

УДК 523.4

Л. В. Ксанфомалити

Институт космических исследований РАН
117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная 84/32
ksanf@iki.rssi.ru

Солнечная система, планетные системы звезд и теория последовательной аккреции

Обнаружение планет у других звезд по модуляции лучевых скоростей находится за пределами возможного. (Р. Г. Айткен, 1938 г.)

Сопоставление свойств Солнечной системы с экспериментальными данными, полученными при наблюдениях экзопланет, приводит к значительным изменениям в представлениях аккреционной теории. Рассматриваются некоторые новые идеи современной теории происхождения планет и планетных систем.

СОНЯЧНА СИСТЕМА, ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ ЗІРОК І ТЕОРІЯ ПОСЛІДОВНОЇ АКРЕЦІЇ, Ксанфомаліті Л. В. — Зіставлення властивостей Сонячної системи з експериментальними даними, отриманими при спостереженнях екзопланет, приводить до значних змін в уявленнях акреційної теорії. Розглядаються деякі нові ідеї сучасної теорії походження планет і планетних систем.

THE SOLAR SYSTEM, PLANETARY SYSTEMS OF STARS AND SUCCESSIVE ACCRETION THEORY, by Ksanfomaliti L. V. — A comparison between properties of the solar system and experimental data derived from observations of exoplanets results in a significant revision of the accretion theory. We offer some new ideas for the modern theory of the origin of planets and planetary systems.

Введение. В 1970-х гг. аккреционная теория происхождения планетных систем казалась «почти» завершённой. Однако открытие экзопланет и последующий приток в планетную физику многих талантливых исследователей, существенный прогресс в теоретических и экспериментальных работах привели к тому, что за последние годы аккреционная теория создана практически заново. Образование планет оказалось явлением в высшей степени хаотическим, приводящем в каждом отдельном случае к различным результатам.

Радикально новыми, по сравнению с прежними представлениями теории, оказываются почти все этапы образования планетных систем вообще, и Солнечной системы в частности. Предполагавшаяся типичность Солнечной системы оказалась иллюзорной, а протосолнечная туманность возникла вовсе не в изолированной от других звезд области. Близкие звезды, среди которых были и Сверхновые, сыграли, по-видимому, важную роль в формировании Солнечной системы, а временная шкала ее формирования оказалась значительно короче, чем представлялось прежде. Начальные орбиты газожидких планет, Юпитера и особенно Сатурна, значительно отличались от современных, а «ледяные гиганты» Уран и Нептун образовались совсем не там, где сегодня расположены их орбиты. Население пояса астероидов подвергалось полному разрушению с последующим обновлением. Одним из главных процессов в образовании планет группы Земли были их катастрофические соударения.

Нельзя сказать, что многие физические процессы, которые оказались критическими в формировании планет, не были известны прежде, но почему-то внимание исследователей они не привлекали. Наша работа касается некоторых наиболее важных результатов теоретических исследований процессов формирования Солнечной системы и новых экспериментальных данных, полученных в ходе изучения экзопланетных систем.

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Открытие в 1995 г. внесолнечной планеты-гиганта 51 Peg b было стартом новой планетной физики, включающей экзопланетные системы. В руках исследователей оказался уникальный экспериментальный материал, который позволил по-новому взглянуть на аккреционные процессы. Чрезвычайно важным фактором для теории аккреции оказалась обнаруженная миграция массивных экзопланетных тел с высоких орбит, подобных орбитам Юпитера и Сатурна, до неожиданно низких околозвездных орбит — явление, которого Солнечная система, вероятнее всего, каким-то образом избежала.

Метод лучевых скоростей (МЛС) позволил обнаружить много планет-гигантов с массой, сравнимой с массой Юпитера. Но поиск прямых аналогов планет земной группы пока остается за пределами технически возможного. Основным признаком наличия планеты у звезды — это обнаружение кеплеровской орбитальной знакопеременной составляющей в лучевой скорости звезды. Важные результаты получены в наблюдениях гигантов, оказавшихся на низких орбитах. Для Солнца кеплеровская скорость, возникающая под действием Земли, составляет всего 0.09 м/с; это в 10—30 раз меньше лучших достигнутых результатов. Тем не менее, первые экзопланеты с массами в несколько масс Земли уже обнаружены, хотя и на тех же очень низких орбитах («горячие земли», «суперземли» [38]).

Статистические сведения об орбитальных и массовых характеристиках экзопланет стали надежной базой проверки создаваемых новых теорий, причем не будет преувеличением сказать, что подавляющая часть полученных сведений не предсказывалась классической теорией. Примером среди них могут быть миграция и низкие орбиты примерно 30 % экзопланет, что наиболее удобно рассмотреть на основе данных, полученных при исследовании низкоорбитальных транзитов — прохождений экзопланет по диску звезды, в числе которых наиболее известен «горячий юпитер» HD 209458b.

Практически все внесолнечные планетные системы (за исключением единичных объектов OGLE) обнаружены методом лучевых скоростей (МЛС). Теоретически есть не менее пяти физических методов поиска, из которых ниже приводятся только МЛС и транзиты. Принципы и схема поиска экзопланет по периодическому изменению лучевых скоростей родительской звезды рассматривались в работах [2—5]. Метод лучевых скоростей тем эффективнее, чем ближе возмущающее тело к звезде. В результате обращения звезды с массой M и планеты с массой $M_{\text{пл}}$ вокруг общего барицентра системы (рис. 1), в лучевой скорости звезды появляется знакопеременная (кеплеровская) составляющая V_s , которая указывает на наличие планеты. Отношение больших полуосей орбит звезды r и планеты R определяется равенством их угловых моментов. Массу звезды в первом приближении можно оценить через ее спектральный класс и светимость. Таким образом, кеплеровская орбитальная скорость звезды V_s определяется периодом T , массами звезды и планеты и эксцентриситетом орбиты планеты.

