

Л. Ксанфомалити, Доктор физико-математических наук,
(Институт космических исследований РАН, Москва)

НАУКА И ЖИЗНЬ®

ПЛАНЕТАРНЫЕ СИСТЕМЫ ЗВЕЗД

Часть 1

Поиск других планет и жизни вне Земли, желательно разумной и подобной нашей, — эти всеобъемлющие задачи явно или неявно лежат в основе развития астрономической науки и научного знания со времен античных философов. В наши дни вполне здоровый интерес к названным проблемам многие слишком нахмуренные специалисты склонны как-то скрывать, официально считая их, по-видимому, не вполне научными. По признанию ведущих сотрудников американского Института SETI (Института поиска внеземных цивилизаций), подобный интерес кое-кому из них даже стоил карьеры. Иногда у представителей «настоящей» астрофизики вообще проскальзывает снисходительный взгляд на планетные исследования: что вы там, со своими примитивными планетами, то ли дело наши черные дыры! Забывают, наверное, «настоящие» астрофизики, что жизнь, включая их самих, могла таинственным образом возникнуть и эволюционировать только на планете. Стоит добавить все же, что на конгрессах Международного астрономического союза, которые раз в три года собирают астрономов всего мира, внепрограммные доклады о поисках внесолнечных планет и жизни за пределами Земли идут при переполненных «настоящими» астрофизиками многотысячных залах.

Попытки человека понять окружающий мир всегда начинались со звездного неба над головой, и все, что ученые знают (а правильнее сказать — предполагают) о возникновении жизни, связано только с планетой Земля. Сегодня, когда накопленные столетиями знания содержат ответы на многие вопросы, когда новые астрофизические методы позволяют исследовать не только горизонт Вселенной, но и, возможно, даже горизонт времени, не менее важным (и даже сенсационным) научным событием стало открытие планетных систем у других звезд. Почти сто лет казалось, что это открытие вот-вот произойдет, публиковались многочисленные исследования и проводились специальные конференции, но состоялось оно только в 1995 году. Поразительно, что открытию внесолнечных планет мешали, как это будет видно из дальнейшего, именно те сведения, которые ученые получили в ходе исследования нашей Солнечной системы и которые считались исходными также для поиска других планетных систем.

У поиска внесолнечных планет (экзопланет, как их еще называют) несколько аспектов: это новые фундаментальные знания о происхождении мира, в котором мы живем; новые представления об эволюции нашей собственной планеты, природа которой далеко не застыла в своем развитии и совсем не

так однозначна и устойчива, как это когда-то представлялось; наконец, это поиск миров с теми самыми таинственными условиями, в которых когда-то возникла (в единственной известной нам аминокислотно-нуклеиновой форме) и эволюционировала жизнь на нашей планете.

Сложность механизмов образования и эволюции планет такова, что одинаковые исходные условия вовсе не обязательно ведут к идентичным результатам. Подобно тому как нельзя предсказать, куда покатится камень по разветвленной канавке или на какую сторону острова течение вынесет плот, природа предлагает большой набор различных путей для развития изначально мало различающихся планетных тел. Хорошо известный пример — планета Венера, совершенно непохожая на Землю (хотя удалось узнать это только в наши дни). Что же касается других планетных систем, то их разнообразие проявляется даже в самой их структуре.

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ВСЕГДА СЧИТАЛОСЬ КЛАССИКОЙ АСТРОНОМИИ

В XX веке отправной точкой в поиске других планетных систем считалась хорошо изученная структура Солнечной системы. Ближе к центральной звезде, Солнцу, располагаются четыре планеты земного типа: Меркурий, Венера, Земля с Луной и Марс. Все они имеют высокую среднюю плотность, 4-5,5 г/см³, и, за исключением Меркурия и Луны, обладают атмосферами. Их удаленность от Солнца (в расстоянии от Земли до Солнца, равном 150 млн км, которое принято за астрономическую единицу и называется а.е.) составляет от 0,4 до 1,5 единицы. Планеты земного типа находятся в центральной части Солнечной системы. Гораздо дальше, от 5 до 30 единиц, располагаются планеты-гиганты, разделенные значительно большими расстояниями. Они устроены совсем иначе, чем Земля, и имеют газо-жидкую природу. Эту группу возглавляет Юпитер, масса которого в 318 раз больше массы Земли и составляет одну тысячную (точнее, 1/1047) массы Солнца. Все гиганты имеют кольца разной плотности и огромное количество лун: у Сатурна их больше 60. Между орбитами Марса и Юпитера находятся орбиты сотен тысяч малых планет, имеющих небольшие размеры, преимущественно около сотни километров. Размеры трех из них близки к 500 км, а Цереры — к 1000 км. Размеры многих тысяч других — всего несколько километров, а то и сотни метров. Между орбитами гигантов также расположены орбиты малых тел (так называемая группа Кентавров).

Начиная с расстояния 39 а.е. располагаются орбиты транснептуновых объектов (ТНО). Их возглавляет двойная планета Плутон-Харон, которую в августе 2006 года наиболее шумная часть делегатов Генеральной Ассамблеи Международного астрономического союза в Праге лишила звания планеты (вряд ли Плутон с Хароном рыдают от горя, но бурных заседаний было немало). Логика такого решения в том, что уже обнаружено много других ТНО, в том числе недавно открытый 2003 UB313, который почти вдвое больше Плутона. По-видимому, пояс ТНО тянется до 60 а.е. и дальше. Еще одна группа «населения» Солнечной системы — кометы — имеет типичные размеры небольших астероидов и находится на очень вытянутых орбитах с перигелием (самой близкой по отношению к Солнцу точкой орбиты) у Солнца, часто даже ниже орбиты Меркурия, и с афелием (максимальным удалением) порядка 1000 а.е. (для долгопериодических комет). Здесь подобные тела образуют Облако Оорта, откуда они иногда (или периодически) отправляются к Солнцу. Причем в отличие от планет, орбиты которых располагаются примерно в одной плоскости, близкой к плоскости орбиты Земли (эклиптике), кометы могут прийти откуда угодно. Остается сказать, что все планеты и спутники вращаются вокруг своей полярной оси, причем, если их орбита низкая, как у Меркурия или как у галилеевых спутников Юпитера, их вращение так или иначе синхронизируется с обращением. Скорости орбитального движения планет очень различны, от 50 км/с у Меркурия и 30 км/с у Земли до 2 км/с у ТНО, в соответствии с третьим законом Кеплера.

Если в пределах планетных систем расстояния удобно обозначать в а.е., то для расстояний до Облака Оорта, а тем более до звезд, астрономы предпочитают парсек (пк — расстояние, которое свет проходит за 3,26 года) или просто световой год. А 1 а.е. — это всего 8 световых минут.

Поиски других планетных систем в XX веке опирались на изложенные представления о Солнечной системе. Ученые рассчитывали, как она должна выглядеть с расстояния, скажем, 5 пк, соответствующего удалению ближайших звезд. Получалось, что случай почти безнадежный — свет звезды замаскирует присутствие планет. Можно попытаться обнаружить только Юпитер, да и то при очень больших ухищрениях. Так как орбитальный период Юпитера составляет 12 земных лет, а Сатурна почти 30, план поисков должен был предусматривать постоянные наблюдения выбранных звезд в течение 10-30 лет...

ПОИСКИ ПЛАНЕТ У ДРУГИХ ЗВЕЗД В XX ВЕКЕ

Первой открытой экзопланетой стала планета у звезды 51Peg в созвездии Пегаса. Фактически планета у звезды 51Peg была обнаружена в 1994 году, но официально объявили об этом лишь осенью следующего года. Сообщения об открытии планет появлялись и раньше, в течение почти всей второй половины XX века, но неизменно опровергались. Справедливости ради начать следует с классической (и самой долгой) истории поиска гипотетических планет у звезды Барнарда («летающей»), открытой в 1916 году.

Звезда Барнарда — четвертая из ближайших к Солнцу звезд. В астрофизике звезды классифицируют по типам, в зависимости, главным образом, от их температуры. Солнце — звезда класса G2, с температурой излучения около 6000 К. Звезда Барнарда — сравнительно холодный и маломассивный красный карлик позднего класса M5V. Сам первооткрыватель — Э. Барнард — был охотником за кометами, причем не бескорыстным: правительство США тогда платило премии за находки комет. Свою звезду в 1916 году он открыл случайно, благодаря главной ее особенности — большому видимому движению по небу, около 10 угловых секунд в год. Позже другой исследователь из США, П. Ван де Камп, заинтересовался

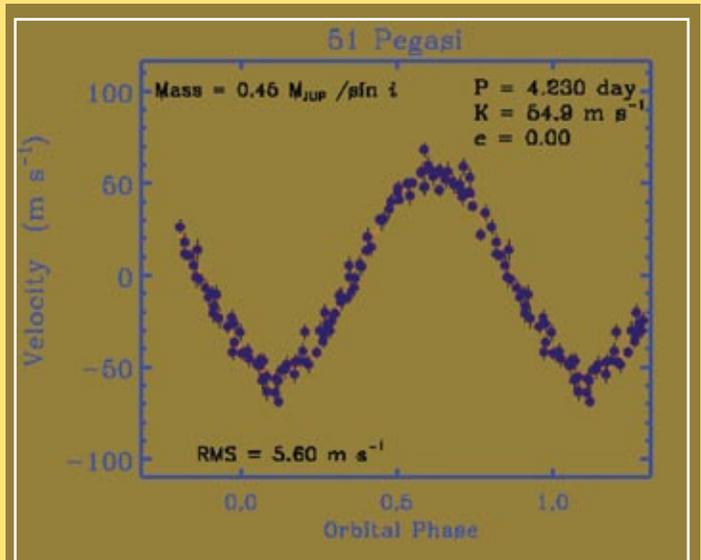


График лучевой скорости 51 Пегаса. Амплитуда изменения скорости планеты — около 55 метров в секунду, а период — всего 4.2 дня

