

Методы обнаружения земноподобных планет

Г. М. Бескин, Д. А. Растегаев, Ю. Ю. Балегга

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Открытие планеты у звезды главной последовательности 51 Peg в 1995 году ознаменовало начало “новой эры” в астрономии. На сегодняшний день найдено свыше 200 звезд с планетами “юпитерианских” масс. Однако главной, все еще не решенной, задачей экзопланетологии остается обнаружение и изучение планет, на которых может возникнуть жизнь, в первую очередь — похожих на Землю. В работе проанализирована эффективность различных методов поиска планет земных масс. Показано, что для достижения этой цели можно использовать аподизацию при получении прямых изображений планет, микролинзирование ими фоновых звезд, транзиты и тайминг пульсаций родительской звезды. Обсуждаются характеристики некоторых космических миссий, в рамках которых возможно обнаружение маломассивных планет.

DETECTION METHODS OF EARTH-LIKE PLANETS, by G.M.Beskin, D.A.Rastegaev, Y.Y.Balega. The “new times” in astronomy began in 1995 after discovery of planets orbiting main sequence stars. Till now over 200 planets with Jupiter-like masses have been detected. The main problem of exoplanetology to be solved is finding and study of planets which are suitable for life creation — first of all Earth-like ones. Efficiency of different methods aimed to search for such planets are analysed. It is demonstrated that Earth-like planets can be detected by apodization of their images, microlensing of background stars, transits and timing of pulsations of host stars. Several space-borne projects are discussed as tools of low-mass planets detections.

1. Введение

Открытие планет вокруг пульсара PSR 1257+12 (Волчан и Фрайл, 1992) активизировало их поиски у обычных звезд. Обнаружение же “горячих Юпитеров” (Майор и Келоз, 1995) стало началом “новой эры” не только в астрономии, но и в проблеме SETI: надежды найти признаки жизни, похожей на нашу, стали реальностью. Однако большинство известных на сегодняшний день планет имеют массы, сравнимые с массой Юпитера, и удалены от родительской звезды на расстояния, не превышающие 1 АЕ (около 70% объектов). В таких случаях возможность возникновения углеродно-кислородной жизни практически исключена. По современным представлениям она может появиться на планетах с земными массами, находящихся в зоне жизни — области вокруг звезды, в которой на планетах может существовать жидкая вода (Кастинг и др., 1993) (рис. 1). Например, для звезд спектрального класса G эта зона лежит между орбитами Венеры и Марса.

Массивные планеты обладают достаточной силой тяжести, чтобы удерживать атмосферу, плане-

ты же с массами менее $0.5 M_{\oplus}^1$, скорее всего, ее теряют. Кроме того, у таких маломассивных планет отсутствуют тектонические плиты, необходимые для реализации круговорота CO_2 (Кастинг и др., 1993). Таким образом, в рамках проблемы SETI необходимо искать земноподобные планеты на расстояниях около 1 АЕ от солнцеподобных звезд. В данной статье мы рассматриваем применимость различных методов поиска для обнаружения планет с земными параметрами при наблюдениях в оптическом и ИК-диапазонах.

2. Методы обнаружения планет

Существующие методы обнаружения планет (рис. 2) можно разделить на два типа: прямые и косвенные. В первом случае регистрируется излучение самой планеты. Во втором — обнаруживаются вариации характеристик родительской звезды (или фонового объекта — в микролинзировании), обу-

¹ Далее в тексте используются следующие обозначения: M_J — масса Юпитера, M_{\oplus} — масса Земли (близка к $0.003 M_{\odot}$).

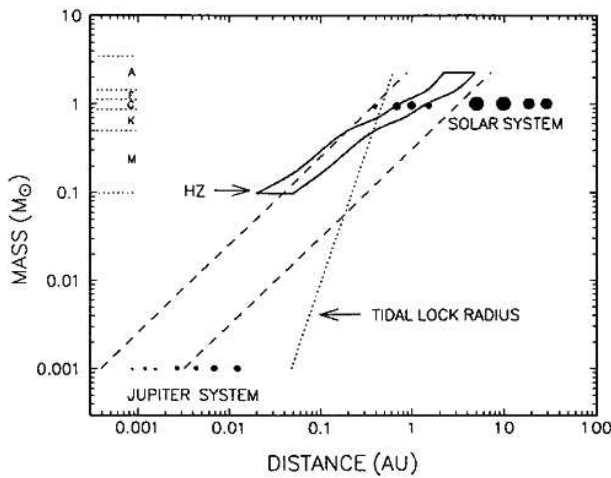


Рис. 1: Зона, пригодная для существования углеродно-кислородной жизни (помечена HZ). По оси абсцисс — логарифм расстояния планеты от родительской звезды, по оси ординат — логарифм массы родительской звезды в солнечных единицах (Кастинг и др., 1993).