Кеплеровская составляющая V_s тем выше, чем больше масса планеты и чем короче большая полуось ее орбиты. (Астрометрический метод, наоборот, тем эффективнее, чем длиннее большая полуось орбиты). Уже в ранних работах отмечалось, что предельные возможности метода лучевых скоростей определяются главным образом нестабильностью фотосфер звезд солнечного типа [36]. В типичном благоприятном для МЛС случае беспокойство фотосферы не превы-

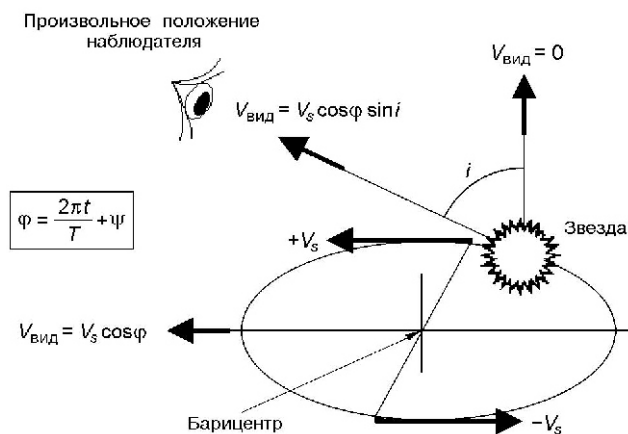
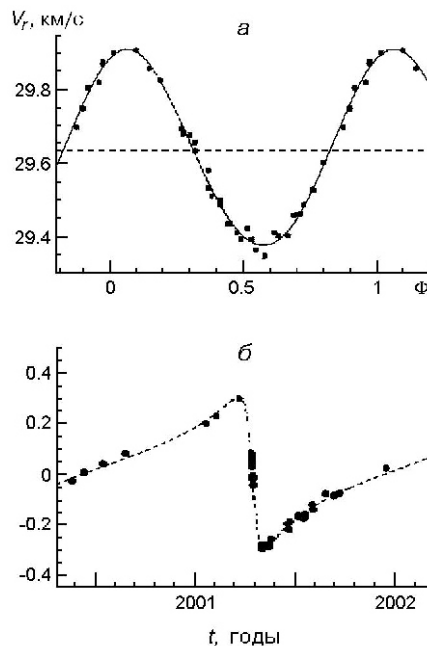


Рис. 1. Величина видимой составляющей $V_{\text{вид}}$ кеплеровской лучевой скорости V_s звезды, обращающейся вокруг барицентра, при разных положениях наблюдателя

Рис. 2. Вид периодических изменений кеплеровских лучевых скоростей при разных значениях эксцентриситета орбиты экзопланеты: *a* — $e = 0.04$ (почти круговая орбита HD 70642, возможного аналога Юпитера), *б* — $e = 0.71$ (орбита Драконис — с высоким, «кометным» эксцентриситетом)



шает 3 м/с, а предельные возможности самого метода близки к 1—1.5 м/с [41]. Рекордом стало недавнее достижение М. Майором и его сотрудниками порога 0.3 м/с [38].

Короткий период T , соответствующий близкому положению планеты типа «горячий юпитер» к родительской звезде, облегчает поиск возмущающего тела. В свое время именно короткий период позволил обнаружить первую экзопланету у звезды 51 Peg. Определение массы M экзопланеты с помощью МЛС возможно только с точностью до множителя $\sin i$, где i — угол между нормалью к плоскости орбиты и направлением на наблюдателя. Вид кривой кеплеровской орбитальной скорости звезды чрезвычайно чувствителен к эксцентриситету орбиты экзопланеты. Круговая орбита соответствует правильной гармонической функции, а при заметном эксцентриситете появляются четные гармоники (рис. 2).

При случайном удачном расположении наблюдателя примерно в плоскости кеплеровской орбиты можно наблюдать транзиты планеты (ее прохождения по диску звезды), проявляющиеся в небольшом уменьшении светового потока от звезды. Возможность наблюдения транзитов оценивалась и раньше. Незадолго до открытия первого короткопериодического «горячего юпитера» (51 Peg b) были опубликованы работы [11, 23], посвященные возможности обнаружения внесолнечных планет по их транзитам, исходя из свойств Юпитера. Выводы авторов были пессимистичными. Тем не менее, транзиты стали новым мощным инструментом астрофизики, позволяющим исследовать не только экзопланету, но и саму «родительскую» звезду. Такие параметры, как радиусы обоих тел, их массы, наклон кеплеровской орбиты, широта прохождения, состав, свойства атмосферы планеты и фотосферы звезды, — все это удается получить из транзитов,

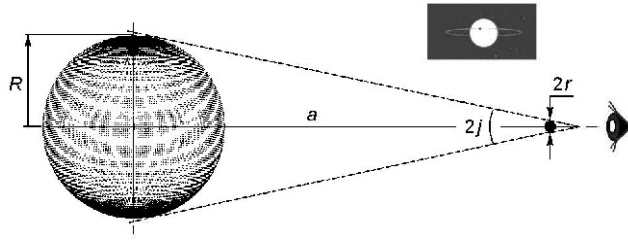


Рис. 3. Схема наблюдений прохождения экзопланеты по диску звезды (транзитов), проявляющихся в периодическом ослаблении блеска звезды

если звезда достаточно яркая. Предельная глубина модуляции, вызываемая транзитами HD 209458b, составила 1.5 %. Как было показано позже, глубина модуляции даже 0.15 % все еще позволяет получить необходимые данные.