звездой Барнарда и не прекращал ее исследования более полувека. Движение звезды он начал изучать в 1938 году, используя астрометрический метод (точное определение координат объекта и его положения относительно других звезд), и, накапливая наблюдательный материал, настойчиво продолжал эту работу до 1980-х годов. Ван де Камп использовал фотопластинки своих наблюдений на 61-сантиметровом телескопе американской обсерватории Спруул, основную часть которых он провел в 1950-1978 годах. По результатам астрометрического анализа 2400 снимков Ван де Камп нашел, что след звезды Барнарда на фотопластинке образует слабо волнистую линию с размахом колебаний до 0,0005 мм, что соответствует периодическому смещению звезды на 0,04 угловой секунды. Такие колебания могли бы возникать под действием обращающейся вокруг звезды массивной планеты, так как в действительности оба тела обращаются вокруг общего центра масс, который, конечно, отстоит от центра звезды гораздо ближе, чем от центра планеты (во столько же раз ближе, во сколько масса звезды больше массы планеты). В таком же равновесии находятся, скажем, бабушка и внучка, качающиеся на противоположных концах доски. Чтобы никто из них не перевешивал, опора доски (барицентр) должна быть значительно ближе к массивной бабушке, чем к легкой внучке. Звезда и планета не качаются, а обращаются вокруг барицентра, но его положение определяется тем же условием. Чем массивнее планета и чем меньше масса звезды, тем заметнее должны быть периодические колебания в движении последней. Так как звезда Барнарда быстро движется, отдельные точки ее последовательных положений складываются в слегка волнистый след, считал Ван де Камп.

Из данных Ван де Кампа следовало, что возмущения в движении звезды вызывает планета с массой Юпитера (или больше) и примерно с его же орбитой. В дальнейшем де Камп говорил уже о двух планетах, с периодами 12 и 26 лет. Популярность исследований де Кампа росла, чему способствовало и то, что он умел хорошо владеть аудиторией. Однако некоторые скептики относились к его данным недоверчиво.

Н. Вегман, один из близких коллег де Кампа, провел независимые измерения, колебаний в положении звезды Барнарда не обнаружил, но публиковать свои результаты не стал. В 1971 году Д. Гейтвуду, который тогда был аспирантом Аллеганской обсерватории (США), предложили исследовать движения звезды Барнарда в качестве диссертационной темы. Компьютеры

тогда только входили в астрономическую практику, но Гейтвуду удалось разработать новый астрометрический прибор — многоканальный компьютеризированный фотометр, который в значительной мере исключал возможные ошибки измерений. Для надежности измерения проводились независимо в двух обсерваториях. Когда накопилось достаточное количество снимков, запустили программу их обработки. Вокруг громоздкого грохочущего принтера собрались все участники работы. «Это был странный случай, все произошло так быстро, за минуты, — рассказывал Гейтвуд. — Мы смотрели на выползавшую из принтера распечатку, причем не знали, какая из звезд — Барнарда. И вот появилась звезда с возмущениями около 30 тысячных секунды дуги. Я оживился. Бог мой, вот она! Мы нашли! Фантастика! Мы столпились, разглядывая, обсуждая, и тогда... тогда я увидел номер звезды. Это была не звезда Барнарда! Это была двойная звезда с возмущающим компаньоном». Далее появился совершенно ровный, без какой-либо волнистости, след звезды Барнарда.

Де Камп до конца своих дней настаивал на существовании планет у звезды Барнарда. Он умер в 1995 году, в год, странно совпавший с открытием первой подлинной экзопланеты у звезды 51Peg.

Наряду с астрометрией исследователи рассматривали и другие возможные методы поиска планет. В обзорах 80-х годов XX столетия приводились вполне обоснованные оценки возможностей методов лучевых скоростей (о нем ниже) и наблюдений внесолнечных планетных тел в оптическом и в инфракрасном диапазонах.

Метод прямой фотометрической регистрации экзопланет по отраженному ими свету в 1970-1990-х годах обсуждали многие исследователи. Автор в одной из своих работ 1986 года рассматривал выполнимость такой регистрации планет, исходя из самых-самых предельных технических возможностей. Принималось, что планетная система подобна Солнечной, наблюдаемой с расстояния 5 пк. Отношение света, отраженного планетой, к свету Солнца очень мало и составляет для Венеры и Юпитера одну миллиардную, а для Земли еще в четыре раза меньше. Идеальная оптическая система космического телескопа диаметром 2,6 метра с идеальным приемником могла бы создать фототок в 10-20 фотоэлектронов в секунду от света Юпитера. В принципе такой ток можно измерить, но шум регистрации фототока от самой звезды превышает эти значения в 10 тысяч раз, поэтому система должна быть очень сложной. Расчеты показывали, что задача требует длительности экспозиции не менее 10 часов.

Технические сложности метода прямой регистрации были причиной скептического к нему отношения. Теоретически большими преимуществами обладает радиометрический метод, который отличается от фотометрического только диапазоном длин волн. Фокус здесь заключается в использовании особенностей планковской кривой излучения абсолютно черного тела. Регистрируется не отраженный свет, а собственное инфракрасное излучение планеты в диапазоне 25-50 мкм. Длина волны выбирается правее максимума планковской кривой для планеты, где выигрыш получается наибольшим. К тому же, в отличие от оптической фотометрии, тепловое излучение исходит от всей поверхности планеты, а не только от освещенной стороны. С учетом свойств уравнения Планка отношение интенсивности инфракрасного излучения Юпитера и Солнца получается в 150 тысяч раз больше отношения их яркостей в оптическом диапазоне. Но реальный выигрыш, по техническим причинам, не превышает 100 раз.

Эффективность метода прямой регистрации (в оптическом диапазоне) все-таки была доказана наблюдениями планеты у так называемого коричневого карлика 2M1207. Это особый случай, о котором рассказывается ниже.



Положение звезды Барнарда на нашем звездном небе. Находится в созвездии Змееносца на расстоянии 1,828 пк (5,96 светового года) от Земли. Красный карлик спектрального класса M5V; видимая звездная величина 9,5m, светимость — 1/2300 солнечной. Масса звезды Барнарда равна 17% массы Солнца

ПЛАНЕТНАЯ СИСТЕМА У НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ PSR B1257+12

Впреки ожиданиям первая внесолнечная планетная система была обнаружена не у нормальной звезды, а у пульсара (нейтронной звезды). В 1991 году радиотелескоп Аресибо (Пуэрто-Рико, США) был остановлен на частичный ремонт. 300-метровая параболическая антенна Аресибо неподвижна, поэтому основной режим работы этого радиотелескопа — пассивный, то есть излучение радиоисточников регистрируется, когда благодаря вращению Земли они проходят через его неподвижную диаграмму направленности. А. Вольцшан использовал остановку плановых работ на радиотелескопе для поиска пульсаров, расположенных высоко над плоскостью Галактики. Вскоре ему удалось обнаружить слабый пульсар PSR B1257+12, импульсы которого повторяются каждые 6,2 миллисекунды. Пульсар далекий, он находится на расстоянии 1300 световых лет. (Пульсары — это быстровращающиеся нейтронные звезды с двумя узкими лучами, как у прожектора маяка. Они удобны для исследования межзвездного пространства, и существуют специальные математические модели, которые позволяют получить сведения о межзвездной среде именно путем обработки данных об излучении пульсара). Но с обработкой данных PSR B1257+12 возникли проблемы. Вскоре, чтобы подтвердить наблюдения Вольцшана, Д. Фрейл в радиоастрономической обсерватории Сокорро в Нью-Мексико провел независимые измерения, но получил такие же результаты.

Немного раньше А. Лин выступил в печати с сообщением об открытии планеты у другого пульсара, PSR B1829-10. Его статья в журнале «Nature» появилась 25 июля 1991 года вместе с вынесенным на обложку ярким заголовком: «Первая планета вне нашей Солнечной системы». У Лина тоже были проблемы с обработкой данных, но, когда он включил в модель пульсара периодическое воздействие, создаваемое гипотетической массивной планетой, задача была решена. Период планеты, однако, оказался странно равным точно половине земного года. Впрочем, мало ли какие бывают совпадения. Вольцшан и Фрейл тоже включили в обработку такое же периодическое

воздействие от массивной планеты. Однако осенью того же года на конференции, где были представлены доклады Лина и Вольцшана, Лин мужественно признался, что с новой программой обработки присутствие планеты у пульсара PSR B1829-10 не подтвердилось. Ошибку вызывало, по-видимому, годовое движение Земли.

В 1993 году Вольцшан объявил, что у пульсара PSR B1257+12 оказались три планеты, которые удалены от него в том же отношении 0,39/0,72/1, что и расстояния от Солнца Меркурия, Венеры и Земли. Массы планет довольно значительны: 0,2, 4,3 и 3,6 земной, а периоды обращения составляют 25, 67 и 98 суток (в дальнейшем заключение о существовании первой планеты оспаривалось).

По-видимому, планеты у пульсара представляют собой весьма экзотические образования. Они подвержены действию интенсивных потоков электронов, позитронов и гамма-излучения, периодически падающих на планеты с указанным периодом (то есть с частотой 160 Гц). После первых же публикаций возник вопрос: откуда там взялись планеты? Нейтронная звезда — продукт взрыва обычной звезды в конце ее жизни. Предположение, что планеты у звезды когда-то существовали и сохранились после ее взрыва как сверхновой, не проходит по нескольким причинам. После взрыва сверхновой планеты должны были бы оказаться внутри газовых оболочек звезды. Но даже если бы они и сохранились, пусть в обожженном виде, удержаться на своих орбитах они бы не смогли: после взрыва масса звезды и ее тяготение резко уменьшаются, в результате сохраняющегося момента орбиты планет катастрофически увеличиваются и планеты покидают звезду.