словленные влиянием планеты. Таким образом, в число прямых методов входит получение изображения планеты (с использованием адаптивной оптики, коронографии, интерферометрии) и длинноволновая интерферометрия, а к косвенным относятся: построение кривой лучевых скоростей звезды, астрометрия, наблюдения транзитов и микролинзирования, тайминг пульсаций родительской звезды. Каждый метод характеризуется измеряемыми (наблюдаемыми) величинами. Они связаны с физическими параметрами планеты: ее массой M_p , радиусом R_p , температурой T_p , расстоянием от родительской звезды a , орбитальным периодом P , яркостью L_p и расстоянием D от Солнца² (Шнайдер, 1999).

2.1. Метод лучевых скоростей (МЛС)

Практически все известные на сегодня планеты обнаружены в результате анализа лучевых скоростей звезды (<http://exoplanet.eu/>). Современная точность их измерения составляет около 1–3 м/с, что одновременно является и фундаментальным пределом, поскольку такие скорости характерны и для движений в атмосфере звезды (Перриман и др., 2005). Однако эти наблюдения позволяют находить у солнцеподобных звезд лишь планеты с массами до 0.01 – 0.1 M_{\oplus} (в зависимости от

² Соответствующие величины, относящиеся к родительской звезде, будем обозначать *.

орбитального периода). Точность же определения лучевой скорости, необходимая для обнаружения земноподобной планеты у таких звезд, составляет 0.03 – 0.1 м/с. Еще одним недостатком метода является зависимость результатов от неизвестного наклона орбиты к лучу зрения.

В то же время маломассивная звезда (в частности карлик спектрального класса М) может менять свою лучевую скорость под воздействием земноподобной планеты с амплитудой, превышающей предельную чувствительность МЛС. Именно таким образом и была обнаружена планета с массой $5M_{\oplus}$ у звезды Gl 581 (Удри и др., 2007). Год на этой планете, попадающей в близкую к звезде зону жизни, длится около 12 дней. При этом из-за приливного взаимодействия она обращена к светилу одной стороной. Таким образом, впервые появились основания для размышлений о характере жизни в столь нестандартных условиях.

2.2. Методы, основанные на исследовании прямых изображений звезды или планеты

Отношение яркостей Земли и Солнца в оптическом диапазоне составляет около $5 \cdot 10^{-10}$. Для Юпитера же эта величина близка к $2.5 \cdot 10^{-9}$. Она возрастает в диапазоне 1 – 2 мкм и достигает 10^{-7} для земноподобных планет (Энджел и др., 1986). Следовательно, чтобы обнаружить планету на фоне звезды, нужно получать прямые изображения с контрастом не менее 18 звездных величин. Теоретические оценки показывают, что использование специальных приемов его повышения позволяет решить эту задачу (см. пп. 2.2.3, 2.2.6).

2.2.1. Астрометрия звезды-хозяйки

Метод заключается в измерении вариаций положения фотоцентра звезды, чье движение возмущено планетой. Полуось эллипса смещения фотоцентра можно найти из выражения (Перриман и др., 2005)

$$\alpha = \frac{M_p}{M_*} \cdot \frac{a}{D}. \quad (1)$$

Например, если бы мы наблюдали нашу Солнечную систему с расстояния 10 пк, то влияние Юпитера приводило бы к смещению фотоцентра Солнца на 500 микросекунд дуги, а Земли — на 0.3 микросекунды дуги. Для сравнения — данные, полученные на спутнике HIPPARCOS (ЕКА, 1997) (наилучшие на сегодняшний день), имеют астрометрическую точность около 1 миллисекунды дуги. Планируемая чувствительность приборов спутника GAIA (Перриман, 2003), запуск которого намечен в следующем десятилетии, составляет 3 ми-

Planet Detection Methods

Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated April 2007)
[corrections or suggestions please to michael.perryman@esa.int]

