

Транзиты внесолнечных планет на низких орбитах

Л. В. Ксанфомалити

Институт космических исследований РАН, Москва

Деление внесолнечных планет (экзопланеты) на две группы по параметрам орбит было выявлено в первые же годы исследований этих новых объектов. “Горячие юпитеры” с $a < 0.15$ а.е. и периодом, не превышающим 10 суток, находятся на низких круговых орбитах. Этим они резко отличаются от более массивных (главным образом) объектов на высоких орбитах с большими периодами (до 10 лет) и эксцентриситетами до $\varepsilon = 0.9$. В предлагаемой работе рассматриваются внесолнечные планеты с орбитами, позволяющими наблюдать их транзиты (прохождения по диску звезды). Сопоставление экспериментальных данных, полученных при наблюдении транзитов “горячих юпитеров”, с выводами теории позволяет сделать заключение о водородном (главным образом) составе объекта HD 209458b (и других “горячих юпитеров”) и о вероятном наличии у них сильного магнитного поля. Вместе с тем результаты исследований транзитов указывают на возможность существования различных подтипов внесолнечных планет, в том числе планет с массивным ядром из тяжелых элементов.

TRANSITS OF EXTRASOLAR PLANETS AT LOW ORBITS, by L.V.Ksanfomaliti. Division of extrasolar planets (exo-planets) into two groups according to parameters of their orbits was discovered in the very first years of studying these new objects. “Hot jupiters” with $a < 0.15$ a.u. and periods less than 10 days are in low circular orbits. This is their drastic difference from mainly more massive objects in high orbits with large periods (up to 10 years) and eccentricities up to $\varepsilon = 0.9$. This paper considers extrasolar planets with orbits permitting one to observe their transits (passages across the star disk). Comparison of experimental data obtained in observations of transits of “hot jupiters” with theoretical conclusions allows us to infer that the chemical composition of the object HD 209458b (and other “hot jupiters”) is mainly hydrogen, and magnetic field is probably present. At the same time, the results of studying transits indicate that there probably exist different subtypes of extrasolar planets including ones with a massive core of heavy elements.

1. Введение

К осени 2006 г. общее число открытых планет у других звезд достигло 208. Значительная их часть, более 50 экзопланет, имеет большую полуось орбиты в пределах 0.15 а. е., что определяет вероятность наблюдений транзитов для этой группы (т.е. расположение наблюдателя в плоскости орбиты экзопланеты) достаточно высокими значениями, от 0.06 до 0.20. В течение 5-ти лет внесолнечная планета HD 209458b оставалась, не считая объектов OGLE, единственной с обнаруженным транзитом. Надежды найти другой объект с транзитами долго не оправдывались, зато был обнаружен ряд эффектов, сходных в наблюдениях с транзитами. В частности, так могут себя проявлять устойчивые пятна на звезде или затменные двойные (Charbonneau, 2003a, b). Когда наблюдатели сни-

зили ожидаемый эффект ослабления света звезды при транзитах до 0.2–0.3% (у HD 209458 ослабление составило 1.6%), были обнаружены еще две экзопланеты с транзитами, HD 149026b и TrES-1 (Sato et al., 2006; Alonso et al., 2004). Благодаря высокой активности исследователей, использующих метод лучевых скоростей (МЛС), возможные звезды-кандидаты на обладание планетными системами в пределах сферы, скажем, 150 пк, быстро исчерпываются. А исследование объектов OGLE, хотя число их растет, мало что может дать физике внесолнечных планет, поскольку у столь далеких слабых объектов даже тип компаньона (планета-гигант, коричневый карлик или звезда малой массы) определить очень сложно (Gonzalez, 2003).

Набор свойств HD 209458 оказался весьма благоприятным для исследований, несмотря на его

сравнительно большую удаленность, 47 пк (Schneider, 2006). Это звезда класса G0 ($V = 7^m 65$) с достаточно спокойной фотосферой, допускающей МЛС-измерения вплоть до 3 м/с. Ее характеристики: $M = 1.06M_s$, $R_* = 1.18R_s$, возраст составляет 5.2 Глет (Cody, Sasselov, 2002). Хотя в настоящее время в системе обнаружена только одна планета, но это наиболее интересный объект нового класса — “горячий юпитер” с 3.5-суточным периодом, типичный для внесолнечных систем и совершенно чуждый Солнечной системе.

Отметим, что предельные возможности метода лучевых скоростей ныне близки к 1.5 м/с (Santos et al., 2003; 2005) и определяются главным образом нестабильностью фотосфер звезд солнечного типа. Метод поиска экзопланет по периодическому изменению лучевых скоростей тем эффективнее, чем ближе возмущающее тело к звезде. Основные соотношения для кеплеровских составляющих лучевой скорости звезды приводились в работе Ксанфомалити (2000). В результате обращения звезды с массой M и планеты с массой m вокруг общего барицентра системы в лучевой скорости звезды появляется знакопеременная (кеплеровская) составляющая $V_{\text{ед}}$ (с периодом T и фазой ψ), которая указывает на наличие планеты. Отношение больших полуосей орбит звезды r и планеты R определяется равенством их моментов, $mR = Mr$.

Интересно отметить, что в работах (Giampapa и др., 1995; Wozniak и др., 1985), опубликованных накануне открытия первого “горячего юпитера” 51 Peg b, указывалось, что перспективы обнаружения гипотетических внесолнечных планет, имеющих транзиты, сомнительны. Авторы исходили из того, что и вероятность благоприятного для наблюдения транзитов положения плоскости орбиты низка (для такой пары, как Солнце – Юпитер, — $6 \cdot 10^{-4}$), и явление происходит исключительно редко (например, для Юпитера в Солнечной системе — 1 раз в 12 лет). Существование короткопериодических “горячих юпитеров” никто не предполагал — их открытие оказалось полной неожиданностью. Что же касается транзитов, они стали новым мощным инструментом астрофизики, позволяющим исследовать не только экзопланету, но и саму “родительскую” звезду.

Если R_* и R_p — радиусы звезды и планеты и a — большая полуось кеплеровской орбиты планеты, очевидное условие транзитов, исходя из геометрии наблюдения, имеет вид:

$$\operatorname{tg} i \geq a / (R_* + R_p), \quad (1)$$

где i — угол наклона орбиты.

Вероятность P_t наблюдаемости транзитов составляет

$$P_t = (R_* + R_p) / a. \quad (2)$$

Для планет на низких орбитах с $a < 0.15$ а.е. $P_t > 6\%$, а для системы HD 209458 $P_t = 17\%$. Для еще более низких орбит вероятность P_t растет вплоть до 20%.

2. Система HD 209458

Транзиты объекта HD 209458b (рис. 1) впервые наблюдались практически одновременно наземными и космическими средствами (Charbonneau и др., 2000; Henry и др., 2000). Последующие поиски этого эффекта у 20-ти звезд проводились многими группами исследователей (до 20-ти на 2003 г.), но успеха не имели (Horne, 2003). Учитывая незначительность доли звезд, имеющих “горячие юпитеры” (всего 0.0075, согласно Butler и др., 2001), а также произвольное положение плоскости их орбит, Charbonneau (2003b) определил вероятность встретить среди одиночных звезд солнечного типа объект с наблюдаемыми транзитами планет на уровне 1/1300.