Возможное объяснение природы планет пульсара PSR B1257+12 связано именно с его быстрым вращением, хотя он должен быть достаточно старым (и медленным). Предполагается, что рядом с ним существовала другая звезда, вещество которой постепенно перетекало к пульсару, ускоряя его вращение, а остатки могли конденсироваться в планеты. Ныне такой звезды нет.

В 1999 году подтвердилось наличие планеты с массой порядка пяти масс Юпитера у еще одного пульсара, PSR B1620-26. Среди возможных кандидатов на наличие планет есть и другие пульсары.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ПЛАНЕТ У СОЛНЕЧПОДОБНЫХ ЗВЕЗД

Число открытых на 2006 год экзопланет превышает двести. Практически все они найдены одним и тем же очень сложным методом, который, не вникая в подробности, все же можно объяснить достаточно просто.

Все звезды участвуют во вращении Галактики. Но наряду с этим каждая звезда имеет собственные, случайные скорости, которые относительно Солнца могут достигать нескольких десятков километров в секунду. Если звезда приближается к наблюдателю или удаляется, возникает эффект Доплера, когда световые волны как бы сжимаются или растягиваются вдоль луча, смещая весь спектр звезды в синюю или красную сторону соответственно. Измерения смещения линий в спектре позволяют определить лучевые (радиальные) скорости звезд. Разумеется, составляющую скорости, которая вдоль луча не направлена, таким методом измерить нельзя.

Представим теперь, что у звезды есть массивная планета, вместе с которой они обращаются вокруг барицентра. Движение звезды по такой кеплеровской орбите наложит на доплеровскую составляющую лучевой скорости еще одну, переменную составляющую, которая обычно намного меньше полной лучевой скорости и выдает присутствие планеты. Третий закон Кеплера связывает орбитальное расстояние планеты и период ее обращения с массой звезды (и планеты). Масса звезды солнечного типа приблизительно известна заранее из ее спектрального класса. Как видно из рисунка, измерения позволяют определить массу планеты только с точностью до синуса угла i , причем, если планетная система звезды расположена так, что плоскость орбит перпендикулярна к направлению на

наблюдателя, измерения станут невозможными. Для нахождения доплеровской составляющей используются доплеровские сдвиги положения многочисленных спектральных линий звезды, главным образом в области 500-600 нм. Сдвиг линий звезды определяют относительно спектральных линий лабораторного источника. Сам сдвиг, который возникает благодаря кеплеровским скоростям, микроскопический, и его измерения больше относятся к искусству, чем к науке.

Предельной возможностью метода, существующего уже около ста лет, до 70-х годов XX века считалось нахождение скоростей примерно 300-500 м/с. Попытки обнаружить планеты по признаку периодического изменения знака кеплеровской составляющей, возникающей при обращении звезды вокруг барицентра, были совершенно бесперспективны. Кеплеровские (орбитальные) скорости звезд очень малы. Например, в Солнечной системе кеплеровская скорость Солнца, возникающая под действием притяжения Юпитера, всего 12,5 м/с, Сатурна — 2,7 м/с, а Земли или Венеры — менее 0,1 м/с. Поэтому для поиска экзопланет понадобилось при-



Пульсар PSR B1257+12 и планета PSR B1257+12 C — ее масса равна 3,9 земных масс. Это пока наиболее близкая по массе к Земле из найденных экстрасолнечных планет (иллюстрация NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, SSC)

думать и создать аппаратуру в 100-200 раз более чувствительную.

Второй главный метод поиска — астрометрический, о котором уже говорилось выше. Здесь достигнута точность выше 1 микросекунды дуги, причем есть перспективы улучшения метода. Теоретически существует не менее пяти физических методов поиска, из которых здесь рассматриваются только метод лучевых скоростей (МЛС) и транзиты.

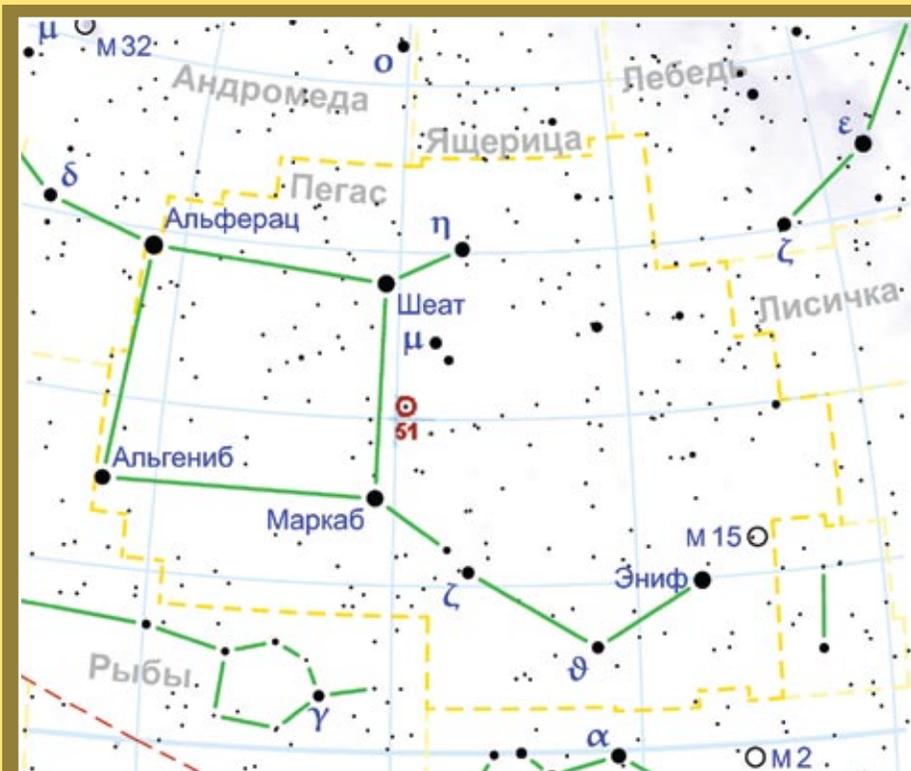
И МЛС, и астрометрический метод тем эффективнее, чем больше масса возмущающего тела (планеты). При этом колебания в положении звезды, которые ищет астрометрия, тем больше, чем дальше гипотетическая планета. Зато кеплеровская составляющая скорости звезды становится ничтожно малой, а наблюдения растягиваются на десятилетия. МЛС, наоборот, тем эффективнее, чем ближе возмущающее тело к звезде. Естественно, для близкого тела необходимая длительность наблюдений получается намного меньшей. До 1995 года исследователи неизменно исходили из массы и периода Юпитера и ничего другого не ожидали.

Стремясь улучшить чувствительность метода лучевых скоростей, в начале 1990-х годов несколько групп в разных странах одновременно занялись его совершенствованием. В 1988 году в Канаде Б. Кэмпбелл и его коллеги сумели зарегистрировать лучевые скорости около 15 м/с. Они сравнивали положение линий в спектре звезды с наложенным на него лабораторным спектром паров фтористого водорода, который, однако, очень неудобен для работы из-за высокой токсичности.

В Швейцарии, в Женевской обсерватории, М. Майор и Д. Квеллоц (который тогда был аспирантом Майора) разработали другой спектрометр, где был использован торий-аргоновый стандарт со световодом. В МЛС-наблюдениях во французской высокогорной обсерватории в Верхнем Провансе они достигли на нем предельной чувствительности 13 м/с и в 1994 году приступили к поиску планет у 142 звезд солнечного типа из сравнительно близкого окружения Солнца, в том числе у звезды 51Peg, находящейся на расстоянии 15 пк.

В Сан-Францисском университете в США группа Д. Марси начала планомерный поиск планет еще в 1987 году и к 1995 году уже имела в руках многолетний наблюдательный материал. По предложению П. Батлера, который тогда, как и Квеллоц, был аспирантом, фтористый водород в стандарте заменили парами йода (в дальнейшем йодный стандарт в астрономии стал очень «модным»). В газовой фазе йод имеет много спектральных линий как раз в области наиболее удобных линий звезд — 500-600 нм. Но именно из-за многочисленности линий йодного стандарта требуются очень трудоемкая обработка результатов и применение мощного компьютера.

По расчетам, чувствительность нового метода должна была быть высокой и составлять 10 м/с, что легко достигалось в кратковременных тестах. Однако, хотя в ходе ночных наблюдений типичная ошибка результатов составляла всего 5-10 м/с, наблюдения от ночи к ночи давали разброс от 20 до 100 м/с. Хорошие результаты, полученные Д. Марси с коллегами накануне, в следующую наблюдательную ночь казались ошибочными. Шесть лет они дорабатывали и совершенствовали программы обработки. Наконец, в 1994 году их коллега С. Вогт



Положение звезды 51Peg в созвездии Пегаса

заменил оптику спектрометра в Ликской обсерватории, где выполнялись наблюдения, и сразу же удалось довести порог до 3 м/с. Это вполне позволило бы воображаемому наблюдателю, удаленному на 10 пк (30 световых лет), обнаружить Юпитер по его гравитационному влиянию на Солнце. Однако накопленные материалы требовали нескольких лет компьютерной обработки. Поскольку Марси и Батлер с коллегами знали, что период Юпитера составляет 12 лет, они, похоже, особенно не торопились. Но все же, чтобы ускорить работу, число регулярно наблюдавшихся звезд было сокращено со 120 до 25. Среди отброшенных была и звезда 51Peg, потому что в Йельском каталоге ярких звезд она значилась как нестабильный субгигант и относилась к особому виду звезд. В действительности 51Peg — спокойная звезда солнечного типа, спектральный класс G2.5. Эта ошибка в каталоге для Марси и Батлера стала роковой.

