутые, эллиптические. Кроме того, в некоторых случаях планеты движутся в резонансе друг с другом — пока одна из них совершает один оборот, другая делает ровно два, три и так далее. В Солнечной системе ничего подобного не замечено — только в главном поясе астероидов можно найти зоны, находящиеся в такого рода резонансе с большими планетами, но зон этих астероиды, напротив, избегают.

Как создать планеты-газовые гиганты в непосредственной близости от звезды, пока никто не придумал. Поэтому астрономы предполагают, что в процессе эволюции планеты-гиганты, зародившись далеко от своих звезд, мигрировали в эту область. Идея планетной миграции за последние несколько лет произвела настоящий переворот в понимании процессов образования планетных систем, а компьютерное моделирование показало, что такая миграция возможна за неожиданно короткое по космическим масштабам время порядка миллиона лет.

С этим переворотом пришел и очередной разворот в отношении к естественности Солнечной системы. Теперь астрономы чешут головы над вопросом: так все-таки наши космические окрестности — это правило или исключение?

Вопрос далеко не тривиальный, и это тот редкий случай, когда в попытках ответить на него опираться на результаты наблюдений нельзя. Конечно, абсолютное большинство планетных систем, которые нам известны, на Солнечную совсем не похожи. Но дело в том, что систем, похожих на нашу, мы пока обнаружить просто не можем. Большинство методов обнаружения внесолнечных планет наиболее чувствительны именно к гигантским телам, обращающимся в непосредственной близости от своих солнц.

Группа канадских и американских астрономов под руководством Эдварда Томмеса из Гвельфского университета в канад-

ской провинции Онтарио попыталась решить этот вопрос экспериментом — но не натурным, разумеется, а численным. Его результаты опубликованы в последнем выпуске Science. С помощью суперкомпьютера ученые смоделировали процесс образования планетных систем и миграции тел в них в первые полмиллиарда лет жизни новорожденной звезды, похожей на молодое Солнце. Заселив окружающий ее газопылевой диск «зародышами» планет массой в тысячную долю массы Земли, астрономы стали следить за совместной эволюцией растущих планет и диска.

Подобные работы делались и прежде, однако, как правило, рассматривали лишь одну сторону процесса — гидродинамическую эволюцию диска или миграцию планет под действием взаимного притяжения и притяжения со стороны звезды. Попытки «поженить» два подхода также предпринимались, однако характерные временные масштабы процессов, протекающих в газе и в популяции планет, трудно соизмеримы, а потому, как правило, ограничивались эволюцией двух-трех планет на небольшом промежутке времени (несколько тысяч оборотов вокруг звезды).

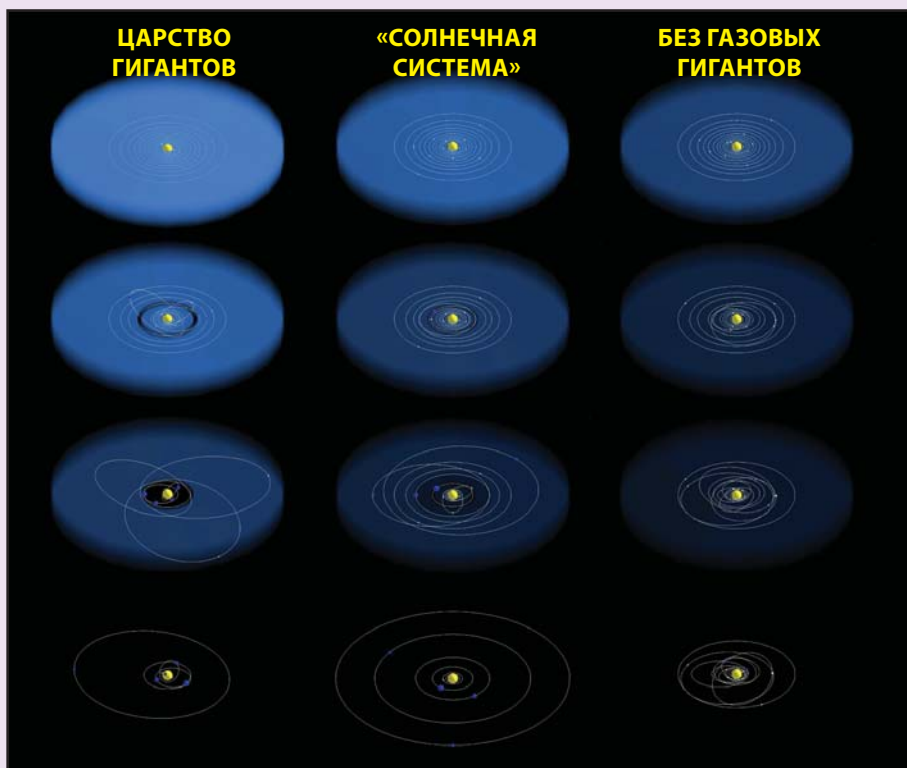
Томмес и его коллеги решили пожертвовать не временем, а точностью в описании газового диска. Во-первых, они заменили сложную физику аккреции (выпадения) вещества на планеты простой моделью. А сам диск, вместо того чтобы представлять его двух- и уж тем более трехмерной структурой, они заменили на набор тонких круглых колец. В таком приближении почти вся гидродинамическая часть модели свелась к теории дисков, предложенной более 30 лет назад российскими астрофизиками Николаем Ивановичем Шакурой и Рашидом Алиевичем Сюняевым. С некоторыми дальнейшими упрощениями у модели осталось, по сути, лишь два параметра — полная масса газового диска и знаменитый параметр α , описывающий вязкость вещества в диске.