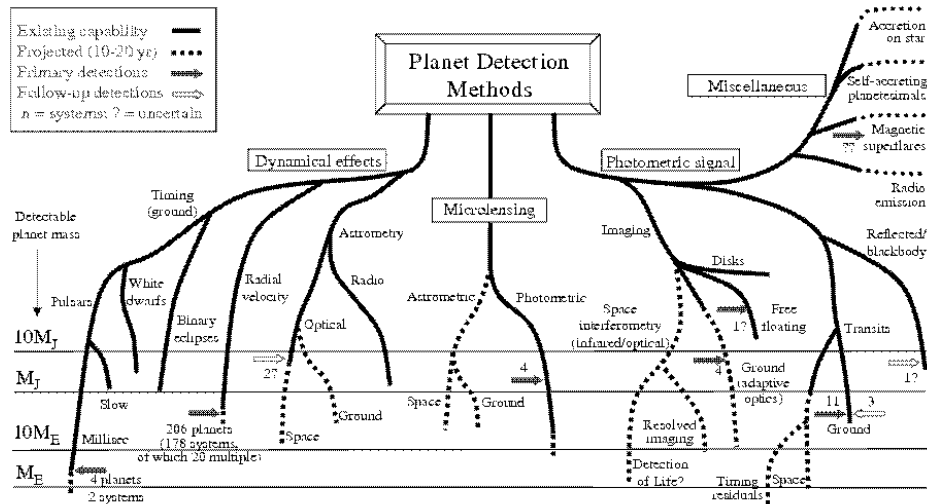


Рис. 2: Классификация методов обнаружения планет по Перриману и Хайнауту (2005).

кросекунды дуги. Предельная точность интерферометров SIM Planet Quest (Научная рабочая группа SIM, 2000) также не будет превышать 1 микросекунду дуги. Впрочем, у самых близких звезд предполагается обнаружить несколько планет, сопоставимых по массе с Землей. Тем не менее, в ближайшем будущем с помощью астрометрии нельзя будет обнаруживать земноподобные планеты в больших количествах.

2.2.2. Длиннобазовая интерферометрия

Применение методов классической интерферометрии Майкельсона при наблюдениях с системой оптических телескопов сопряжено с большими техническими трудностями. Основная сложность заключалась в согласовании оптической разности хода лучей от телескопов, разнесенных на расстояния в десятки метров друг от друга, с точностью, близкой к 1 мкм. На сегодняшний день технические проблемы успешно решены (см. например, сайт <http://olbin.jpl.nasa.gov>), однако этот метод не позволяет обнаруживать земноподобные планеты. Он применим только к объектам ярче 9 звездной величины, при этом контраст между звездой

и планетой не должен превышать 7-ми звездных величин (Монье, 2003; Балдвин, 2003) (рис. 3).

2.2.3. Коронаграфия

Основной методической особенностью коронаграфии является экранирование яркого центрального объекта специально подобранной диафрагмой, что позволяет повысить контраст изображения планеты. Тем не менее в этом случае максимальная разность блеска между нею и звездой не может превышать 8 звездных величин, что явно не достаточно для обнаружения земноподобных планет. Однако применение дополнительных методов (например аподизации) позволяет выделять компоненты слабее звезды более чем в 10^9 раз (Янг и Костинский, 2004).

2.2.4. Адаптивная оптика

Использование адаптивной оптики в классическом варианте не позволяет обнаруживать планеты земного типа, так как этот метод не разрешает компоненты с разностью блеска, превышающей 5 звездных величин. На рис. 4 показано изображение пла-

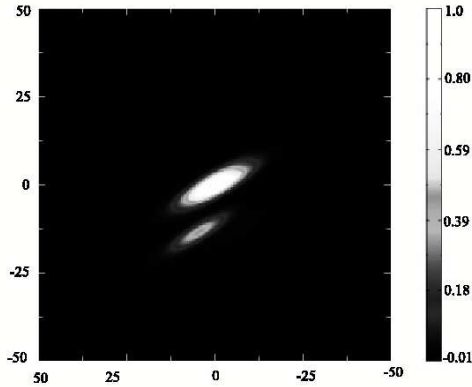


Рис. 3: Изображение системы Θ^1 Ori C, восстановленное методом апертурного синтеза по данным, полученным на длинноволновом интерферометре ИОГА в H полосе (Краус и др., 2007).



Рис. 4: Изображение планеты, обращающейся вокруг коричневого карлика 2M1207 (Шовэн и др., 2004).

неты с массой $5M_{\text{J}}$, обращающейся вокруг коричневого карлика 2M1207 (Шовэн и др., 2004). Контраст здесь составляет около 5 зв. вел. и близок к предельному для метода адаптивной оптики.

2.2.5. Покрытие Луной

Угловое разрешение метода не зависит от размера зеркала телескопа и достигает 3–5 мс дуги (рис. 5). Разность блеска разделяемых объектов для телескопов 8–10-метрового класса не может превышать 11 звездных величин (Рикики, 2003), что не дает возможности использовать покрытие звезд Луной для поиска земноподобных планет.