Несколько других групп исследователей тоже накапливали материал, исходя из того, что обнаружима планета с массой не менее Юпитера и с периодом 12 лет.

Метод швейцарских исследователей М. Майора и Д. Квеллоца позволял получить результат сразу. Их техника была отлажена, однако уже через несколько месяцев после начала работы возникли проблемы с этой самой 51Peg. Всего за несколько ночей значительная часть лучевой скорости звезды меняла знак, изменяясь на 60 м/с. М. Майор предположил, что причина может быть в неисправности спектрометра. Но уже в декабре 1994 года в руках у Майора и Квеллоца оказалась синусоидальная кривая изменения кеплеровской составляющей лучевой скорости 51Peg с периодом (годом планеты) всего 4,2 дня. Исследователи были в затруднении. По массе такая планета должна быть очень большой, чем-то вроде Юпитера, но находится на орбите в восемь раз ближе к звезде, чем даже Меркурий к Солнцу (около 1/20 а.е.), и с периодом 1/1000 периода Юпитера. В существование таких планет никто тогда не мог поверить.

Желая проверить свое открытие еще раз, Майор и Квеллоц решили выдержать характер и не публиковать свои данные

сразу. В марте 1995 Пегас ушел за Солнце, и до возобновления наблюдений в июле оставалось четыре месяца. Майор и Квелоц рассчитали, какой должна быть будущая фаза кеплеровской составляющей, если это действительно планета. И вот, в июле 1995 года, 51Peg появился точно с расчетным значением кеплеровской лучевой скорости. Еще через несколько ночей наблюдений сомнений уже не оставалось: найдена первая планета, обращающаяся вокруг нормальной звезды. Но планета, по меркам Солнечной системы, совершенно необычная: намного ближе к звезде, чем кто-либо мог предположить. «Поэтому было очень, очень трудно убедить себя, что это — планета, а не пульсации звезды, или ее вращение, или что-то еще», — говорил М. Майор. Тем не менее был куплен и торжественно съеден большой торт и срочно подготовлена статья в печать.

В дальнейшем именно с утверждением, что у 51Peg наблюдаются пульсации звезды, а не экзопланета, выступил Д. Грей. Его критика не подтвердилась, так как периоды собственных колебаний звезд значительно короче, а главное — не могут иметь столь высокой стабильности.

Осенью 1995 года на конференции в Италии Майор и Квелоц доложили о своем открытии, о необычной близости планеты к звезде и ее большой массе. Планеты стали называть по имени звезды с добавлением буквы b для первой найденной планеты, с для второй и т. д. Как уже говорилось, МЛС-измерения фактически дают оценку не самой массы M, а величину Msini. Насколько оценка массы экзопланеты отличается от ее реальной массы, зависит от угла i, который образует нормаль к плоскости ее орбиты с направлением на наблюдателя; для 51Peg b масса составляет, скорее всего, половину массы Юпитера. Из-за близости к звезде температура планеты очень высока и превышает, вероятно, 1000 К (в дальнейшем этот тип планет получил название «горячий юпитер»). Работа была представлена в журнал «Nature». Открытие вызвало сенсацию, причем критики тут же отметили, что такая планета по целому ряду причин просто не могла образоваться.

Что же касается Д. Марси и П. Батлера, вести с конференции застали их врасплох. У них шли наблюдения, и последующие четыре ночи они посвятили столь опрометчиво оставленной ими 51Peg. Вскоре сомнений не осталось: швейцарцы правы. Огорчению Марси и Батлера не было границ — столько лет работы, а первенство досталось другим. Но вскоре они уже оказались в центре внимания американской прессы и телевидения. Появились неожиданные коллеги, которые, по их словам, тоже обнаружили планеты у 51Peg, даже целых две, но не смогли объяснить, как они это сделали. Постепенно швейцарцы вообще как-то отошли на второй план, лишь в конце газетных и других публикаций упоминалось, что швейцарские исследователи тоже обнаружили экзопланету.

Но Майор и Квелоц были вынуждены молчать. Хотя публикация в «Nature» и закрепляет приоритет, но правила редакции запрещают разглашать содержание находящейся в печати статьи. На все обращения журналистов они мрачно отмалчивались, а лавры открытия доставались другим. «Это была полностью вина «Nature», — говорил Квелоц. — Мы были в очень трудном положении, поскольку хотели говорить, хотели рассказать о том, что сделали, но не могли из-за запрета «Nature». Была масса звонков от журналистов, но все что мы могли сказать, это — извините, не можем ответить. Может быть, спросите кого-либо еще».

Марси и Батлеру срочно предоставили время на мощных компьютерах. За последующие полгода они обработали накопленные за восемь лет материалы о 107 звездах. Им сразу же удалось выделить шесть звезд-кандидатов, причем одну из них, в созвездии Лебедя (16Cyg B), одновременно нашла группа У. Кохрана (США). Экзопланета у 16Cyg B оказалась одной

ГЛОССАРИЙ

Парсек

Парсек (пк, pc) — расстояние, на котором звезда при ее наблюдении с противоположных точек диаметра земной орбиты изменяет свое видимое положение (параллакс) на 1 угловую секунду. Или, что то же самое, расстояние, с которого земная орбита видна под углом 1 секунда. 1 пк = 206 265 а. е. = 3,26 св. года = $30,857 \cdot 10^{12}$ км.

Законы Кеплера

Законы Кеплера — три закона, описывающие невозмущенное движение планет. Сформулированы немецким астрономом И. Кеплером в начале XVII века.

1-Й ЗАКОН. Орбита планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Кометы и космические аппараты могут двигаться по гиперболам и параболам, в фокусе которых находится центр притяжения.

2-Й ЗАКОН. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади, то есть скорость планеты возрастает при ее приближении к Солнцу (максимальна в перигелии) и убывает при удалении (минимальна в афелии).

3-Й ЗАКОН. При движении двух планет по эллиптическим орбитам вокруг Солнца квадраты их обращения относятся как кубы больших полуосей их орбит. Формулировка подразумевает, что масса планет пренебрежимо мала по сравнению с массой Солнца.

Галилеевы спутники

Галилеевы спутники — четыре самых крупных спутника Юпитера — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто, открытые в 1610 году итальянским физиком и астрономом Галилео Галилеем при помощи сконструированного им телескопа. По своим характеристикам они ненамного отличаются от Луны (масса Луны $M = 7,350 \cdot 10^{22}$ кг, радиус $R = 1732,2$ км).

из первых среди планет с очень большим эксцентриситетом орбиты, больше подходящим комете. Вместе с тем в числе новых экзопланет оказалась также t Boo b, орбита которой имеет ничтожный эксцентриситет. Ее период («год») 3,3 дня, а вероятная масса — примерно четыре массы Юпитера. К родительской звезде она еще ближе, чем экзопланета 51Peg b. Забегая вперед, можно сказать, что дальнейшее совершенствование метода лучевых скоростей и его предельные возможности определяются главным образом тем, насколько нестабильны фотосферы звезд солнечного типа. В типичном благоприятном для МЛС случае беспокойства фотосферы составляют примерно 3 м/с, а предельные возможности самого метода ныне близки к 1,5 м/с.

В дальнейшем темпы открытий экзопланет нарастали. Появились новые коллективы исследователей, а среди экзопланет выделились несколько типичных групп. Уже на начало 2000 года было исследовано около 500 звезд солнечного типа, причем удалось обнаружить 32 экзопланеты. Треть среди них — объекты типа «горячий юпитер». К середине этого года общее число открытых экзопланет превысило 200. Отдельный их класс — это так называемые коричневые, или, правильнее, инфракрасные карлики.

(Окончание следует)

Л. Ксанфомалити, доктор физико-математических наук,
(Институт космических исследований РАН, Москва)

НАУКА И ЖИЗНЬ®

ПЛАНЕТАРНЫЕ СИСТЕМЫ ЗВЕЗД

Часть 2

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОНАВИГАЦИЯ

НАЙДЕННЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ НЕ ПОХОЖИ НА СОЛНЕЧНУЮ

На основании ограниченной статистики сегодня можно утверждать, что планетными системами (или одиночными планетами) располагают примерно четыре процента звезд, по спектральным свойствам близких к солнечному классу, от класса F7V (немного горячее Солнца) до K1V (холоднее его). Первое, что обращает на себя внимание, это очень близкое расположение орбит экзопланет к родительской звезде (см. рисунок). В верхней части рисунка показаны орбиты десяти экзопланет с минимальными большими полуосями, причем выдержаны относительные размеры орбиты и звезды, за диаметр которой условно принят диаметр Солнца (размеры этой группы звезд различаются мало). Масштаб схемы иллюстрирует стрелка вверху рисунка, равная половине большой полуоси орбиты Меркурия (0,2 а.е.). Угловой размер родительской звезды, наблюдаемой с этих экзопланет, лежит в пределах от $4,5^\circ$ до 12° (у Солнца всего $0,5^\circ$). Диаметры дисков планет на рисунке сделаны примерно пропорциональными их массам, $M \sin i$. Эксцентриситеты орбит этой группы планет очень малы, то есть орбиты практически круговые. В нижней части рисунка на такой же схеме приведены как пример относительные размеры пар звезда — орбита для более далеких объектов, 55Cnc и GJ86, с большими эксцентриситетами планетных орбит. Масштаб схемы задан орбитальными положениями Меркурия, Венеры и Земли.