Схема наблюдения транзитов приведена на рис. 3. Угол $j = 90 - i$. На врезке показано положение орбиты, необходимое для наблюдения транзита. Если R и r — радиусы звезды и планеты, a — большая полуось кеплеровской орбиты планеты, условие регистрации транзитов, исходя из геометрии наблюдения, формулируется как расположение наблюдателя в пределах угла $2j$ раскрыва кольцевого сектора:

$$\operatorname{tg} j = (R - r) / a, \quad (1)$$

причем вероятность p_t наблюдаемости транзитов составляет эту же величину:

$$p_t = (R - r) / a. \quad (2)$$

Для планет на низких орбитах ($a < 0.15$ а. е.) вероятность такого расположения плоскости кеплеровской орбиты, при котором будут наблюдаться регулярные транзиты, для угла $2j$ составляет более 6 %. Так, для системы HD 209458, где $a = 0.047$ а. е. и радиус звезды $R = 1.148R_{\odot}$, вероятность $p_t = 10$ %, причем транзиты повторяются каждые 3.5 сут. Для еще более низких орбит вероятность возрастает вплоть до 20 % и более, что несравненно выше известной вероятности наблюдения внешним наблюдателем прохождений Юпитера по диску Солнца (всего $8 \cdot 10^{-4}$) и его 12-летней периодичности.

Продолжительность самих транзитов определяется радиусом звезды, большой полуосью орбиты планеты a (или радиусом круговой орбиты) и суммарной массой звезды и планеты ($M + M_{\text{пл}}$). Радиусы звезд разных подклассов от поздних F до ранних M, различаются не слишком сильно. Как следует из III закона Кеплера, орбитальная скорость планеты на круговой орбите равна

$$V = \sqrt{(M + M_{\text{пл}}) / a}, \quad (3)$$

где G — гравитационная постоянная. Длительность экваториального транзита HD 209458b составляет

$$T_{\text{эт}} = 2R \sqrt{a / (M + M_{\text{пл}})} = 3.15 \text{ ч.} \quad (4)$$

Если длительность транзита $T_{\text{тр}}$ отличается от экваториального, можно найти широту прохождения транзита. С достаточной точ-

ностью (пренебрегая массой планеты) широту прохождения можно найти из выражения как:

$$\arccos(T_{\text{тр}} \sqrt{M/a/2R}). \quad (5)$$

Благодаря небольшому различию смещения спектральных линий от правого и левого лимбов вращающейся звезды в некоторых случаях в наблюдениях удастся разделить слабые признаки пересечения планеты приближающегося или удаляющегося лимбов.

Свойства планетных систем, которые были обнаружены в ходе поиска внесолнечных планет, вызывают сомнения в типичности Солнечной системы [16, 17]. Разумеется, планеты земного типа, с большой полуосью орбиты, подобной земной, пока обнаружить невозможно, но структура обнаруженных планетных систем не походит на Солнечную: очень массивные планеты находятся на разных орбитах, в том числе на орбитах с большой полуосью 0.05—2 а. е. На ноябрь 2009 г. общее число открытых планет у других звезд, согласно каталогу Ж. Шнайдера [<http://exoplanet.eu/>], достигло 370. Наряду с одиночными, число систем, у которых обнаружено несколько планет, уже превысило 30. Система коричневого карлика GJ 876 имеет две планеты (причем с орбитальным резонансом 2:1), Andromedae — три планеты, 55 Cancri — четыре планеты, одна из которых имеет массу $M \sin i$, близкую к массе Нептуна (около 17 масс Земли).

Значительная часть экзопланет (около 100) имеет большую полуось орбиты в пределах 0.15 а. е., а фактически — орбиты, на порядок более низкие, чем в Солнечной системе орбита Меркурия. Это определяет довольно высокую вероятность расположения наблюдателя в плоскости их орбит (транзитов) — от 0.06 до 0.20. Однако низка сама вероятность обнаружить такую систему. Звезды, имеющие планеты типа «горячий юпитер», составляют незначительную часть звездного населения, всего 0.0075 [14]. Учитывая также произвольное положение плоскости их орбит, Д. Шарбоне [18, 19] называл величину 1/1300 как вероятность встретить среди звезд солнечного типа объект с наблюдаемыми транзитами планет. Интересно отметить, что открытая в 2000 г. экзопланета HD 209458b [20] в течение пяти лет вообще оставалась единственным обнаруженным транзитом у близко расположенных звезд.

ТРАНЗИТЫ ЭКЗОПЛАНЕТ HD 149026b, TrES-1 И HD 189733b

Среди наиболее существенных для теории аккреции новых фактов оказалось обнаружение миграции массивных экзопланетных тел до чрезвычайно низких околозвездных орбит, где орбитальный период составляет единицы суток, а в рекордных случаях — около десяти часов. Как уже говорилось, при удачном положении наблюдателя это явление позволяет, с высокой вероятностью наблюдать прохождения планет по диску звезды.

HD 149026b. В работах [22, 42] сообщалось о второй (после HD 209458) сравнительно яркой звезде, HD 149026, у которой обнаружены транзиты экзопланеты, причем в поисках планеты исследователи исходили именно из высокой металличности звезды HD 149026. (Роли металличности посвящена наша работа [4]). Экзопланета найдена с помощью МЛС; ее масса несколько превышает массу Сатурна. Звезда имеет спектральный класс G0IV и визуальную величину 8.15^m ; расстояние до нее составляет 79 пк. Звезда действительно имеет повышенную металличность ($[Fe/H] = +0.36$) и массу $(1.3 \pm 0.1)M_{\odot}$. Исходя из светимости $2.72L_{\odot}$, радиус звезды равен $1.45R_{\odot}$. Звезда моложе Солнца, возраст около 2 Глет. Масса планеты, согласно наблюдениям, проведенным совместно японской обсерваторией Subaru и обсерваторией Кека, составляет $M \sin i = 0.36M_{Jup}$, период 2.8766 сут, орбитальное расстояние 0.042 а. е., эксцентриситет орбиты 0. Транзиты означают, что $\sin i \approx 1$. Радиус орбиты всего в 6 раз больше радиуса звезды, а отношение радиусов звезды и планеты равно 20.