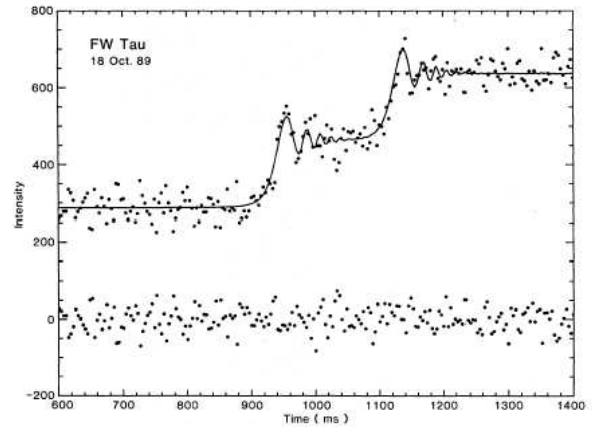


Рис. 5: Кривая блеска двойной системы FW Tau при покрытии Луной (Лейнерт и др., 1991). Расстояние между компонентами — $0''.151 \pm 0''.005$, разность блеска $\Delta m = 0$.

2.2.6. Аподизация

Планета, обращающаяся вокруг звезды с яркостью L_{\star} на угловом расстоянии $\alpha = a/D$, отражая свет звезды, имеет яркость L_p , определяемую выражением (Шнайдер, 1999)

$$L_p = \frac{AL_{\star}}{8} \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 \phi(t), \quad (2)$$

где $\phi(t) = 1 - \sin i - \sin(2\pi t/P)$ — фазовый фактор, A — альbedo, i — наклонение орбиты. Как было отмечено в п. 2.2, отношение L_p/L_{\star} очень мало, лишь в ИК-диапазоне оно достигает 10^{-7} (Энджел и др., 1986). К счастью, при достаточном расстоянии от звезды контраст увеличивается, поскольку изображение планеты располагается на фоне излучения дифракционных колец, а не центрального максимума размером $\theta = 1.2\lambda/d$, где d — диаметр телескопа.

Для Юпитера ($a = 5AU$), если бы его наблюдали на 1-м телескопе на длине волны 0.5 мкм с расстояния 5 пк, отношение яркости планеты к “подсветке” звезды составило бы $2.5 \cdot 10^{-4}$. Чтобы обнаружить такую планету на уровне 5σ , требуется суммарная экспозиция в $4 \cdot 10^6$ с (1 месяц), что является нереальным. Однако поверхность зеркала (скорее всего, вторичного) телескопа можно изменить таким образом, чтобы свет от звезды, отраженный разными его зонами, приходил в фокальную плоскость в интерференционном минимуме. Рассмотрим амплитуды световых волн, пришедших из двух разных точек зеркала, разнесенных на расстояние l : A_{\star}^1 и A_{\star}^2 для звезды и A_p^1 и A_p^2 для планеты. Пусть поверхность зеркала деформирована так, что эти две точки смещены вдоль

светового луча на величину d . В фокальной плоскости (фокусное расстояние — F) относительная разность фаз A_\star^1 и A_\star^2 составит $(l/F)d/\lambda$, а для лучей A_p^1 и A_p^2 она будет $(l/F + \alpha)d/\lambda$. Результирующие амплитуды волн в фокальной плоскости (Шнайдер, 1999):

$$A_\star = A_\star^1 + A_\star^2 = A_\star^1(1 + \exp(i(l/F)d/\lambda)), \quad (3)$$

$$A_p = A_p^1 + A_p^2 = A_p^1(1 + \exp(i(l/F + \alpha)d/\lambda)). \quad (4)$$

Величины F и α фиксированы, но можно варьировать l и d таким образом, чтобы выполнялись условия $(l/F)d/\lambda = (2n+1)\pi$ и $(l/F + \alpha)d/\lambda = 2n\pi$. Тогда мы будем иметь $A_\star = 0$, а $A_p = 2A_p^1 \neq 0$, т.е. излучение звезды в области локализации изображения планеты отсутствует. Варьировать d можно разными способами, например, с помощью пьезоэлектрических активаторов. Этот метод называется “аподизацией” и позволяет уменьшить контраст системы “звезда–планета” до величины, достаточной для обнаружения земноподобных планет.

Вместо деформирования зеркала можно воспользоваться турбулентностью атмосферы, которая сама генерирует произвольные d на частотах порядка 1 кГц. Получая короткоэкспозиционные изображения звезды и планеты, на некоторых снимках мы будем видеть саму планету, если случайно будут выполняться приведенные выше условия (метод темных спеклов) (Лабейри, 1995).