Столь низкие орбиты «горячих юпитеров» стали вызовом существующим теориям образования Солнечной системы по целому ряду причин, прежде всего, потому, что образование планет-гигантов было возможно вдали от Солнца, там, где происходила конденсация воды и других летучих веществ с образованием льдов. Поэтому свойства экзопланеты 51Pegb вначале рассматривались как аномалия. Но последовавшие затем открытия других экзопланет заставляют предполагать, что аномалией может быть, скорее, сама наша Солнечная система.

Независимо от физики явления короткий период обращения, соответствующий близкому к родительской звезде положению планеты типа «горячих юпитеров», облегчает поиск возмущающего тела. Как уже говорилось, в свое время именно короткий период позволил обнаружить первую экзопланету (у звезды 51Peg).

Известен лишь один красный карлик (маленькая звезда с низкой температурой) с планетной системой. Спектральные классы звезд с найденными экзопланетами близки к солнеч-

ному, это звезды G-класса и поздних F-подклассов. Поначалу это казалось «космическим шовинизмом»: почему планеты присутствуют только у тех звезд, которые подобны нашей? Но тому есть несколько объяснений. У звезд более ранних подклассов F экзопланеты пока не обнаружены, что объясняется известными ограничениями метода лучевых скоростей в отношении требований к спокойствию фотосфер звезд, но вовсе не доказанным отсутствием у них планет (динамика их фотосфер более бурная). С другой стороны, и у звезд более позднего K-класса планетных систем найдено мало. Одна из причин заключается в том, что спектр средних и поздних K-подклассов настолько насыщен спектральными линиями, что существующий метод



Схема орбит некоторых экзопланет в сравнении с характерными расстояниями в Солнечной системе.

В верхней части рисунка масштаб указан половиной большой полуоси орбиты Меркурия, в нижней — орбитами Меркурия, Венеры и Земли. Примерно выдержаны относительные размеры звезды и орбиты

анализа спектрограмм их звезд затруднителен.

Обнаруженные планетные системы отличаются от Солнечной тем, что массивные планеты, «юпитеры», находятся в их центральной части. Но если проследить строение спутниковых систем самого Юпитера и других гигантов в Солнечной системе, то и там можно увидеть аналогичную структуру: крупные спутники находятся близко к планете, мелкие вдалеке. Поэтому существует даже гипотеза, что какое-то редчайшее событие было причиной, которая привела к необычной структуре Солнечной системы, например, сближение с нею другой звезды в период формирования планет.

ПЛАНЕТНАЯ СИСТЕМА μ And И ДРУГИЕ

Поначалу удавалось обнаружить лишь одиночные планеты. Первой системой с несколькими планетами стала ипсилон Андромеды (μ And). Первую из ее планет, μ And b, обнаружила группа Дж. Марси в 1996 году. Они заметили, что на кеплеровскую составляющую (около 70 м/с) наложена еще одна искаженная синусоида, с периодом 4,6 суток, которая постоянно обнаруживалась в наблюдениях. Это указывало на присутствие еще одной планеты, μ And c с массой $M \sin i = 0,68 M_{\text{Ю}}$ (массы Юпитера) на низкой орбите. Оказалось, что лучевая скорость звезды μ And за длительное время увеличивается примерно на 100 м/с, а затем на столько же уменьшается. После нескольких лет наблюдений стала видна другая правильная составляющая с периодом около 3,5 года. Отличие ее формы от синусоидальной указывает на большой эксцентриситет орбиты экзопланеты. Но после исключения составляющих с периодами 4,617 и 1308 суток остающийся разброс данных все еще примерно вдвое превышает ожидаемые ошибки. Поиск других скрытых планет вскоре позволил выявить еще один период, 241 сутки, также с большим эксцентриситетом. Массы планет, с точностью до $\sin i$, равны 0,68, 2,05 и 4,29 $M_{\text{Ю}}$, а большие полуоси (радиус орбиты) 0,059, 0,828 и 2,09 а.е. В Солнечной системе подобное распределение начинается с орбиты Венеры и кончается внутренней границей пояса астероидов. Поэтому систему μ And можно было бы считать похожей на Солнечную, если бы у планет μ And c и d не была так велика вытянутость (эксцентриситет) орбит — 0,24 и 0,31 соответственно.

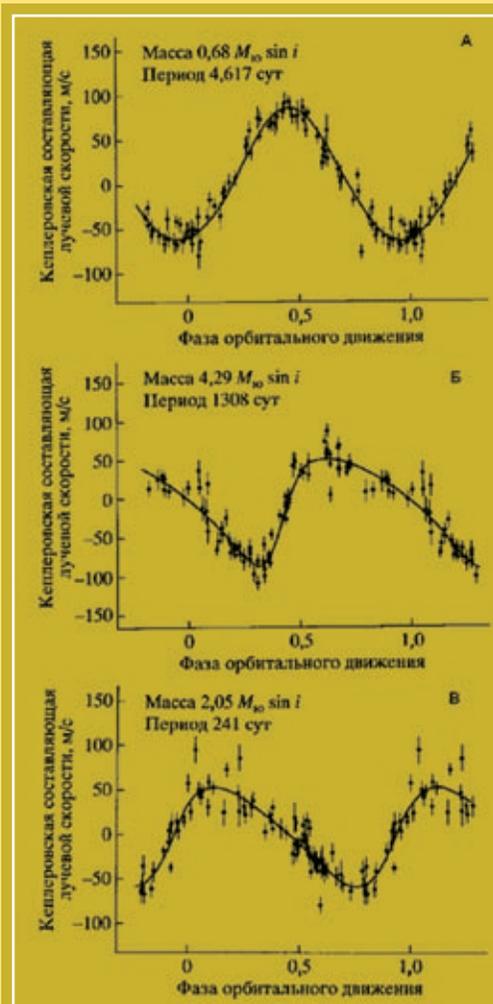
Число систем, у которых обнаружено несколько планет, постоянно воз-

Спектральные классы звезд. В астрономии звезды делят на классы. Основных классов 7, их обозначают латинскими буквами в таком порядке: O, B, A, F, G, K, M. Давно, когда эта классификация создавалась, астрономы думали, что она отражает жизненный путь звезды: очень горячие большие голубые звезды классов O и A, с температурой до 100 000 K, по мере расходования запасов энергии и остывания становятся слабыми маленькими красными карликами M, температура которых едва дотягивает до 2000 K. Но все оказалось гораздо сложнее. Что же касается классификации, она основывается на различиях в спектрах звезд, которые сами зависят от температуры звезды. Звезды классов O-B голубые, A-F - белые, G - желтые, K - оранжевые, M - красные. Классы делят еще на подклассы. Наше Солнце относится к классу G2 и считается, как это ни обидно, карликовой желтой звездой (его размер около 1,4 млн км)

растает и в 2006 году достигло 19. Система коричневого карлика GJ 876 имеет две планеты (причем с орбитальным резонансом 2:1), ипсилон Andromedae — три планеты, 55 Cancri — четыре, причем одна из них имеет массу, близкую к массе Нептуна (около 17 масс Земли).

Массы известных внесолнечных планет лежат в пределах от примерно 0,055 до более чем 10 $M_{\text{Ю}}$. Свойства метода лучевых скоростей (МЛС) таковы, что во всех найденных планетных системах легче всего обнаружить весьма массивные объекты, с массами в несколько масс Юпитера, причем на низких орбитах (с коротким периодом). Лишь в последние годы техника МЛС приблизилась к порогу кеплеровских скоростей 1 м/с, благодаря чему в 2004 году были обнаружены две экзопланеты с массами около 5% массы Юпитера. Такой результат возможен только для звезд с исключительно спокойной фотосферой.

Уже в первые годы исследований было установлено, что экзопланеты делятся на две большие группы по орбитальным признакам: «горячие юпитеры» на низких круговых орбитах с радиусом орбиты менее 0,15 а.е. и периодом менее 10 суток и более массивные (главным образом) объекты на высоких орбитах с периодом меньше 10 лет. Орбиты дальних планет принято характеризовать эксцентриситетом. Он оказался неожиданно большим или даже очень большим, вплоть до 0,9, что больше подходит для комет, а не для планет. Удалось установить, что планеты на низких круговых орбитах имеют сравнительно узкие пределы масс, в среднем 0,6-0,7 масс Юпитера, а тела на высоких эксцентрических орбитах различаются по массам очень значительно. Условная граница между круговыми короткопериодическими (несколько суток) и преимущественно эксцентрическими орбитами с периодом более 30 суток находится на расстоянии 0,15-0,16 а.е. от родительской звезды.



А. Кеплеровская составляющая μ And, создаваемая короткопериодической планетой μ And b (4,6 сут). Составляющие c и d вычтены. **Б.** Кеплеровская составляющая с периодом 1308 суток, создаваемая планетой μ And d. Вычтены составляющие b и c. **В.** То же для планеты с периодом 241 сутки. Вычтены составляющие b и d. (Из работы Батлера и др., 1999 г.)