После этого оставалось лишь заставить машину считать, меняя параметры от одного эксперимента к другому. Всего их было проделано чуть больше сотни.

Как выяснилось, планетные системы, хоть чем-то похожие на нашу, в вычислениях появляются очень редко.

Лишь в 6% случаев по истечении 500 миллионов лет эксперимент не сходился к одной из двух крайностей. Первая из них — множество «горячих юпитеров», хаотично обращающихся в непосредственной близости от звезды по сильно вытянутым орбитам. Вторая — ни одной гигантской планеты, такой же беспорядок в центре и никаких спокойных круглых орбит на почтительном от звезды расстоянии. Вместе с тем, именно наличие Юпитера на круговой орбите во многом стабилизирует нашу планетную систему, заодно защищая жизнь на Земле от бомбардировки шальными кометами и астероидами: могучее притяжение гигантской планеты за миллиарды лет в значительной степени очистило окрестности Солнца от таких объектов.

Система, действительно подобная Солнечной — в ней две гигантские планеты, напоминающие наши Юпитер и Сатурн, и несколько планет поменьше обращаются по круговым орбитам — получилась лишь в 1 случае из 100. Для этого требуется достаточно четкое соотношение между вязкостью и массой. Сделай диск чуть массивнее или менее вязким — и его наполнят



Три пути развития планетных систем. В случае слишком плотного диска (слева) образуется большое число гигантских газовых планет, которые быстро мигрируют к центральной звезде, превращаясь в «горячие юпитеры». В случае слишком разреженного диска (справа) образуется множество твердых планет, взаимодействие которых хаотизирует систему. Лишь при правильном совпадении параметров (в центре) появляется подобие Солнечной системы

«горячие юпитеры», чуть легче или вязче — и гигантских планет не останется вовсе.

Томмес и его коллеги пишут, что задним умом, после проведения эксперимента, несложно объяснить такой результат. В системе диск — планеты идет своего рода борьба между двумя компонентами. Аккреция вещества из диска движет планеты к центру системы, и если диск достаточно массивен, их финальная судьба — быть поглощенными звездой. В то же время планеты собирают на себя газ, одновременно смещаясь к центру системы, таким образом «выведают» сначала кольца, а потом и дыры в диске. Вопрос лишь в том, какой процесс идет быстрее. Если газ исчезает слишком быстро, то крупные планеты не образуются, если слишком медленно — все они превратятся в «горячие юпитеры». И лишь в случае примерного равенства двух сил одна-две гигантские планеты успевают сформироваться, но к тому времени газа, который заставил бы их смещаться к центру, уже не остается.

Тем не менее из этих результатов пока нельзя делать вывод, что Солнечная система «уникальна» или даже редка.

Во-первых, даже если это один случай на сотню, то помножив это число на десятки миллиардов похожих на Солнце звезд в Галактике, можно получить сотни миллионов планетных систем, похожих на нашу.

А во-вторых, исходного распределения параметров модели — массы диска и его вязкости, определяемой химическим составом и долей пыли в нем, — никто не знает. Никто не может дать гарантии, что по множеству каких-то не известных нам пока причин условия не складываются благотворно именно для образования систем, подобных Солнечной. Так что у «скучной» работы по измерению химического состава и масс облаков газа, окружающих далекие молодые звезды, появилась неожиданно актуальная составляющая.

