

УДК 52

ЭКЗОПЛАНЕТЫ: ОТ ГАЗОВЫХ ГИГАНТОВ К СУПЕРЗЕМЛЯМ

© 2010 г. В.Г. Сурдин

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, г. Москва, Россия

Дан краткий обзор методов обнаружения экзопланет и основных открытий, сделанных в этой области. К концу ноября 2010 г. в окрестности иных звезд обнаружено более 422 планетных систем, содержащих в общей сложности более 500 планет. Возможно, некоторые из них обладают условиями, необходимыми для поддержания водно-углеродной жизни.

Ключевые слова: экзопланеты – методы обнаружения, экзопланеты – открытие, экзопланеты – наличие условий для жизни.

Введение

В 1995 г. состоялось, пожалуй, самое долгожданное открытие в астрономии: впервые было доказано наличие планет у иных звезд, за пределом Солнечной системы. Их стали называть *внесолнечными планетами* или *экзопланетами*. Надежду и даже уверенность в существовании экзопланет ученые высказывали с древнейших времен. Но каждый специалист понимал, что обнаружить планеты в окрестности даже ближайших звезд технически будет чрезвычайно сложно. До изобретения телескопа такая задача вообще не ставилась, а возможность существования иных планетных систем обсуждалась лишь умозрительно (тем более поражает уверенность некоторых мыслителей в их существовании – вспомним хотя бы Джордано Бруно!) Но и при наличии все более и более совершенных телескопов астрономы еще недавно рассматривали поиск иных планетных систем как задачу для далеких потомков.

Даже менее полувека назад ситуация с поиском экзопланет выглядела практически безнадежной. Напомню, что в начале 1960-х годов астрономы обсуждали возможность обнаружения трех типов гипотетических объектов – черных дыр, нейтронных звезд и экзопланет. Разумеется, из этих трех терминов два – черные дыры и экзопланеты – еще не были даже придуманы, но на существование самих объектов указывала физическая теория. Что касается черных дыр, то возможность их обнаружения вообще казалась за гранью разумного – ведь они, по определению, невидимы! А вот что думали ведущие специалисты о возможности обнаружения нейтронных звезд: “Такой объект будет иметь диаметр порядка 30 км, и он будет быстро остывать. Надежда увидеть такой тусклый объект столь же мала, как и надежда увидеть планету, принадлежащую другой звезде. Иными словами – надежды нет” [Торн, 2007].

Как видим, обнаружение далеких планет и нейтронных звезд казалось безнадежно трудным делом. Правда, вскоре случайно удалось открыть быстровращающиеся нейтронные звезды с сильным магнитным полем и переменным излучением – радиопульсары. Это был неожиданный “подарок” со стороны радиоастрономии, на который в начале 1960-х годов никто не рассчитывал. Однако прошло всего 30 лет и практически одновременно (1995–1996 гг.) были открыты одиночные остывающие нейтронных звезды, а также планеты у иных звезд! В некотором смысле прогноз оказался верным: открытие тех и других было *одинаково* трудным, но оно состоялось намного раньше, чем на это рассчитывали специалисты.

Любопытно, что тогда же, в 1996 г., был открыт еще один тип гипотетических объектов, занимающий промежуточное положение между звездами и планетами – ко-

ричевые карлики (brown dwarf). От планет-гигантов коричневые карлики в физическом смысле отличаются тем, что на раннем этапе эволюции в их недрах протекает термоядерная реакция с участием редкого изотопа водорода – дейтерия, не дающая, однако, существенного вклада в энерговыделение карлика [Сурдин, 1999]. Кроме того, буквально в те же годы были открыты многочисленные малые планеты на периферии Солнечной системы – в поясе Койпера [Солнечная..., 2008]. Уже к 1995 г. стало ясно, что пояс Койпера и простирающаяся за ним область населены множеством тел с характерным размером в сотни и тысячи километров, причем некоторые из них, возможно, больше Плутона и имеют собственные спутники. По своим массам объекты пояса Койпера заполнили промежуток между планетами и астероидами, а коричневые карлики – диапазон масс между планетами и звездами. В связи с этим потребовалось точно определить термин “планета”.

Номенклатура планет и экзопланет

Верхняя граница планетных масс, отделяющая их от коричневых карликов и в целом от звезд, была определена исходя из их внутреннего источника энергии: сейчас считается общепринятым, что планета – это объект, в котором за всю его историю не происходят реакции ядерного синтеза. Как показывают расчеты, при формировании космических объектов нормального (солнечного) химического состава с массой более 13 масс Юпитера (M_J) в конце этапа их гравитационного сжатия температура в центре достигает нескольких миллионов кельвинов, что приводит к развитию термоядерной реакции с участием дейтерия. При меньших массах объектов ядерные реакции в них не происходят. Поэтому массу в $13M_J$ считают максимальной массой планеты; объекты с массами от 13 до $70M_J$ называют коричневыми карликами, а еще более массивные – звездами (именно в них происходит длительное термоядерное горение наиболее распространенного легкого изотопа водорода 1H). Для справки: $1M_J = 318$ масс Земли (M_E) = 0.001 массы Солнца (M_\odot) = $2 \cdot 10^{27}$ кг.

Нижняя граница планетных масс, отделяющая их от астероидов, также имеет физическое обоснование. Минимальной массой планеты считается та, при которой в недрах космического тела давление силы тяжести еще в состоянии преодолеть прочность его материала и придать ему округлую форму. Таким образом, в самом общем виде, “планета” – это небесное тело, достаточно массивное для того, чтобы собственная гравитация придавала ему сфероидальную форму, но не достаточно массивное для того, чтобы в его недрах протекали термоядерные реакции. Диапазон масс планет простирается приблизительно от 1% массы Луны до 13 масс Юпитера, т.е. от $7 \cdot 10^{20}$ кг до $2 \cdot 10^{28}$ кг.

Как видим, планеты – это весьма обширная, а значит, разнородная группа тел с массами, охватывающими 7.5 порядков величины. В отличие от них, например, звезды занимают диапазон масс всего в 3.3 порядка (от 0.07 до $150 M_\odot$), а коричневые карлики – даже менее одного порядка. Ясно, что под определение “планета” попадают объекты с сильно различающимися физическими свойствами, химическим составом и степенью гравитационного влияния на соседей по планетной системе. Именно по этой причине по решению XXVI Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (2006 г.) понятие “планета” было разделено на несколько подтипов. Во-первых, если тело планетной массы обращается вокруг более крупного подобного тела, то его называют спутником (пример – Луна). А собственно “планета” (иногда говорят “классическая планета”) определяется как объект Солнечной системы, достаточно массивный, чтобы под действием собственной гравитации принять гидростатически равновесную (сфероидальную) форму и не имеющий рядом со своей орбитой тел сравнимой массы. Этим условиям удовлетворяют только Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Са-

турн, Уран и Нептун. Наконец, введен новый класс объектов Солнечной системы – “планета-карлик”, или “карликовая планета” (dwarf planet). Эти тела должны удовлетворять следующим условиям:

- обращается вокруг Солнца;
- не является спутником планеты;
- обладает достаточной массой, чтобы сила тяжести превосходила сопротивление вещества, и поэтому тело планеты имело сфероидальную форму;
- обладает не настолько большой массой, чтобы быть способной расчистить окрестности своей орбиты.

Прототипом планет-карликов стал Плутон (диаметр 2300 км), а самым крупным представителем этого класса сейчас (конец 2010 г.) считается Эрида (Eris, 2400 ± 100 км), орбита которой в основном лежит за пределом пояса Койпера, в так называемом Рассеянном диске. В пределах пояса Койпера движутся еще две карликовые планеты – Хаумея (Haumea, 1150 км) и Макемаке (Makemake, 1500 км). Пятым и пока последним членом этой группы является Церера (975×909 км), ранее считавшаяся крупнейшим астероидом Главного пояса. Хотя группа планет-карликов пока немногочисленна, ясно, что она неоднородна. Нет сомнений, что по происхождению Церера, движущаяся внутри орбиты Юпитера, существенно отличается от транснептуновых планет-карликов, для подгруппы которых даже предлагается ввести отдельное название – плутоиды (plutoid).