Благодаря высокой частоте транзитов, период HD 209458b определен с высокой точностью, 3.524738 сут. Большая полуось кеплеровской орбиты планеты составляет 0.045 а.е. Глубина модуляции яркости звезды, $(R_p/R_*)^2$, при транзитах достигает 1.6%. По длительности транзита удается легко найти широту прохождения планеты по диску звезды.

Из результатов наблюдений объекта HD 209458b можно сделать важные выводы не только относительно его природы, но и природы других аналогичных гигантов. Для этого в настоящей работе использованы экспериментально установленные их параметры, прежде всего масса и радиус, а также выводы теории строения тел, подобных Юпитеру.

3. Размеры и состав гигантских планет, подобных HD 209458b

Радиусы планет-гигантов и звезд малой массы сложным образом зависят от массы этих объектов. По меньшей мере, три различных процесса могут определять их радиусы. В случае высоких давлений освобождающиеся электроны образуют вырожденный газ. Давление вырожденного газа p зависит от плотности ρ как $p \propto \rho^{5/3}$ (и не зависит от температуры), а давление идеального газа как $p \propto \rho T$. Если условия таковы, что давление вырожденного газа превосходит давление идеального газа, первое начинает играть преобладающую роль. Это соответствует, например, случаю коричневых карликов на границе термоядерной реак-

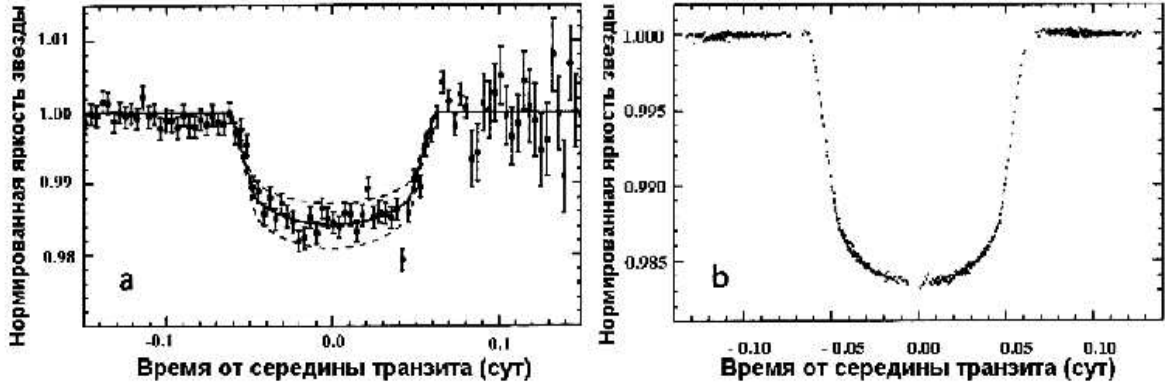


Рис. 1: Первые наблюдения транзитов объекта HD 209458b, выполненные наземными средствами (a): Charbonneau et al. (2000), и с орбитальной обсерватории HST (b): Henry et al. (2000).

ции дейтерия. Тогда связь гравитационной энергии $\gamma M_p^2/R_p$ (здесь γ — гравитационная постоянная), радиуса R_p и плотности ρ определяется условием равновесия:

$$\gamma M_p^2/R_p \propto R_p^3 \rho^{5/3}, \quad (3)$$

и тогда радиус планеты $R_p \propto 1/M_p^{1/3}$. Иными словами, с ростом массы планеты-гиганта, находящейся в равновесном состоянии, ее радиус будет уменьшаться, а не расти. Таким образом, у не слишком молодых по возрасту коричневых карликов в равновесном состоянии радиус R_p будет даже несколько меньше, чем у менее массивной планеты-гиганта.

У более горячих тел — звезд малой массы, где преобладает тепловое давление (давление идеального газа) — радиус тела R_s будет пропорционален массе тела M_s , исходя из примерного равенства гравитационной $\gamma M_s^2/R_s$ и тепловой $(M_s/\mu)kT_n$ энергий,

$$\gamma M_s^2/R_s \sim (M_s/m_h)kT_n \quad (4)$$

(здесь m_h — масса атома водорода, k — постоянная Больцмана, T_n — температура тела). Отсюда следует, что $R_s \propto M_s$, а средняя плотность ρ_s (из $M_s \propto \rho_s R_s^3$) зависит от M_s как $1/M_s^2$. В случае менее массивных тел в действие вступают кулоновские силы, которые начинают преобладать над давлением вырожденного газа. Эта ситуация характерна для планет-гигантов, имеющих металличность, близкую к солнечной, и старых коричневых карликов (подробнее см. de Pater, Lissauer, 2001.) В среде, где преобладает кулоновское давление, изменения плотности относительно невелики. В случае постоянной плотности — $R_p \propto \mu M_p^{1/3}$. Для планет-гигантов с преимущественно водородно-гелиевым составом $\rho_p \propto$

M_p^b , где b значительно меньше единицы, т.е. $\rho_p \propto \text{const}$. Тогда $R_p \propto M_p^{1/3}$.

Таким образом, можно ожидать, что планеты, имеющие близкую к солнечной металличность (и состоящие, главным образом, из легких элементов — водорода и гелия), будут иметь примерно одинаковые радиусы, близкие к радиусу Юпитера. Из приведенных выше соотношений следует интересный вывод, что похожие радиусы будут иметь и коричневые карлики, и даже наименее массивные звезды.

С приведенными выводами теории можно сравнить экспериментальные данные о планете-гиганте HD 209458b, “классическом” объекте с обнаруженными транзитами (Charbonneau и др., 2000; Henry и др., 2000). Благодаря наблюдениям транзитов (угол $i = 86.1^\circ$, $\sin i = 0.998$) масса объекта, в отличие от других внесолнечных планет, установлена точно. Согласно Cody, Sasselov (2002), радиус планеты составляет $R_p = (1.42^{+0.10}_{-0.13})R_J$ а масса $M_p = (0.69 \pm 0.02)M_J$. Последнее значение близко к $0.67M_J$ из каталога California and Carnegie Planet Search (2003). Отсюда следует, что средняя плотность планеты весьма низкая — 0.29 г/см^3 . Оценка радиуса планеты по данным транзитов составляет $(1.35 \pm 0.06)R_J$ (Charbonneau, 2003a), что соответствует несколько более высокой плотности, 0.33 г/см^3 , остающейся, однако, вдвое ниже средней плотности Сатурна (0.67 г/см^3). В той же работе приводится и уточненный радиус звезды HD 209458 — $(1.15 \pm 0.05)R_\odot$. Отсюда с учетом приведенных выше соотношений уже можно сделать определенные выводы о природе планеты. Для этого удобно воспользоваться работой Stevenson, Salpeter (1976), где на основании уравнения состояния были рассчитаны радиусы холодных тел, каждое из кото-

рых состоит из одного элемента: Fe, Mg, C, He, H, либо смеси 75% H и 25% He. Масса варьировалась от 1 до 10^{-6} солнечных. Дополненная диаграмма из работы (Stevenson, Salpeter, 1976) приведена на рис. 2. Горизонтальная ось имеет логарифмический масштаб. На диаграмме начальными буквами обозначены положения 4-х планет-гигантов Солнечной системы. Несмотря на оценочный характер диаграммы, она четко указывает на соответствие состава Юпитера и Сатурна солнечной металличности и, кстати, на несоответствие ей металличностей Урана и Нептуна, что следует также из экспериментальных исследований последних десятилетий (миссия “Voyager 2”) и теоретических работ (Hubbard и др., 1995).

