



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 34–54

УДК 52(02); 52(03); 52(05); 52(07); 52:378

Проблема существования планетных систем.

I. Методы и средства поиска

В.А. Захожай

Научно-исследовательский институт астрономии
Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина

Рассматриваются методы поиска экзопланет, пути их реализации на существующей и перспективной астрономической базе и космических средствах.

ПРОБЛЕМА ІСНУВАННЯ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ. I. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОШУКУ, Захожай В.А. — Розглядаються методи пошуку екзопланет, шляхи їх реалізації на існуючій та перспективній астрономічній базі і космічних засобах.

PROBLEM OF PLANETARY SYSTEMS EXISTENCE. I. METHODS AND MEANS OF THE SEARCH, by Zakhzhaj V.A. — Methods of searching for exoplanets are considered. Ways of theirs realization on the base of nowadays and perspective astronomical or space technique are discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Представления о формировании планетных систем у звезд и субзвезд совместно с существующими наблюдательными данными и теоретическими разработками позволяют выделить наиболее характерные признаки проявления планет по наблюдениям звезд, в окрестностях которых они образовались. Эти признаки позволяют очертить методы поиска планетных систем у звезд и определить требования к их точности (или чувствительности).

В настоящее время все методы поиска планетных систем у звезд можно разделить принципиально на две группы, которые уже позволяют обнаруживать планеты у звезд и те, которые из-за технических (или финансовых) возможностей еще не «заработали». «Работающие» методы можно объединить в блоки: 1) фотометрические, к которым можно отнести регистрацию потоков теплового (в видимом и ИК-диапазонах) и нетеплового излучений; 2) кинематические, объединяющие обнаружение планет по анализу собственного и орбитального движений в плоскости небесной сферы и по лучу зрения, включая регистрацию падения потока излучения вследствие прохождения планеты по лимбу звезды; 3) гравитационного микролинзирования. Существует ряд методов, которые были предложены и обоснованы, но еще не апробированы, как правило, из-за отсутствия финансовых возможностей. Это интерферометрические, спекл-интерферометрические, коронографические и поляриметрические методы. Осуществление ряда методов связано со строительством телескопов с большими апертурами или с выведением специальных астрономических инструментов в космос. В частности, планируется уже к концу настоящего десятилетия осуществить ряд специальных проектов на базе наземных телескопов с большими апертурами, космических телескопов и интерферометров [151].

Проблеме существования и поиска планетных систем посвящены обзоры Голда [9], Мороза [25], Гринстейна и Блэка [98], Хуанга [107], Папротны [149], Александрова и Захожая [3, 4], Нинкович и Попович [145], Перримана [151], Нидзельски [144], Ксанфомалити [19–23], Шнайдера [175], Марси и др. [130], Удри и Майора [192], Вавруха и Тишко [5].

Цель настоящей работы — охарактеризовать современное состояние проблемы поиска планетных систем в Галактике.

2. ПЛАНЕТЫ И ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

Согласно современным представлениям, к планетам будем относить космические тела, вещество которых находится в конденсированном твердом либо жидком состоянии, а их эволюция связана с гравитационной дифференциацией [1]. Нижняя граница масс планет зависит от состава их недр: для ледяных планет ($\bar{\rho} \sim 1 \text{ г/см}^3$) она близка к 10^{22} г [28], для силикатных ($\bar{\rho} \sim 3 \text{ г/см}^3$) — к 10^{23} г [1], для водородно-гелиевых планет с солнечным составом минимальная масса определяется возможностью удержания водорода и составляет примерно 10^{29} г (порядка массы Сатурна) [16]. Ожидаемые диаметры таких планет, соответственно, равны около 300, 400 и 60 000 км.

В соответствии с представлениями о планетах, их массы недостаточно для образования путем самогравитации в фрагментирующем протоскоплении. В соответствии с критерием Рисса [24, 159] и оценками Лоу и Линден-Белла [126], наиболее вероятная граничная масса между субзвездами и планетами принадлежит интервалу $0.003 \leq m/m_{\odot} \leq 0.007$ [16]. Следовательно, заведомо к планетам будем относить объекты с массами меньше $0.003m_{\odot}$, к субзвездам — с массами больше $0.007m_{\odot}$, к планетам или субзвездам — объекты попадающие в интервал солнечных масс [0.003, 0.007]. Оценка Степински и Блэка [187] попадает в этот интервал солнечных масс [0.005, 0.007]. Более низкие значения, где учитывался отвод тепла углеродом в фрагментирующем облаке, получены Сучковым и Щекиновым [29] — $0.0002 \div 0.002m_{\odot}$.

Протопланетные диски (колыбель планетных систем), их остатки (как наблюдаемый в Солнечной системе Зодиакальный свет), сформировавшиеся планеты есть основания искать у планет, субзвезд, звезд (примерно более поздних спектральных классов, чем B5) и их звездных остатков; в кратных звездных, звездно-субзвездных и субзвездных системах.

Общие оценки вероятности распространенности планетных систем и протопланетных дисков дают значения до 0.4 от общего числа звезд в Галактике, а число самих планет в Галактике может оказаться примерно на два порядка больше, чем звезд [16]. Следовательно, феномен планетных систем ожидается довольно распространенным, а задача их поиска достаточно обоснованной для достижения положительного результата.

3. МЕТОДЫ ПОИСКА

Планетную систему, с целью поиска, следует рассматривать в двух принципиальных фазах существования: на стадиях газо-пылевых дисков (протопланетного или аккреционного [151]) и сформировавшихся планет, вращающихся в гравитационном поле звезды или субзвезды¹.

Стадию газопылевого диска можно представить моделью с центральным телом, окруженным диском (наклоненным к наблюдателю под произвольным углом) определенного размера, фотометрически неоднородным, пространственная плотность, температура и степень поляризации которого изменяются с удалением от центра. Сформировавшаяся планетная система предполагает наличие планет с интервалом масс $\sim 10^{(-11 \div -10)} \div 10^{(-4 \div -3)} m_{\odot}$, принадлежащих, в общем виде, кратной гипотетической звездно-субзвездной системе с остатком протопланетного диска, пространственная плотность которого определенным образом связана с возрастом системы.

Рассмотрим для простоты планетную систему, состоящую из одиночной звезды, или субзвезды, и одной планеты, находящуюся на известном удалении от Солнца, орбита которой повернута к земному наблюдателю под определенным углом и содержащую остатки протопланетного вещества (рис. 1).

Сформулируем вопросы, на которые хотелось бы получить ответы, в следующем виде:

- 1) можно ли обнаружить газопылевой диск и его остаток?
- 2) можно ли обнаружить излучение от планеты?

¹Поиск планетных тел в центральном поле более массивных планет здесь опущен, поскольку нас интересует поиск планетных систем в гравитационном поле космических объектов, способных образовываться путем самогравитации, которыми являются звезды и субзвезды.

3) можно ли по исследованию центрального объекта (звезды или субзвезды) обнаружить планету и какие параметры его можно определить, параллельно выяснив, каковы должны быть требуемые условия для наблюдений, инструментов и их пороговой чувствительности?

3.1. Прямое детектирование протопланетных дисков

В зависимости от удаленности газопылевого диска от Солнца и применяемого для его детектирования астрономического инструмента, он может наблюдаться либо как протяженный объект с характерным распределением плотности и температуры, либо как точечный с характерным избытком ИК-излучения. Для оценки потока от газопылевого диска с эффективной температурой T_{eff} , можно воспользоваться спектральной плотностью потока излучения $S_{\lambda}(T_{\text{eff}})$, падающего на границу земной атмосферы от находящегося на расстоянии D квазисферического абсолютно черного тела с характерным радиусом r [15]:

$$S_{\lambda}(T_{\text{eff}}) = \Omega_S B_{\lambda}(T_{\text{eff}}) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{(r/D)^2}{\exp \frac{hc}{k\lambda T_{\text{eff}}} - 1}, \quad (1)$$

где Ω_S — телесный угол, под которым виден источник излучения, $B_{\lambda}(T_{\text{eff}})$ — интенсивность излучения источника на длине волны λ . Максимум излучения холодных протопланетных дисков ожидается в диапазоне волн, определяется законом смещения Вина

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2900}{T_{\text{eff}}} \text{ мкм}, \quad (2)$$

что для $T_{\text{eff}} < 100$ К дает $\lambda_{\text{max}} > 29$ мкм.

В процессе эволюции планетной системы количество первичного протопланетного вещества уменьшается за счет выметания его образовавшимися планетезималями и аккреции на центральную звезду или субзвезду. Химический состав его при этом меняется, а с появлением планет он радикально отличается от первичного протопланетного состава. Продукты распада комет, метеоров, диссипации атмосферы планет пополняют межпланетное пространство газом и пылью, которые распределяются в плоскости орбитального вращения планет. Поэтому межпланетная среда имеет вторичное происхождение по отношению к протопланетным образованиям, которые имеют характерный химический состав межзвездной среды Галактики на соответствующий период формирования центрального тела и протопланетного диска. Межпланетное вещество не может продолжительное время находиться на орбите за счет эффекта Пойтинга-Робертсона и звездного ветра. Рассеяние излучения на частицах межзвездной среды порождает поляризацию, степень которой зависит от углового расстояния от звезды. Обнаружение у звезд диска, поляризующего свет с химическим составом, характерным для одной из стадий эволюции планетных систем, несет не только принципиальную информацию о наличии планет, на что обратил внимание Фесенков [30], но и о

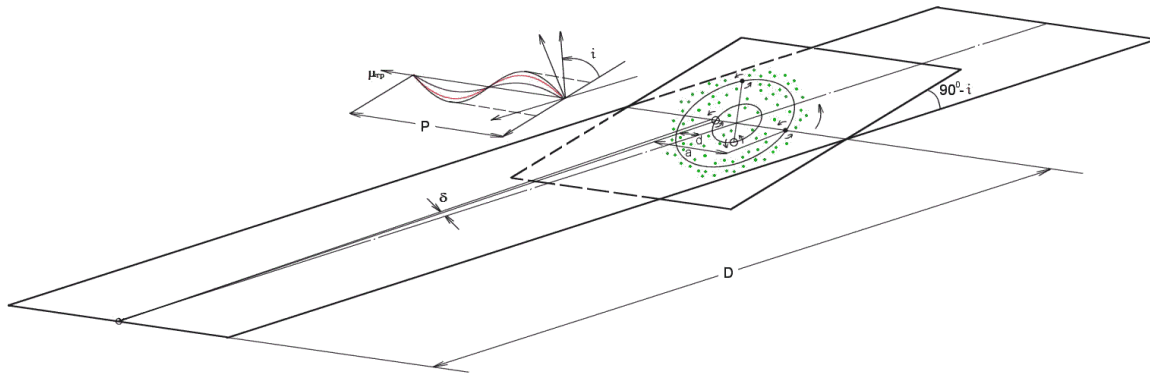


Рис. 1. Проявление наличия планет у звезд или субзвезд, удаленных от земного наблюдателя на расстоянии D ($0.0003 \div 80$) m_j

возрасте планетной системы [3]. Спектр таких объектов несет информацию о составе газопылевой составляющей планетных систем различного возраста [3].