Таким образом, в Солнечной системе мы имеем: 1) классические планеты; 2) карликовые планеты и 3) спутники с массой планет (таковых около 20), которые я предлагаю называть “планетами-спутниками”. За пределом Солнечной системы номенклатура тел планетного типа пока не настолько развита и совсем не формализована.

Объект с массой планеты, находящийся за пределом Солнечной системы, называют “экзопланетой” (exoplanet) либо “внесолнечной планетой” (extrasolar planet). Пока эти термины равноправны и по частоте употребления, и по смыслу (напомним, что греческая приставка *экзо-* означает “вне”, “снаружи”). Сейчас оба эти термина почти без исключения относятся к планетам, гравитационно-связанным с какой-либо звездой за исключением Солнца. Такое толкование термину дают словари и энциклопедии. Например, exoplanet: *n.* a planet that orbits a star outside the solar system. Или: extrasolar planet – any planetary body that orbits a star other than the Sun. Однако уже найдены и, возможно, существуют в немалом количестве самостоятельные планеты, обитающие в межзвездном пространстве. По отношению к ним используется термин “*free-floating*” planets (свободно плавающие планеты), но нередко и они фигурируют под именем *exoplanet*. Таким образом, отдельного однозначного термина для членов околос звездных планетных систем пока нет. В данной статье для краткости мы используем термин *экзопланета* или просто *планета*, понимая под этим, если специально не оговорено, члена околос звездной планетной системы.

К концу ноября 2010 г. подтверждено открытие 504 экзопланет в 422 планетных системах (включая 4 планеты у двух радиопульсаров). При этом 46 систем содержат не менее двух планет, а одна – не менее 6. За текущей статистикой открытий удобно следить на агрегаторе ресурсов “Portal of the Universe” (интернет-адреса см. в Литературе) или на сайте Planet Quest (NASA), а подробные данные об экзопланетных системах можно найти в каталоге “The Extrasolar Planets Encyclopaedia”, который поддерживается Жаном Шнайдером (Парижская обсерватория). Подавляющее большинство экзопланет обнаружено с использованием различных косвенных методов детектирования, но некоторые уже наблюдались непосредственно. Большинство замеченных экзопланет – это газовые гиганты типа Юпитера и Сатурна, обращающиеся недалеко от звезды. Очевидно, это объясняется ограниченными возможностями методов регистрации: массивную планету на короткопериодической орбите легче обнаружить. Но с каждым годом

удается открывать все менее массивные и более удаленные от звезды планеты. Сейчас уже обнаружены объекты, по массе и параметрам орбиты почти не отличающиеся от Земли. Поскольку по массе эти объекты пока еще превосходят Землю, их часто называют “суперземлями”.

Методы поиска экзопланет

Среди многочисленных методов поиска экзопланет [Perryman, 2000; Jones, 2008] отметим те, что уже доказали свою состоятельность (табл. 1), и кратко обсудим их. Прочие методы либо находятся в процессе разработки, либо не дали пока значимого результата.

Таблица 1. Методы поиска экзопланет

Название метода	Принцип метода
Регистрация изображений / Direct imaging	Получение прямого изображения экзопланеты путем регистрации ее излучения (собственного или отраженного ею света звезды).
Астрометрический метод / Astrometric method	Поиск периодических колебаний положения звезды в плоскости небесной сферы, вызванных ее обращением вокруг центра масс планетной системы.
Метод лучевых скоростей / Radial-velocity method	Поиск периодических колебаний лучевой скорости звезды, вызванных ее обращением вокруг центра масс планетной системы.
Фотометрия прохождений / Transit photometry	Регистрация кратковременного уменьшения блеска звезды при проходе планеты на фоне звездного диска (“затмение” звезды планетой).
Хронометраж / Timing	Наблюдаются регулярные отклонения в моментах прихода периодических сигналов, вызванные изменением расстояния до их источника, совершающего орбитальное движение.
Гравитационное микролинзирование / Gravitational microlensing	Поиск кратковременного (но неоднократного) усиления блеска звезды заднего фона в результате искривления ее лучей в гравитационном поле более близкой к нам звезды с планетной системой.

Прямое наблюдение экзопланет

Планеты – холодные тела, сами не излучающие свет, а лишь отражающие лучи звезды-хозяина. Поэтому планету, расположенную вдали от этой звезды, практически невозможно обнаружить. Если же она движется вблизи звезды и хорошо освещена ее лучами, то для далекого наблюдателя такая планета трудноразличима из-за гораздо более яркого блеска “прижавшейся” к ней звезды.

Предположим, наблюдатель располагается у ближайшей к нам звезды α Кентавра и смотрит в сторону Солнечной системы. Тогда Солнце будет сиять для него так же ярко, как звезда Вега на земном небосводе. А блеск планет Солнечной системы окажется очень слабым и к тому же сильно зависящим от ориентации их дневного полушария к направлению на α Кентавра. В табл. 2 приведены самые выгодные для обнаружения значения углового расстояния планет от Солнца и их оптического блеска. Как видим, лидером по яркости является Юпитер, а за ним идут Венера, Сатурн и Земля. Вообще говоря, крупнейшие современные телескопы без особого труда могли бы заметить такие тусклые объекты, если бы на небе рядом с ними не было чрезвычайно яркой звезды. Но для далекого наблюдателя угловое расстояние планет от Солнца очень мало, что делает задачу их обнаружения чрезвычайно сложной.

Таблица 2. Солнечная система при наблюдении с расстояния α Кентавра

Планета	Максимальное угловое расстояние от Солнца	Максимальный Блеск в фильтре V
Меркурий	0.3"	25 ^m
Венера	0.5	22
Земля	0.8	23
Марс	1.1	27
Юпитер	3.9	21
Сатурн	7.2	23
Уран	14	26
Нептун	23	28
Плутон	30	34

Но астрономы сейчас создают приборы, которые решат эту задачу. Например, изображение яркой звезды можно закрыть экраном, чтобы ее свет не мешал изучать находящуюся рядом планету. Такой прибор – звездный коронограф – по конструкции похож на солнечный внеатмосферный коронограф Лио. Другой метод предполагает “гашение” света звезды за счет эффекта интерференции ее световых лучей, собранных двумя или несколькими расположенными рядом телескопами – так называемым “звездным интерферометром”. Поскольку звезда и расположенная рядом с ней планета видны в чуть-чуть разных направлениях, с помощью звездного интерферометра (изменяя расстояние между телескопами или правильно выбирая момент наблюдения) можно добиться почти полного гашения света звезды и, одновременно, усиления света планеты. Оба описанных прибора – коронограф и интерферометр – очень чувствительны к влиянию земной атмосферы, поэтому для их успешной работы необходимо использовать систему адаптивной оптики, либо, что еще лучше, вывести приборы за пределы атмосферы.

Измерение яркости звезды

Косвенный метод обнаружения экзопланет – метод прохождений, или транзитов – основан на регистрации блеска звезды, на фоне диска которой перемещается экзопланета. Только для наблюдателя, расположенного в плоскости орбиты этой планеты, она время от времени затмевает свою звезду. Если это звезда типа Солнца, а экзопланета типа Юпитера, диаметр которого в 10 раз меньше солнечного, то в результате такого затмения яркость звезды понижается на 1%. Это можно заметить с помощью наземного телескопа. Но экзопланета земного размера закроет только 0.01% поверхности звезды, а столь малое снижение яркости трудно измерить сквозь беспокойную земную атмосферу; для надежной регистрации столь малого изменения блеска требуется космический телескоп.