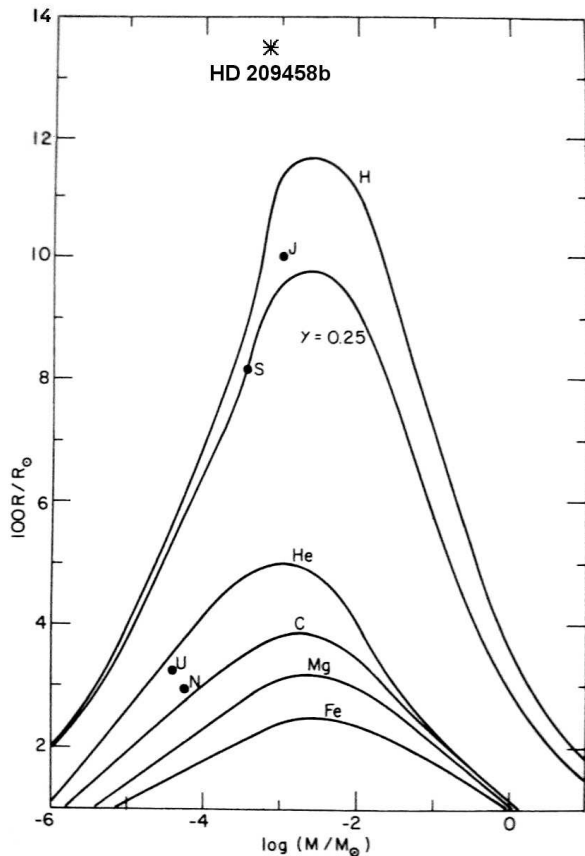


Рис. 2: Зависимости масса-радиус (в солнечных единицах) для холодных сфер указанного состава. На диаграмме показано положение Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна (адаптировано из работы Stevenson, Salpeter, 1976). Звездочкой показано положение добавленного объекта HD 209458b.

Из диаграммы следует, что с дальнейшим ростом массы, после достижения максимума, радиус тела будет уменьшаться. Показанное на диаграмме положение Юпитера соответствует представле-

ниям о его составе (кривой для смеси водород-гелий) и не является предельным для планет-гигантов другого состава. В монографии de Pater, Lissauer (2001) приводится следующая оценка максимального радиуса R_{max} (в км) самогравитирующего холодного тела состава Z:

$$R_{max} = 10^5 Z / [m_h \mu_a (Z^{2/3} + 0.51)^{1/2}]. \quad (5)$$

Здесь $m_h \mu_a$ — атомная масса, Z — атомный номер основного элемента. Выражение (5) получено на основе экспериментальных данных о поведении вещества при низких давлениях и теоретических моделей для высоких давлений. У чисто водородного тела R_{max} составляет 82600 км, что значительно превышает радиус Юпитера ($7.19 \cdot 10^4$ км).

Положение HD 209458b в верхней части диаграммы рис. 2 однозначно свидетельствует, что водород является основной составляющей этого небесного тела (возможно, с небольшой долей гелия в соответствии с космической пропорцией элементов). Ожидаемая высокая эффективная температура “горячих юпитеров” несколько смещает HD 209458b вверх на диаграмме, но и при любой коррекции она расположена значительно выше Юпитера. Следует отметить, что Hubbard et al. (2002) допускают полное отсутствие ядра у HD 209458b. Но даже в этом случае радиус HD 209458b примерно на 20% превышает теоретические оценки, что пока остается необъясненным (Burrows, 2003; 2005).

Эффективная температура T_e “горячих юпитеров” определяется постоянной излучения звезды E_o , а также большой полуось орбиты a и боллометрическим альбедо A_B планеты. E_o (для HD 209458b при a = 1) превышает солнечную и составляет $2.11 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Эффективная температура T_e учитывает приток радиации на площадь πR_p^2 и отток с площади $4 \pi R_p^2$ и определяется уравнением:

$$(1 - A_B) E_o / a^2 = 4 \sigma T_e^4, \quad (6)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана. Зависимость температуры T_e от альбедо A_B экзопланеты представлена в табл. 1.

Таблица 1:

A_B	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
T_e, K	1426	1385	1340	1290	1231	1165	1084	980	823

Наиболее вероятны средние и низкие значения альбедо для ожидаемого состава облаков экзопланеты с эффективной температурой более 1000 К. Температуры в любом случае достаточно высоки и соответствуют примерно уровню 1 кбар в атмосфере Юпитера. В неадиабатической модели Guillot и др. (1995) (рис. 3) это уровень базы самой внеш-

ней конвективной зоны. В работах Burrows (1998, 2005), Goukenleuque и др. (2000) и других были рассмотрены результаты теоретического анализа состояния атмосферы “горячих юпитеров”. В целом, внешние области атмосферы “горячего юпитера”, наблюдаемые извне, должны быть обеднены тугоплавкими элементами, конденсирующимися при температурах 1700–2500 К и оседающими в ее более плотные слои. Таковы железо, алюминий, кремний. На уровне давления 10 бар, вероятно, расположены оптически плотные облака, состоящие из силикатов — Mg_2SiO_4 и/или $MgSiO_3$. Не исключено присутствие других соединений и частиц восстановленного железа. В ближней ИК-области спектра планеты должны наблюдаться полосы CO и CH_4 . В модели Seager & Sasselov (2000) принималось, что внешний облачный слой состоит из зерен $MgSiO_3$, Fe и Al_2O_3 размером 10 мкм, причем в надоблачной атмосфере должны присутствовать пары H_2O , TiO и CH_4 . Эффективная температура планеты принималась равной 1350 К (из чего следует $A_B = 0.278$). Транзиты HD 209458b позволили получить экспериментальные данные о составляющих ее атмосферы, существенно дополняющие теоретические исследования.

4. Аналогия с внутренним строением Юпитера

Использование в случае экзопланет уравнений состояния, полученных для Юпитера, вполне правомерно. Обычно в расчеты вводятся некоторые упрощения, позволяющие получить достаточно наглядные результаты. Зависимость давления p от плотности ρ представляется экспоненциальной функцией постоянной политропы n как

$$p \propto \rho^{(1+1/n)}. \quad (7)$$

Крайние случаи соответствуют $n = \infty$ при $p=0$ (на внешней границе тела) и $n = 3/2$ при предельно высоких p , когда $p \propto \rho^{5/3}$. При очень высоких давлениях в реальном теле планеты происходят фазовые переходы.

Для планеты-гиганта солнечного состава фазовый переход водорода в металлическое состояние происходит при давлении около 1.4 Мбар (Guilott и др., 1995), что у Юпитера соответствует примерно $0.8R_J$ (рис. 3). Освобождающиеся на этом уровне электроны проводимости поддерживают электрические токи. Поэтому внесолнечные планеты подобного состава неизбежно должны иметь сильные магнитные поля с моментами высших порядков (квадрупольные, октупольные), подобные полям Юпитера и Сатурна. В принципе, можно предложить несколько вариантов эксперимента, где это их свойство можно использо-

вать для детектирования экзопланет (например, искать зеемановское расщепление спектральных линий, изменение типа поляризации с линейной на круговую). Другим крайне интересным методом регистрации магнитного поля “горячих юпитеров” может быть поиск радиоизлучения, возникающего при взаимодействии магнитных полей экзопланеты и звезды с плазмой. Для наземного наблюдателя радиоисточник должен быть точечным, а его интенсивность должна коррелировать не только с орбитальным периодом экзопланеты, но и с периодичностью звездного цикла, аналогичного солнечному (11/22 года).