Уже первые результаты наблюдений транзитов HD 149026b привлекли внимание исследователей к необычным физическим свойствам планеты. Малое ослабление потока HD 149026 сразу же указало на относительно небольшой радиус планеты, что противоречило ее достаточно большой массе. Обнаруженные транзиты HD 149026b (рис. 4) указывают на ослабление потока звезды всего на 0.003^m , что в пять раз меньше, чем в случае HD 209458b. Радиус HD 149026b составляет 0.85 радиуса Сатурна, или $(0.725 \pm 0.05)R_{Jup}$. Экзопланета HD 149026b представляет собой новый класс внесолнечных планет. По своему положению она соответствует «горячим юпитерам», но обладает массивным ядром из тяжелых элементов, до 0.7 массы всей экзопланеты. Масса ее достигает 1.2 масс Сатурна (115 масс Земли). Угол между осью орбиты и направлением на Землю был оценен по

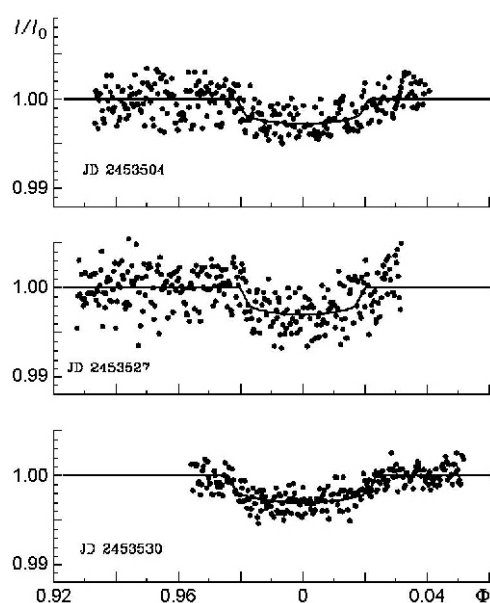


Рис. 4. Ослабление света звезды при транзите экзопланеты HD 149026b [22, 42]

данным о длительности транзитов и составил $i = 85^\circ$, поэтому в эксперименте найдена практически полная масса экзопланеты.

Выводы, опирающиеся на данные о массе и радиусе HD 149026b, указывают на гигантское ядро HD149026b из плотных составляющих, со средней плотностью ядра около 5.5 г/см^3 и с массой около 67 масс Земли. Формирование такой планеты трудно объяснить в рамках известных теорий образования планет, аккреционной теории или теории гравитационной неустойчивости. Чтобы объяснить образование экзопланеты HD 149026b, привлекаются аналогии с Нептуном. В свою очередь, и возникновение Нептуна среди планет Солнечной системы объяснить сложно [17]. Истории Нептуна была посвящена, в частности, работа У. Хаббарда и др. [26, 27]. Его формирование должно было начаться с образования неустойчивого джинсова фрагмента с массой около трех масс Земли. По мере того, как холодный массивный протонептун испытывал кельвин-гельмгольцево сжатие, твердые частицы постепенно оседали и образовывали массивное ядро. Вероятно, так же происходило формирование HD 149026b. Но дальнейшие стадии образования HD 149026b мало понятны. Если следовать теории гравитационной неустойчивости [12, 13], формирование планеты происходило под действием излучения находившейся достаточно близко массивной звезды, что вызвало испарение внешних газовых оболочек. В конце концов так могла возникнуть странная планета типа Нептуна, с ядром в 17 масс Земли, если исходить из солнечного состава протопланетного диска. В случае экзопланеты HD 149026b с ее гигантским ядром сценарий гравитационной неустойчивости требует удвоенной солнечной металличности и образования неустойчивого джинсова фрагмента с массой около $6M_{\oplus}$. А. Бюроус [17] указывает, что только так можно образовать ядро в 67 масс Земли, причем время оседания твердых зерен значительно превышает время кельвин-гельмгольцево сжатия газовых оболочек, а фотоиспарение газовых оболочек планеты с массой $6M_{\oplus}$ вообще трудно завершить за время существования системы HD 149026.

Возникновение большого ядра HD 149026b встречается с не меньшими трудностями и в рамках классической аккреционной теории. Массивное ядро, 30 масс Земли, вызывает самоускоряющуюся газовую аккрецию, даже если разогрев от выпадения планетезималей задерживает кельвин-гельмгольцево сжатие, что требует наличия больших масс газа в планетной сфере Хилла. Но структура HD 149026b предполагает, что тело формировалось как раз в обедненной газом среде. Тем не менее, газ должен был присутствовать, иначе нельзя объяснить, как происходила миграция, переместившая HD 149026b на низкую орбиту с периодом 2.87 сут.

Образование большого ядра HD 149026b должно было происходить в условиях высокой металличности (с величиной 2.3, что соответствует $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.36$). Изолированная масса ядра примерно равна $M_{\text{изо}} \sim (a^2 \Sigma)^{3/2} M^{1/2}$, где Σ — поверхностная плотность пыли в диске,

a — расстояние до звезды с массой M . Предполагается, что $\sim M [\text{Fe}/\text{H}]$. В ходе дальнейшей аккреции масса ядра приближается к $M_{\text{изо}} \sqrt{2}$ [39]. При удвоенной металличности звезды с массой $1.3M_{\odot}$ изолированная масса ядра возрастает в 3.7 раз. Чтобы планеты-гиганты Солнечной системы могли сформироваться за время жизни протопланетного диска, необходимо увеличение по крайней мере втрое. Формирование Юпитера на расстоянии 5.2 а. е. от Солнца требует $\rho = 10 \text{ г/см}^3$. В таких условиях масса ядра $M_{\text{я}}$ для HD149026b составила бы 42 масс Земли [17]. Ключом для понимания происхождения планеты HD149026b с огромной массой ядра (67 масс Земли) может стать короткое время ее аккреции.