Вторая проблема этого метода в том, что весьма невелика доля экзопланет, орбитальные плоскости которых точно ориентированы на Землю. К тому же затмение длится всего несколько часов, а интервал между затмениями – годы. Тем не менее, прохождения экзопланет на фоне звезд уже неоднократно наблюдались и дали ценный материал.

Существует также весьма экзотический метод поиска одиночных планет, свободно “дрейфующих” в межзвездном пространстве. Такое тело можно обнаружить по эффекту гравитационной линзы, возникающему в тот момент, когда невидимая планета проходит на фоне далекой звезды. Своим гравитационным полем планета искажает ход световых лучей, идущих от звезды к Земле: подобно обычной линзе, она концентрирует свет и увеличивает яркость изображения звезды для земного наблюдателя. Это очень трудоемкий метод поиска экзопланет, требующий длительного наблюдения за ярко-

стью тысяч и даже миллионов звезд. Но автоматизация астрономических наблюдений уже позволяет его использовать.

По указанным выше причинам основная роль в поиске экзопланет подобных Земле отводится космическим инструментам. С декабря 2006 г. ведутся наблюдения на европейском спутнике COROT, телескоп которого диаметром 27 см имеет поле зрения около 3° и оснащен чувствительным фотометром. Поиск планет осуществляется методом прохождений. Обнаружено уже несколько планет-гигантов и даже одна планета, размер которой лишь на 70% больше, чем у Земли. В марте 2009 г. на гелиоцентрическую орбиту выведен спутник “Кеплер” (NASA) с телескопом диаметром 95 см, способный непрерывно измерять блеск около 170 тыс. звезд в поле зрения $10^\circ \times 10^\circ$. От него ждут массового обнаружения планет земного типа. Несколько уже найдено, а сотни – ждут подтверждения.

Измерение положения звезды

Весьма перспективны методы, основанные на измерении движения звезды, вызванного обращением вокруг нее планеты (см. табл. 3). В качестве примера вновь рассмотрим Солнечную систему. Наиболее сильно на Солнце влияет гравитация массивного Юпитера: в первом приближении нашу планетную систему вообще можно рассматривать как двойную систему Солнце – Юпитер, разделенные расстоянием 5.2 а.е. (астрономической единицы) и обращающиеся с периодом около 12 лет вокруг общего центра масс. Поскольку Солнце примерно в 1000 массивнее Юпитера, оно во столько же

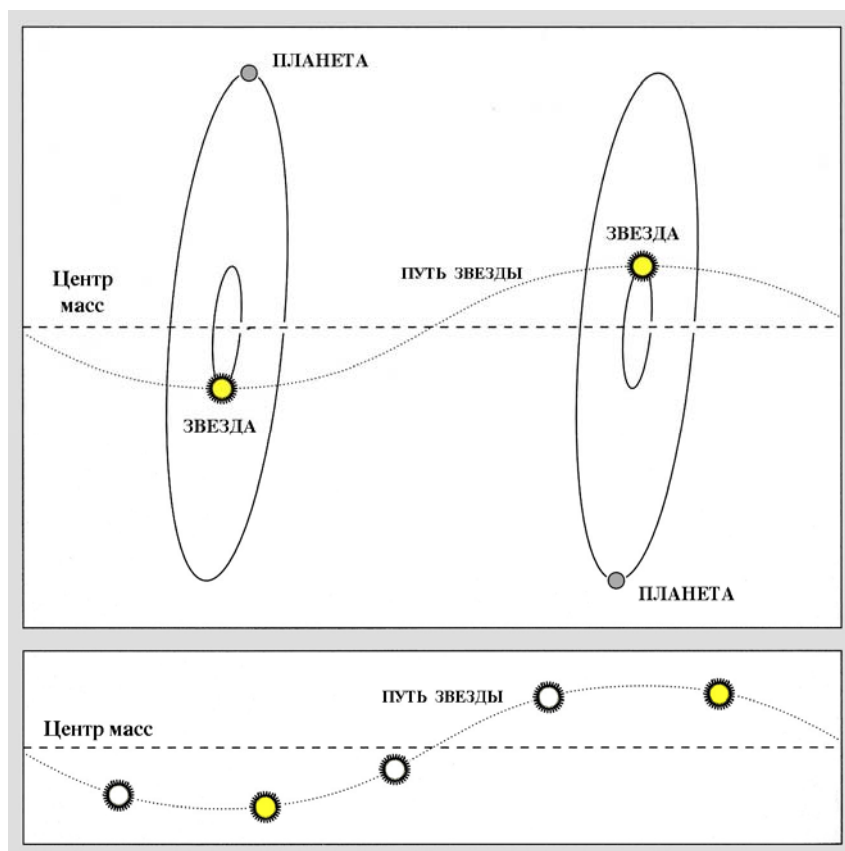


Рис. 1. Взаимное движение звезды и планеты. Центр масс системы “звезда + планета” движется прямолинейно (пунктир). Звезда и планета обращаются вокруг центра масс по подобным орбитам в противофазе (*вверху*). Наблюдая звезду, можно заметить ее “покачивания”, указывающие на присутствие планеты

раз ближе к центру масс. Поэтому Солнце с периодом около 12 лет обращается по окружности радиусом $5.2 \text{ а.е.}/1000 = 0.0052 \text{ а.е.}$, который лишь немногим больше радиуса самого Солнца. С расстояния α Кентавра (4.34 св. года = 275000 а.е.) радиус этой окружности виден под углом $0.004''$. Это чрезвычайно малый угол: под таким углом мы видели бы толщину карандаша с расстояния 360 км. Но астрономы умеют измерять столь малые углы, и поэтому уже несколько десятилетий ведут наблюдение за ближайшими звездами в надежде заметить их периодическое “покачивание”, вызванное присутствием планет (рис. 1). В самое последнее время это удалось сделать с поверхности Земли, но перспективы астрометрического поиска экзопланет, безусловно, связаны с запуском специализированных спутников, способных измерять положения звезд с миллисекундной точностью.

Измерение скорости звезды

Заметить периодические колебания звезды можно не только по изменению ее видимого положения на небе, но и по изменению расстояния до нее. Вновь рассмотрим систему Юпитер – Солнце, имеющую отношение масс 1:1000. Поскольку Юпитер движется по орбите со скоростью 13 км/с, скорость движения Солнца по его собственной небольшой орбите вокруг центра масс системы составляет $V = 13 \text{ м/с}$. Для удаленного наблюдателя, расположенного в плоскости орбиты Юпитера, Солнце с периодом около 12 лет меняет свою скорость с амплитудой 13 м/с.

Для точного измерения скоростей звезд астрономы используют эффект Доплера. Он проявляется в том, что в спектре звезды, движущейся относительно земного наблюдателя, изменяется длина волны всех линий: если звезда приближается к Земле, линии смещаются к синему концу спектра, если удаляется – к красному. При нерелятивистских скоростях движения эффект Доплера чувствителен лишь к лучевой скорости звезды, т.е. к проекции полного вектора ее скорости на луч зрения наблюдателя (прямая, соединяющая наблюдателя со звездой). Поэтому скорость движения звезды, а значит, и масса планеты определяются с точностью до множителя $\cos\alpha$, где α – угол между плоскостью орбиты планеты и лучом зрения наблюдателя. Вместо точного значения массы планеты (M) доплеровский метод дает лишь нижнюю границу ее массы ($M\cos\alpha$).

Обычно угол α неизвестен. Лишь в тех случаях, когда наблюдаются прохождения планеты по диску звезды, можно быть уверенным, что α близок к нулю. Но у доплеровского метода есть два важных преимущества: он работает на любых расстояниях (если удалось получить спектр), и его точность не зависит от расстояния. В табл. 3 показаны характерные значения доплеровской скорости и углового смещения Солнца под влиянием каждой из планет. Плутон присутствует как прототип планет-карликов.