Если не использовать аподизацию для подавления излучения звезды, а просто компенсировать искажения волнового фронта, то и в этом случае можно обнаружить планеты, но с юпитерианскими массами и только у маломассивных звезд или коричневых карликов (Шовэн и др., 2004) (пункт 2.2.4).

2.3. Микролинзирование

Эффект гравитационного микролинзирования возникает, когда фоновая звезда пересекает окружность Эйнштейна объекта, расположенного между нею и наблюдателем. При этом ее яркость изменяется со временем в виде симметричной вспышки, продолжающейся недели–месяцы. Если объект представляет собой звезду с планетой, на кривой блеска появляются дополнительные достаточно контрастные детали малой длительности. Для планет с массами от $1M_\oplus$ до $10M_\oplus$ интенсивность этих деталей возрастает более чем на 10% в течение нескольких часов (Бене и Рае, 1996). В результате микролинзирования к настоящему времени обнаружены 4 планеты (<http://exoplanet.eu>) (рис. 6) с массами от 2.6 до $0.017M_\oplus$. Однако, теоретически этот метод позволяет обнаруживать и менее массивные тела.

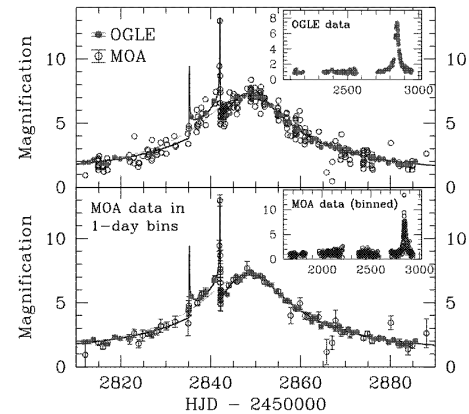


Рис. 6: Кривая блеска события микролинзирования OGLE 2003-BLG-235, в котором впервые обнаружена планета вблизи звезды — гравитационной линзы (Бонд и др. 2004).

К сожалению, микролинзирование связано с “мгновенной” конфигурацией фоновой звезды, звезды с планетой и наблюдателя, которая никогда не повторится. Таким образом, планета не может быть исследована. К настоящему времени уже выполнено несколько крупных проектов по поиску гравитационного микролинзирования (OGLE, MOA и др.), а также планируются новые. Низкая результативность обнаружения планет с помощью этого метода говорит о малой вероятности таких событий и необходимости более длительных рядов наблюдений.

2.4. Транзит

При прохождении планеты по диску звезды (транзите) блеск последней незначительно ослабляется. Наблюдения этих вариаций яркости позволяют одновременно определить несколько параметров такой системы (Дииг, 1998). Величина падения яркости ΔL и яркость звезды L_\star связаны с радиусами звезды и планеты соотношением

$$\frac{\Delta L}{L_\star} \approx \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2 \quad (5)$$

в случае равномерного распределения яркости по звездному диску. При транзите на экваторе звезды с коэффициентом потемнения к краю 0.6 максимальное падение блеска возрастает на 25%. Так как потемнение к краю зависит от длины волны, планетный транзит также вызывает, хотя и незначительные, вариации цвета. Длительность прохождения планеты по диску звезды τ задается фор-

мулой

$$\tau = \frac{P}{\pi} \left(\frac{R_* \cos \delta + R_p}{a} \right), \quad (6)$$

где δ — широта транзита. Нужно отметить, что обнаружение небольших вариаций τ может указывать на присутствие в системе дополнительных планет (Дииг, 1998).

После регистрации транзита, если известен радиус звезды, например, по данным спектральной классификации, из (5) можно найти радиус планеты. Зная P и массу звезды, можно определить большую полуось орбиты a из третьего закона Кеплера. С использованием (6) можно получить широту транзита δ , зная его длительность τ . Эта информация может быть использована для оценки угла наклона орбитальной плоскости по формуле:

$$\cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a}. \quad (7)$$

Отсюда (при $\delta = 90^\circ$) легко найти минимальное наклонение, при котором прохождение по диску еще обнаруживается,

$$i_{min} = \arccos(R_*/a). \quad (8)$$

Из соотношений (5) и (7) следуют основные особенности применения метода — необходимо регистрировать очень малые вариации блеска, эффект можно наблюдать только при орбитальном наклонении, близком к 90° , как у затменно-двойных звезд. Отношение диаметров внутренних планет Солнечной системы и Солнца составляет около 1:100. Для наблюдателя, который пытается обнаружить транзиты планет Солнечной системы, относительное падение блеска звезды будет

$$\frac{\Delta L}{L_*} = 8.4 \cdot 10^{-5} \text{ для Земли,}$$

$$\frac{\Delta L}{L_*} = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ для Юпитера.}$$