Строение “горячих юпитеров”, находящихся на весьма низких орбитах, может несколько отличаться от схемы рис. 3. Высокая плотность излучения, приходящего от близкой звезды, способствует значительному снижению интенсивности конвекции, но только в самых внешних слоях планетного тела, как уже было показано при оценке эффективной температуры T_e “горячего юпитера”. Радиус такого тела примерно на 10% превышает юпитерианский (de Pater, Lissauer, 2001), что, вообще говоря, не совсем согласуется с положением объекта HD 209458b на рис. 2. Отличия в строении от схемы рис. 3 могут касаться и самых внутренних областей “горячего юпитера” (Hubbard и др., 2002).

Предполагается, что все “горячие юпитеры” образовались на высоких орбитах и затем мигрировали на низкие. Эта гипотеза была предложена сразу после открытия первой экзопланеты 51 Peg b (Lin и др., 1996; Trilling et al., 1998). Как было установлено, мигрируют, скорее всего, тела с массами, не превышающими юпитерианскую, имеющими в среднем $0.5\text{--}0.6 M_J$ (Santos et al., 2003, 2005; Udry et al., 2003). Процесс разогрева мигрировавшей планеты за счет радиации звезды может быть рассчитан. Разогрев излучением звезды при переходе к установившемуся равновесию на конечной орбите достаточно медленный и определяется свойствами атмосферы планеты, прежде всего, ее альбедо. В качестве иллюстрации роли альбедо можно напомнить, например, что, несмотря на близость к Солнцу, Венера поглощает меньше солнечной радиации, чем Земля. Существующие модели гигантов типа Юпитера учитывают такие факторы, как скорость вращения, влияние магнитного поля и другие. Масса небольшого очень плотного ядра Юпитера принимается в большинстве моделей от 5 до 10 масс Земли. Обогащенность углеродом, азотом и серой по сравнению с солнечной металличностью принимается 2-3-кратной. Таковы же ожидаемые свойства “горячих юпитеров”. Мантия планеты должна включать “льды” NH_3 , H_2O и CH_4 .

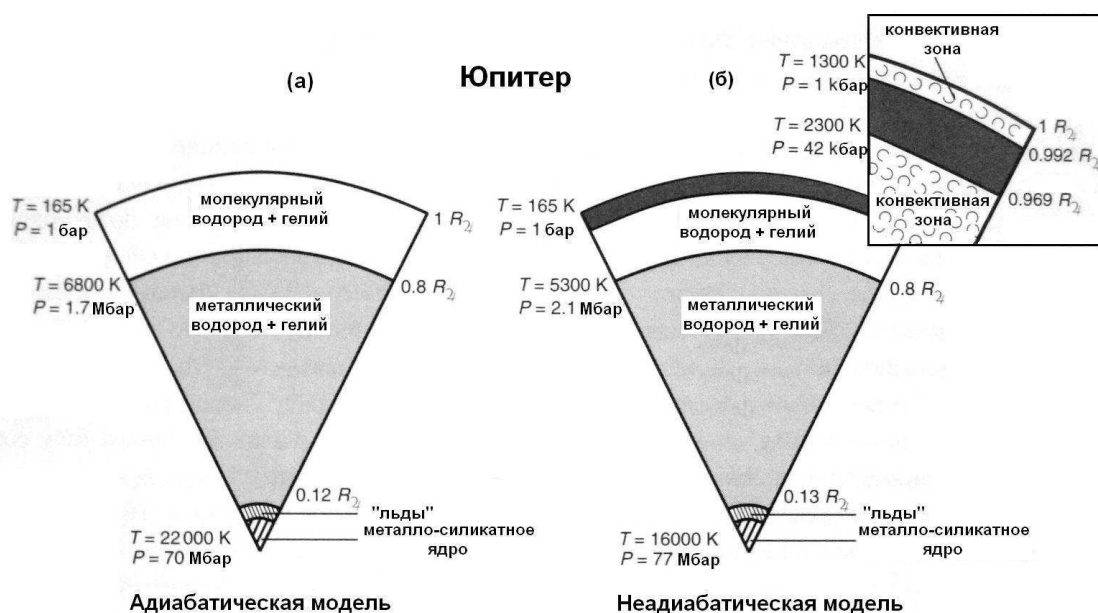


Рис. 3: Две модели строения планеты-гиганта состава солнечной металличности. Адиабатическая модель (а) соответствует глубокой конвективной внешней оболочке; неадиабатическая (б) – модель, в которой учитываются спектральные “окна прозрачности” среды. Из работы Guillot и др. (1995).

5. Натрий, водород и другие элементы в атмосфере и экзосфере 209458b

Вернемся к фактическим данным об объекте HD 209458b. Были обнаружены D-линии нейтрального натрия (0.589 мкм), относящиеся к достаточно плотным областям его атмосферы (Seager and Sasselov, 2000; Hubbard, 2001; Charbonneau et al., 2002; Charbonneau et al., 2003a). Отмечены различия в интенсивностях этих линий в начале и конце транзита (при левом и правом контактах). Что же касается водородной природы HD 209458b, то она подтверждена экспериментально, хотя и косвенно (Vidal-Madjar и др., 2003; Charbonneau, 2003a). Во время трех транзитов наблюдалось поглощение излучения родительской звезды в полосе Лайман-альфа, создаваемое водородом короны HD 209458b. Вид полосы и положение максимумов несколько отличаются для левого и правого контактов (рис. 4), но ее отождествление сомнений не вызывает. Так как звезда HD 209458 относится к солнечному типу, именно на такой результат и можно было рассчитывать. В отличие от D-линий натрия, поглощение вызывают атомы водорода во внешней части короны планеты-гиганта. Поглощение возникает за пределом Роша, следовательно, оно обусловлено убегающими (теряемыми) атомами нейтрального водорода (Vidal-Madjar et al., 2003).

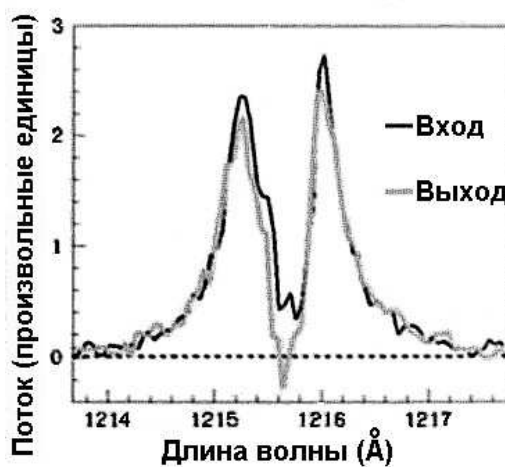


Рис. 4: Лайман-альфа полоса водорода, поглощение в которой происходит в водородной короне HD 209458b (Vidal-Madjar и др., 2003).