Таблица 3. Колебания положения и скорости Солнца под влиянием планет

Действующая планета	Угловые колебания Солнца при наблюдении с расстояния 3 пк (в миллисекундах дуги)	Доплеровские колебания лучевой скорости Солнца при наблюдении в плоскости эклиптики (м/с)
Меркурий	0.00002	0.008
Венера	0.00058	0.086
Земля	0.00098	0.089
Марс	0.00016	0.008
Юпитер	1.6	13
Сатурн	0.89	2,8
Уран	0.27	0.3
Нептун	0.51	0.3
Плутон	0.00008	0.00003

Как видим, гравитационное влияние планеты на звезду вызывает движение звезды со скоростью, в лучшем случае, метры в секунду. Можно ли заметить перемещение звезды с такой маленькой скоростью? До конца 1980-х годов ошибка измерения скорости оптической звезды методом Доплера составляла не менее 500 м/с. Но затем были разработаны принципиально новые спектральные приборы, позволившие повысить точность до 10 м/с. Например, в прецизионном спектрометре Европейской южной обсерватории Ла-Силья (Чили) свет звезды пропускается сквозь кювету с парами йода, находящуюся в термостатированном помещении. Фиксируя относительное положение спектральных линий звезды и йода, удается очень точно измерять скорость звезды. Новая техника сделала возможным открытие экзопланет, определение их орбитальных параметров и масс, о чем мы расскажем в следующих разделах.

А в заключение этого раздела заметим, что указанный в табл. 1 метод хронометража, или тайминга, по существу является одной из разновидностей доплеровского метода, поскольку в нем тоже регистрируется изменение в характере импульсов движущегося источника. Этот метод используется в том случае, если есть возможность фиксировать не только частоту импульсов, но и точное время прихода каждого из них. Например, его используют радиоастрономы, с высокой точностью фиксирующие моменты прихода импульсов от радиопульсаров и тем самым по времени запаздывания сигнала определяющие периодические смещения нейтронной звезды относительно Солнца. Это позволяет обнаруживать невидимые объекты, обращающиеся вокруг радиопульсаров (т.е. нейтронных звезд). Вообще, метод хронометража требует лишь наличия стабильного “генератора импульсов”, в роли которого могут выступать не только нейтронная звезда, но и пульсирующий или вращающийся белый карлик, тесная двойная звезда, и т.п.

Этапы открытия экзопланет

Астрометрический поиск

Исторически первые попытки обнаружить экзопланеты связаны с наблюдениями за положением близких звезд. В 1916 г. американский астроном Эдуард Барнард (1857–1923) обнаружил, что тусклая красная звезда в созвездии Змееносец быстро перемещается по небу относительно других звезд – на 10" в год. Позже астрономы назвали ее Летящей звездой Барнарда. Хотя все звезды хаотически перемещаются в пространстве со скоростями 20–50 км/с, для земного наблюдателя угловые смещения звезд остаются практически незаметными вследствие большого расстояния. Звезда Барнарда – весьма заурядное светило, поэтому возникло подозрение, что причиной ее наблюдаемого “полета” служит не уникально большая скорость, а необычная близость к нам. Действительно, звезда Барнарда оказалась на втором месте от Солнца после системы α Кентавра.

Масса звезды Барнарда почти в 7 раз меньше массы Солнца, поэтому влияние на нее соседней планеты (если она есть) должно быть весьма заметным. Более полувека, начиная с 1938 г., изучал движение этой звезды американский астроном Питер ван де Камп (1901–1995). Он измерил ее положение на тысячах фотопластинок и заявил, что у звезды обнаруживается волнообразная траектория с амплитудой покачиваний около 0.02", а значит, вокруг нее обращается невидимый спутник. Из расчетов П. ван де Кампа следовало, что масса спутника чуть больше массы Юпитера, а радиус его орбиты 4.4 а.е. В начале 1960-х годов это сообщение облетело весь мир и получило широкий резонанс.

Но не все астрономы согласились с выводами П. ван де Кампа. Продолжая наблюдения и увеличивая точность измерений, Дж. Гейтвуд и его коллеги к 1973 г. выяс-

нили, что звезда Барнарда движется ровно, без колебаний, а значит, массивных планет в качестве спутников не имеет. Однако эти же работы принесли в 1996 г. новую находку: были замечены зигзаги в движении шестой от Солнца звезды Лаланд 21185, удаленной от Солнца на 2.5 пк. (На ее волнообразное движение указывал сам П. ван де Камп еще в 1951 г.) По мнению Гейтвуда, вокруг этой звезды обращаются две планеты: одна с периодом 30 лет (масса $1.6 M_J$, радиус орбиты 10 а.е.) и вторая с периодом 6 лет ($0.9 M_J$, 2.5 а.е.). Но и это открытие до сих пор не только не подтверждено, но и вызывает все большие сомнения.

Первое надежное астрометрическое обнаружение экзопланеты состоялось лишь в 2009 г.: после 12 лет наблюдений с помощью 5-метрового Паломарского телескопа за 30 звездами американские астрономы Стивен Правдо и Стюард Шаклан (JPL, NASA) обнаружили у одной из них планету [Pravdo, Shaklan, 2009; Rodriguez, 2009]. Сама звезда “ван Бисбрук 10” (VB 10) – одна из самых маленьких в Галактике: это красный карлик спектрального класса M8, уступающий Солнцу в 12 раз по массе и в 10 раз по диаметру. А светимость этой звезды столь мала, что если заменить ею наше Солнце, то днем Земля была бы освещена как сейчас лунной ночью. Именно благодаря малой массе этой звезды, планета VB 10b смогла “раскачать” ее до заметной амплитуды: с периодом около 272 сут положение звезды на небе колеблется на 0.006” (тот факт, что это удалось измерить, можно без преувеличения назвать триумфом наземной астрометрии). Сама планета-гигант обращается по орбите с большой полуосью 0.36 а.е. (как у Меркурия) и имеет массу $6.4 M_J$, т. е. она легче своей звезды всего в 14 раз, а по размеру даже не уступает ей.

Планеты у нейтронных звезд

В конце 1980-х годов несколько групп астрономов в разных странах создали высокоточные оптические спектрометры и начали систематические измерения скоростей ближайших к Солнцу звезд. Эта работа была специально нацелена на поиск экзопланет и через несколько лет действительно увенчалась успехом (см. ниже). Но первыми открыли экзопланету радиоастрономы, причем не одну, а сразу целую планетную систему. Произошло это в ходе исследования радиопульсаров – быстро вращающихся нейтронных звезд, излучающих строго периодические радиоимпульсы. Поскольку пульсары – чрезвычайно стабильные источники сигнала, радиоастрономы могут применять к ним метод хронометража, позволяющий выявлять движение со скоростью ~ 1 см/с, а значит, обнаруживать рядом с ними планеты с массами в сотни раз меньше, чем у Юпитера.

Первое сообщение в журнале *Nature* об открытии планетной системы вокруг пульсара PSR 1829-10 (также обозначался как PSR 1828-11 и PSR B1828-10, современное обозначение PSR J1830-10) сделала в середине 1991 г. группа радиоастрономов Манчестерского университета (М. Бэйлес, А. Лин и С. Шемар), наблюдавших на радиотелескопе в Джодрелл-Бэнк. Они объявили, что вокруг нейтронной звезды, удаленной от Солнца на 3.6 кпк, обращается планета в 10 раз массивнее Земли по круговой орбите с периодом 6 мес. В 1994 г. в неопубликованном сообщении эти авторы уточнили, что планет три: с массами 3, 12 и 8 земных и периодами, соответственно, 8, 16 и 33 мес. Однако до сих пор объявленное ими открытие не подтверждено независимыми исследованиями и поэтому остается сомнительным.