Процесс формирования планетных систем может наблюдаться и в радиодиапазоне, причем следует ожидать корреляции с ИК-наблюдениями. Источники для радионаблюдений целесообразно выбирать в областях звездообразования, где ожидается наличие протяженных оболочек, которые, вероятно, не могут быть исключены из числа кандидатов в протопланетные образования. Вслед за Шкловским [31], следует обратить внимание на наличие мазерных источников в оболочках молодых звезд, которые могут возникать на самых ранних стадиях образования звезд и планет.

Существует необходимость в исследовании УФ-области спектра молодых (~ 10 Мг) околозвездных дисков у звезд солнечного типа, так как химия протопланетных образований определяется, в основном, полем сильного УФ-излучения центральной звезды [110].

3.2. Детектирование планет

Рассмотрим вопрос о детектировании изображения от планеты в окрестностях ее центрального тела [15, 17, 26, 151]. Как следует из рис. 1, из всего потока излучения центрального тела на планету в сторону наблюдателя попадает лишь его часть. Обозначив r , A , и a , соответственно, — радиус, сферическое альbedo и большую полуось орбиты планеты, нетрудно видеть, что в квадратуре доля потока, отражаемая в сторону наблюдателя (отношение площади поперечника планеты πr^2 к площади сферы $4\pi a^2$), составит $\frac{Ar^2}{4a^2}$. Следовательно, когда собственной энергией излучения планеты можно пренебречь, разность блеска между центральным телом и планетой, находящейся в квадратуре, будет порядка

$$\Delta m \approx 2.5 \lg \frac{Ar^2}{4a^2}. \quad (3)$$

Для альbedo $A_1 = 0.4$ и $A_2 = 1.0$, отношения радиусов планеты к радиусу центральной звезды $r/R = 0.1$, и удаленности от звезды $a = 1 \div 10$ а.е. разность блеска, соответственно, ожидается в пределах $\Delta m_1 \approx 19 \div 24^m$, $\Delta m_2 \approx 18 \div 23^m$. Оценки, выполненные по формуле (1) для ИК-диапазона на интервале длин волн $\lambda = 10 \div 30$ мкм (для эффективных температур планет $T_{\text{эфф}} \approx 100 \div 300$ К), показали, что отношение интегральных потоков планеты и звезды (при $\Delta\lambda = 2$ мкм, $T_{\text{эфф}*} = 6000$ К, $r/R = 0.01 \div 0.1$) на пять порядков больше этого же отношения в видимом диапазоне. Поток от планеты составит $\approx 4 \cdot (10^{-4} \div 1)$ квант/см²·с. Этого потока достаточно, чтобы за время детектирования $\sim 10^3$ с при отношении сигнал/шум ~ 10 зафиксировать планету 4-метровым ИК-телескопом [3].

Эффективные температуры центрального тела и планеты ($T_{\text{эфф}*}$, $T_{\text{эфф}p}$) и их радиусы (R , r) определяют отношение их светимостей:

$$\frac{L_p}{L_*} = \left(\frac{T_{\text{эфф}p}}{T_{\text{эфф}*}} \right)^4 \left(\frac{r}{R} \right)^2. \quad (4)$$

Это отношение очень мало: для объекта типа Юпитера в максимальной элонгации $L_p/L_* \sim 10^{-9}$. При наблюдении с наземным телескопом, при разделении планет и звезды $1''$ (что соответствует наблюдению Юпитера с расстояния 5 пк) планетный сигнал погружен в фотонный шум дифракционного профиля телескопа ($\lambda/D \approx 0.02'' \div 0.01''$ для апертур телескопов $D = 5 \div 10$ м), и что более проблематично, в профиль «замытия» ($\sim 1''$), создаваемый турбулентной атмосферной рефракцией [151].

По-видимому, единственная возможность получения изображений планет с Земли связана с использованием адаптивной оптики [36, 186]. Она активно разрабатывается для больших астрономических телескопов нового поколения, с целью компенсации атмосферных фазовых флуктуаций на зрачке телескопа 8–10 м при достижении ограниченного дифракцией изображения [151]. С целью прямого обнаружения планет, вращающихся вокруг сотни звезд, были выработаны требования, предъявляемые к особенностям главного зеркала телескопа [36, 95, 128]. Так, для обнаружения земноподобных планет необходим телескоп с хорошей активной оптикой и апертурой 30-м, способной свести среднеквадратические aberrации до нескольких нанометров [128], или система зеркал с по-

движными элементами, как предлагается в проекте 100-м OWZ-телескопа [95]. Для детектирования планет-гигантов у нескольких звезд достаточно 3-х метровой адаптивной апертуры [128], а у первой сотни звезд — системы зеркала, изготовленного по принципу телескопа Кек-II², с 10^4 подвижными элементами [36].

Трудности, возникающие при детектировании планет через земную турбулентную атмосферу, предлагалось преодолеть с помощью телескопов, выносимых на околоземную орбиту. В одном из таких проектов Эллиот предложил осуществить детектирование потока от планеты (в видимом диапазоне) при экранировании звезды лимбом Луны [85].

Бонэ, Джосс и Лабейри [53] предлагали использовать космический телескоп как коронограф Лео, где используется принцип пространственной фильтрации. Изображение звезды, получаемое космическим телескопом, в видимом диапазоне должно напоминать картину диска Эйри. При хорошем качестве зеркала ожидается получить $10 \div 20$ хороших колец, в области которых должен быть сигнал от планеты. Принципиально выделение сигнала от планеты на фоне дифракционной картины звезды можно свести к соответствующему расположению двух масок: одной в фокальной плоскости, другой в перефокусированной плоскости изображения зрачка. Первая маска обеспечивает устранение центрального максимума и несколько первых дифракционных колец, вторая — служит для устранения тех частей апертуры, которые образуют дифракционную картину, не отфильтрованную первой маской. Для надежного отождествления сигнала от планеты в плоскости изображения телескоп рекомендовалось несколько покачивать вокруг его оптической оси, сохраняя направление на звезду. При использовании современных детекторов, ожидаемое время накопления ~ 1 ч [3].

Идея Ксанфомалити [19, 20] состоит в размещении сигнала от планеты в дифракционных минимумах картины Эйри от звезды. Пренебрегая сигналом ближе ~ 10 -го кольца картины Эйри и совмещая ось вращения приемника с направлением на звезду, можно накопить достаточный для регистрации сигнал от планеты, который будет промодулирован частотой вращения приемника излучения. Оценки показали, что достаточные количества фотонов от таких планет, как Земля и Венера, для ближайших звезд можно накопить примерно за 30 ч, а Меркурия — за 240 ч.

Наземные и космические (включая лунные) интерферометрические системы с базовыми линиями 10–100 км могли бы приступить к получению разрешаемых изображений планет [117]. Бендер и Стеббинс [45] разработали проект космического интерферометра, для которого доступно получение изображений землеподобных планет со 100-элементным разрешением (10×10), в видимом диапазоне, удаленных на расстояние 10 пк. С учетом необходимости снижения звездного света до необходимого уровня, требуется 15–25 телескопов с 10-м апертурами, разнесенными по базовым линиям 200 км. Для получения 100×100 элементов разрешения, требуется 150–200 инструментов, разнесенных на 2000-км базовые линии и время наблюдения 10 лет на планету. Более доступным представляется удержание необходимой геометрии разнесения телескопов с помощью лазерной метрологии. В методе Лабейри [118] 30-минутной экспозиции на гипер-телескопе, состоящем из 150-ти 3-м зеркал в космосе, разнесенных на 150 км, было бы достаточно для обнаружения материков на планете, удаленной на расстояние 10 св.лет. Брэйсуэлл [56] и Брэйсуэлл и МакФай [57] отметили, что при температурах Солнца и Юпитера, 6000 К и 128 К, обнаружение теплового излучения в режиме Релея–Джинса далее ~ 20 мкм (где тепловое ИК излучение от планеты самое сильное) дает 10^5 -кратное увеличение контраста интенсивностей [151]. Они предложили принцип обнуляющей интерферометрии для усиления сигнала планета/звезда. В их методе свет от двух или большего числа апертур, отстоящих на 20–50 м, объединяется в противофазе. Базовая линия подбирается так, что свет от звезды интерферирует с гашением в широком длинноволновом диапазоне, а сигнал от планеты интерферирует с усилением (базовую линию можно подобрать таким образом, чтобы радиус, усиливающий интерференцию, соответствовал «обитаемой зоне»). Вращение интерферометра вокруг оси, проходящей через звезду, позволило бы обнаруживать слабую планету по сигналу,

²Телескоп Кек-II состоит из системы 349 подвижных элементов [195].

модулированному в гармониках частоты вращения.

Кроме улучшения контраста планета/звезда, ИК космический интерферометр мог бы обеспечить доступ в спектральную область, в которой имеются молекулярные компоненты, считающиеся индикаторами жизни, в частности O_3 и H_2O [151]. Европейское Космическое Агентство рассматривает ИК космический интерферометр Дарвина, как приоритетную, но отдаленную программу (срок осуществления намечен после 2010 г.) [86, 121, 122, 133, 140, 174]. Здесь предлагается использовать обнуляющую интерферометрию в ИК области для обнаружения и получения спектров земноподобных планет вокруг 100–200 звезд на расстояниях до 15–20 пк. Он должен состоять из 4–6 1-м телескопов, пассивно охлаждаемых до 40 К, разделенных 50 м и работающих в диапазоне 6–17 мкм, чтобы захватить спектральные линии H_2O , CH_4 , O_3 и CO_2 [151].