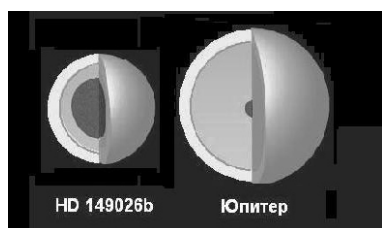


Рис. 5. Вероятное внутреннее строение экзопланеты HD149026b в сравнении с Юпитером

На рис. 5 показано предполагаемое внутреннее строение HD149026b по сравнению с Юпитером. Только значительное различие в строении этих гигантов может объяснить высокую среднюю плотность планеты, составляющую 1.20 г/см^3 (или 1.07 г/см^3 согласно [22]). Предложены несколько гипотез о каменном или ледяном составе ядра HD149026b. Подобно всем низкоорбитальным планетам, история HD149026b предполагает ее миграцию с

высокой на околозвездную орбиту.

TrES-1. Подавляющее большинство внесолнечных планет найдено у звезд солнечного класса и ближайших к нему подклассов F и K. Экзопланета TrES-1, сообщение об открытии которой было опубликовано в 2004 г., [9], принадлежит звезде класса K0V, более слабой, чем HD 149026b ($V = 11.79^m$). Ослабление света звезды при транзите планеты менее 1 %. Орбитальное расстояние экзопланеты TrES-1 составляет 0.0393 а. е., орбитальный период 3.030065 сут, причем орбита имеет необычно большой для короткопериодических экзопланет эксцентриситет 0.135. Параметр $M \sin i$, найденный с достаточно высокой точностью, составляет $(0.75 \pm 0.07)M_{\text{Ю}}$ [41], и благодаря подтвержденным транзитам является действительной массой планеты. Масса TrES-1 почти вдвое больше массы HD149026b и практически такова же, как масса HD 209458b. Радиус TrES-1 превышает радиус Юпитера, $1.08^{+0.18}_{-0.04} R_{\text{Ю}}$. Таким образом, средняя плотность TrES-1 составляет 0.64 г/см^3 , т. е. такова же, как плотность Сатурна. Удаленность TrES-1 около 160 пк.

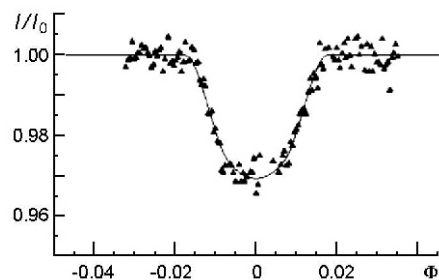
В работах [17, 21] сообщалось о новых результатах исследований TrES-1 и HD 209458b в тепловых ИК-диапазонах ($\lambda = 4.5, 8.0$ и 24 мкм). С борта космической обсерватории «Spitzer Space Telescope» впервые удалось зарегистрировать уменьшение теплового излучения системы звезда — планета при прохождении планеты за звездой. Ослабление составило 0.00066 ± 0.00013 на длине волны 4.5 мкм и

0.00225 ± 0.00036 на длине волны 8 мкм. По существу это первые прямые наблюдения теплового излучения горячего юпитера. Методом, изложенным выше, было найдено довольно низкое сферическое альbedo планеты (0.31 ± 0.14). Поглощение почти 70 % падающей радиации приводит к высокой равновесной температуре планеты 1060 ± 50 К. Именно высокая равновесная температура планеты сделала возможными эти измерения. Можно напомнить, что в визуальном оптическом диапазоне на поток от подобной планеты приходится лишь 10^{-10} , а для ИК-диапазона оценки составляют 10^{-7} [16].

Как уже отмечалось, радиус HD 209458b примерно на 20 % больше теоретических моделей [17]. Радиус HD149026b, наоборот, меньше теоретического. Лучшее из других с моделями согласуется именно радиус TrES-1.

HD 189733b. Одна из наиболее интересных планет с наблюдаемыми транзитами, HD 189733b, относится к типу «очень горячих юпитеров» (находящихся на наиболее низких орбитах). Ее период всего 2.219 сут. Большая полуось ее орбиты составляет 0.0313 а. е. Глубина ослабления потока от звезды при транзитах HD 189733b достигает рекордных значений 3 % (рис. 6). Объект был открыт в ходе программы ELODIE [15] поиска транзитов у звезд повышенной металличности, причем транзиты были сначала обнаружены спектроскопически (по эффекту смещения спектральных линий при пересечении лимба). Эффект дает смещения с противоположным знаком при начале и окончании транзита, которые удалось зарегистрировать. Интересно, что последующие измерения повышенную металличность HD 189733 не подтвердили, $[Fe/H] = -0.03 \pm 0.04$. Звезда HD 189733 находится гораздо ближе к Земле, чем HD 209458, на расстоянии 19.3 пк. Уточненный класс звезды K1—K2 ($V = 7.67^m$), $T_{эф} = 5050$ К; ее масса $0.82M_{\odot}$ и радиус $0.76R_{\odot}$. Отношение радиусов звезды и планеты 0.172 ± 0.003 . Благодаря этим особенностям планета HD 189733b относится к удобным объектам исследований. Ее родительская звезда относится к классу K, где число известных экзопланет невелико. Бучи и др. [14] приводят следующие данные о планете: эксцентриситет орбиты 0, масса $(1.15 \pm 0.04)M_{Ю}$. Радиус HD 189733b, как и у TrES-1, превышает радиус Юпитера в 1.26 ± 0.003 раза. Средняя плотность составляет 0.75 г/см^3 , т.е. выше плотности Сатурна. Таким образом, масса и радиус HD 189733b наибольшие из всех перечисленных. Низкоорбитальные экзопланеты имеют массы около $0.75M_{Ю}$. В последние годы

Рис. 6. Ослабление света звезды при транзите относительно близкой внесолнечной планеты HD 189733b (19.3 пк) [14]



появились признаки того, что на более низких орбитах масса планет несколько больше [41]. Масса HD 189733b свидетельствует в пользу такого утверждения.