Первое подтвердившееся открытие внесолнечной планеты сделал польский радиоастроном Алекс Вольцжан (A. Wolszczan), который с помощью 305-метровой антенны в Аресибо (о. Пуэрто-Рико) изучал радиопульсар PSR 1257+12, удаленный примерно на 300 пк от Солнца и посылающий импульсы через каждые 6.2 мс. В 1991 г.

ученый заметил периодическое изменение частоты прихода импульсов. Его американский коллега Дейл Фрейл подтвердил это открытие наблюдениями на другом радиотелескопе. К 1993 г. выявилось присутствие рядом с пульсаром PSR 1257+12 трех планет с массами 0.02, 4.1 и 3.8 M_E , обращающихся с периодами 25, 67 и 98 сут. В 1996 г. появилось сообщение о присутствии в этой системе четвертой планеты с массой Сатурна и периодом около 170 лет, но оно осталось неподтвержденным.

Та легкость, с которой планеты были найдены у первого пульсара, вдохновила радиоастрономов на анализ сигналов и других пульсаров (их сейчас известно около 2000). Но поиск оказался почти безрезультатным: лишь еще у одного далекого пульсара PSR B1620-26 обнаружилась планета-гигант массой 2.5 M_J . Хотя после 1995 г. методами оптической астрономии были обнаружены сотни экзопланет (см. ниже), в абсолютном большинстве это оказались планеты-гиганты. Таким образом, до недавнего времени планетная система пульсара PSR 1257+12 демонстрировала единственный пример планет типа Земли за пределом Солнечной системы.

Считается весьма странным, что вообще рядом с нейтронной звездой обнаружались маломассивные спутники-планеты. Рождение нейтронной звезды должно сопровождаться взрывом сверхновой. В момент взрыва звезда сбрасывает оболочку, с которой теряет большую часть своей массы. Поэтому ее остаток, нейтронная звезда-пульсар, не может своим притяжением удержать планеты, которые до взрыва обращались вокруг массивной звезды. Возможно, что обнаруженные у пульсаров планеты сформировались уже после взрыва сверхновой, но из чего и как – не ясно. Пока планетные системы нейтронных звезд по причине их непонятого происхождения считают чем-то “неполноценным”.

Успех доплеровского метода: планеты у нормальных звезд

Первую “настоящую” экзопланету обнаружили в 1995 г. астрономы Женевской обсерватории Мишель Майор (M. Mayor) и Дидье Келоз (D. Queloz), построившие оптический спектрометр, определяющий доплеровское смещение линий с точностью до 13 м/с. Любопытно, что американские астрономы под руководством Джеффри Марси (G. Marcy) создали подобный прибор раньше и еще в 1987 г. приступили к систематическому измерению скоростей нескольких сотен звезд; но им не повезло сделать открытие первыми. В 1994 г. Майор и Келоз приступили к измерению скоростей 142 звезд из числа ближайших к нам и по своим характеристикам похожих на Солнце. Довольно быстро они обнаружили “покачивания” звезды 51 в созвездии Пегас (51 Peg), удаленной от Солнца на 15.6 пк. Колебания этой звезды происходят с периодом 4.23 сут и, как заключили астрономы, вызваны влиянием планеты массой не менее 0.47 M_J .

Это удивительное соседство озадачило ученых: совсем рядом со звездой, как две капли воды похожей на Солнце, со скоростью 136 км/с мчится планета-гигант, обегая ее всего за четыре дня, поскольку расстояние от звезды до планеты почти в 20 раз меньше, чем от Земли до Солнца. Не сразу поверили астрономы в это открытие. Ведь обнаруженная планета-гигант из-за ее близости к звезде должна быть нагрета до 1000 К. Горячий ЮПИТЕР? Такого сочетания никто не ожидал. Быть может, за покачивания звезды была принята пульсация ее атмосферы? Однако дальнейшие наблюдения подтвердили открытие планеты у звезды 51 Peg. Затем обнаружили и другие системы, в которых планета-гигант обращается очень близко к своей звезде.

Доплеровский метод оказался наиболее плодотворным для поиска экзопланет (рис. 2): именно он помог обнаружить присутствие большинства известных сегодня невидимых объектов (экзопланет и некоторых коричневых карликов) вблизи оптических звезд. Погрешность регистрации лучевой скорости звезды достигла сейчас 1 м/с, что

близко к теоретическому пределу, в основном связанному с нестабильностью звездных атмосфер. Это не позволяет обнаруживать аналоги Земли вблизи аналогов Солнца, для чего нужна была бы погрешность порядка нескольких сантиметров в секунду (см. табл. 3). Однако это уже дает возможность регистрировать присутствие планет в несколько раз массивнее Земли (так называемые *сверхземли*, super-Earth) вблизи звезд в несколько раз менее массивных, чем Солнце. И такие планеты действительно обнаружены (см. ниже).

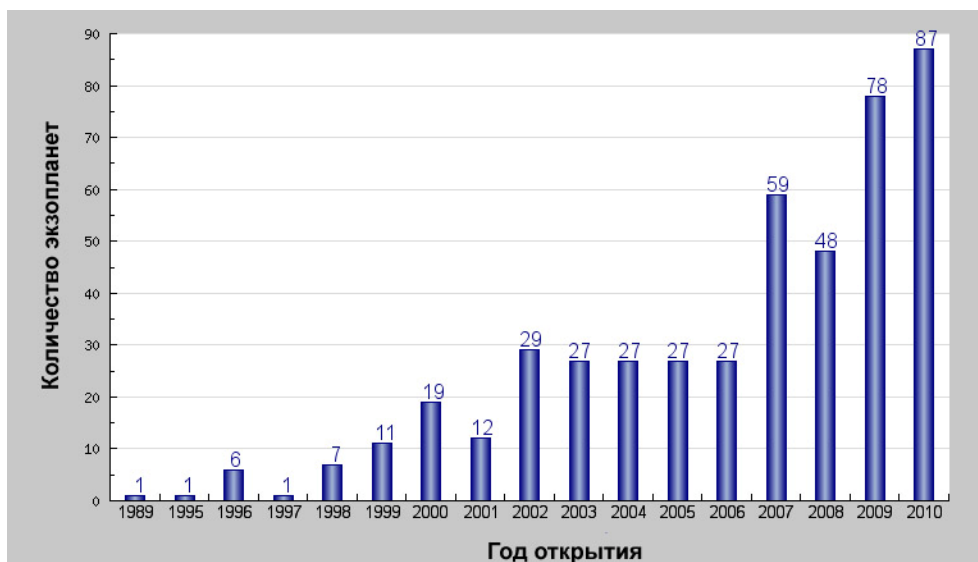
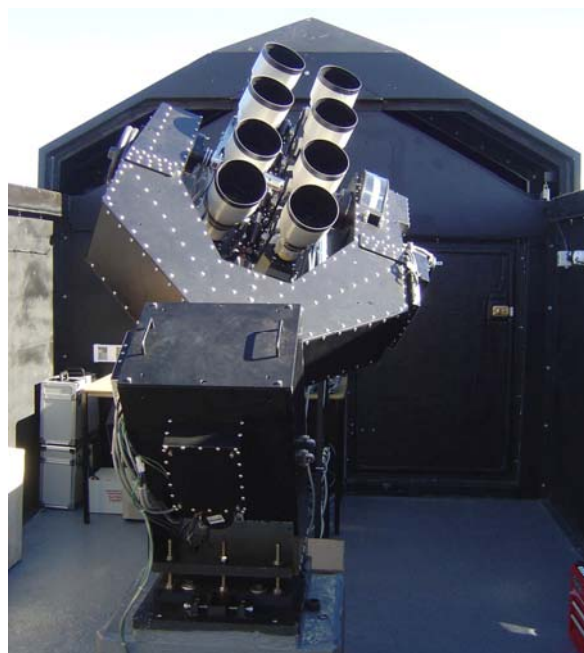


Рис. 2. Количество экзопланет, обнаруженных в течение указанного года доплеровским методом. Полное их количество составляет 467. Данные “Interactive Extra-solar Planets Catalog” на 26 ноября 2010 г.