Переменность Солнца на шкале от нескольких часов до одного дня (характерная длительность транзита) существенно меньше — $\Delta L_\odot/L_\odot \sim 10^{-5}$. Изменения блеска, обусловленные пятнами на поверхности вращающейся звезды, можно легко отличить от транзита из-за различий в характерных временах, так как они связаны с вращением звезды вокруг оси. В то же время предельная точность фотометрии при наземных наблюдениях ограничена низкочастотными атмосферными нестабильностями и составляет около 0.1%. Таким образом, транзиты юпитероподобных планет легко могут наблюдаться с Земли (рис. 7). Для обнаружения же земноподобных планет около звезд

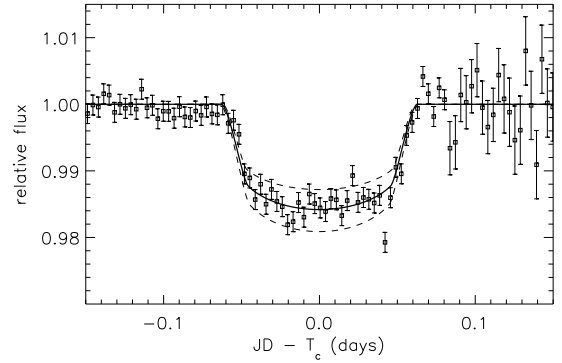


Рис. 7: Первое обнаружение планеты методом транзита у звезды HD 209458 (Шарбоне и др. 2000).

главной последовательности требуются космические наблюдения. Их чувствительность существенно выше ожидаемых вариаций блеска звезды в результате транзита земноподобной планеты.

Для удаленного наблюдателя, не оставляющего попытки обнаружить Землю в Солнечной системе, достижение благоприятного результата возможно при наклонении земной орбиты, превышающем $\delta = 89.73^\circ$. Легко видеть, что вероятность удачной для наблюдения транзита ориентации системы есть отношение площадей поверхностей шарового слоя высоты $2R_*$ и радиуса a и всего шара $4\pi a^2$

$$p \approx \frac{2\pi \cdot 2R_*}{4\pi a^2} = R_*/a = \cos(i_{min}), \quad (9)$$

что дает:

0.65% — для Венеры,

0.47% — для Земли,

0.041% — для Юпитера.

Для оценки частоты обнаружения транзитов эти вероятности необходимо разделить на P , откуда следует, что транзиты земноподобных планет могут обнаруживаться в 100 раз чаще, чем транзиты “юпитеров” (Дииг, 1998). Таким образом, метод транзитов весьма эффективен для поиска внутренних планет, однако лишь при наблюдениях из космоса.

2.5. Тайминг

Изменения времени распространения излучения звезды, обладающей планетой, из-за обращения вокруг центра масс системы могут быть использованы для поиска планет. Они очевидным образом приводят к вариациям моментов регистрации

Таблица 1: Характерное время обнаружения системы земной конфигурации

Тип звезды	P_{10}/ε_{-3} 10 мин/ $0^m.001$	m_{min} mag	T_{min} лет	m_{aver} mag	T_{aver} лет
δ Щита	$6 \cdot 10^{-2} - 42$	2	0.02	9	14.33
β Цефея	0.18 – 3.6	2	0.20	9	128.99
гоАр	0.4 – 150	4	6.37	6	40.19
Белый карлик	$3 \cdot 10^{-3} - 4$	12	0.57	14	3.58
Солнце	3.0 – 4000	0	9.00	3	142.64

фиксированных фаз пульсаций (вращения звезды), если добротность этих периодических процессов достаточно высока. Именно измерения вариаций моментов прихода радиопульсов пульсара PSR 1257+12 позволили обнаружить планеты земного типа (Волчан и Фрайл, 1992). В частности, для круговой орбиты, видимой с ребра, и типичной массы пульсара $1.35M_{\odot}$ амплитуда изменений моментов прихода импульсов пульсара определяется выражением (Волчан, 1997):

$$\tau_p = 1.2 \left(\frac{M_p}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{P}{1yr} \right)^{2/3} \text{ ms.} \quad (10)$$