Идеи, призванные улучшить космические миссии [35, 114] или зондовые эксперименты на высотах 30 км [188], предлагалось опробовать в наземных экспериментах [151]. Многоэлементные антенны могут обеспечить глубокий центральный ноль с полосами высокого разрешения, которые можно использовать для картирования. Это должно обеспечить полностью усиливающую интерференцию для близкой планеты, даже при наличии разрешенного звездного диска, и позволяет отделить планету от пылевого облака во внешней системе [37–39].

Луна представляется перспективным местом, с которого можно осуществить поиск и детектирование планет [18]. Глубокий вакуум (10^5 молекул/см³ — нейтральный газ; 100 ионов/см³ — ионизированный газ), сейсмическая стабильность на поверхности (1–3 бала по шкале Рихтера), почти отсутствующая приливная деформация, малая гравитация, темное небо (UV-фон в 40 раз слабее, чем на Земле), отсутствие рассеянного света, влияния рефракции, медленного осевого вращения были положены в основу Большого Лунного оптического телескопа LOT (Lunar Large Optical Telescope) — полноапертурного 16-м телескопа, предназначенного для работы в диапазоне от 0.1 до 10 мкм.

Уже в настоящее время имеется определенный опыт использования интерферометрических методов для решения различных астрофизических задач: ЮТА-интерферометр (два 0.45-м телескопа с базовыми линиями до 38 м), работающий с 1995 г. [190]; Паломарский стендовый интерферометр (со 110-м базовой линией, устойчивый относительно больших быстрых изменений атмосферной турбулентности и вращения Земли), работающий в К-полосе (2–2.4 мкм) [66, 148]; система CHARA на Маунт Вильсон (шесть 1-м телескопов, установленных в кресте с 200-м плечами, работающими в видимой и К-полосе), начавшая работать с 2001 г. [139]. После начала функционирования в полной мере Большого бинокулярного телескопа (два 8.4-м телескопа на одном фундаменте с базовой линией 14.4 м) он сможет работать с чувствительностью, планируемой для проекта TRF (Открыватель земноподобных планет), для обнаружения внесолнечного зодиакального излучения [38, 105]. На длинах волн 4 и 11 мкм ему будет доступно для регистрации на расстоянии 10 пк, соответственно, излучение солнечного зодиакального уровня и юпитероподобных планет с возрастом 1 млрд. лет, в пределах 0.8 а.е. и 0.3 а.е. от звезды. Возлагаются надежды на интерферометрическое взаимодействие двух 10-м телескопов Кека с 85-м базовой линией совместно с четырьмя дополнительными 2-м телескопами, и на интерферометрическое взаимодействие (200-м базовая линия) четырех 8-м и (пока) трех дополнительных 1.8-м телескопов ЕЮО [151]. В ближайшие 5 лет, кроме программы обнаружения коричневых карликов и получения изображений планет с использованием космического телескопа Хаббла [179], НАСА планирует вывести на орбиту 0.85-м криогенно-охлаждаемую ИК обсерваторию — проект SIRFT [69] (2004 год), и Космический телескоп нового поколения — NGST [134] (2009 год). После 2010 года НАСА предполагает осуществить проект ИК интерферометра TRF [43, 44], с базовой линией 75–1000 м, рассматривая ее, как составную часть программы Origins [189].

3.3. Динамические методы обнаружения

С использованием рис. 1, рассмотрим «поведение» центрального космического тела (звезды или субзвезды), вокруг которого вращается планета, орбита которой характеризуется параметрами: P —

орбитальный период системы, d — расстояние центрального тела (ц.т.) до барицентра, a — большая полуось орбиты планеты, δ , δ'' — угловое расстояние между ц.т. и барицентром в радианах и угловых секундах, соответственно.

Рассмотрим два крайних случая: 1) движение планеты по орбите в картинной плоскости (что соответствует наклону $i = 0^\circ$) и 2) движение планеты по орбите в плоскости, совпадающей с лучом зрения ($i = 90^\circ$).

Астрометрический метод. Третий закон Кеплера позволит связать орбитальный период, большую полуось и массы компонентов системы:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2}, \quad (5)$$

где G — гравитационная постоянная; M , m — массы звезды и планеты, соответственно;

$$a_{\text{а.е.}} \approx (M/m_\odot)^{1/3} P_y^{2/3} \quad (6)$$

где большая полуось, масса и период выражены, соответственно, в астрономических единицах, массах Солнца и в земных годах. Расстояние между центральным телом и барицентром в квадратуре:

$$Md = m(a-d), \quad (7)$$

$$d = a \frac{m}{m+M} \approx \frac{am}{M}, \quad (8)$$

$$\delta = \frac{d}{D} \approx \frac{a}{D} \frac{m}{M}, \quad (9)$$

$$\delta'' \approx 206265'' \frac{a}{D} \frac{m}{M} \quad (10)$$

Формулы (9), (10) определяют условия, предъявляемые к точности астрометрических наблюдений невидимых спутников звезд. Точность определения амплитуды колебания звезды вокруг барицентра классическим астрометрическим способом не превышает $\sim 0.01'' \div 0.001''$ [6, 197]. Систематические ошибки, неизбежно возникающие за большие промежутки времени, могут снизить точность астрометрических определений центральных тел на порядок [3]. Поэтому приводимая ван де Кампом точность $\sim 0.001''$ вызвала сомнения у ряда астрометристов [87].

Точность можно повысить, увеличивая количество единичных измерений, применяя новую технику и новые методы наблюдения, в частности применяя в рассматриваемой задаче космические звездные интерферометры. Гейтвуд предлагал применять для этих целей длиннофокусные астрографы с относительными отверстиями $\sim 10^{-3}$ и апертурой больше метра [87], а Мак-Алистер — спекл-интерферометрию [137, 138]. При этом ожидается повышение оперативности и надежности обнаружения планетных систем, а также более чем на порядок точности единичного измерения. Очевидно, что число оптических пар, исследуемых методом спекл-интерферометрии для поиска у них планетных систем, ограничено для них зоной изопланетичности земной атмосферы [3, 137].

Влияние Юпитера на Солнце с расстояния 10 пк, вызывает астрометрическую амплитуду $500 \text{ мк}''^3$, Земля — $0.3 \text{ мк}''$ за год. Т.к. на Солнце влияют все планеты, необходимая точность за 50-летний период должна быть $\sim 1 \text{ мк}''$ [151].

Наибольшая астрометрическая точность достигнута в радиодиапазоне (с использованием интерферометров с очень большими базовыми линиями, VLBI, достигающими до 3000 км) для двойной радиозвезды σ^2 СтВ, где среднеквадратические остатки составили $0.20 \text{ мк}''$ [124, 125]. Этого достаточно для обнаружения юпитероподобных планет, находящихся ближе 20 пк. Спутники юпитероподобных масс должны давать возмущения около $1 \text{ мк}''$, а землеподобная планета возле ближайшей радиозвезды UV Set давала бы смещение около $8 \text{ мк}''$. Пока этим методом не обнаружено ни одного кандидата в планеты (среди пяти звезд, которые проходят по программе поиска внесолнечных планет) [151].

Перспектива измерений с точностью $\sim 10 \text{ мк}''$ или лучше ожидается от оптического интерферометра Мак III [110], от Паломарского интерферометра [65], Кекского интерферометра [67], и VLBI

³мк'' — микросекунд дуги

ЕЮО [132]. Специальное астрометрическое оборудование PRIMA изготовлено для VLTI с целью поиска и определения характеристик экзопланет [78]. Эти инструменты должны обеспечить очень высокую астрометрическую точность для малых полей (например, для двойных и кратных систем) на уровне $10 \text{ мк}''$ [181, 182]. В рамках программы VLBI ЕЮО, PRIMA (программа получения фазовых изображений и микросекундной астрометрии) предполагается использование четырех 8.2-м телескопов с целью достижения астрометрической точности $\approx 10 - 50 \text{ мк}''$.

Астрометрический телескоп HIPPARCOS обеспечил точность $\sim 1 \text{ мк}''$ для $\sim 118\,000$ звезд [153]. В рамках этого проекта использовались специальные методы, с помощью которых проводилось обнаружения коричневых карликов [47, 48]. Для известных планетных систем данные Гиппаркоса дали некоторые ограничения для планетных масс: в нескольких случаях Перриман и др. [152] получили слабые верхние пределы для планетных масс; Мейзех и др. [136] вычислили массу внешнего спутника ν And, получив $10_{-4.6}^{+4.7} m_J$ против $m \sin i = 4.1 m_J$; Зуккер и Мейзех [198] считают, что спутником HD 10697 является, вероятно, коричневый карлик.

От миллисекундной астрометрии нельзя ожидать ощутимого вклада в деле обнаружения внесолнечных планет. В тоже время большой объем микросекундных астрометрических измерений позволит в будущем решить три важные задачи: 1) измерения существенно ниже $0.1 \text{ мк}''$ расширят возможность обнаружения планет с массами, намного меньшими предела юпитерианской массы, до 50–200 пк; 2) астрометрические наблюдения, объединенные со спектроскопическими данными, позволят непосредственно определять массы планет, независимо от наклона орбиты; 3) можно будет определить относительный наклон орбит с несколькими планетами.

Проекты будущих астрометрических измерений DIVA [164] и FAME [92] предполагают точность, несколько хуже $1 \text{ мк}''$ ($\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ угл.сек., в зависимости от звездной величины). Достижение более высокой точности предполагается в миссиях SIM [48] и GAIA ЕЮО [94, 141], запланированных, соответственно, на 2005 и 2009 гг. Космическо-интерферометрическая миссия НАСА SIM предназначена, главным образом, для оптической астрометрии на уровне угловой микросекундной точности с максимальными базовыми линиями около 10 м [151]. Являясь в некотором смысле предшественником TPF, она сможет давать изображение и обнуление [51], но с разрешением намного ниже углового разрешения, предусматриваемого для TPF. Эта миссия будет особенно ценной для детальных определений орбит планетных систем, обнаруженных в наземных экспериментах. Миссия GAIA сможет наблюдать около миллиарда звезд до $V \sim 20^m$ в рамках исследования звездного населения Галактики. В предположении, что 4–5% звезд солнечного типа имеют юпитероподобные спутники [131], можно будет обнаружить (и во многих случаях получить параметры орбит) около 10 000 планетных систем с массой $\sim 1 m_J$ и периодами около 1–10 лет [151] у звезд до 15^m .