Таким образом, можно утверждать, что объект HD 209458b подобен Юпитеру, но, возможно, несколько богаче водородом (рис. 2). Главные отличия относятся к составу, структуре и, возможно, к динамике внешней конвективной зоны планеты-гиганта. Ее атмосфера и облачный слой, с учетом сложного состава облаков с различными температурами фазовых переходов отдельных компонентов, должны иметь сложную структуру. Разуме-

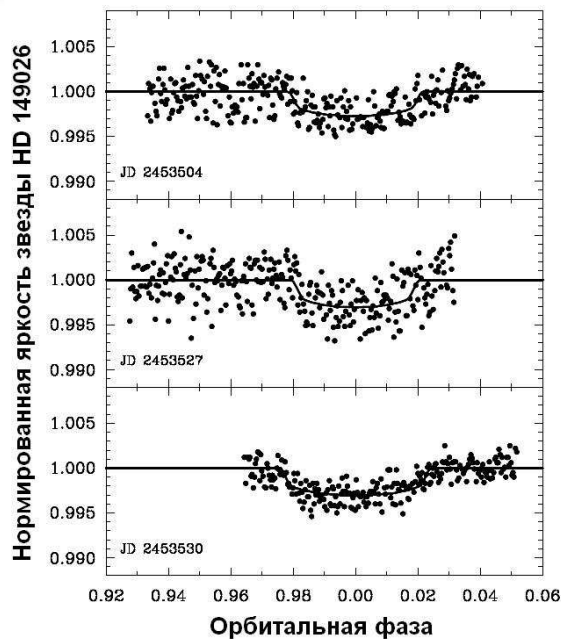


Рис. 5: Транзиты экзопланеты HD 149026b подтверждены независимыми наблюдениями (Sato et al., 2006).

ется, из-за близости к “родительской” звезде конденсация аммиака, характерная для облаков Юпитера, на дневной стороне планеты исключена. С другой стороны, при неизбежном синхронном вращении планеты NH_3 может конденсироваться на ночной стороне, если только эффективная температура обеих сторон планеты не выравнивается, как в атмосфере Венеры. Действительно, сильные ветры могут выравнивать температуры дневной и ночной сторон планеты (Seager & Sasselov, 2000). Модель радиационного равновесия (Iro и др., 2003) предсказывает, тем не менее, перепад температуры день–ночь в 600 К на уровне 0.1 бар.

В начале 2004 г. появилось предварительное сообщение об обнаружении с помощью картирующего спектрографа космического телескопа им. Хаббла кислорода и углерода в экзосфере HD 209458b (Hubblesite, 2004), при этом подчеркивалось неорганическое происхождение кислорода. Фактически, кислород и углерод найдены даже не в экзосфере, а в кометоподобном хвосте из убегающего газа. Временами он покрывает значительно большую часть диска звезды, чем сама планета, и эффективность измерений методом просвечивания возрастает. Кометоподобный хвост планеты определяет, по-видимому, и упоминавшееся выше поглощение водородом в полосе Лайман-альфа.

Сравним характеристики планетного хвоста и настоящих кометных хвостов. Интересно оценить

масштабы потерь массы планеты в хвосте подобной плотности. Кометы с достаточно большой массой и низким перигелием за одно его прохождение могут терять до 10^{16} г. В отличие от комет, потери атмосфер “горячих юпитеров” связанные как с тепловым, так и с нетепловым механизмами, происходят постоянно. Площадь экзобазы атмосферы, с которой происходит истечение, несравненно больше сечения кометы, но несравнима и гравитация, удерживающая убегающие компоненты. Если достаточно произвольно принять, что за один орбитальный период (3.5 сут) экзопланета HD 209458b может терять 10^{17} г, потери за космогоническое время (скажем, 5 млрд лет) составят $2.5 \cdot 10^{28}$ г, или всего 4% от массы планеты.

Из наблюдений транзитов HD 209458b были определены потемнения к лимбу в разных длинах волн (Charbonneau и др., 2003a). Такого рода данные позволяют отличить подлинные транзиты от эффектов, создаваемых, например, устойчивыми звездными пятнами. Именно они поставили под сомнение реальность транзитов у HD 192263 (Henry и др., 2002).

Пример HD 209458b показывает, что даже единственный объект, обладающий транзитами, представляет собой прекрасный инструмент для исследований как планеты, так и родительской звезды. Их фундаментальные характеристики — радиусы, массы, наклон кеплеровской орбиты, широта прохождения, состав, свойства атмосферы планеты и фотосферы звезды — все это удается определить, если звезда достаточно яркая. Предельная глубина модуляции, вызываемая транзитами HD 209458b, составила 1.6%. По-видимому, даже при глубине 0.15 % все еще можно получить необходимые данные. В 2003–05 гг. в проекте OGLE (Konacki et al., 2003; Torres et al., 2003; Sasselov et al., 2003; Udalski et al., 2003, 2004) методом “большого черпка” было обнаружено не менее 4-х транзитов у очень далеких звезд (см. ниже). Но логическим продолжением работы с HD 209458b стали исследования открытых в 2004–05 гг. транзитов HD 149026b и TrES-1.

6. Транзиты объектов HD 149026b и TrES-1

Транзит у HD 149026 был обнаружен в ходе выполнения программы исследований 2000 ближайших звезд главной последовательности (Sato et al., 2006). Экзопланета найдена с помощью МЛС; ее масса несколько превышает массу Сатурна. Уверенной регистрации кеплеровской орбитальной составляющей способствовала спокойная фотосфера HD 149026 (Sato et al., 2006). Звезда имеет

спектральный класс G0IV и визуальную величину 8^m15 , расстояние до нее — 79 пк, металличность несколько повышена — $[Fe/H] = +0.36$, масса — $(1.3 \pm 0.1) M_{\odot}$. При светимости $2.72 L_{\odot}$ радиус звезды составляет $1.45 R_{\odot}$. Звезда моложе Солнца, ее возраст — около 2 Глет, а эффективная температура — 6147 К. Масса планеты, согласно совместным наблюдениям на обсерваториях Субару и Кек, составляет $0.36 M_{Jup}$, период 2.8766 сут, орбитальное расстояние 0.042 а.е., эксцентриситет 0. Радиус орбиты всего в 6 раз больше радиуса звезды.

В обнаруженных транзитах (рис. 5) ослабление потока звезды составило всего 0^m003 , что в 5 раз меньше, чем у HD 209458. Отношение радиусов звезды и планеты 20, на что сразу же указывало малое ослабление и что противоречило ее достаточной большой массе. Радиус HD 149026b около 0.85 радиуса Сатурна или $(0.725 \pm 0.05) R_{Jup}$. Таким образом, экзопланета HD 149026b представляет собой новый класс внесолнечных планет. По своему положению она соответствует “горячим юпитерам”, но обладает массивным ядром из тяжелых элементов, составляющим до 0.7 массы всей планеты. Поскольку угол между осью орбиты и направлением на Землю, оцененный по длительности транзитов, близок к 85° , в эксперименте найдена практически полная масса планеты.

Модели, использующие данные о массе и радиусе планеты, указывают на существование у нее гигантского ядра из плотных составляющих с массой около 67 масс Земли и средней плотностью около $5.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Столь парадоксальный вывод трудно объяснить в рамках обеих конкурирующих теорий образования планет, кратко изложенных в обзорах Ксанфомалити (2000; 2004a), — аккреционной (nucleation around an ice/rock core) и теории гравитационной неустойчивости (direct collapse). Возможно, аналогии с космогонией Нептуна позволят разрешить возникшие сложности.