МИГРАЦИЯ И ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ

Причина своеобразного «выбора» масс планет, которые обращаются по низким круговым орбитам, лежит, по-видимому, в механизме миграции, медленного сползания планет с высоких орбит, где они образовались, на низкие, околозвездные. Явление миграции предсказывали некоторые теоретические работы, но так как в Солнечной системе все крупные планеты всегда остаются на своих орбитах и никуда не сползают, теории миграции особого значения не придавали. Но теперь миграция, направленная к центральной звезде, с орбит, находящихся в зоне формирования планет-гигантов (на расстоянии 4-5 а.е.), остается единственным логичным объяснением происхождения низкоорбитальных планет, потому что здесь им просто не из чего возникнуть. Астрономы уже обнаружили несколько десятков гигантских газово-пылевых дисков в стадии формирования планет. Обширная зона вокруг звезды, радиусом до нескольких десятков а.е., свободная от пыли и газа, в них присутствует неизменно. Плотность излучения звезды здесь настолько высока, что пылевые частицы испаряются и улетают на периферию. Поэтому ответ на первый возникающий вопрос: где находится тот материал, из которого сформировались низкоорбитальные планеты? — мог быть только один: на расстоянии орбиты Юпитера (5 а.е.). Согласно теории, миграция возникает на ранней стадии формирования звезды и планетной системы и происходит достаточно быстро. Внесолнечные планеты предлагают теоретикам столько вопросов, что в пору всю теорию образования планет писать заново. А наивный вопрос: почему миграции нет в нашей Солнечной системе? — им лучше не задавать.

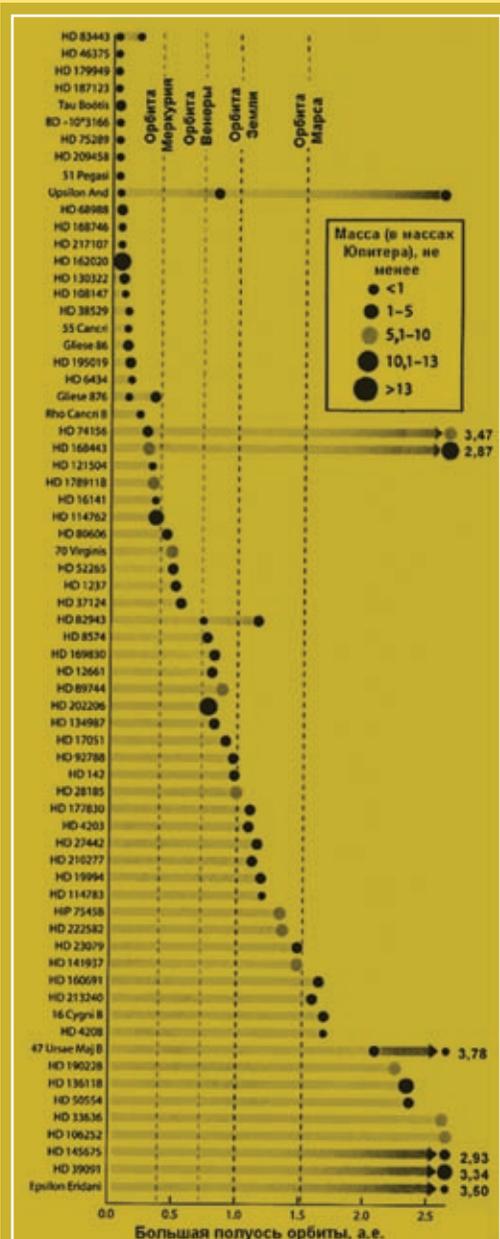
Благодаря высокой активности исследователей, использующих метод лучевых скоростей (МЛС), число еще не изученных звезд — кандидатов на обладание планетными системами в пределах сферы, скажем, 100 пк — быстро подходит к концу. Все это звезды из близкого солнечного окружения, а для далеких звезд МЛС не годится. Примерно полдюжины планетных систем найдено в ходе программы поиска так называемых гравитационных линз OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), на расстояниях более 1000 пк. Хотя число объектов, найденных OGLE, растет, они мало что смогут дать физике внесолнечных планет, поскольку у столь далеких слабых объектов даже тип компаньона (планета-гигант, коричневый карлик или звезда малой массы) определить очень сложно.

Некоторые группы орбит короткопериодических планет имеют пониженную или повышенную населенность по сравнению с остальными.

Группирование по орбитальным периодам также неравномерно и почему-то наиболее заметно вблизи периодов 3-5 суток. На этот интервал приходится достаточно много планет, чтобы считать наблюдаемый максимум неслучайным.

Подавляющее число экзопланет с большой полуосью орбиты более 0,16 а.е. имеет очень большие и даже гигантские эксцентриситеты орбит, которые в Солнечной системе встречаются только у комет и некоторых астероидов. Представим себе, что планета, подобная Сатурну, раз в десять лет сближается со своим солнцем, а затем уходит на окраины системы, за пределы видимости. Эксцентриситет, осредненный для 90 экзопланет на орбитах с большой полуосью более 0,15 а.е., составляет 0,32. Для объяснения происхождения высоких эксцентриситетов предложены различные механизмы, причем главными остаются гравитационное взаимодействие между образующимися планетами или взаимодействие планеты с протопланетным диском. Интересно, что в этом процессе больше образовавшихся гигантов выбрасывается в космос, чем остается у звезды. Согласно некоторым работам, в Солнечной системе когда-то могло быть до десяти юпитеров, которые в этом «небесном пинг-понге» усердно выталкивали друг друга. Что же касается эксцентриситета, то, если низкоорбитальные «горячие юпитеры» действительно мигрировали с высоких орбит, после завершения миграции они каким-то образом сумели от него избавиться. Это поразительное их свойство. Миграция каким-то образом выключилась, когда они приблизились к родительской звезде на минимальное расстояние.

Среди известных экзопланет все же есть несколько на высоких орбитах, но с малым эксцентриситетом, то есть почти на круговой орбите. Такова третья планета в системе звезды ρ 1 Cancri (55 Cancri), «горячий юпитер» с периодом 14,7 суток у которой был обнаружен в числе первых экзопланет. На кеплеровский компонент, так же как у μ And, накладывается медленный дрейф лучевой скорости, указывающий на присутствие другой планеты. Вторая планета с периодом обращения 44,3 суток имеет большой эксцентриситет орбиты. Третья планета привлекает внимание тем, что имеет орбитальный период около 14,7 года, весьма близкий к периоду Юпитера, большую полуось орбиты 5,9 а.е. (у Юпитера 5,2 а.е.) и, что наиболее интересно, сравнительно низкий эксцентриситет орбиты, 0,16. Масса планеты составляет по крайней мере 4,06 масс Юпитера (M_{Jup}). Среди других экзопланетных систем с эксцентриситетом орбиты менее 0,1 можно отметить планеты у звезды в Большой Медведице, 47 UMa b и c, с массами M_{sini} 2,41 и 0,76 M_{Jup} , и $a = 2,10$ и $3,73$ а.е. Для планеты 47 UMa c, положение которой примерно соответствует поясу астероидов в



Орбиты внесолнечных экзопланет, распределение орбит и минимальные оценки их масс. Положение планет в кратных системах за пределами поля рисунка показано значением большой полуоси орбиты (например, вторая планета системы HD 74156 имеет большую полуось орбиты 3,47 а.е.). (Из работы Кестлер, 2003 г.)

Солнечной системе, масса может быть даже меньше 1 *Мю*. Но таких объектов немного. В целом низкий эксцентриситет исключение, а не правило.

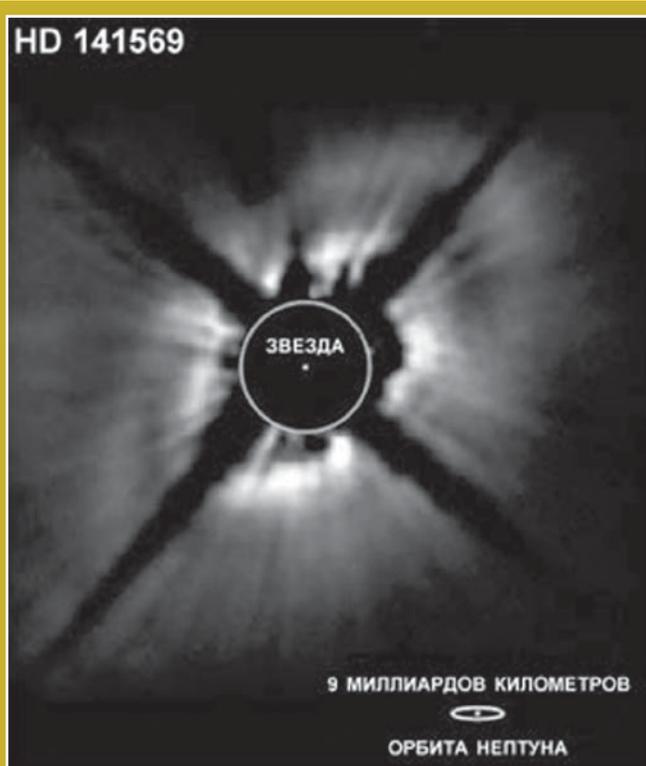
ТРАНЗИТЫ

Если наблюдатель случайно окажется примерно в плоскости кеплеровской орбиты, масса планеты будет определена точно, так как синус угла становится равен единице. В этом случае можно также наблюдать прохождения по диску звезды планеты (ее транзиты). Конечно, различить черный кружок на точечном диске звезды нельзя, но небольшое уменьшение потока света от звезды измерить можно. В работах 1985 года, опубликованных накануне открытия первого короткопериодического «горячего юпитера» (51 Peg b), указывалось, что перспективы обнаружить гипотетические внесолнечные планеты по их транзитам сомнительны. Авторы исходили из того, что не только вероятность благоприятного для наблюдения транзитов положения плоскости орбиты низка (скажем, для пары Солнце — Юпитер вероятность равна 0,0006), но и само явление происходит исключительно редко (например, исходя из периода обращения Юпитера в Солнечной системе, 1 раз в 12 лет). О существовании низкоорбитальных «горячих юпитеров» никто не подозревал, а у них вероятность оказаться в плоскости наблюдения транзитов гораздо выше, вплоть до 0,06 и даже до 0,20. Для системы звезды HD 209458, первой, транзиты которой были обнаружены, вероятность их наблюдения составила 0,17. Транзиты стали новым мощным инструментом астрофизики, позволяющим исследовать не только экзопланету, но и саму родительскую звезду.