Оптический интерферометр (Lunar Optical Interferometer) с диаметром зеркал 1–1.5 м, предполагает работу в спектральных диапазонах: УФ (0.1–0.35) мкм, видимом (0.4–1.0) мкм и ИК (1.0–10.0) мкм [18]. Планируется, что система интерферометра будет включать минимум три телескопа, размещенных на концах в несколько километров Y-подобной базы. Такой интерферометр обеспечит микросекундную точность — достаточную для изучения их структуры и динамики ближайших звезд и обнаружения планетных систем.

Предел на астрометрическое обнаружение землеподобных планет из космоса может наложить неоднородность освещения по диску звезды. Земля вынуждает перемещаться центр масс Солнца с полуамплитудой около 500 км (0.03% звездного диаметра), а солнечные пятна, покрывающие 1% солнечной поверхности приводят к перемещению центра блеска Солнца до 0.5% [196].

Метод лучевых скоростей. Амплитуда скорости центрального тела с массой M , вызванная спутником массы m , имеющим орбитальный период P и эксцентриситет орбиты e с наклоном ($90^\circ - i$) [70]:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{m \sin i}{(M+m)^{2/3} \sqrt{1-e^2}}. \quad (11)$$

Для $M \gg m$

$$K = 28.4 P_y^{-1/3} \frac{m}{m_J} \sin i \left(\frac{M}{m_\odot} \right)^{-2/3} \text{ м/сек}, \quad (12)$$

где m_J — масса Юпитера, i — наклон плоскости орбиты планеты к картинной плоскости, и согласно третьему закону Кеплера

$$P_y = a_{\text{a.e.}}^{3/2} \left(\frac{M}{m_\odot} \right)^{-1/2} \text{ лет}. \quad (13)$$

Для $i = 90^\circ$:

$$K_{\text{max}} = 28.4 P_y^{-1/3} \frac{m}{m_J} \left(\frac{M}{m_\odot} \right)^{-2/3} \text{ м/сек}, \quad (14)$$

соответствует падению блеска центрального тела на величину

$$|\Delta m| = 2.5 \lg \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (15)$$

при длительности затмения по диску центрального тела в зависимости от его широты φ [74, 177]:

$$\tau = \frac{P_y}{\pi} \left(\frac{R \cos \varphi + r}{a_{\text{a.e.}}} \right) \approx 13 \left(\frac{m}{m_\odot} \right)^{-1/2} a_{\text{a.e.}}^{1/2} \frac{R}{R_\odot} \text{ час}. \quad (16)$$

Вероятность такого события, как показал Розенблат, — одно покрытие на 3 тыс. звезд с планетными системами, видимыми с ребра за 5 мин наблюдений [163]. Ожидается, что одна планетная система из $100 \div 200$ должна быть видна с ребра [3].

Конфигурации, когда планета вращается вокруг одной из компонент широко разделенной двойной, или же вокруг тесной двойной, являются динамически устойчивыми [46, 102, 104, 178]. Оценки показали, что анализируемый метод позволяет обнаружить планеты с радиусами около 10 000 км с довольно большой вероятностью и удовлетворительной точностью [151].

Использование прецизионных измерений лучевых скоростей с точностями выше ~ 10 м/с для поиска внесолнечных планет⁴ путем калибровки длин волн звездного спектра искусственной поляризацией света звезды впервые предлагалось Серковским [180]. Для этого поляриметр должен быть выполнен таким образом, чтобы плоскость поляризации искусственно линейно-поляризованного света от звезды быстро изменялся бы с длиной волны. Следовательно, указанная точность может быть достигнута точным измерением позиционного угла поляризации, что и дает калибровку по длинам волн для каждого элемента спектра [3].

Метод лучевых скоростей в настоящее время ограничен, как правило, яркими звездами с $V < 8^m$, где используются спектрограммы с разрешением $\sim 60\,000$. Это позволяет получить многочисленные точные спектральные характеристики звезд [63, 100, 129], обеспечивающие точность измерения лучевых скоростей до 3 м/с [59] с дальнейшим повышением точности до 1–2 м/с [55, 68, 115]. В частности, предлагалось использование высокодисперсионного звездного интерферометра Конна, потенциальные возможности которого для измерения радиальных скоростей ~ 1 м/с [68]. Точность ± 1 м/с ограничена влиянием звездных пятен и конвективными неоднородностями на звездной поверхности [61, 167, 168] и, по-видимому, является граничной для метода лучевых скоростей. Поскольку такая точность еще не реализована, высказывались соображения о том, что восходящие и нисходящие потоки в звездных атмосферах можно будет отличить от эффекта, обусловленного вращением планет [146].

Точная корреляционная фотометрия, предусматривающая измерение падения блеска центрального тела в момент прохождения планеты по ее диску с точностью до $\sim 0.001^m$, может быть реализована с использованием одного, двух [84] и более телескопов. Для телескопа с диаметром апертуры 1 м это выполнимо за несколько месяцев наблюдений [151]. В рамках ТЕР (Прохождение внесолнечных планет) с 1994 г. такая программа реализуется на шести телескопах, установленных

⁴Орбитальная скорость Солнца под действием Юпитера — 12.5 м/с, Сатурна — 2.7 м/с [21].

в разных точках земного шара [74, 82]. Результаты поисков планет приведены в работах Диг и др. [75], Доула и др. [83], Роттлера и др. [165], однако достоверных результатов до настоящего времени не получено.

Известно, что наземные наблюдения ограничены относительной точностью фотометрии 0.01%. Для этого метода предлагалось использовать космический телескоп STARS с площадью телескопа 0.5 м^2 и полем зрения 1.5° , но было отвергнуто ЕКА [174]. ЕКА в начале 2000 г. [166] приняло к рассмотрению модернизированный вариант телескопа с площадью 1 м^2 и полем зрения 6° . Предложен вариант мониторинга почти 700 000 звезд за 2–3 года наблюдений, расположенных в ~ 20 полях, каждое из которых будет наблюдаться в течение месяца. При относительной фотометрической точности 10^{-6} , предполагается отнаблюдать не менее, чем по три прохождения внесолнечных земнеподобных планет по каждой из ~ 50 звезд главной последовательности.

Аналогичный американский проект Kepler [54] разработан на основе ранее предлагаемого проекта FRESIP [113], как составная часть программы NASA — Discovery. Имея однометровую апертуру и поле зрения 12° , предлагается непрерывно отслеживать около 80 000 звезд главной последовательности ярче 14^m , с фотометрической точностью 10^{-5} . Предполагается обнаружение 480 планет земного типа, 160 короткопериодических гигантов, 24 долгопериодических планет, 1400 планет с периодами меньше недели.

COROT — небольшой проект, предложенный Французским космическим агентством CNES [77, 177]. Планируемое время выведения телескопа с апертурой 27 см — 2004 год. Проект предназначен для исследования звездных колебаний. В режиме планетного обнаружения предполагается отслеживание 50 000 звезд с фотометрической относительной точностью $7 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ для звезд с видимой величиной $V = 11 - 15.5^m$ и временем интегрирования 1 час. Ожидается обнаружение планет по прохождению с размерами $2R_\oplus$. MONS и MOST — соответствующие проекты датского и канадского происхождения, запланированные для обнаружения звездных колебаний и пригодные для изучения прохождений [151].

При достижении фотометрической относительной точности 10^{-4} методом прохождений можно обнаружить даже кометы [120], эффектом которых объясняется фотометрические изменения в системе β Pic [119, 120]. Этим методом предлагалось также искать спутники внесолнечных планет [177], вероятности обнаружения которых вычислялись Сарторетти и Шнейдером [173]. В случае реализации проекта COROT, возможно их детектирование в окрестностях водородно-гелиевых планет, если радиус больше $0.3R_\oplus$. Возможности спектроскопии и отображения при прохождении обсуждались Шнайдером [151].

Важными результатами является обнаружение события прохождения внесолнечной планеты в системе HD 209458 [64, 103]. Эти результаты подтверждены методом лучевых скоростей и по анализу астрометрического спутника HIPPARCOS в 1990–93 гг. [183]. Первое обнаружение прохождения для HD 209458 было выполнено с использованием 10-см инструмента STARE [64], которым было отслежено около 24 000 звезд в поле $(5.7^\circ)^2$ в созвездии Возничего.

Отношение «радиус–масса», полученное для затменной системы HD 209458 ($r/m = 1.55r_J/0.69m_J = 2.25r_J/m_J$), было использовано Видьмаченко [7] для оценки звездных величин водородно-гелиевых планет, открытых у 65 звезд методом лучевых скоростей к ноябрю 2001 г. Полученные значения визуальных величин оказались в пределах $25.1^m - 12.8^m$. Расчетный блеск 14 планет оказался ярче $\approx 19^m$, из которых для 9 звезд изменения яркости Δm за счет орбитального вращения планет ожидаются $\geq 0.00010^m$ и соответствует потоку сто и более фотонов на миллион фотонов от центральной звезды.

Прямое детектирование «ярких» планет не представляется возможным из-за того, что открытые планеты, являясь короткопериодическими, находятся за пределами их углового разрешения имеющимися телескопами. Поэтому было предложено их обнаружить с помощью фотоэлектрических наблюдений с одно- и двухканальным фотометром [8] путем детектирования изменения яркости Δm или потока фотонов от небесных объектов с амплитудами несколько тысячных долей

процента от основного потока излучения, вызванного орбитальным движением планет. Наибольшее число фотонов (≈ 470) согласно оценок [7], ожидается у планеты, принадлежащей системе τ Boo. Это может служить объяснением прямого обнаружения в системе τ Boo вариации блеска в 1% вследствие наличия у нее планеты [59, 62], совпадающие с орбитальным периодом (3.313 сут), измеренным методом лучевых скоростей [176].

Аризонский поиск планет (ASP) использует 20-см апертуру и ASAS (автоматический обзор всего неба) нацелен на фотометрический просмотр $\sim 10^7$ звезд ярче 14^m по всему небу, делая по 100 3-минутных экспозиций за ночь. Было предложено для наблюдений более 34 000 звезд в шаровом скоплении 47 Tuc для телескопа Хаббла [93]. Анализ первых 27 000 звезд не обнаружил убедительных кандидатов в планеты [58]. В этом же скоплении ведется поиск транзитных водородно-гелиевых планет с помощью широкоугольного искателя WEI, установленного на 40-дюймовом инструменте, снабженном V+R фильтром [194]. Кандидаты выборки — периферийные звезды солнечного типа скопления с блеском $17.5^m > V > 19.0^m$. Методом вычитания ПЗС-изображений были построены кривые блеска 28 000 звезд, позволившие обнаружить 14 переменных звезд, 8 из которых ранее не были известными. Прохождений планет пока не обнаружено.