Транзиты были темой многих дискуссий секции «Внесолнечные планеты» конференции «Protostars and Planets V», материалы которой содержат много важных сведений (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/ppv2005/ppv2005.inforpage.html>). Обзор работ по транзитам приводится в работе Charbonneau и др. (2007). Материалы конференции публикуются в издании Protostars and Planets V / Eds B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. Tucson: Univ. of Arizona Press.

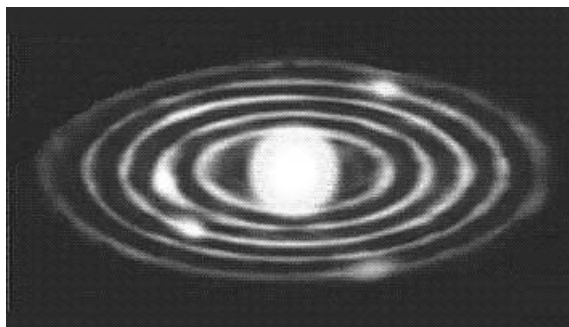
Все низкоорбитальные «горячие юпитеры» не могли образоваться на наблюдаемых орбитах. Их история неизбежно предполагает миграцию орбит.

НЕКОТОРЫЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ АККРЕЦИОННОЙ ТЕОРИИ

Планеты Солнечной системы, как и планеты других звезд, представляют собой сложный конгломерат твердого и жидкого вещества, нейтрального газа и плазмы, с поступающими из окружающего пространства частицами пыли и заряженными частицами высоких энергий. Для поиска ответов на вопрос, каким образом сформировалась Солнечная система, теория располагает сегодня новыми экспериментальными данными, значительная часть которых получена после открытия планет у других звезд. Теория формирования звезд и планетных дисков была разработана достаточно давно, но сегодня благодаря успехам теоретической астрофизики и наблюдательной астрономии процессы формирования планетных систем стали намного более понятными.

Основы аккреционной теории были заложены в XVIII веке работами Э. Сведенборга, И. Канта и П.-С. Лапласа. Позднее, уже в XX веке, в нашей стране важный вклад в теорию образования планетных систем внесли О. Ю. Шмидт и его последователи из Института физики Земли РАН. Согласно основам аккреционной теории, в каком-то фрагменте гигантского межзвездного газопылевого облака частицы начинают концентрироваться вокруг случайного центра гравитации, образуя протосолнечное-протопланетное облако. По мере сжатия облако начинает вращаться, и в условиях сохранения углового момента становится плоским. В таком вращающемся диске происходит фрагментация (рис. 7), появляются мелкие центры конденсации, затем планетезимали, которые, в свою очередь, сталкиваясь и объединяясь, становятся зародышами планет, протопланетами. Затем в результате множественных столкновений с окружающими планетезималиями протопланеты образуют планеты, которые возникают в результате аккреции вещества из газопылевого диска, окружающего молодую звезду, на образующееся ядро планеты.

Рис. 7. Формирование Солнечной системы согласно ранним представлениям аккреционной теории (XX век). Газопылевое облако вращается и постепенно уплощается, превращаясь в тонкий диск вокруг формирующегося в центре Солнца. Образуются кольца, из которых затем формируются планеты



В классической аккреционной теории [1, 8, 25, 44] предполагалось образование планет-гигантов в несколько этапов. Во второй половине XX века общепринятой была двуступенчатая схема образования Юпитера и Сатурна [8, 25, 40]. В схематичном изложении — это длительная (до 10^8 лет) аккреция микронных пылевых частиц на растущее ядро с накоплением в нем примерно 10—15 масс Земли [40], а затем более быстрая аккреция на ядро газа, доводящая массу гиганта до окончательной величины. Схема предполагала столкновительную аккрецию частиц твердого материала (главным образом силикатного состава) во внутренней части протопланетного диска, сначала в частицы субмикронного размера, затем в комочки размерами в несколько сантиметров и их последующее слияние с образованием километровых планетезималей и более крупных планетных зародышей. Накопленные в протопланетном диске планетезимали затем объединялись в столкновениях и создавали ядро будущей планеты, с массой от 10 до 25 масс Земли. (В более поздних работах произошла переоценка массы ядра до 5—10 и даже до 2—3 масс Земли [43, 46]. Затем ядро захватывало газовый компонент из протопланетного диска (главным образом водород). Как показывали расчеты, на весь процесс должно уходить до 10^8 лет [39].