История Нептуна должна была начаться с образования неустойчивого джинсова фрагмента с массой около 3 масс Земли. В процессе Кельвин-Гельмгольца сжатия холодного массивного прото-Нептуна твердые частицы оседали и образовывали массивное ядро. Дальнейшая эволюция проходила под действием излучения близкой массивной звезды, вызвавшего испарение внешних газовых оболочек (Boss, 2003, direct collapse). В конце концов, при солнечном составе протопланетного диска так и могла возникнуть эта странная планета с ядром в $17 M_{Земли}$. В случае HD 149026b сценарий гравитационной неустойчивости требует удвоения металличности и увеличения массы неустойчивого джинсова фрагмента $6 M_{Jup}$, чтобы образовалось ядро в $67 M_{Земли}$. До-

полнительные сложности связаны с тем, что время оседания твердых зерен значительно превышает время Кельвин-Гельмгольца сжатия газовых оболочек, а фото-испарение для планеты с массой $6 M_{Jup}$ трудно завершить за время существования системы HD 149026.

Возникновение большого ядра HD 149026b встречается с не меньшими трудностями и в рамках классической теории и требует присутствия больших масс газа в планетной сфере Хилла. Но структура HD 149026b предполагает, что тело формировалось как раз в обедненной газом среде. С другой стороны, газ необходим, чтобы объяснить миграцию планеты на низкую орбиту с периодом 2.87 сут.

Образование большого ядра HD 149026b происходило в условиях высокой металличности (2.3, что соответствует $[Fe/H] = +0.36$). Изолированная масса ядра $M_{iso} \sim (a^2 \sigma)^{3/2} M_*^{-1/2}$, где σ — поверхностная плотность пыли в диске, а — расстояние до звезды с массой M_* . Предполагается, что $\sigma \sim M_* [Fe/H]$. В ходе дальнейшей аккреции масса ядра приближается к $\sqrt{2} \cdot M_{iso}$. При удвоенной металличности звезды с массой $1.3 M_{\odot}$ изолированная масса ядра возрастает в 3.7 раз (Pollack et al., 1996). Чтобы планеты-гиганты Солнечной системы могли сформироваться за время жизни протопланетного диска, необходимо увеличение σ по крайней мере втрое. Формирование Юпитера на расстоянии 5.2 а.е. от Солнца требует $\sigma = 10 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. В таких условиях M_{cor} для HD 149026b составила бы $42 M_{Земли}$. Для объяснения (понимания) происхождения планеты HD 149026b с ее реальной массой $\sim 67 M_3$ необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, предполагаемое внутреннее строение HD 149026b кардинально отличается от строения и состава Юпитера. Только так можно объяснить высокую плотность планеты. Предложены несколько гипотез о составе как каменного, так и ледяного ядра HD 149026b.

Как известно, подавляющее большинство экзопланет найдено у звезд солнечного класса и ближайших к нему подклассов. Планета TrES-1 (Alonso et al., 2004), также принадлежит звезде класса K0V, но более слабой, чем HD 149026 ($V = 11.79^m$). Уменьшение ее яркости при транзите не превышает 1% (рис. 6). Орбитальное расстояние экзопланеты TrES-1 составляет 0.0393 а.е., период — 3.030065 сут, эксцентриситет необычно велик для короткопериодической планеты — 0.135.

Ее масса, $(0.75 \pm 0.07) M_J$, почти вдвое больше массы HD 149026b и практически совпадает с таковой у HD 209458b. Радиус TrES-1 превышает радиус Юпитера, $1.08_{-0.04}^{+0.18} R_J$. С борта космиче-

ской обсерватории Spitzer Space Telescope впервые удалось зарегистрировать в ИК-диапазоне изменения теплового излучения этой системы при прохождении планеты *за звездой*. Ослабление составило на длине волны 4,5 мкм 0.00066 ± 0.00013 и на длине волны 8 мкм 0.00225 ± 0.00036 (Charbonneau et al., 2005). Методом, изложенным выше, было найдено довольно низкое сферическое альbedo планеты, 0.31 ± 0.14 . Поглощение почти 70% падающего излучения определяет высокий уровень ее равновесной температуры, 1060 ± 50 К. Можно напомнить, что доля оптического излучения подобной планеты составляет лишь 10^{-10} , а в ИК-диапазоне — 10^{-7} (Burrows, 2005).

Как уже отмечалось, радиус HD 209458b примерно на 20% больше теоретических оценок (Burrows, 2005), радиус HD 149026b, наоборот, меньше теоретического, а радиус TrES-1 хорошо согласуется с результатами моделирования.

В 2006 г. появилось сообщение об открытии неожиданно близкого (всего 19.3 пк) объекта HD 189733b. Его период — всего 2.219 сут. Большая полуось орбиты составляет 0.0313 а.е. Глубина ослабления потока от звезды при транзитах HD 189733b рекордная — 3%. Bouchy et al. (2006) приводят следующие данные о планете: эксцентриситет орбиты 0, масса составляет $1.15 \pm 0.04 M_{Jup}$. Радиус HD 189733b, как и у TrES-1, превышает радиус Юпитера — $1.26 \pm 0.003 R_{Jup}$. Средняя плотность составляет 0.75 г·см^{-3} , т.е. выше плотности Сатурна. Таким образом, масса и радиус HD 189733b наибольшие из всех перечисленных.

7. Поиск транзитов у звезд шарового скопления 47 Tuc

Для планет на низких орбитах вероятность благоприятных для регистрации регулярных транзитов ориентаций плоскостей их орбит составляет более 6%. В 2000 г. был предпринят поиск таких транзитов в шаровом скоплении 47 Tuc с помощью орбитального телескопа им. Хаббла. Это скопление близко (расстояние 4 кпк), компактно и удобно расположено. Исследованиями были охвачены 34 000 звезд главной последовательности с блеском до 24 зв. величины. По предварительной оценке, должны были быть найдены 17 объектов с транзитами. Как ни странно, не было обнаружено ни одного (Gilliland и др., 2000).

В 2002 г. такая же программа была повторена (Charbonneau, 2003b) на телескопе Англо-Австралийской обсерватории. Выбирались, в основном, солнцеподобные звезды, в пределах от 17^m до $18^m.5$ в V. Предполагаемая средняя длительность транзитов составляла около 2.5 ч,