Впервые транзиты планеты HD 209458 b наблюдали две группы исследователей из США, Д. Шарбоне и Дж. Хенри в 2000 году, практически одновременно наземными и космическими средствами. Прохождение планеты по диску звезды длится несколько часов. Открытие транзитов HD 209458 b стимулировало активные поиски других аналогичных объектов. В последующие годы по программе OGLE нашли до пяти очень далеких объектов. Но в течение четырех-пяти лет после открытия система HD 209458 оставалась единственной относительно близкой системой такого рода, несмотря на тщательные поиски других объектов. В какой-то мере происходило это из-за переоценки ожидаемого эффекта: предполагалось найти объекты примерно с такой же глубиной ослабления света при транзитах, как у звезды HD 209458 (около 1,6%), что, возможно, оказалось просто удачей наблюдателей. Следующий объект имел глубину ослабления только 0,3%. Зато найденная в 2005-2006 годах система HD 189733 b имеет рекордное трехпроцентное ослабление света при транзитах.

Только с помощью транзитов удастся исследовать ряд важных характеристик экзопланет, прежде всего, измерить их радиусы и исследовать свойства их атмосфер. Хотя надежды найти другой относительно близкий объект с транзитами долго не оправдывались, был обнаружен ряд эффектов, проявление которых подобно ложным транзитам. За планетные транзиты исследователи могут принять, например, устойчивые пятна на звезде или так называемые затменные двойные звезды. Когда наблюдатели снизили ожидаемый эффект ослабления света звезды при прохождении планеты по диску звезды почти на порядок, до 0,2-0,3%, были обнаружены еще две экзопланеты с транзитами, HD 149026 b и TrES-1. Они в 2004-2005 годах дополнили список транзитов, в котором до того был только «горячий юпитер» HD 209458 b. Естественно, транзиты наблюдаются только у «горячих юпитеров». Вероятность найти планету с транзитами на высокой орбите очень мала.

Свойства системы HD 209458, несмотря на ее умеренную удаленность, оказались весьма удобными для исследований.



Объект HD 141569. Центральная часть снимка закрыта, но края зоны хорошо видны. (Снимок Б. Смита и его коллег, наблюдения на HST, 1999 г.). Наблюдения газопылевых дисков неизменно показывают окружающую звезду обширную центральную зону, свободную от пыли и газа

Из результатов наблюдений объекта HD 209458 b можно сделать важные выводы не только относительно его природы, но и о природе других аналогичных гигантов. HD 209458 — звезда класса G0 с достаточно спокойной фотосферой, допускающей МЛС-измерения вплоть до 3 м/с, старше Солнца по возрасту (5,2 гигагода), со старой планетной системой, прошедшей долгий путь эволюции. Хотя ныне в ней известна только одна планета, но это именно тот наиболее интересный объект нового типа — «горячий юпитер», типичный для внесолнечных систем, но неизвестный в Солнечной системе. Период HD 209458 b, благодаря высокой частоте транзитов, определен с высокой точностью — 3,524738 суток. Радиус кеплеровской орбиты планеты составляет 0,045 а.е. Глубина ослабления света звезды при транзитах достигает 1,6%. По длительности транзита удается легко найти даже широту прохождения планеты по диску звезды. Среди окружающих Солнце звезд она представляет собой достаточно далекий объект — 47 пк (150 световых лет).

Звезды, имеющие планеты типа «горячий юпитер», составляют незначительную часть всего звездного «населения» — только 0,0075. Учитывая также произвольное положение плоскости их орбит, вероятность встретить среди звезд солнечного типа объект с наблюдаемыми транзитами еще меньше и не превышает 1/1300. Анализ зависимости масса-радиус для экзопланеты HD 209458 b, в сравнении с Юпитером и Сатурном, указывает на водород как основную составляющую этого небесного тела (возможно, с небольшой долей гелия). Температура внешних оболочек «горячих юпитеров», в зависимости от орбиты и свойств атмосферы, лежит в пределах 900-1300 К. Облачный слой в такой атмосфере должен состоять из мельчайших зерен MgSiO₃, Fe и Al₂O₃, причем в надоблачной атмосфере должны присутствовать пары воды, метана и окиси титана.

Планета-гигант HD 209458 b (как и другие тела этого типа) должна иметь сильное магнитное поле сложной структуры, с

напряженностью того же порядка, что и поле Юпитера. В определенных обстоятельствах признаки присутствия сильной дипольной составляющей магнитного поля можно использовать для поиска экзопланет.

По-видимому, существует несколько типов «горячих юпитеров». Найденная в 2006 году экзопланета с транзитами HD 149026 b представляет собой новый класс внесолнечных планет. Малое ослабление света звезды HD 149026 сразу же указало на относительно небольшой радиус планеты. Но это противоречило ее достаточно большой массе. Радиус HD 149026 b составляет 0,85 радиуса Сатурна, или 0,725 Юпитера. По своему положению планета соответствует «горячим юпитерам», но обладает массивным ядром из тяжелых элементов, до 0,7 всей ее массы, которая достигает 1,2 массы Сатурна (115 масс Земли). Угол $i = 85^\circ$ между осью орбиты и направлением на Землю оценили по данным о длительности транзитов, поэтому в эксперименте найдена практически полная масса экзопланеты. Ее период («год») составляет 2,8766 суток, радиус орбиты всего в шесть раз больше радиуса самой звезды.

Модели, опирающиеся на данные о массе и радиусе, указывают на гигантское, по сравнению с Юпитером, ядро HD 149026 b из плотных составляющих, с массой около 67 масс Земли, со средней плотностью ядра около $5,5 \text{ г/см}^3$. Столь парадоксальный вывод трудно объяснить в рамках теорий образования планет. Чтобы объяснить образование HD 149026 b, привлекаются аналогии с Нептуном, происхождение которого также во многом неясно.

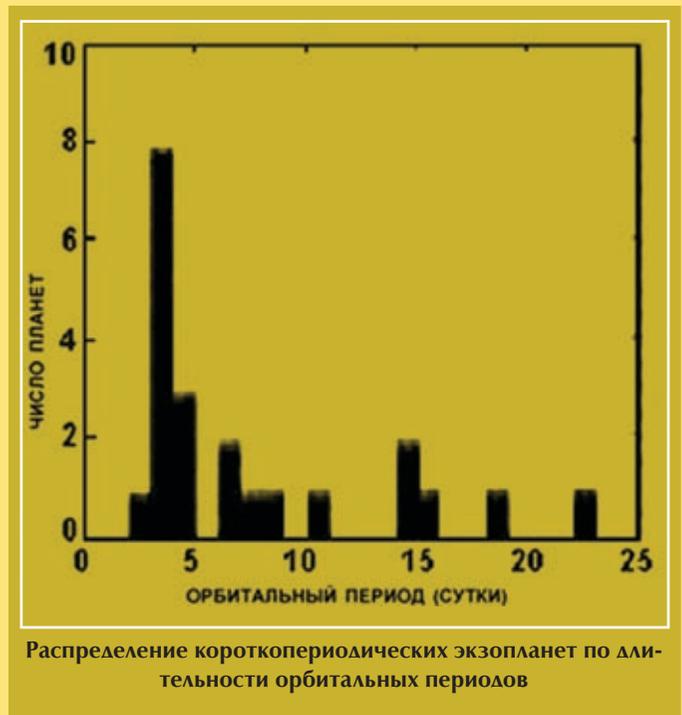
Обнаружены несколько низкоорбитальных планет, которые получили временное название «очень горячий юпитер». OGLE TR-56, самый короткопериодический «горячий юпитер» из всех известных, с периодом 1,2 суток, также был найден в ходе эксперимента OGLE III. Немногочисленные измерения показывают, что масса планеты $M = 1,45 M_{\text{Ю}}$, а большая полуось орбиты 0,0225 а.е., то есть только 3,3 млн км, или 0,02 а.е. Родительская звезда (которая относится к солнечному типу) видна с такого расстояния под углом 24° , в 50 раз больше Солнца.

К типу «очень горячих юпитеров» с наблюдаемыми транзитами относится и одна из последних открытых экзопланет, HD 189733 b. Ее период всего 2,219 суток, а радиус орбиты составляет 0,0313 а.е. Глубина ослабления потока от звезды при транзитах планеты рекордная, 3%. Звезда HD 189733 находится гораздо ближе к Земле, чем HD 209458, — на расстоянии 19,3 пк.

ПОИСК ТРАНЗИТОВ У ЗВЕЗД ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ 47 ТУС

Поиск транзитов «методом тыка» очень утомителен и нерезультативен. Весьма привлекательной кажется идея поиска транзитов в близких шаровых скоплениях звезд, где в небольшом (по небесным меркам) объеме сосредоточены сотни тысяч звезд. Поскольку для планет на низких орбитах вероятность такого расположения плоскости кеплеровской орбиты, при котором будут наблюдаться регулярные транзиты, составляет более 6%, перспективы поиска кажутся заманчивыми. В 2000 году группа Р. Джиллиланда предприняла поиск транзитов у звезд в шаровом звездном скоплении 47 Тус, используя орбитальный телескоп им. Хаббла. Скопление 47 Тус относится к близким (расстояние 4 кпк), компактным и удобно расположенным объектам. Исследованиями были охвачены 34 тысячи звезд главной последовательности, до 24 звездной величины. По предварительной оценке, предполагалось найти 17 объектов с транзитами, но ни одного обнаружить не удалось.