С 2001 года начаты наблюдения на 1.2-м телескопе FLWO по программе долгосрочного проекта PISCES (Планеты в звездных скоплениях) по поиску транзитных планет и получены первые результаты исследования в полосе R скопления NGC 6791 [142]. В процессе реализации этого проекта предполагается подключить для определения лучевых скоростей 6.5-метровый телескоп ММТ с целью: 1) пронаблюдать три или более прохождений для 50% всех транзитных планет с периодами между 1 и 8 сутками; 2) отделить прохождения планет от субзвезд с массами, большими $0.0025m_{\odot}$.

Падение блеска центрального тела сопровождается также изменением цвета звезды, на что обратил внимание Розенблат [163]. Этот метод двухцветовой фотометрии основан на различной степени потемнения к краю у звезд в синих и красных лучах. Ожидается, что прохождение планеты по диску звезды вызовет характерное изменение в цвете: при пересечении лимба — в синюю сторону, с продвижением к центру звезда краснеет, и дальнейшее передвижение к лимбу должно приводить к новому уменьшению показателя цвета звезды. Для экваториального прохождения планеты изменение показателя цвета может достигать 0.7% [3].

Вследствие прохождения планеты по диску центрального тела, как получено в модельных экспериментах Захожая [11–15], происходит изменение в его пространственном спектре:

$$F(\vec{\omega}) = \int f(\vec{r}) \exp(-2\pi i \vec{r} \vec{\omega}) d\vec{r} \quad (17)$$

где: $f(\vec{r})$ — распределение светового поля по объекту, \vec{r} — радиус-вектор, отсчитанный в плоскости объекта, $\vec{\omega}$ — пространственно-частотный радиус-вектор.

В случае затменной системы (модель однородного диска) можно восстановить вид функции $|F(\vec{\omega})|^2$, применяя преобразование Ганкеля к разности двух круговых функций (одна — единичная, другая характеризуется величинами n и k) с учетом фазового множителя (a — расстояние между центрами круговых функций, выраженное через отношение диаметров, u — компонент вектора линейной пространственной частоты, вдоль которой сдвинуты круговые функции):

$$|F(\vec{\omega})|^2 = \frac{1}{4\omega^2} [J_1^2(\pi\omega) - 2nk \cos(2\pi au) J_1(\pi\omega) J_1(\pi n\omega) + n^2 k^2 J_1^2(\pi n\omega)], \quad (18)$$

где: J_1 — функции Бесселя первого рода, $\omega^2 = u^2 + v^2$, u и v — компоненты вектора линейной пространственной частоты, n и k — отношение диаметров и контраст, соответственно.

Суть идеи состоит в фиксировании квадрата модуля пространственного спектра сигнала, как это делается при определении диаметров звезд методом спекл-интерферометрии [116], а затем восстановлении его до дифракционного предела телескопа. Применение этого метода встречается с большими трудностями, поскольку для него необходимы телескопы, разрешающие диаметры звезд с линейными размерами порядка диаметра Солнца. В обозримом будущем планируется изготовление телескопов с апертурами до 100 м [95]. Перспектива использования предложенного метода

видится с привлечением длиннобазовых звездных и безизбыточных интерферометров, база которых $\sim 10^2 \div 10^3$ км [3, 117, 118].

3.4. Метод металличностей

Предлагается искать «следы загрязнения» молодых звезд (с возрастом несколько миллионов лет) от бомбардировок формирующими планетную систему космических тел — процесс, оставивший в Солнечной системе многочисленные кратеры на внутренних планетах, происходивший в первый миллиард лет после образования Солнца [143]. Такое «загрязнение» звезд можно обнаружить, исследуя металличность тщательно отобранных населений звезд разных масс, например, в скоплениях среднего возраста, пытаясь отыскать характерные черты в относительных распространенностях в отдельных звездах, или отыскивая изотопные аномалии, типа Li⁶. Анализ распространенности легких (Li и Be) элементов, α -элементов и группы железа в звездах с экзопланетами, раскрывает возможность отличить звезды, имеющие планеты от звезд без таковых [109].

3.5. Активность звезд

12-летний солнечный цикл близок к орбитальному периоду Юпитера. Если это не простое совпадение, а результат солнечно-планетных связей, следует обратить внимание на аналогичную переменность, встречаемую у звезд. К такому типу активности, только большего масштаба, относят звезды типа BY Dra и RS CVn, на что ранее уже обращалось внимание Александровым и Захожаем [2]. Сравнивая основные характеристики взаимодействия между звездой и планетой с взаимодействиями между звездами, идентифицировав три разных режима взаимодействия: вращательную синхронизацию, гравитационное (приливное) и магнитное взаимодействия, Кунц, Саар и Мьюсилак [71] обосновывают возрастание хромосферной и корональной активности разных масштабов в зависимости от того, в окрестности звезд или планет они генерируются. Это может служить предпосылками для поиска планет у звезд по наблюдениям их активности [72]. Первые поиски такой вызываемой планетами активности, использующий ИК-триплет Ca II, успехом не увенчался, но более чувствительное исследование, использующее линии Ca II H и K, обнаружило признаки усиленной планетой активности для HD 179949 и в других системах [169].

Гравитационное взаимодействие планет с несферическими оболочками звезды образует большие дополнительные механические силы и моменты между соседними оболочками (напр., ядром и конвективной зоной), порождает циклические деформации всех слоев звезды и регулирует процессы внутри и на поверхности. Приливные и неприливные механизмы ведут к усилению эндогенной активности материнской звезды своими планетами и определяют ритмы звездной активности. Проведенный спектральный анализ упругой энергии и энергии приливов и сил взаимодействия между ядром и конвективной зоной, вызванных планетами для некоторых моделей Солнца, 55 Cnc, ν And [42], может лечь в основу поиска планет по звездной активности центральных звезд.

3.6. Проявление планет у звезд на завершающей стадии эволюции

Есть основания для предположения, что планеты могут существовать у звезд, находящихся в постядерную эпоху: у гигантов и звездных остатков (белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр). Впервые об этом было высказано предположение в художественной литературе — романе И.Ефремова «Туманность Андромеды» [10], где космические путешественники попадают в гравитационное поле черной дыры⁵. После открытия в конце 70-х годов планеты у нейтронной звезды PSR 0329+54 [80], эта литературная идея получила научное развитие.

На стадии гигантов звезда увеличивается в размерах в $\sim 10^2 - 10^3$ раз. Близкие планеты, удаленные от образующегося гиганта на несколько астрономических единиц, вращаются вблизи его фотосферы и начинают испаряться. Расчеты показывают [27], что темп испарения не настолько

⁵В то время еще не существовало термина «черная дыра», и поэтому автор использовал другой термин «железная звезда», по существу вкладывая смысл того, что мы в настоящее время понимаем под звездным остатком — черной дырой.

велик, чтобы планета испарилась «мгновенно». Планета продолжительное время может вращаться, влияя на форму кривой блеска на стадии мирид. И такие характерные кривые блеска удалось обнаружить у ряда гигантов [27].

Дальнейшая эволюция гигантов, образующихся в результате эволюции звезд нулевого возраста с массами $< 8m_{\odot}$ [16] сопровождается отделением внешней оболочки от образовавшегося в недрах белого карлика. Оценки показали, что «выживаемость» планет на стадии планетарной туманности весьма вероятно [184], поэтому не лишена смысла идея поиска планет в планетарных туманностях. Прямых сообщений об открытии планет в таких системах пока нет.

Исследование влияние захвата планет гигантами в процессе эволюции звезд показало, что большая часть первоначального углового момента звезд уносится ветрами [185]. Это ведет к тому, что даже планета с малой массой может раскрутить возникший гигант на ранней стадии или на асимптотической ветви до уровня, где становится важной магнитная активность. Холодные магнитные пятна могут усилить образование пыли и скорость звездного ветра, привести к несферическому ускользанию вещества. Ожидается, что магнитная активность проявится через X-излучение или поляризацию лазера. Этот процесс может повлиять на распределение звезд на горизонтальной ветви, может привести к образованию эллиптической планетарной туманности, а может и уберечь некоторые звезды от образования планетарной туманности.

При охлаждении белых карликов, ионизация атомов углерода и кислорода ($T \sim 10^5$ К), гелия ($T \sim 2.5 \cdot 10^5$ К), водорода ($T \sim 10^4$ К) частично ионизирует фотосферу. Наличие планет может возбуждать нерадиальные g-колебания, в диапазоне 100–1000 сек [151]. Изменений периода таких пульсаций ($\sim 10^{-15}$ с $^{-1}$) достаточно для обнаружения на его орбите планет с массами до $0.5m_J$, для орбитальных периодов $P = 0.1 - 30$ лет [111, 112, 158].

Предлагалось несколько вариантов существования планет в окрестности пульсаров [41, 154–156]: 1) планета образовалась возле звезды, с массой нулевого возраста $\approx (8 - 10)m_{\odot}$ [16] или 2) возле другой звезды и потом была захвачена пульсаром в процессе эволюции; 3) образование нейтронной звезды сопровождается появлением фрагментирующего аккреционного диска на планетезимали с последующим образованием планет по стандартной модели.

Такая планетная система может быть обнаружена по изменению градиента периода пульсаций пульсара. Скорость орбитального движения пульсара вокруг центра масс, определяется расстоянием его от центра масс d , согласно (8), и периодом орбитального движения P [17]:

$$v = 2\pi d/P \approx 2\pi m P^{-1/3} M^{-2/3}. \quad (19)$$

Следовательно, амплитуда изменения периода, согласно эффекту Доплера, есть

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{v}{c} \approx \frac{2\pi}{c} \frac{m}{M^{2/3}} P^{-1/3}. \quad (20)$$

Анализ показал, что современной точности измерения частоты пульсара достаточно для обнаружения планет с массой порядка марсианской и меньше в сантиметровом диапазоне волн, где пульсации проявляются наиболее отчетливо [3].

Наличие планет в окрестностях черных дыр можно ожидать по схеме, приведенной для нейтронных звезд (варианты 2 и 3). «Следы» образующихся планет в аккреционном диске, по-видимому, могут порождать мазерные источники, как это предполагается и, по-видимому, уже обнаружено [27] в классических протопланетных образованиях. Данных о таких объектах пока нет.