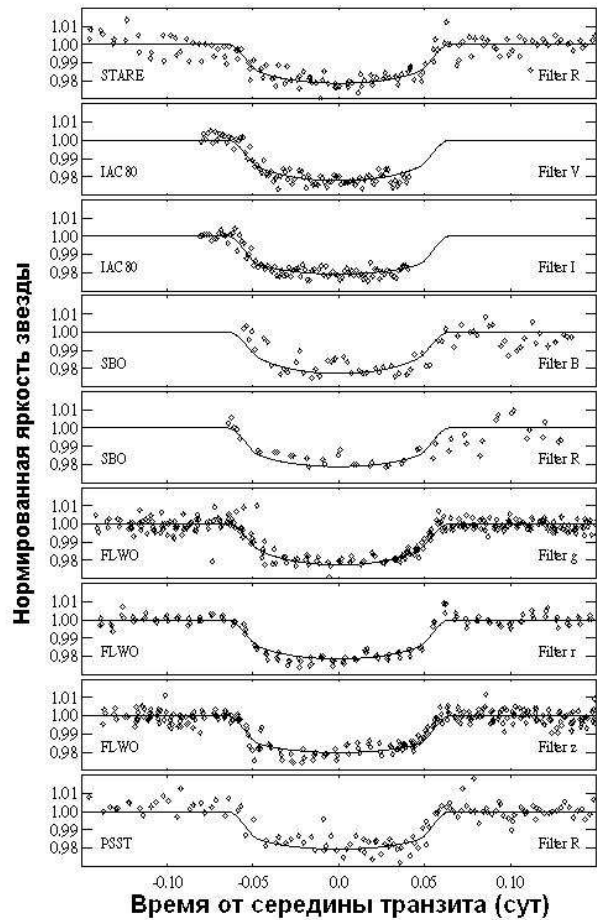


Рис. 6: Большая полуось орбиты объекта TrES-1 составляет 0.0393 а.е., орбитальный период 3.030065 сут. Эксцентриситет 0.135 необычно велик для короткопериодических экзопланет. Благодаря подтвержденным транзитам, установлена действительная масса планеты, $0.61 \pm 0.06 M_{Jup}$ (Alonso et al., 2004).

вероятность их обнаружения — 7%. Суммарное время наблюдений около 36 000 звезд было в 4 раза выше, чем в 2000 году. Ожидалось, что будет найдено 20 объектов с транзитами. Результат, в пределах 3σ , снова оказался “нулевым”.

Парадоксальное, но вполне возможное объяснение — звезды в шаровых скоплениях не имеют планет. Причины могут быть разными, например, взаимные гравитационные эффекты близко расположенных звезд, затрудняющие формирование планетной системы. К факторам, препятствующим возникновению планетных систем, может относиться и низкая металличность звезд скопления (Gonzales, 2003).

Связь металличности звезды с вероятностью

возникновения у нее планетной системы рассматривалась в обзоре Ксанфомалити (2004a). Корреляция между ними подтверждена многочисленными исследованиями (Fischer et al., 2003; Gonzalez, 2003). Вероятность обнаружить планетную систему у звезды солнечного типа составляет 4–5 %, но возрастает до 20 % у звезд с металличностью, вдвое большей. Во всяком случае, это справедливо для исследованных достаточно близких звезд, скажем, в пределах 100 пк.

8. Транзиты у далеких галактических объектов

В 2001 г. группа польских исследователей (Udalski и др., 2001) сообщила о новых результатах, полученных в ходе эксперимента по оптическому гравитационному линзированию (OGLE III). Позднее (в 2002 г.) эти результаты были дополнены новыми наблюдениями. Использовался телескоп 1.3 м, оснащенный мозаикой из высокочувствительных ПЗС-матриц нового поколения, установленный в обсерватории Ла Кампанос (Чили). Наблюдения проводились в трех областях в направлении галактического центра. В первых сообщениях авторы приводили данные наблюдений за 36 наблюдательных ночей. С помощью автоматизированной системы проводился одновременный мониторинг 52 000 звезд с фотометрической точностью до 1.5%. В 42 случаях были обнаружены явления, которые авторы интерпретировали как “многократные наблюдения транзитов”. В большинстве случаев размеры затмевающих объектов оказались слишком велики для планет (Charbonneau, 2003b). У OGLE-TR-40 и OGLE-TR-10 радиус затмевающего тела оказался равным 1–1.5 радиуса Юпитера. Авторы указывали на сходство этих явлений с транзитами HD 209458b. На рис. 7 приведены результаты для объекта OGLE-TR-40. Несмотря на убедительный вид диаграммы, экзопланетная природа объекта OGLE-TR-40 не подтвердилась. Как указывалось выше, на основании только этих имеющихся данных невозможно определить природу затмевающего тела. Это может быть как “горячий юпитер”, так и коричневый карлик или звезда малой массы, их радиусы близки.

В ходе эксперимента OGLE III был найден еще один объект, OGLE TR-56 (Konacki и др., 2003), представляющий собой самый короткопериодический “горячий юпитер” (период 1.2 сут.). Немногочисленные измерения дают для него следующие результаты: $M_p \sin i = 1.45 M_J$, $i = 81^\circ$, $a = 0.0225$ а.е., то есть всего 3.3 млн км. “Родительская” звезда (солнечного типа) на таком расстоянии имеет угловой размер 24° .

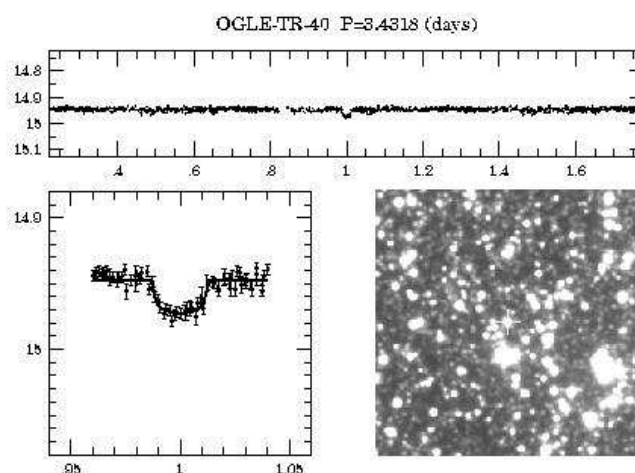


Рис. 7: Предполагаемые транзиты объекта OGLE TR-40 с периодом 3.43 сут. (Udalski et al., 2002) в дальнейшем не были подтверждены. Справа — снимок области расположения OGLE TR-40 в направлении центра Галактики.

Все объекты OGLE III представляют собой достаточно слабые звезды — от 13^m до 16^{m5} , расстояния до них превышают 1500 пк. Даже на больших телескопах их необходимо наблюдать в течение нескольких часов.

Еще один проект, EXPLORE, — поиск транзитов у далеких звезд (Mallen-Ornelas и др., 2002) с использованием больших телескопов и обзором объектов, находящихся в галактической плоскости, — отличается тем, что в нем будут исследованы звезды поздних классов, K и M.

9. Заключение

Благодаря удачной ориентации орбит внесолнечных планет-гигантов HD 209458b, HD 149026b и TrES-1 относительно наземного наблюдателя, их зарегистрированные транзиты позволяют получить фундаментальные сведения как о самих планетах, так и о родительских звездах. По меньшей мере, 4 внесолнечных планеты с транзитами обнаружены в ходе программы OGLE. В сочетании с теоретическими данными экспериментальные результаты позволяют сделать выводы о водородной как основной составляющей планеты-гиганта HD 209458b, ее средняя плотность лежит в пределах $0.29 - 0.33$ г/см³, что также указывает на водородный (в основном) состав этого небесного тела. Теоретические модели HD 209458b допускают наличие ядра из “металлов” с массой 5–10 масс Земли и присутствие небольшой фракции гелия, возможно, меньшей, чем на Юпитере. Вместе с тем,

другой “горячий юпитер”, HD 149026b, имеет ядро со средней плотностью около 5.5 г/см^3 , что указывает на тяжелые породы как его основные составляющие.

Планета-гигант HD 209458b (как и другие тела этого типа) должна иметь сильное магнитное поле сложной структуры с напряженностью, близкой юпитерианской. В определенных обстоятельствах, признаки присутствия объекта с сильной дипольной составляющей магнитного поля можно использовать для поиска экзопланет.