Планеты с массой Юпитера или Земли могут быть обнаружены у "нормальных" медленных пульсаров, в то время как тела значительно меньшей массы, такие как Луна и большие астероиды могут быть обнаружены у миллисекундных пульсаров. Аналогичные исследования вариаций периодических изменений блеска у "обычных" звезд могут привести к обнаружению земноподобных планет (Бескин и др., 2002). В табл. 1 приведено характерное время, необходимое для обнаружения планеты земного типа у пульсирующих родительских звезд различных видов (Бескин и др., 2002). В первой колонке указан тип звезды, во второй — отношение периода пульсаций, выраженного в единицах 10 минут, к глубине модуляции ε ($\varepsilon_{-3} = 1000\varepsilon$). Далее приведены максимальная и средняя звездные величины объекта и соответствующие продолжительности наблюдений, необходимых для обнаружения земноподобной планеты. Для оценок использовались наилучшие отношения P к ε (самые короткие периоды пульсаций и самые большие амплитуды вариаций). Таким образом, в течение нескольких недель – одного года можно обнаружить земноподобные планеты у достаточно ярких переменных звезд типа δ Щита, β Цефея и белых карликов при наблюдениях на 1–2-метровом телескопе.

3. Перспективы

Для обнаружения и исследования планет, похожих на Землю, предназначены многочисленные космические и наземные инструменты, описание которых можно найти на странице <http://exoplanet.eu/>. Здесь мы упомянем лишь три — GAIA, KEPLER и SIM PlanetQuest. Реализация этих космических проектов, запланированных на ближайшие 10 лет, позволит получить данные высокого качества.

GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) — пожалуй, самый грандиозный проект ближайшего будущего. Он не предназначен специально для поиска планет. Это астрометрическая миссия Европейского Космического Агенства (ESA), в ходе которой за пять лет планируется измерить параллаксы около миллиарда звезд с беспрецедентной точностью. Например, для звезд до 15-ой звездной величины она составит 10 микро-секунд дуги, что по порядку величины сопоставимо с угловым диаметром человеческого волоса, наблюдаемого на расстоянии 1000 км. Расстояния до звезд вблизи галактического центра планируется измерить с точностью 10%. Хотя даже такая чувствительность не позволит обнаружить планеты земного типа, данные, полученные в рамках этого проекта, дадут возможность существенно продвинуться в решении многих астрофизических проблем, в том числе и связанных с изучением экзопланет. Запуск спутника намечен на 2011 год.

KEPLER — это первая миссия NASA, предназначенная для обнаружения земноподобных планет при наблюдениях их транзитов. Запуск спутника запланирован на 2008 год. На его борту будет установлен телескоп системы Шмидта диаметром 0.95 м с полем зрения 105 град². В течение 4-летней работы инструмента будет проводиться фотометрический мониторинг выбранной группы звезд ярче 14-ой звездной величины. У звезд 12-ой величины с помощью установленного на борту приемника можно будет обнаружить транзит земноподобной планеты на уровне 4σ за 6.5 часов. Подробности реализации проекта — на сайте

<http://kepler.nasa.gov>.

SIM PlanetQuest (Space Interferometry Mission) — проект NASA. Это первый космический интерферометр, предназначенный для высокоточных измерений параллаксов звезд. База интерферометра составит 9 метров. В рамках проекта предполагается проведение глубокого обзора (Deep search) — измерение параллаксов ближайших 250 звезд с точностью 1 микросекунда дуги; широкого обзора (Broad survey) — измерение параллаксов около 2000 звезд с точностью 3 микросекунды дуги; поиска массивных планет вокруг молодых звезд. Согласно последним данным, миссия начнет свою работу в 2010 году и продлится не менее 10 лет. Подробную информацию можно найти на сайте http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.cfm.

4. Заключение

Земноподобная планета, обращающаяся вокруг звезды, расположенной в 100 пк от Солнца для земного наблюдателя, будет удалена от своего светила на 10 mas, имея блеск 28-29^m. В принципе, некоторые методы наблюдений, основанные на анализе собственного блеска планеты (т.е. ее изображения), обладают достаточным пространственным разрешением, а при реализации на телескопах 8-10-метрового класса и проникающей силой, чтобы обнаружить такие объекты (коронोगрафия, адаптивная оптика, покрытие Луной). Однако их непосредственное использование не дает возможности получить разумное отношение “сигнал-шум” при поиске планет из-за подсветки звезды, т.е. контраст разделяемых компаньонов системы ограничен 5-11 зв. величинами. В то же время сочетание упомянутых методов с подавлением излучения звезды в области локализации планеты (аподизация) повышает допустимый контраст до 20-ти зв. величин, что позволит в конечном итоге обнаруживать земноподобные спутники звезд (Лабейри, 1995; Шнайдер, 1999).