3.7. Метод гравитационного микролинзирования

Теоретически, планеты могут быть как связаны с центральным телом, так и существовать вне его, если, например, планетная система по какой-то из причин была разрушена. И те, и другие планеты могут иметь сколь угодно малые светимости и их излучение для детектирования недоступно уже на расстояниях сотен парсек. Такие планеты было предложено искать по эффекту «микролинзирования», предложенным Пачинским [147], который состоит в детектировании изменений интенсивности линзированного изображения (состоящего из множества микроизображений),

возникающего при прохождении «темного» точечного космического тела по точечному источнику, удаленному, как правило, на космологическое расстояние.

Согласно разработанному Рефсделом [160], Вамбсангом [193], Секетом [170], Рефсделом и Сурдейжем [161] математическому аппарату этого явления микролинзирование можно отличить от пекулярной собственной переменности источника по его ахроматическому поведению [151]. Принципы интерферометрических измерений в условиях микролинзирования, порядок их выполнения и примеры моделирования событий приведены в работе [78].

С 1993 г. наблюдательные программы смогли охватить наблюдениями миллионы звезд и стали активно наблюдать микролинзирование в рамках программ EROS [40], OGLE [191], MACHO [34] и DUO [32]. Уже наблюдаются сотни событий и заявлены события, приписываемые планетам (хотя и оспариваемые) [151]. Продолжаются проекты GMAN [157], PLANET [33], MSP [162], EXPORT [99, 147].

Мао и Пачински [127] и Гоулд и Лоэб [96] исследовали линзирование в случае, когда вокруг основной линзы вращается одна или несколько планет, и выяснили, что обнаруживаемая тонкая структура в фотометрическом следе фонового объекта появляется довольно часто, даже для планет с малой массой. Гоулд и Лоэб [96] считают, что вероятность обнаружения такой тонкой структуры $\approx 17\%$ для планеты класса Юпитера (т.е. удаленной на 5 а.е. от центральной звезды) и 3% для Сатурна. Вероятность обнаружения земноподобных планет рассматривалась Балатто и Фалько [52], расчеты числа обнаружений для реальных наблюдательных программ — Пил [150], Саху [171], Сакет [170], Гауди и Сакет [91]. Анализировались также отличие между возмущениями двойным источником и планетой [88], влияние нескольких планет на сильное увеличение [90], вероятность наблюдения повторных событий, вызываемых присутствием нескольких планет [80] и конфигурации, пересекающие каустики [97].

Кроме фотометрического микролинзирования, изменяющаяся ориентация приводит и к слабому движению фотоцентра фонового объекта, называемому астрометрическим линзированием. Поскольку подвергающийся микролинзированию источник имеет два (обычно не разрешенных) изображения, их центроид несколько отклонен (обычно на долю угловых миллисекунд) относительно траектории источника вследствие меняющихся усиления и положений изображений при линзировании (см. [50, 106]).

Астрометрическое усиление имеет два преимущества перед фотометрическим микролинзированием. Во-первых, астрометрическое поперечное сечение намного больше фотометрического; во-вторых, вырождение, связанное с массой линзы, устраняется [89]. Обычно измерения дают только отношение масс планета/звезда и их проецированное разделение в единицах радиуса линзы Эйнштейна. Астрометрические характеристики пока измерить нельзя, они слишком малы для современных наземных наблюдений — это дело будущего. Астрометрическое линзирование как способ обнаружения планет исследовалось Мао и Пачински [127], Сафизадех и др. [172], Хан и Чанг [101], Доминик и Саху [81]. Величина возмущения от планет класса Юпитера, длящаяся несколько дней [151], оценивается $\sim 10 \text{ мк}''$. Ожидается, что Космический интерферометр SIM [74] позволит изучить такие фотометрические события, а GAIA — обнаружить астрометрическое линзирующее смещение независимо от фотометрии [81].

Метод микролинзирования обладает высокой чувствительностью для планет малых масс, эффективностью работы для больших расстояний (килопарсеки) и не требует фотонов от планеты. В то же время не существует возможности заблаговременного отбора для исследований конкретных систем и трудно воспроизвести открытие планет [151].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постановка задачи поиска планет у звезд сформировалась к концу 70-х — началу 80-х годов XX века. К тому времени были предложены основные, не утратившие актуальности и к настоящему времени идеи и методы поиска планет у звезд. Прошло 20 лет, прежде чем была открыта планета

неастрометрическим методом: в 1995 году появилось первое сообщение о наблюдении методом лучевых скоростей планеты у звезды 51 Peg [135]. С тех пор прошло еще около 10 лет. К 10 сентября 2004 г. методом лучевых скоростей было обнаружено 129 невидимых спутника у 113 звезд (у 10 систем — два, у 2 — три, у 1 — четыре спутника), с массами $(0.042 \div 16.9)m_J \sin i$ [176].

К настоящему времени различными методами открыто 163 невидимых спутника, массы которых попадают в интервал, ограниченный снизу массой Марса и соизмеримой с наименьшей массой невидимого спутника, открытого у пульсара PSR B1257+12 b, и ограниченный сверху массами, приводимыми в результатах по поиску планет методами лучевых скоростей: $(0.0003 \div 17)m_J$ и астрометрическим, ограниченным максимальными массами субзвезд — $80m_J$ [176, 197]. В соответствии с критерием Рисса [159] и оценками Лоу и Линден-Белла [126], массы 110 невидимых спутников соответствуют заведомо планетным, меньше $3m_J$, где подавляющее число из них — водородно-гелиевые. Массы 33 водородно-гелиевых невидимых спутников попадают в интервал $(3 \div 7)m_J$, где находится наиболее вероятная граница «планета-субзвезда», 20 — типично субзвездные ($m > 7m_J$).

1. Александров Ю.В., Захожай В.А. // Астрон. вестн. — 1980. — **14**. — С. 129.
2. Александров Ю.В., Захожай В.А. // Астрон. вестн. — 1983. — **17**. — С. 82.
3. Александров Ю.В., Захожай В.А. // Астрон. вестн. — 1983. — **17**. — С. 131.
4. Александров Ю.В., Захожай В.А. // В кн.: Проблемы поиска жизни во Вселенной. — М.: Наука, 1986. — С. 201.
5. Ваврух М.В., Тишко Н.Л. // Журн. физ. досл. — 2002. — **6**. — С. 414.
6. Ван де Камп П. // В кн.: Методы астрономии. — М.: Мир, 1967. — С. 412.
7. Видьмаченко А.П., Крушевская В.Н., Кузнецова Ю.Г. // Кинем. и физ. неб. тел. — 2002. — **18**. — С. 419.
8. Видьмаченко А.П. // Кинем. и физ. неб. тел. — 1994. — **10**. — С. 62.
9. Голд Т. // В кн.: Проблема СЕТИ (Связь с внеземными цивилизациями). — М.: Мир, 1975. — С. 15.
10. Ефремов И.А. Туманность Андромеды. — М.: Мол. гвардия, 1958. — 368 с.
11. Захожай В.А. // Вестн. Харьк. ун-та: Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия. — 1978. — № 176. — С. 85.
12. Захожай В.А. // Астрометрия и астрофиз. — 1979. — № 37. — С. 85.
13. Захожай В.А. // Вестн. Харьк. ун-та: Методы обработки астрономических и космических изображений. — 1981. — № 223. — С. 60.
14. Захожай В.А. // Вестн. Харьк. ун-та: Астрометрия Солнечной системы. — 1983, № 247. — С. 44.
15. Захожай В.А.: Дис...канд.физ.-мат.наук. — Л.: ГАО АН СССР, 1987. — 206 с.
16. Захожай В.А. // Вісник Астрон. школи. — 2002. — **3**, № 2. — С. 81.
17. Иванов В.В., Кривов А.В., Денисенков П.А. Парадоксальная Вселенная (175 задач по астрономии) — Санкт-Петербург: С-ПбГУ, 1997. — 144 с.
18. Кислюк В.С. // Вісник Астрон. школи. — 2003. — **4**, № 2. — С. 55.
19. Ксанфомалити Л.Н. // Тезисы докл. Всесозн. Симпозиума «Поиск разумной жизни во Вселенной». — Таллин, 1981. — С. 28.
20. Ксанфомалити Л.Н. // В кн.: Проблема поиска жизни во Вселенной. — М.: Наука, 1986. — С. 187.
21. Ксанфомалити Л.Н. // Астрон. вестн. — 1999. — **33**. — С. 547.
22. Ксанфомалити Л.Н. // Астрон. вестн. — 2000. — **34**. — С. 529.
23. Ксанфомалити Л.В. // Тезисы докл. Всеросс. астроном. конф. ВАК-2004: «Горизонты Вселенной». — Тр. ГАИШ. — 2004. — **LXXXV** (МГУ, ГАИШ, 3–10 июня 2004 г.). — С. 5.