Предполагается, что готовящиеся новые космические миссии KEPLER и COROT смогут исследовать десятки тысяч звезд с фотометрической точностью 10^{-5} и обнаружить у них множество планетных объектов с транзитами. Согласно плану миссии, только аппарат KEPLER за 4 года работы сможет исследовать 10^5 звезд. Точность 10^{-5} достаточна для обнаружения транзитов землеподобных планет, для обнаружения которых МЛС и другие существующие наземные технические средства пока бессильны.

Список литературы

- Ксанфомалити Л.В., 2000, *Астрон. вестн.*, **34**, 6, 529
 Ксанфомалити Л.В., 2004, *Астрон. вестн.*, **38**, 4, 344
 Ксанфомалити Л.В., 2004а, *Астрон. вестн.*, **38**, 5, 428
- Alonso R., Brown T. M., Torres G. et al., 2004, *Astrophys. J.*, **613**, L153
 Borucki W. J., Scargle J. D., Hudson H. S., 1985, *Astrophys. J.*, **291**, 852
 Boss A. P., 2001, *Astrophys. J.*, **563**, 367
 Bouchy F.F., Udry S., Mayor M., 2006, *Astron. Astrophys.* (in press)
 Burrows A., Sudarsky D. & Hubbard W. B., 2003, *Astrophys. J.*, **594**, 545
 Burrows A., 2005, *Nature.*, **233**, 261
 Burrows A., 1998, *Frontieres*, 373
 Butler R.P., Vogt S. S., Marcy G.W. et al., *Astrophys. J.*, **545**, 504
 Butler R. P., Marcy G.W., Vogt S. S. et al., 2001, San Francisco: ASP
 California and Carnegie Planet Search (2003), Masses and orbital characteristics of extrasolar planets, <http://exoplanets.org/almanacframe.html>
 Charbonneau D., Brown T.M., Latham D.W., Mayor M., 2000, *Astrophys. J.*, 2000, **529**, No1, L45
 Charbonneau D., 2003, IAU Symposium 219, XXV General Assembly IAU, Sydney
 Charbonneau D., 2003a, *Extrasolar Planets Encyclopaedia*, ed. Schneider J. arXiv:astro-ph/0302216, <http://exoplanets.org/almanacframe.html>
 Charbonneau D., 2003b, HD 209458 and the power of the dark side, *Scientific frontiers in research on extrasolar planets*, eds. Deming D., Seager S. San Francisco: ASP, ISBN: 1-58381-141-9, **294**, P. 449-456
 Charbonneau D., Brown T. M., Gilliland R.L., Noyes R.W., 2003, IAU Symposium 219, XXV General Assembly IAU, Sydney
 Charbonneau, D., Brown, T. M., Noyes, R. W. & Gilliland, R. L., 2002, *Astrophys. J.*, **586**, 377
 Charbonneau D., Allen L. E., Megeath S. T. et al., 2005, *Astrophys. J.* (in press)
 Cody A.M., Sasselov D.D., 2002, *Astrophys. J.*, **569**, 451
 De Pater I., Lissauer J.J., 2001, *Planetary Sciences. N.-York, London: Cambridge University Press*, 508 p.
 Fischer D., Valenti J.A., Marcy G., 2003, IAU Symposium 219, XXV General Assembly IAU, Sydney
 Giampapa M. S., Craine E. R., Hott D. A., 1995, *Icarus*, **118**, 199
 Gonzalez G., 2003, *Reviews of Modern Physics*, **75**, 101
 Goukenleuque C., Bezard B., Joguet B., et al., 2000, *Icarus*, **143**, 308
 Guillot T., Chabrier G., Gautier D., Morel P., 1995, *Astrophys. J.*, **450**, 463
 Henry G. W., Donahue R. A., Baliunas S. L., 2002, *Astrophys. J.*, **577**, L111
 Henry G.W., Marcy G.W., Butler R.P., Vogt S.S., 2000, *Astrophys. J.*, **529**, ?? 1, L41
 Horne K., 2003, Status and prospects of transit searches: Hot Jupiters galore, *Scientific frontiers in research on extrasolar planets*, eds. Deming D., Seager S. San Francisco: ASP
 Hubbard W.B., Podolak M., Stevenson D.J., 1995, *The interior of Neptune, Neptune and Triton*, ed. Cruikshank D.P., Tucson, Arizona University Press, p.109
 Hubbard, W. B. et al., 2001, *Astrophys. J.*, **560**, 413
 Hubbard W. B., Burrows A., Lunine J. I., 2002, *Astron. and Astrophys. Ann. Rev.*, **40**, 103
 HubbleSite, 2004, Oxygen and carbon found in atmosphere of an extrasolar planet // <http://hubble.stsci.edu/newscenter/newsdesk/archive/nuggets/1075730400>
 Ipatov S.I., 1998, Migration of celestial bodies in the forming Solar System, *Planetary Systems: the Long View*, eds. Celnikier L.M. Tran Thanh Van J. France: Frontieres, p.93
 Ipatov S.I., 1999, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **73**, 107
 Iro N., Bézard B., Guillot T., 2003, 35th Meeting DPS. Session 7. Extra solar planets I, Paper 7.12
 Konacki M., Torres G., Jha S., Sasselov D., 2003, *Nature*, **421**, 507
 Konacki M., Torres G., Jha S. & Sasselov D., 2003, *Nature*, **421**, 507
 Lin D.N.C., Bodenheimer P., Richardson D.C., 1996, *Nature*, **380**, 606
 Marley M.S., 1999, Interiors of the giant planets, *Encyclopedia of the Solar System*, eds. Weissman P.R., McFadden L., Jonson T.V., N.-York. Academic Press, p.339
 Mallen-Ornelas G., Seager S., Yee H. K. C. et al., 2002, *Astrophys. J.*, astro-ph/0203218
 Santos N., Israelian G., Mayor M. et al., 2003, *Astron. and Astrophys*, **398**, 363
 Santos N.C., Benz W., Mayor M., 2005, *Science*, **310**, 251
 Sato B., Fischer D.A., Henry G.W. et al., 2006, *Astrophys. J.*, ???
 Sasselov D., 2003, *Astrophys. J.*, **596**, 1327

- Schneider J., 2003, Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanets.org/almanacframe.html>
- Seager S., Sasselov D.D., 2000, *Astrophys. J.*, **537**, 916
- Stevenson D.J., Salpeter E.E., 1976, Interior models of Jupiter, eds. Gehrels T., Matthews M.S. Tucson, Arizona University Press, p.85
- Torres G., Konacki M., Sasselov D. & Jha S., 2003, *Astrophys. J.*, **609**, 1071
- Trilling et al., 1998, *Astrophys. J.*, **500**, 428
- Udry S., Mayor M., Santos N. C., 2003, *Astron. and Astrophys.*, **407**, 369
- Udalski A., Paczynski B., Zebrun K. et al., 2002, The optical gravitational lensing experiment. Search for planetary and low-luminosity object transits in the Galactic disk. Results of 2001 campaign, *Astrophysics*, abstract 18 Feb, astro-ph/0202320
- Udalski A., Pietrzynski G., Szymanski M. et al., 2003, *Acta Astronomica*, **53**, 133
- Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Desert J.-M. et al., 2003, *Nature*, **422**, 143