“Затмения” звезд планетами

Метод прохождений также доказал свою эффективность. Сейчас фотометрические наблюдения за звездами ведутся как с борта космических обсерваторий, так и с Земли. Все современные фотометрические инструменты имеют широкое поле зрения. Измеряя одновременно блеск миллионов звезд, астрономы существенно увеличивают свой шанс обнаружить прохождение планеты по диску звезды. При этом, как правило, обнаруживаются планеты, часто демонстрирующие “затмение” звезд, т.е. имеющие короткий орбитальный период, а значит – компактную орбиту.

Рис. 3. Восьмиобъективный роботизированный фотометрический комплекс WASP (Wide Angle Search for Planets). Такие инструменты установлены на о. Ла-Пальма (Канарские о-в) и в Южно-африканской астрономической обсерватории близ Сазерленда. Это совместный проект нескольких британских университетов и испанского Астрофизического института на Канарских островах. Фото с сайта <http://www.superwasp.org>



Термин “горячий юпитер” стал настолько привычным, что никого уже особенно не удивило открытие в 2009 г. планеты WASP-18b, имеющей массу $10M_J$ и обращающейся по почти круговой орбите на расстоянии 0.02 а.е. от своей звезды. Орбитальный период этой планеты составляет всего 23 часа! Учитывая, что звезда WASP-18 (HD 10069) имеет спектральный класс F9 и обладает большей светимостью, чем Солнце, можно предположить, что температура поверхности планеты должна достигать 3800 К: это уже не просто горячий, а “раскаленный юпитер”. Из-за близости к звезде и своей большой массы планета вызывает сильные приливные возмущения на поверхности звезды, которые, в свою очередь, тормозят планету и в будущем приведут к падению планеты на звезду.

Фотографии экзопланет

Несмотря на огромные трудности, астрономам все же удалось сфотографировать экзопланеты уже имеющимися средствами! Правда, средства эти были лучшими из лучших: орбитальный телескоп “Хаббл” (NASA) и крупнейшие наземные инструменты: 8–10-метровые телескопы “Кек” (Калифорнийская ассоциация астрономических исследований), “Gemini” (США, Великобритания, Канада, Чили, Аргентина, Бразилия, Австралия) и “Very Large Telescope” (Европейская южная обсерватория). Среди использованных для этой работы технических ухищрений – заслонка, отсекающая свет звезды, и светофильтры, пропускающие в основном инфракрасное излучение планеты в диапазоне длин волн 2–4 мкм, что соответствует температуре примерно 1000 К (в этом диапазоне планета выглядит более контрастно по отношению к звезде).

Начиная с 2004 г. получено уже 14 изображений экзопланет в 11 планетных системах (Их каталог см. в Литературе). Например, в протопланетном диске, окружающем молодую звезду β Живописца, сфотографирована планета весьма похожая на Юпитер, только массивнее. Ситуация там напоминает молодую Солнечную систему, в которой новорожденный Юпитер активно влиял на формирование в околосолнечном диске остальных планет. Наблюдать этот процесс “вживую” – мечта всех специалистов по планетной космогонии.

В конце 2008 г. важные открытия почти одновременно сделали две группы американских и канадских ученых. Космическим телескопом “Хаббл” удалось сфотографировать (рис. 4) планету на внешнем крае пылевого диска, окружающего яркую звезду Фомальгаут (α Южной Рыбы). Хотя эта звезда светит почти в 20 раз мощнее Солнца, она не могла бы настолько сильно осветить свою планету, чтобы сделать ее заметной с Земли. Ведь обнаруженная планета удалена от Фомальгаута на 115 а. е. Поэтому есть основания предполагать, что планета окружена отражающим свет газово-пылевым кольцом, намного большим кольца Сатурна. В нем, по-видимому, формируются спутники этой планеты, подобно тому, как в эпоху юности Солнечной системы формировались спутники планет-гигантов.

Не менее любопытна и фотография сразу трех планет у звезды HR 8799 в созвездии Пегас (рис. 5), полученная группой канадских астрономов под руководством К. Маруа. Эта система удалена от нас примерно на 40 пк. Каждая из ее планет почти на порядок массивнее Юпитера, но движутся они примерно на тех же расстояниях от своей звезды, что и наши планеты-гиганты: в проекции на небо это 24, 38 и 68 а.е. Будет очень странно, если на месте Венеры, Земли и Марса в той системе не обнаружатся землеподобные планеты. Но пока это за пределом технических возможностей.

Получение прямых снимков экзопланет – важнейший этап в их изучении. Этим окончательно подтверждается их существование и открывается путь к изучению свойств этих планет: их размеров, температуры, плотности, характеристик поверхности.

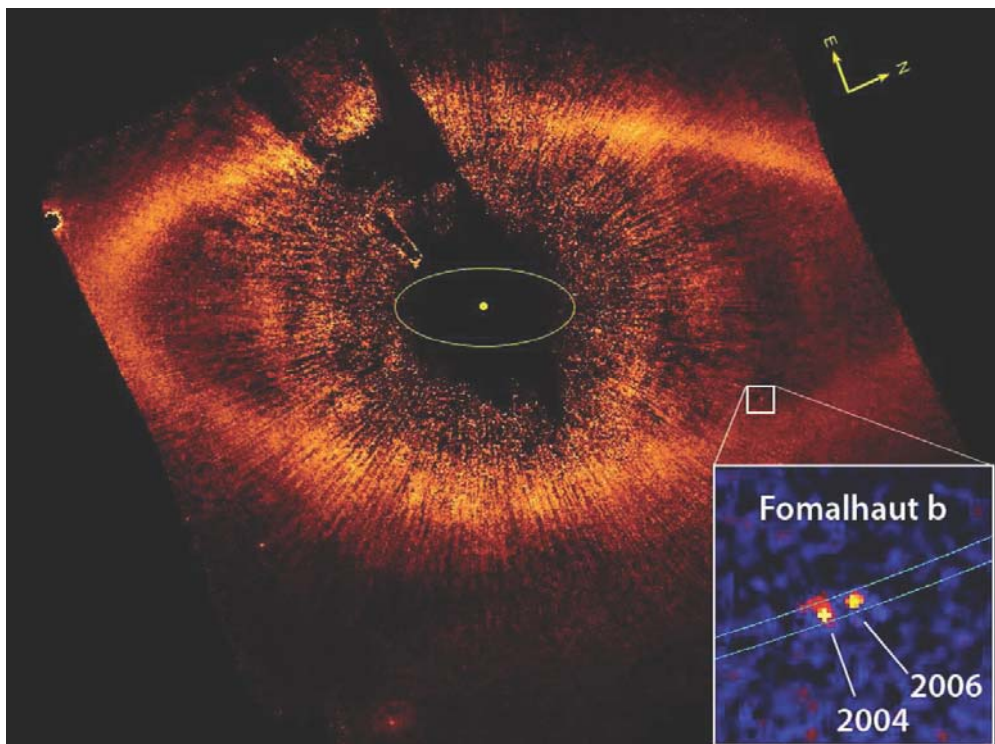


Рис. 4. В мощном пылевом диске вокруг звезды Фомальгаут телескоп “Хаббл” сфотографировал планету (в белом квадрате). Желтый кружок в центре снимка обозначает положение звезды (сама она закрыта экраном), желтый эллипс, показанный для масштаба, имеет размер орбиты Нептуна. За два года наблюдений экзопланета Fomalhaut b сместилась очень незначительно, так как период ее обращения по орбите около 900 лет. Фото из: [Kalas и др., 2008].