24. *Марочник Л.С., Сучков А.А.* Галактика. — М.: Наука, 1984. — 392 с.
25. *Мороз В.И.* // В кн.: Проблема поиска внеземных цивилизаций. — М.: Наука, 1981. — С. 171.
26. *Пекер Ж.-К.* Экспериментальная астрономия. — М.: Мир, 1973. — 166 с.
27. *Рудницкий Г.М.* // Тезисы докл. Всеросс. астроном. конф. ВАК-2004: «Горизонты Вселенной». — Тр. ГАИШ. — 2004. — **LXXV** (МГУ, ГАИШ, 3–10 июня 2004 г.). — С. 63.
28. *Слюта Е.Н., Воробаев С.А.* // Астрон. вестник. — 1993. — **27**. — С. 71.
29. *Сучков А.А., Щекминов Ю.А.* // Астрон. ж. — 1975. — **52**. — С. 662.
30. *Фесенков В.Г.* // Природа. — 1961. — № 3. — С. 5.
31. *Шкловский И.С.* // Астрон. циркуляр. — 1966. — № 372. — С. 1.
32. *Alard C.* // In C.S. Kochanek, J.N. Hewitt, eds., *Astrophys. Appl. of Gravit. Lens.* IAU Symp. — Kluwer, Dordrecht, 1996. — **173**. — P. 215.
33. *Albrow M.D., Birch P., Caldwell J., et al.* // In C.S. Kochanek, J.N. Hewitt, eds., *Astrophys. Appl. of Gravit. Lens.* IAU Symp. — Kluwer, Dordrecht. — 1996. — **173**. — P. 227.
34. *Alcock C, Akerlof C W, Allsman R A, et al.* // *Nature*. — 1993. — **365**. — P. 621.
35. *Angel J.R.P., Cheng A.Y.S., Woolf N.J.* // *Nature*. — 1986. — **322**. — P. 341.
36. *Angel J.R.P.* // *Nature*. — 1994. — **368**. — P. 203.
37. *Angel J.R.P., Woolf N.J.* // *Sci. Am.* — 1996. — **274**, April. — P. 46.
38. *Angel J.R.P., Woolf N.J.* // *Astrophys. J.* — 1997. — **475**. — P. 373.
39. *Angel J.R.P., Woolf N.J.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions.* — ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 207.
40. *Aubourg E, Baryre P, Br'ehin S, et al.* // *Nature*. — 1993. — **365**. — P. 623.
41. *Banit M., Ruderman M.A., Shaham J., Applegate J.H.* // *Astrophys. J.* — 1993. — **415**. — P. 779.
42. *Barkin J.V.* // Abstract book: 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 73.
43. *Beichman C.A.* // Technical Report 9622. — JPL. — 1996.
44. *Beichman C.A.* // *SPIE*. — 1998. — **3350**. — P. 719.
45. *Bender P.L., Stebbins R.T.* // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101(E4)**. — P. 9309.
46. *Benest D.* // In R.Rebolo, E.L.Martin, M.R.Zapatero Osorio, eds., *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets.* — ASP Conf. Series. — San Francisco, 1998. — **134**. — P. 277.
47. *Bernstein H.H.* // In M.A.C. Perryman, P.L. Bernacca, eds., *Hipparcos Venice 97.* ESA. — Noordwijk, 1997. — SP402. — P. 705.
48. *Bernstein H.H., Bastian U.* // In M.A.C Perryman, F. van Leeuwen, eds., *Future Possibilities for Astrometry in Space* ESA. — 1995. — SP379. — P. 55.
49. *Boden A., Unwin S., Shao M.* // In M.A.C. Perryman, P.L. Bernacca, eds., *Hipparcos Venice 97.* ESA. — Noordwijk, 1997. — SP402. — P. 789.
50. *Boden A.F., Shao M., van Buren D.* // *Astrophys. J.* — 1998. — **502**. — P. 538.
51. *Böker T., Allen R.J.* // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — **124**. — P. 123.
52. *Bolatto A.D., Falco E.E.* // *Astrophys. J.* — 1994. — **436**. — P. 112.
53. *Bonneau D., Josse M., Labeyrie A.* // In: *Image Process. Techn. Astron. Proc. Conf.* — Utrecht, Dordrecht-Boston, 1975. — P. 403.
54. *Borucki W.J., Koch D.G., Dunham E.W., Jenkins J.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions.* ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 153.

55. *Bouchy F., Connes P., Bertaux J.L.* // In J.B. Hearnshaw, C.D. Scarfe, eds., *Precise Stellar Radial Velocities*. IAU Coll. 170 ASP Conf. Series. — San Francisco, 1999. — **185**. — P. 22.
56. *Bracewell R.* // *Nature*. — 1978. — **274**. — P. 780.
57. *Bracewell R., MacPhie R.* // *Icarus*. — 1979. — **38**. — P. 136.
58. *Brown T.M., Charbonneau D., Gilliland R.L., et al.* // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 2000. — 196th Meeting, 2.03.
59. *Burrows A., Angle R.* // *Nature*. — 1999. — **402**. — P. 732.
60. *Butler R.P., Marcy G.W., Williams E., et al.* // *Publ. Astr. Soc. Pac.* — 1996. — **91**. — P. 540.
61. *Butler R.P., Marcy G.W.* // In R. Rebolo, E.L. Mart'in, M.R. Zapatero Osorio, eds., *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*. — Tenerife, Spain, 1998. — P. 162.
62. *Cameron A., Horne K., Penny A., Jamse D.* // *Nature*. — 1999. — **402**. — P. 732.
63. *Campbell B., Walker G.A.H.* // *Publ. Astr. Soc. Pac.* — 1979. — **91**. — P. 540.
64. *Charbonneau D., Brown T.M., Latham D.W., Mayor M.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **529**. — L45.
65. *Colavita M.M., Shao M.* // *Astrophys. Space Sci.* — 1994. — **212**. — P. 385.
66. *Colavita M.M.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 87.
67. *Colavita M.M., Boden A.F., Crawford S.L., et al.* // *SPIE*. — 1998. — **3350**. — P. 776.
68. *Connes P.* // *Astrophys. Space Sci.* — 1994. — **212**. — P. 357.
69. *Cruikshank D.P., Werner M.W.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions* ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 223.
70. *Cumming A., Marcy G.W., Butler R.P.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **526**. — P. 890.
71. *Cuntz M., Saar S.H., Musielak Z.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **533**. — L151.
72. *Cuntz M.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 66.
73. *Danner R., Unwin S.* // *SIM: Taking the Measure of the Universe*. — NASA/JPL. — 1999.
74. *Deeg H.J.* // In R. Rebolo, E.L. Mart'in, M.R. Zapatero Osorio, eds., *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets* ASP Conf. Series. — San Francisco, 1998. — **134**. — P. 216.
75. *Deeg H.J., Doyle L.R., Kozhevnikov V.P., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 1998. — **338**. — P. 479.
76. *Deeg H.J., Doyle L.R., Kozhevnikov V.P., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 2000. — **358**. — L5.
77. *Deleuil M., Barge P., Léger A., Schneider J.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 259.
78. *Delplanke Fr.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 77.
79. *Demianski M., Proszynski M.* // *Nature*. — 1979. — **282**. — P. 383.
80. *Di Stefano R., Scalzo R.A.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **512**. — P. 579.
81. *Dominik M., Sahu K.C.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **534**. — P. 213.
82. *Doyle L.R., Dunham E.T., Deeg H.J., et al.* // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101(E6)**. — P. 14823.
83. *Doyle L., Rottler L., Blue J.E., et al.* // In *Bioastronomy 99: A New Era in Bioastronomy*. — 6th Bioastronomy Meeting. — 1999. — P. 73.
84. *Edwards P.J., Hurst R.B., Christie G.* // *Proc. Astron. Soc. Austral.* — 1975. — **2**, № 6. — P. 349.
85. *Elliot J.L.* // *Icarus*. — 1978. — **35**. — P. 156.
86. *Fridlund C.V.M.* // In B.Schurmann, ed., *Darwin and Astronomy 11–18 ESA*. — Noordwijk, NL, 2000. — SP-451.
87. *Gateway G.* // *Icarus*. — 1976. — **27**. — P. 1.

88. *Gaudi B.S.* // *Astrophys. J.* — 1998. — **506**. — P. 533.
89. *Gaudi B.S., Gould A.* // *Astrophys. J.* — 1997. — **486**. — P. 85.
90. *Gaudi B.S., Naber R., Sackett P.D.* // *Astrophys. J.* — 1998. — **502**. — L33.
91. *Gaudi B.S., Sackett P.D.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **528**. — P. 56.
92. *Germain M., Urban S., Murison M., et al.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 273.
93. *Gilliland R.A.* // *Space Tel. Sci. Inst. Newsletter.* — 1999. — **16(3)**. — P. 1.
94. *Gilmore G., de Boer K.S., Favata F., et al.* // In J.B. Brekinridge, P. Jakobsen, eds., *UV, Optical and IR Space Telescopes and Instruments.* — SPIE. — 2000. — **4013**.
95. *Gilmozzi R., Delabre B., Dierickx P., et al.* // *Future of Filled Aperture Telescopes: is a 100m Feasible?* — SPIE. — 1998. — **3352**. — P. 778.
96. *Gould A., Loeb A.* // *Astrophys. J.* — 1992. — **396**. — P. 104.
97. *Graff D.S., Gaudi B.S.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **538**. — L133.
98. *Greenstein J.L., Black D.* // *The search for extraterrestrial intelligence (SETI).* — NASA. SP-419. — 1977. — P. 53.
99. *Griest K.* // *Astrophys. J.* — 1991. — **366**. — P. 412.
100. *Griffin R., Griffin R.* // *Astrophys. J.* — 1973. — **459**. — L35.
101. *Han C., Chang K.* // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* — 1999. — **304**. — P. 845.
102. *Harrington R S.* // *Astron. J.* — 1977. — **82**. — P. 753.
103. *Henry G.W., Marcy G.W., Butler R.P., Vogt S.S.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **529**. — L41.
104. *Heppenheimer T.A.* // *Astron. Astrophys.* — 1978. — **65**. — P. 421.
105. *Hinz P., Angel J.R.P., Woolf N.J., et.al.* // In S. Unwin, R. Stachnik, eds., *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1999. — **194**. — P.56.
106. *Høg E., Novikov I.D., Polnarev A.G.* // *Astron. Astrophys.* — 1995. — **294**. — P. 287.
107. *Huang Su Shu* // *Icarus.* — 1973. — **18**. — P. 339.
108. *Hummell C.A, Mozurkewich D., Elias N.M.I., et.al.* // *Astron. J.* — 1994. — **108**. — P. 326.
109. *Israelian G.* // *Abstract book 25th General Assembly IAU.* — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 68.
110. *Kamp I.* // *Abstract book 25th General Assembly IAU.* — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 68
111. *Kepler S.O., Winget D.E., Nather R.E., et al.* // *Astrophys. J.* — 1991. — **378**. — L45.
112. *Kleinman S.J., Nather R.E., Winget D.E., et al.* // *Astrophys. J.* — 1994. — **436**. — P. 875.
113. *Koch D., Borucki W., Cullers K., et al.* // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101(E4)**. — P. 9297.
114. *Korechoff R.P., Diner D.J., Tubbs E.F., Gaiser S.L.* // *Astrophys. Space Sci.* — 1994. — **212**. — P. 369.
115. *Kürster M., Hatzes A.P., Cochran W.D., et.al.* // In J.B. Hearnshaw, C.D. Scarfe, eds., *Precise Stellar Radial Velocities*, IAU Coll. 170. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1999. — **185**. — P. 154.
116. *Labeyrie A.* // *Astron.Astrophys.* — 1970. — **6**. — P. 85.
117. *Labeyrie A.* // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101(E4)**. — P. 9309.
118. *Labeyrie A.* // *Science.* — 1999. — **285**. — P. 1864.
119. *Lecavelier des Etangs A., VidalMadjar A., Burki G., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 1997. — **328**. — P. 311.
120. *Lecavelier des Etangs A., VidalMadjar A., Ferlet R.* // *Astron. Astrophys.* — 1999. — **343**. — P. 916.
121. *Léger A.* // In J.M. Mariotti, D. Alloin, eds., *Planets Outside the Solar System: Theory and Observations.* — NATOASI. — 1998. — P. 397.