Вместе с тем выполненные в последней четверти XX века многочисленные наблюдения протопланетных дисков звездно-планетных систем в стадии формирования неизменно свидетельствуют о весьма ограниченном времени диссипации водорода и гелия из диска. Во всяком случае, они удерживаются там менее 10^7 , иногда даже менее 10^6 лет [6, 39, 46, 47, 49]. Естественно, это противоречит известному водородному (в основном) составу атмосфер Юпитера и Сатурна. Проводились новые расчеты, где учитывались эффекты самоускоряющегося роста протопланеты, что сокращает время формирования планеты, но оно все еще остается слишком большим, около 10^7 лет [7]. Время формирования удавалось сократить до $8 \cdot 10^6$ лет, если принимаемая поверхностная плотность Z -компонента вещества протопланетного диска на расстоянии орбиты Юпитера составляла 10 г/см^2 , но время формирования увеличивалось до $50 \cdot 10^6$ лет при 7 г/см^2 . Поллак и др. [39] указывали, что увеличение поверхностной плотности до 15 г/см^2 уменьшает время образования Юпитера до нескольких миллионов лет. Однако масса ядра Юпитера при таком моделировании

выходит за теоретически приемлемые пределы [24]. Последующие наблюдения указывают на завершение диссипации основной массы газообразной составляющей в среднем за 3 млн лет. После этого газового материала для формирования планеты практически не остается. (На газообразную составляющую приходится 98 % исходной массы протопланетных дисков).

Классическая схема встретила также с большими трудностями в объяснении распределения углового момента в Солнечной системе. Эта трудность классической схемы — низкая величина углового момента Солнца — была известна давно. Убедительных объяснений этого факта теория предложить не могла, что вызывало известный скепсис. Проблема до конца не решена и сегодня, хотя процесс потери углового момента объяснение все же находит.

Еще одна трудность классической схемы выявилась, когда стали известны внесолнечные планеты: она не может объяснить происхождение огромных эксцентриситетов их орбит. Практически формирование круговой орбиты Юпитера приливными эффектами объяснить не удается [45].

С накоплением экспериментальных данных разрабатываемые теории все более усложнялись. Процессы образования планет оказались значительно сложнее образования звезд. Но в самых общих ее чертах схема аккреционной теории подтверждается наблюдениями, в том числе на космическом телескопе им. Хаббла. Обнаружено около 150 протопланетных дисков, дающих представление о том, как выглядела протосолнечная туманность 5 миллиардов лет назад (рис. 8). Вместе с тем дальнейшее исследование протопланетных дисков обнаруживало все новые противоречия с аккреционной теорией.

В конце XX века А. Боссом стала развиваться гипотеза гравитационной нестабильности [12, 13], основная идея которой была впервые опубликована еще в 1951 г. [33]. Согласно этой гипотезе возникающие в протопланетном диске нестабильности могут вызвать гравитационный коллапс, способный образовать планету всего за 10 000—50 000 лет. Гипотеза активно разрабатывается, но встречается с трудностями и серьезной критикой. К быстрому возникновению крупной конденсации приводят локальные гравитационные нестабильности в

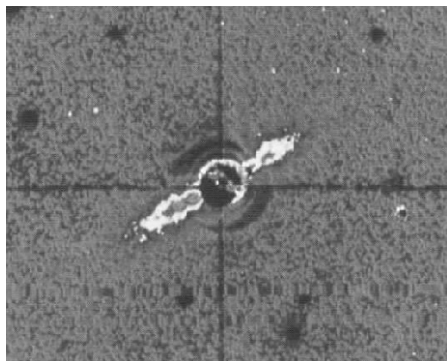


Рис. 8. Формирующаяся планетная система у звезды Pictoris (расстояние 19 пк) — иллюстрация к «стандартной модели» происхождения планетных систем, согласно которой планеты возникают в результате аккреции материала из газопылевого диска, окружающего молодую звезду. Изображение получено со спутника IRAS. Диск виден «с ребра». Пылевая составляющая выделена серым

протопланетном диске. Однако они в такой же мере способны и разрушить зарождающуюся конденсацию.

Аккреционная теория была более разработанной, но и её радикальная ревизия стала неизбежной [39, 41], прежде всего в отношении временной шкалы явлений. Как уже отмечалось, аккреционная теория требовала для образования планет около 100 миллионов лет, когда газа уже не оставалось. В результате серьезной ревизии теории стало понятно, что именно вода, другие летучие и так называемая «линия льдов» (или «линия снега») относятся к важнейшим факторам формирования будущей планетной системы. Процессы формирования крайне сложны и включают ряд одновременно действующих факторов противоположного характера, что делает ход процесса фактически непрогнозируемым. Некоторые физические процессы повторяются последовательно, но с разными результатами. Поэтому новую теорию иногда называют «теорией последовательной аккреции». Вероятно, именно запутанность процессов приводит к многообразию найденных почти 400 экзопланет.

ТЕОРИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ АККРЕЦИИ О ФОРМИРОВАНИИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Новая, значительно усложненная аккреционная теория обратила более пристальное внимание на определяющую роль последовательности происходящих процессов [28, 29, 35], последовательности, которая в какой-то мере была известна, но недооценивались исследователями. Оказалось, что фактически одни и те же процессы отгонки, конденсации и фазовых переходов летучих при их последовательном многократном повторении приводят к совершенно различным результатам, которые и составляют чередующиеся этапы формирования планетной системы. В целом процесс настолько сложен и критичен к окружающим условиям, что его результаты оказываются непредсказуемыми. По-видимому, именно это обстоятельство приводит к тому, что среди 350 обнаруженных внесолнечных планет трудно найти похожие.