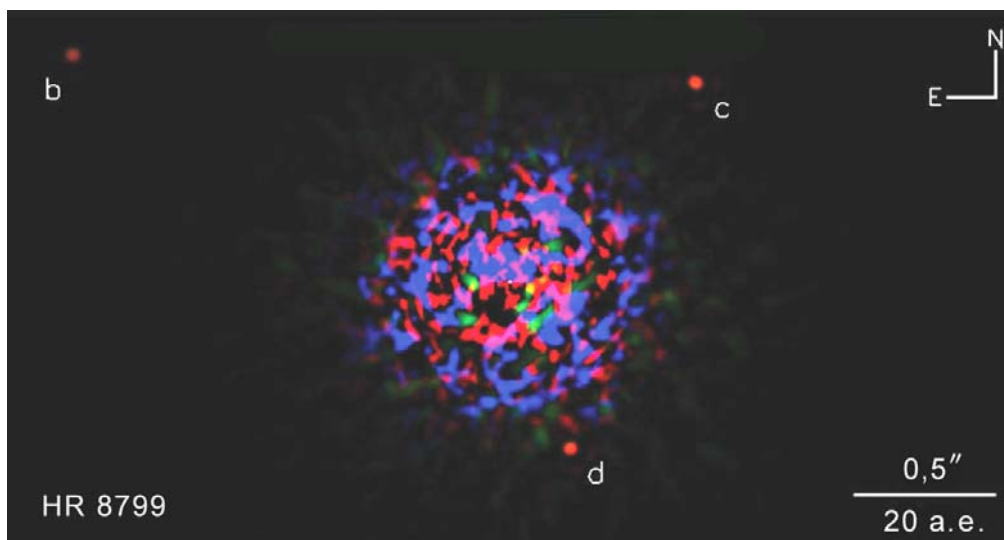


Рис. 5. Планетная система у звезды HR 8799. Это изображение в условных цветах было получено в ближнем ИК диапазоне на телескопах “Кек” и “Gemini” с использованием системы адаптивной оптики и техники цифровой обработки данных. Разноцветное пятно в центре – это то, что осталось от изображения звезды после операции его “глушения”. Изображения планет отмечены буквами b, c, d. Фото из: [Marois и др., 2008]

И самое волнующее – не за горами расшифровка спектров этих планет, а значит, выяснение газового состава их атмосферы. О такой возможности давно мечтают экзобиологи [Джонс, 2007].

Глизе 581g – экзопланета, похожая на Землю

В первые дни октября 2010 г. всеобщее внимание привлекло сообщение об открытии экзопланеты GJ 581g – шестой планеты в системе звезды Глизе 581 (Gliese 581). Об этом заявила группа американских астрономов под руководством профессора Калифорнийского университета в Санта-Круз Стивена Фогта (Steven Vogt) и профессора Пола Батлера (Paul Butler) из Института Карнеги в Вашингтоне. Авторы открытия утверждают, что GJ 581g более всех других до сих пор открытых экзопланет похожа на Землю.

Думаю, здесь нелишне пояснить, что означают имена экзопланет. Дело в том, что собственных имен, как у планет Солнечной системы, экзопланетам пока не присваивают, а их обозначения основывают на имени или каталожном обозначении звезды, с которой связана планета, добавляя к нему букву латинского алфавита, начиная с буквы “b” в порядке открытия планеты. (Буква “a” зарезервирована для самой звезды, но ее обычно опускают.) Например, в системе звезды GJ 581 планеты в порядке их открытия обозначены как GJ 581b, GJ 581c, GJ 581d и т. д. Заметим, что среди звезд с планетами обозначение многих начинается с букв GJ, говорящих о том, что эти звезды входят в известный каталог Глизе. Он включает порядка 1000 звезд, расположенных не далее 25 пк от Солнца, и впервые был составлен в 1960-е годы немецким астрономом Вильгельмом Глизе (W. Gliese); тогда обозначение звезд начиналось с букв G или Gl. Позже Глизе доработал этот каталог совместно с немецким астрономом Хартмутом Ярейсом (H. Jahreiss), и в 1991 г. эта работа, содержащая около 3800 звезд, была опубликована под названием “Third Catalogue of Nearby Stars”. Обозначение звезд по этому каталогу начинается с букв GJ, но по традиции астрономы называют эти звезды по имени первого автора: например, Gliese 581.

Вернемся к экзопланете Gliese 581g. Сообщение об ее открытии вызвало большой интерес не только у астрономов, но и у экзобиологов, которые надеются, что в недалеком будущем удастся обнаружить экзопланеты, подобные Земле, и начать спектральный поиск у них признаков биосферы. Когда планета найдена и орбита ее определена, нетрудно вычислить, попадает ли планета в “зону жизни” родительской звезды, то есть, находится ли она в том диапазоне расстояний, где по температурным условиям возможно существование на поверхности планеты жидкой воды. Однако большой уверенности эта оценка не даст: то, что вода (не лед и не пар, а именно жидкая вода) может существовать, еще не означает, что она на планете есть. Для более надежного определения состава атмосфер землеподобных экзопланет нужны не фотометрические, а спектроскопические наблюдения. Такие проекты уже в работе: это американские космические обсерватории TPF-C и TPF-I, а также европейская обсерватория “Дарвин”. Но эти аппараты отправятся на орбиту не раньше 2015 г. Их задачей станет поиск “биомаркеров”, наиболее надежными из которых считаются спектральные линии кислорода (в форме озона), паров воды и метана. В первую очередь такому исследованию будут подвергнуты планеты наиболее близких к нам звезд. Ближайшая экзопланета обнаружена у звезды ε Эридана, расположенной на расстоянии 10 световых лет (3.22 пк) от Солнца. Но она лишь немногим меньше Юпитера и обращается на расстоянии 3.3 а.е. от звезды чуть менее массивной и менее горячей, чем Солнце. Иными словами, эта планета и ее возможные спутники находятся вне “зоны жизни”.

С другой стороны, планета GJ 581g привлекла внимание именно тем, что условия на ее поверхности должны быть весьма схожи с земными. Центральная звезда этой системы – красный карлик спектрального класса M3, втрое уступает Солнцу по массе и размеру и почти в 100 раз по светимости. Эта звезда удалена от нас на 20 св. лет (6.2 пк) и вполне доступна для наблюдения даже в бинокль. С открытием шестой планеты система звезды GJ 581 стала чемпионом по количеству планет. Точнее говоря, она разделила