С другой стороны, оценки показали, что методы поиска планет, использующие их влияние на излучение звезды-хозяин как затмевающего тела или фоновой звезды как гравитирующего (транзит и микролинзирование, соответственно), пригодны для обнаружения земноподобных объектов (Бене и Рас, 1996; Дииг, 1998). Есть серьезные надежды, что транзиты планет, подобных Земле, будут обнаружены в ближайшие годы в рамках одного из нескольких десятков космических проектов. Можно ожидать получение подобных результатов и в продолжающихся ныне обзорах по обнаружению явлений микролинзирования, например, OGLE (Удальский, 2003). Наконец, нам представляется достаточно перспективным развитие методов изучения вариаций параметров пульсирующих

звезд, в особенности белых карликов (Бескин и др., 2002). Вполне вероятно, что это направление исследований приведет к обнаружению земноподобной планеты у белого карлика (о возможности образования планет в планетарных туманностях см., например (Сокер, 1999)).

Список литературы

- Балдвин (Baldwin J. E.), 2003, *Optical Astronomy II*, volume **4838** of Proc. SPIE, 1
- Бене и Рае (Bennett D. P., Rhie S. H.), 1996, *ApJ*, **472**, 660
- Бескин и др. (Beskin G., Bartolini C., Guarnieri A., Piccioni A.), 2001, in: "The bridge between the big bang and biology", *Proceedings of International workshop*, ed.: Giovanelli F., Stromboli, 190
- Бескин и др. (Beskin G., Bartolini C., Guarnieri A., Piccioni A.), 2002, in: *Proceedings of the First Eddington Workshop on Stellar Structure and Habitable Planet Finding*, ed.: Battrick B., Cordoba, 225
- Бонд и др. (Bond I. A. et al.), 2004, *ApJ*, **606**, L155
- Волчан и Фрайл (Wolszczan A., Frail D. A.), 1992, *Nature*, **355**, 145W
- Волчан (Wolszczan A.), 1997, in: "Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions", *Proceedings of a workshop*, ed.: Soderblom D., Baltimore, 135
- Дииг (Deeg H.-J.), 1998, in: "Brown dwarfs and extrasolar planets", *Proceedings of a Workshop*, eds.: Rebolo R., Martin E. L., Zapatero Osorio M. R., Puerto de la Cruz, 216
- ЕКА (European Space Agency), 1997, "The Hipparcos and Tycho Catalogues", ESA Publ. Division, SP-1200
- Кастинг и др. (Kasting J. F., Whitmire D. P., Reynolds R. T.), 1993, *Icarus*, **101**, 108
- Лабейри (Labeurie A.), 1995, *A&A*, **298**, 544
- Лейнерт и др. (Leinert at al.), 1991, *A&A*, **250**, 407
- Майор и Келоз (Mayor M., Queloz D.), 1995, *Nature*, **378**, 355
- Монье (Monnier J. D.), 2003, *Reports on Progress in Physics*, Volume **66**, Issue 5, 789
- Научная рабочая группа SIM (SIM Science Working Group), 2000, Final report of the SIM Science Working Group
- Перриман (Perryman M.), 2003, in: "GAIA Spectroscopy: Science and Technology", *ASP Conference Proceedings*, Vol. **298**, 3
- Перриман и др. (Perryman M. et al.), 2005, *astro-ph/0506163*
- Перриман и Хайнаут (Perryman M., Hainaut O.), 2005: in "Extra-solar planets, ESA-ESO Working Groups report" Report by the ESA-ESO Working Group on Extra-Solar Planets
- Рикики (Richichi A.), 2003, *A&A*, **397**, 1123
- Сокер Н. (Soker N.), *MNRAS*, **306**, 806
- Удальский А. (Udalski A.), 2003, *Acta Astron.*, **53**, 291
- Удри и др. (Udry S. et al.), 2007, *A&A*, **469**, L43
- Шарбоне и др. (Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., Mayor M.), 2000, *ApJ*, **529**, L45
- Шнайдер (Schneider J.), 1999, *C.R. Acad. Sci. Paris*,

327, Serie IIb, n.6, 621

Шовэн и др. (Chauvin G. et al.), 2004, A&A, **425**, L29

Энджел и др. (Angel J.R., Cheng A.Y.S., Woolf N.J.),
1986, Nature, **322**, 341

Энджел (Angel J.R.), 1994, Nature, **368**, 203

Янг и Костинский (Yang W., Kostinski A.B.), 2004, ApJ,
605, 892

<http://exoplanet.eu/>

<http://kepler.nasa.gov>

<http://olbin.jpl.nasa.gov>

http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.cfm