Поиск транзитов в том же скоплении 47 Тус повторили в 2002 году при помощи телескопа Англо-Австралийской обсерватории. Выбирались в основном солнцеподобные звезды



Распределение короткопериодических экзопланет по длительности орбитальных периодов

в пределах от 17 до 18,5 звездной величины (очень слабые). Предполагаемая средняя длительность транзитов составляла около 2,5 часа, вероятность их обнаружить оценивалась в 7%. Суммарное время наблюдений было в четыре раза больше, чем в первом случае. Исследованиями охватили около 36 тысяч звезд, ожидая найти 20 объектов с транзитами. Как ни странно, результат, в пределах ошибок, снова оказался отрицательным.

Технические причины отрицательного результата, по-видимому, исключены. Парадоксальное, но вполне возможное объяснение заключается в том, что таково свойство звезд в шаровых скоплениях: они могут не иметь планет. Причины могут быть разными, например, взаимные гравитационные эффекты близко расположенных звезд, затрудняющие формирование планетной системы. На более общую причину указал Дж. Гонзалес, который полагает, что ею может быть низкая «металличность» звезд скопления.Metalличность звезд — содержание тяжелых элементов, повышенное или пониженное по сравнению с Солнцем. Статистически почти все звезды с планетными системами имеют повышенную металличность.

«КОРИЧНЕВЫЕ», ИЛИ «ИНФРАКРАСНЫЕ», КАРЛИКИ

Экзопланеты с очень большой массой, около десяти масс Юпитера (например, HD 168443 b, HD 114762 b, HD 89744 b), вероятно, относятся к «коричневым», или инфракрасным, карликам. Поиск таких карликовых «несостоявшихся» звезд велся давно. Ш. Кумар, который предложил название «коричневые карлики», работал над их теорией с 1958 года. Термоядерная реакция синтеза гелия из водорода — это «мотор» всех нормальных звезд, включая Солнце. Но если масса формирующейся звезды составляет не более 4% солнечной, положение осложняется: возможна только термоядерная реакция «горения» дейтерия, а условия для «горения» водорода не выполняются; если же масса звезды очень мала, менее 0,013 массы Солнца (или менее 13 масс Юпитера), термоядерные реакции в ней вообще не возникают. Термоядерная реакция на основе дейтерия действует кратковременно и дает сравнительно мало энергии, поэтому установить наличие реакции у таких слабых объектов, как «коричневые карлики», трудно. (Следует добавить, что, если масса тела очень велика и достигает 63 $M_{\text{Ю}}$, в нем может возникнуть термоядерная реакция на основе изотопов лития.)

Планетами такие тела назвать нельзя, но и звездами они не становятся, а постепенно сжимаются до размеров, меньших Юпитера, причем более массивные карлики имеют меньшие размеры. За счет сжатия долго поддерживается умеренно высокая температура поверхности, до 1300 К (в то время как у самых холодных звезд температура поверхности составляет не менее 2000 К). Продолжительность жизни инфракрасных карликов очень велика, не менее миллиарда лет. Впервые настоящий инфракрасный карлик был найден Д. Латамом и его коллегами в 1989 году у звезды HD 114762. Для него параметр $M_{\text{sin}} = 11 M_{\text{Ю}}$, а реальная масса может достигать нескольких десятков масс Юпитера. Орбита его имеет период 84 дня и большой эксцентриситет (0,33). Такие тела могут находиться на «нормальных» экзопланетных орбитах. В 1998 году А. Бьюроуз исследовал вероятные физические характеристики таких объектов на примере другого инфракрасного карлика, Gliese 229 b, имеющего эффективную температуру около 950 К. Его период около 200 лет и $M_{\text{sin}} = 40 M_{\text{Ю}}$.

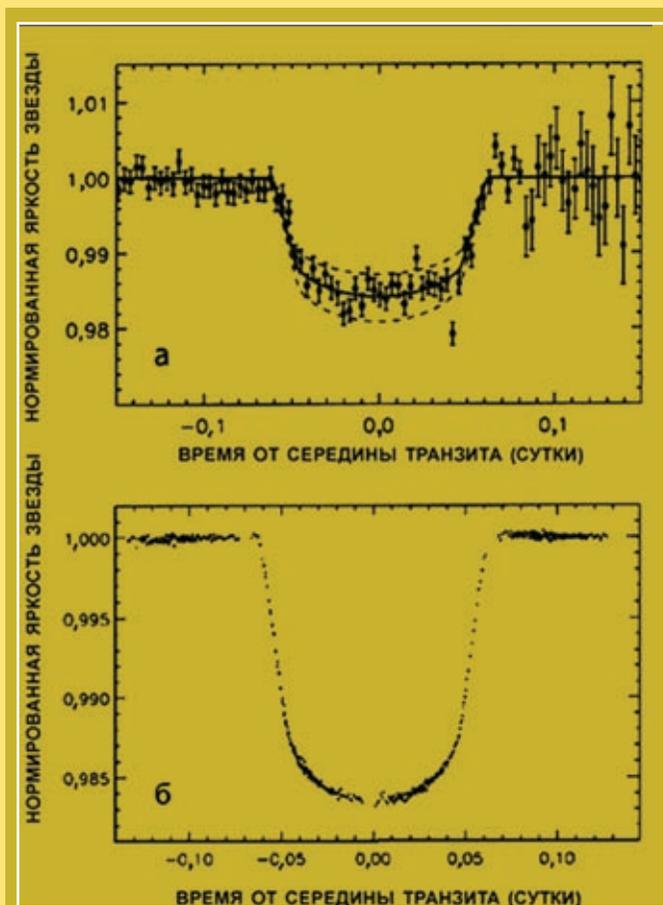
Благодаря особенностям спектра излучения «коричневый карлик» Gliese 229 b удалось сфотографировать в инфракрасных лучах. Инфракрасные карлики, по-видимому, и сами могут иметь планеты. На инфракрасном снимке системы «коричневого карлика» 2M1207 белый яркий объект — это сам «карлик», а красный — его планета, удаленная в десять раз дальше, чем Юпитер от Солнца, что и позволило сделать такой снимок (см. 1 часть статьи, фото 5).

Разными группами исследователей найдено около десятка тел с массами до 60 масс Юпитера. Парадокс, однако, в том, что их должно быть гораздо больше, и не только потому, что их легче обнаружить. Инфракрасными карликами обладают не более 1% исследованных звезд. Но их очень много в областях интенсивного звездообразования, например в широко известной туманности Ориона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экзопланеты и экзопланетные системы разительно отличаются от нашей Солнечной системы, где нет ничего, похожего на 51Peg b, tVoo b или 55Cnc b. В чем причина столь необычных свойств Солнечной системы? Не вникая в подробности, следует сказать о важной роли, которую играет в ней Юпитер. Орбитальные свойства всех планет Солнечной системы находятся в резонансных соотношениях. Существенным фактором в ее истории было образование Юпитера. Две волны метеоритной бомбардировки около четырех миллиардов лет назад сыграли в ней важную роль. В конечном счете возникло стабильное низкоэнтропийное состояние Солнечной системы, в котором Юпитер и другие гиганты, имеющие устойчивые орбиты, защищают внутренние планеты от ударов опасных небесных объектов, уменьшая эту опасность на много порядков. Существуют даже варианты «антропного принципа», утверждающие, что самим своим возникновением и развитием земная жизнь обязана Юпитеру.

Может быть, сам Юпитер, как главное и определяющее тело планетной системы, образовался в необычных условиях? Существует гипотеза, что в период формирования Солнечной системы с ней сблизилась другая звезда, из-за чего система приобрела необычные свойства. Если учесть, что протопланетные газово-пылевые диски значительно различаются по массам, планетные системы, в свою очередь, могут представлять собой целый набор образований с резко различающимися свойствами. Несомненно, что существенную роль играет скорость потери туманностью водорода в критический для формирования планет период. Концентрация газа и пыли в протопланетном диске, с одной стороны, и масса образующейся планеты, с другой, определяют их приливные взаимодействия и возможную



Первые наблюдения транзитов планеты HD 209458 b, выполненные в 2000 году наземными средствами (а) и с орбитальной обсерватории HST (б)

миграцию планеты. Но если считать миграцию правилом, как объяснить стабильность орбит планет-гигантов Солнечной системы?

Эксцентриситеты орбит в Солнечной системе очень малы, у экзопланет (кроме «горячих юпитеров»), наоборот, — очень велики. Большой эксцентриситет рано или поздно приводит к катастрофическим пересечениям орбит. Массивное планетное тело как бы сканирует пространство, постепенно поглощая меньшие тела. В меньшем масштабе подобный процесс известен и в истории Солнечной системы. Один из крупнейших спутников планет, Тритон, за время эволюции своей орбиты не оставил вокруг Нептуна ни одного крупного тела. Ныне Тритон находится на круговой орбите с уникальным обратным по отношению к планете обращением. Точно так же миграция гигантов к звезде не оставляет места для планет, подобных земной группе; лишь системы, в которых гиганты возникли на низких орбитах, а не мигрировали, могут обладать подсистемами внутренних планет.

Все крупные планеты Солнечной системы имеют почти копланарные (расположенные практически в одной плоскости) стабильные орбиты с низким эксцентриситетом, исключающим их катастрофические сближения. Солнечная система — это система с низкой энтропией (высокой устойчивостью). Но именно высокоэнтропийные системы экзопланет, в которых выживают лишь самые массивные тела, могут оказаться нормой. Солнечная система могла быть совсем другой, чем та, в которой мы живем. Или, может быть, мы живем в ней именно потому, что она не похожа на другие?