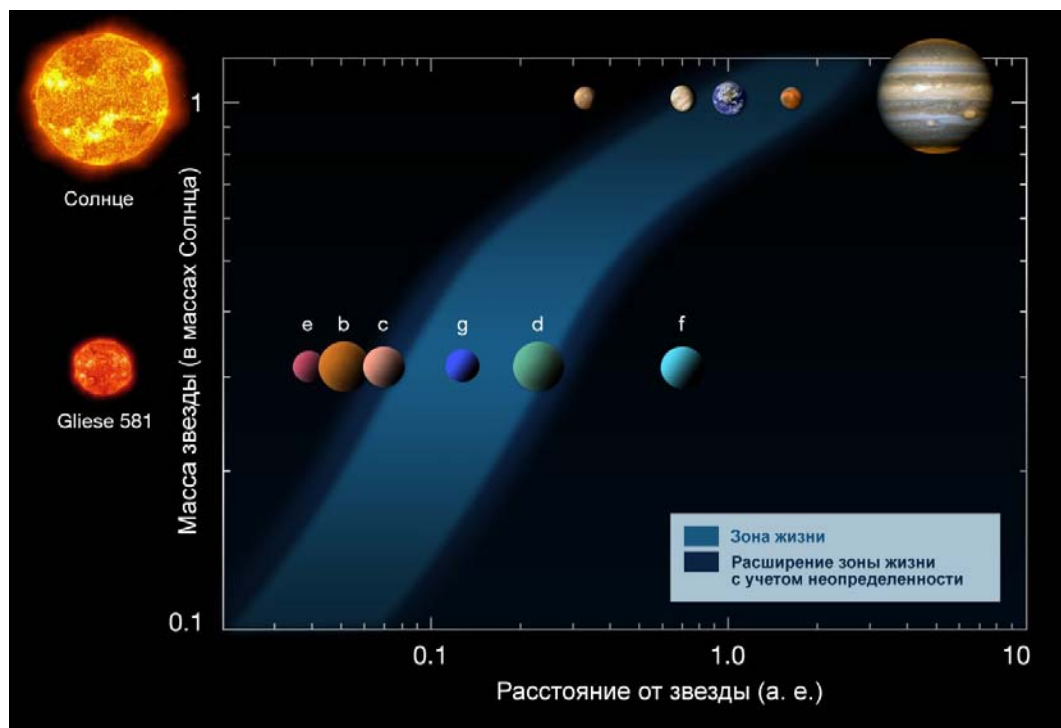


Рис. 6. Положение зоны жизни у звезд с массами менее 1 массы Солнца. Указано распределение планет Солнечной системы и планет звезды Глизе 581. Массы планет показаны относительным размером “шариков”. Рисунок адаптирован с http://en.wikipedia.org/wiki/Gliese_581

первое место с системой звезды HD 10180, вокруг которой обращаются, как минимум, шесть планет, а существование еще одной предстоит доказать. Впрочем, и относительно системы GJ 581 тоже пока не было независимых подтверждений, поэтому о существовании пятой и шестой ее планет можно говорить лишь с определенной долей уверенности. Так или иначе, планетные системы звезд GJ 581 и HD 10180 по своей населенности приближаются к Солнечной системе, содержащей, как известно, восемь планет.

По-видимому, планетная система GJ 581 лишена газовых гигантов калибра Юпитера и Сатурна: массы обнаруженных в ней планет заключены в диапазоне от 2 до 16 масс Земли, а их орбиты близки к круговым. Самое же интересно состоит в том, что по крайней мере одна из планет, а именно – GJ 581g массой около $3M_E$, расположена в “зоне жизни” (рис. 6): средняя температура на ее поверхности, согласно расчетам, близка к 0°C . При столь небольшой массе эта планета является типичной “сверхземлей”. Ее радиус и сила тяжести у поверхности всего в полтора раза превосходят земные. Поэтому планета не может удерживать самые летучие элементы (водород, гелий) и должна иметь твердую поверхность, покрытую не слишком плотной атмосферой. Учитывая, что атмосферное давление там может быть близко к земному, астрономы заключили, что на поверхности планеты возможно наличие жидкой воды.

Возможно, самым большим отличием планеты GJ 581g от Земли является ее очень короткий орбитальный период, составляющий всего около 37 земных суток. Дело в том, что планета GJ 581g располагается на расстоянии 0.15 а.е. от своей звезды. Кроме прочего, это заметно усиливает приливный эффект, действующий со стороны звезды на планету. Весьма вероятно, что орбитальное и суточное вращения планеты синхронизованы, т.е. она постоянно ориентирована к звезде одним и тем же полушарием. Это должно вызывать совершенно особый характер циркуляции атмосферы и распределение климатических зон.

Если существование планеты GJ 581g подтвердится, то следующей задачей станет получение ее прямого изображения и спектра, достаточно качественного для того, чтобы в нем можно было искать биомаркеры. Любопытно, что несколько лет назад, еще до открытия планеты GJ 581g, эта система привлекла к себе внимание энтузиастов поиска внеземных цивилизаций. Учитывая ее схожесть с Солнечной системой и сравнительную близость к нам, в 2008 г. в ее сторону было отправлено послание с помощью 70-метрового евпаторийского радиотелескопа. В самом благоприятном случае ответного послания можно ожидать не ранее 2029 г.

Заключение

Обнаружение первых внесолнечных планетных систем стало одним из крупнейших научных достижений XX века. Решена важнейшая проблема: Солнечная система не уникальна; формирование планет рядом со звездами – это закономерный этап эволюции. Несколько столетий астрономы бьются над загадкой происхождения Солнечной системы. Главная проблема в том, что нашу планетную системы до сих пор не с чем было сравнивать. Теперь ситуация изменилась: практически каждый месяц астрономы открывают новую экзопланету; в основном это планеты-гиганты, но уже начали обнаруживаться и планеты земного типа. Становится возможной классификация и сравнительное изучение планетных систем. Это значительно облегчит отбор жизнеспособных гипотез и построение правильной теории формирования и ранней эволюции планетных систем, в том числе – Солнечной системы.

В то же время, стало ясно, что Солнечная система нетипична: ее планеты-гиганты движутся по круговым орбитам вне “зоны жизни”, что позволяет длительное время существовать внутри этой зоны планетам земного типа, одна из которых – наша Земля – имеет биосферу. Среди обнаруженных планетных систем большинство не обладают этим качеством.

Литература

- Джонс Б.У.* Жизнь в Солнечной системе и за ее пределами / Пер. с англ. под. ред. В.Г. Сурдина. М.: Мир, 2007. 335 с.
- Каталог экзопланет, прямые изображения которых уже получены.
<http://exoplanet.eu/catalog-imaging.php>.
- Солнечная система / Ред.-сост. В.Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2008. 400 с. (Астрономия и астрофизика).
- Сурдин В.Г.* Коричневые карлики: не звезды, и не планеты // Природа. 1999. № 7. С.3–12.
- Торн К.* Черные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна / Пер. с англ. под. ред. член-корр. РАН В.Б. Брагинского. М.: Физматлит, 2007. 616 с.
- Jones B.W.* Exoplanets – search methods, discoveries, and prospects for astrobiology // International J. Astrobiology. 2008. V. 7 (N 3 & 4). P.279–292. В сети: <http://arxiv.org/abs/0901.2018>.
- Kalas P., Graham J., Chiang E. et al.* Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light Years from Earth. 2008. <http://arxiv.org/abs/0811.1994>.
- Marois C., Macintosh B., Barman T. et al.* Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. 2008. <http://arxiv.org/abs/0811.2606>.
- Perryman M.A.C.* Extra-solar planets // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P.1209–1272.
- Portal of the Universe. Профессиональный научно-популярный информационный узел по вопросам астрономии. <http://www.portaltotheuniverse.org>.
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia. Профессиональный астрономический сайт. Содержит наиболее полный “Interactive Extra-solar Planets Catalog”. <http://exoplanet.eu>.
- Pravdo S.H., Shaklan S.B.* An ultracool star's candidate planet // Astrophys. J. 2009. V. 700, N 1. P.623–632.

Rodriguez J. First find Planet-hunting method succeeds at last // NASA, 2009.
<http://planetquest.jpl.nasa.gov/news/firstFind.cfm>.
Planet Quest // NASA. <http://planetquest.jpl.nasa.gov>.

Сведения об авторе

СУРДИН Владимир Георгиевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета. 119992, Москва, Университетский пр., д. 13. Тел.: (495) 939-20-46. E-mail: surdin@sai.msu.ru или vsurdin@gmail.com

EXOPLANETS: FROM GASEOUS GIANTS TO SUPER-EARTHS

V.G. Surdin

Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Abstract: In this brief review the main methods by which exoplanets are being discovered are outlined, and then the discoveries that have so far been made are presented. More than 422 planetary systems around other stars known by the end of November 2010, containing a total of more than 500 planets. Perhaps some of them possess the conditions necessary for the maintenance of carbon-liquid water life.

Keywords: Exoplanets – discovery methods, exoplanets – discoveries, exoplanets – investigations for habitability.