122. *Léger A., et al.* // The Darwin Mission Concept Technical report Proposal to the ESA 'Horizon 2000 Plus' Planning Process. — 1993.
123. *Léger A., Mariotti J.M., Mennesson B., et al.* // *Astrophys. Space Sci.* — 1996. — **241**. — P. 135.
124. *Lestrade J.F., Phillips R.B., Jones D.L., Preston R.A.* // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101(E6)**. — P. 1483.
125. *Lestrade J.F., Preston R.A., Jones D.L., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 1999. — **344**. — P. 1014.
126. *Low C., Lynden-Bell D.* // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1976. — **176**. — P. 367.
127. *Mao S., Paczyński B.* // *Astrophys. J.* — 1991. — **374**. — L37.
128. *Malbet F., Yu J. W., Shao M.* // *Publ. Astr. Soc. Pac.* — 1995. — **107**. — P. 386.
129. *Marcy G.W., Butler R.P.* // *Publ. Astr. Soc. Pac.* — 1992. — **104**. — P. 270.
130. *Marcy G.W., Butler R.P., Fisher D., et al.* // 2002. <http://exoplanets.org>.
131. *Marcy G.W., Cochran W.D., Mayor M.* // In V. Mannings, A.P. Boss, S.S. Russell, eds., *Protostars and Planets IV*. — University of Arizona Press, Tucson. — 2000. — P. 1285.
132. *Mariotti J.M., Denise C., Derie F., et al.* // *SPIE*. — 1998. — **3350**. — P. 800.
133. *Mariotti J.M., Léger A., Mennesson B., Ollivier M.* // In C.B. Cosmovici, S. Bowyer, D. Werthimer, eds., *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, IAU Coll. — Editrice Compositori, Italy, 1997. — **161**. — P. 299.
134. *Mather J.C., Bely P.Y., Stockman P., Thronson H.A.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 245.
135. *Mayor M., Queloz D.A.* // *Nature*. — 1995. — **378**. — P. 355.
136. *Mazeh T., Zucker S., Torre A.D., van Leeuwen F.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **522**. — L149.
137. *McAlister H.A.* // *Icarus*. — 1977. — **30**. — P. 789.
138. *McAlister H.A.* // The proceed. Coll. No. 50 IAU. — Univ. Sydney, Australia. — 1979. — P. 3.1
139. *McAlister H.A.* // In S. Unwin, R. Stachnik, eds., *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space*. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1999. — **194**. — P. 32.
140. *Mennesson B., Mariotti J.M.* // *Icarus*. — 1997. — **128**. — P. 202.
141. *Mignard F.* // In D. Egret, A. Heck, eds., *Harmonizing Cosmic Distance Scales in a PostHipparcos Era*. ASP Conf. Ser. — San Francisco. Astr. Soc. Pac. — 1999. — **167**. — P. 44.
142. *Mochejska B.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 69.
143. *Murray N.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 69.
144. *Niedzielski A.* // *Urania*. — 2001. — **4**. — P. 156.
145. *Ninković S., Popovic G.M.* // *Bull. Obs. Astron., Belgrade*. — 1987. — № 137. — P. 44.
146. *O Leary B.* // *Sky and Telescope*. — 1980, August. — P. 111.
147. *Paczyński B.* // *Astrophys. J.* — 1986. — **301**. — P. 503.
148. *Pan X., Kulkarni S., Colavita M.M., Shao M.* // In R. Rebolo, E.L. Mart'in, M.R. Zapatero Osorio, eds., *Brown Dwarfs and Extrasolar Planets*. — Tenerife, Spain. — 1998. — P. 271.
149. *Paprotny Z.* // *Post. Astronaut.* — 1977. — **10**, № 1. — P. 41.
150. *Peale S.J.* // *Icarus*. — 1997. — **127**. — P. 269.
151. *Perryman M.A.C.* // Preprint Rep. Prog. Phys. — 2000, 31 May. — P. 1.
152. *Perryman M.A.C., Lindgren L., Arenou F., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 1996. — **310**. — L21.
153. *Perryman M.A.C., Lindgren L., Kovalevsky J., et al.* // *Astron. Astrophys.* — 1997. — **323**. — L49.
154. *Phillips J.A., Thorsett S.E.* // *Astrophys. Space Sci.* 1994. — **212**. — P. 91.

155. *Phinney E.S., Hansen B.M.S.* // In J.A. Phillips, S.E. Thorsett, S.R. Kulkarni, eds., Planets around Pulsars. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1993. — **36**. — P. 371.
156. *Podsiadlowski P.* // In J.A. Phillips, S.E. Thorsett, S.R. Kulkarni, eds., Planets around Pulsars. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1993. — **36**. — P. 149.
157. *Pratt M.R., Alcock C., Allsman R.A., et al.* // In C.S. Kochanek, J.N. Hewitt, eds., Astrophysical Applications of Gravitational Lensing. IAU Symp. — Kluwer, Dordrecht, 1996. — **173**. — P. 221.
158. *Provencal J.L.* // In D.R. Soderblom, ed., Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 123.
159. *Rees M.J.* // Mon. Not. R. Astr. Soc. — 1976. — **176**. — P. 483.
160. *Refsdal S.* // Mon. Not. R. Astr. Soc. — 1964. — **128**. — P. 295.
161. *Refsdal S., Surdej J.* // Rep. Prog. Phys. — 1994. — **56**. — P. 117.
162. *Rhie S.H., Becker A.C., Bennett D.P., et al.* // Astrophys. J. — 1999. — **522**. — P. 1037.
163. *Rosenblatt F.A.* // Icarus. — 1971. — **14**. — P. 71.
164. *Röser S., Bastian U., de Boer K.S., et al.* // In M.A.C Perryman, P.L. Bernacca, eds., Hipparcos. Venice 97 ESA. — Noordwijk. — SP402. — 1997. — P. 777.
165. *Rottler L., Doyle L., Bolte M.* // In Bioastronomy 99: A New Era in Bioastronomy. — 6th Bioastronomy Meeting. — 1999. — P. 110.
166. *Roxburgh I., Christensen-Dalsgaard J., Favata F.* // Eddington: a Stellar Physics and PlanetFinder Explorer. — Technical report Proposal to ESA. — 2000.
167. *Saar S.H., Donahue R.A.* // Astrophys J. — 1997. — **485**. — P. 319.
168. *Saar S.H., Butler R.P., Marcy G.W.* // Astrophys. J. — 1998. — **498**. — L153.
169. *Saar S.H.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P.70
170. *Sackett P.D.* // In J.M. Mariotti, D. Alloin, eds., Planets Outside the Solar System: Theory and Observations. — NATOASI. — 1999. — P. 189.
171. *Sahu K.C.* // In D.R. Soderblom, ed., Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions ASP Conf. Series. — San Francisco. — 1997. — **119**. — P. 73.
172. *Safizadeh N., Dalal N., Griest K.* // Astrophys. J. — 1999. — **522**. — P. 512.
173. *Sartoretti P., Schneider J.* // Astron. Astrophys. Suppl. — 1999. — **134**. — P. 553.
174. *Schneider J.* // Astrophys. Space Sci. — 1996. — **241**. — P. 35.
175. *Schneider J.* // C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II. — 1999. — **327**. — P. 621.
176. *Schneider J.* // <http://www.obspm.fr/planets>. — 10 September, 2004.
177. *Schneider J., Auvergne M., Baglin A., et al.* // In C.E. Woodward, J.M. Shull, H.A. Thronson, eds., Origins. ASP Conf. Series. — San Francisco, 1998. — **148**. — P. 298.
178. *Schneider J., Chevreton M.* // Astron. Astrophys. — 1990. — **232**. — P. 251.
179. *Schroeder D., Golimowski D.* // Publ. Astr. Soc. Pac. — 1996. — **108**. — P. 510.
180. *Sercovski K.* // Icarus. — 1976. — **27**. — P. 13.
181. *Shao M.* // Astrophys. Space Sci. — 1995. — **223**. — P. 119.
182. *Shao M., Colavita M.M.* // Astron. Astrophys. — 1992. — **262**. — P. 353.
183. *Söderhjelm S., Robichon N., Arenou F.* // Astron. Astrophys. — 2000. — **355**. — P. 295.
184. *Soker N.* // Mon. Not. R. Astr. Soc. — 1999. — **306**. — P. 806.
185. *Soker N.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 71.
186. *Stahl S.M., Sandler D.G.* // Astrophys. J. — 1995. — **454**. — L153.

187. *Stepinski T.F., Black D.C.* // *Astron. Astrophys.* — 2000. — **356**. — P. 903.
188. *Terrile R.J., Ftaclas C.* // In C.B.Cosmovici, S.Bowyer, D.Werhimer, eds., *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, IUA Coll. — Editrice Compositori, Italy, 1997. — **161**. — P. 359.
189. *Thronson H.A.* // In D.R. Soderblom, ed., *Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions ASP Conf. Series.* — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 3.
190. *Traub W.A.* // *SPIE.* — 1998. — **3350**. — P. 848.
191. *Udalksi A., Szyma'nski M., Kaluzny J., et al.* // *Acta Astron.* — 1993. — **43**. — P. 289.
192. *Udry S., Mayor M.* // *Lecture notes in physics: Astrobiology.* — Springer, Verlag. — 2002.
193. *Wambsganss J.* // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* — 1997. — **284**. — P.172.
194. *Weldrake D.* // *Abstract book 25th General Assembly IAU.* — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 72.
195. *Wizinowich P., Acton D.S., Shelton C., et al.* // *Publ. Astr. Soc. Pac.* — 2000. — **112**. — P. 315.
196. *Woolf N.J., Angel J.R.P.* // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1998. — **36**. — P. 507.
197. *Zakhozaj V.A.* // *Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique.* — Nikolaev, 2001. — P. 274.
198. *Zucker S., Mazeh T.* // *Astron. Astrophys.* — 2000. — **531**. — L67.

Поступила в редакцию 14.10.2004