Согласно наиболее развитым современным представлениям процесс, называемый последовательной аккрецией, имеет следующие особенности. Конденсация массивного межзвездного газопылевого облака может происходить достаточно быстро; за время от 150 тысяч до нескольких миллионов лет образуется группа молодых звезд разных масс. Во многих случаях сохраняется взаимное влияние звезд. Вокруг звезды возникает протопланетное облако из остаточного материала, приобретающее, благодаря вращению, форму диска. Пылевая составляющая облака представляет собой частички субмикронных размеров неправильной формы. На пылевую составляющую приходится всего 1-2 % массы облака, остальное — водород (около 90 %) и гелий. Сталкиваясь, частицы могут как объединяться, так и разру-

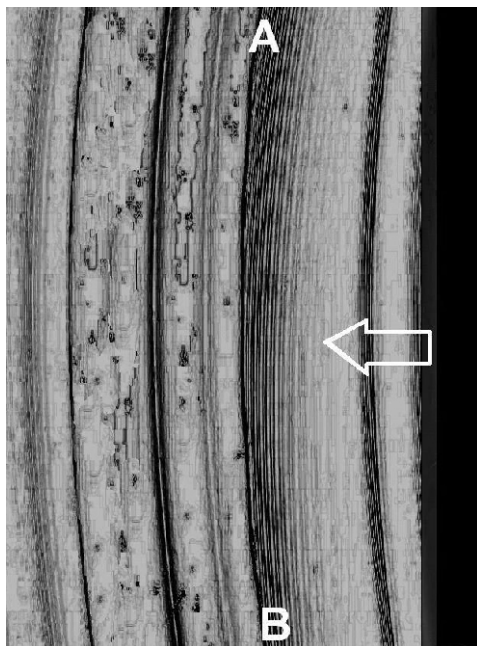
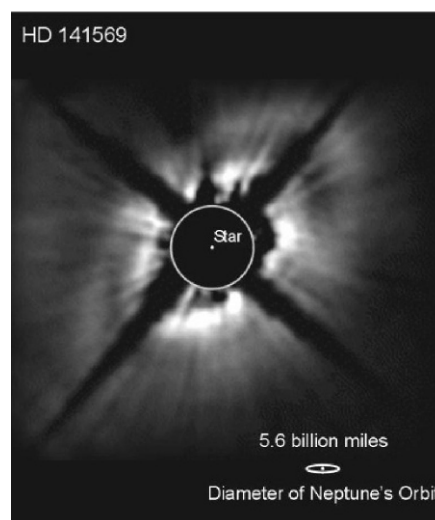


Рис. 9. Отгонка летучих от звезды (правая часть рисунка) за линию льдов АВ. Случайные уплотнения создают короткоживущие кольца, разрывы и волны в газопылевом диске

шаться. Но под действием усиливающейся радиации молодой звезды начинается стадия испарения летучих из внутренней части диска, воды и включений летучих в силикатных частицах. Значительная часть диска экранирована пылевой средой от нагрева прямой радиацией. Однако разогретая среда переизлучает поглощенную энергию в инфракрасном диапазоне, где диск достаточно прозрачен и доносит энергию, таким образом, до внутренних затененных областей и разогревает их до высокой температуры. Но на периферии внутренней зоны температура уже недостаточна для испарения летучих. Происходит мощная отгонка летучих (из правой части рис. 9) за линию льдов АВ. Компьютерное моделирование показывает, что небольшие случайные конденсации могут порождать недолгоживущие волны и кольца в диске. На границе конденсации летучих, прежде всего воды, возникает линия льдов, на которой и с ее внешней стороны происходит концентрация колоссальных масс протопланетного материала. Судя по изображениям протопланетных дисков, внешние пределы зоны конденсации могут отстоять на сотни астрономических единиц (рис. 10). Летучие в газовой фазе конденсируются на пылинках, размеры которых постепенно увеличиваются в сотни и тысячи раз. Главные события происходят вблизи линии льдов. Вначале почти вся масса обращающегося вокруг звезды молодого протопланетного облака приходится на газ, плотность которого убывает с расстоянием от звезды. Вблизи линии льдов единичный объем газа находится под сложным влиянием гравитации звезды и самого облака, давления газовой среды и центробежных сил. В результате у линии льдов его орбитальная скорость оказывается меньше кеплеровской. В то же время, если скорость твердых частиц будет меньше кеплеровской, они станут выпадать к звезде. Именно это и происходит из-за торможения

Рис. 10. Изображение звезды HD 141569 (наблюдатели Б. Смит и Дж. Шнайдер, 1999 г.). На снимке зона радиусом 2—4 а. е., практически свободная от летучих, охватывает черный кружок, которым закрыта сама звезда



в газовой среде достаточно крупных частиц, более 1 мм. Мигрируя во внутренние области относительно линии льдов, они нагреваются, конденсаты плавятся, частицы становятся липкими и быстро растут. Образуются планетезимали, заготовки материала будущих планет. За миллионы лет они достигают километровых размеров. На образование основной их массы уходит примерно 1 миллион лет. Вначале рост массы планетезималей происходит в силу случайных столкновений. Но чем больше становятся планетезимали, тем более сильной гравитацией они обладают и тем интенсивнее они начинают поглощать своих соседей с небольшой массой [31]. Так возникают тела, которые можно назвать зародышами, или протопланетами. Они обладают сравнимыми массами и перехватывают оставшиеся планетезимали из узкой полосы вдоль своей орбиты [30, 31]. Когда большая часть планетезималей поглощена, рост зародыша прекращается.

Одновременно на самой критической линии льдов происходят другие важные события. Здесь возникает скачок давления испарившейся газовой фазы, орбитальная скорость газа возрастает, достигает и опережает кеплеровскую, и газ уже не тормозит, а ускоряет частицы. В результате миграция к звезде основной массы частиц останавливается. Тем не менее, из дальней периферии диска миграция продолжается, и у линии льдов скапливается большая масса материала, ожидающего начала следующей стадии образования планетной системы.

Планетезимали очень многочисленны, счет идет на многие сотни миллионов или даже миллиард; в результате множественных столкновений они образуют тела, достигающие размеров Луны и более, захватывающие остающийся материал и подавляющие рост соседей [31]. После достижения нескольких процентов земной массы рост протопланет ограничивается из-за гравитационных взаимодействий с другими телами, а часть тел в таких взаимодействиях вообще выбрасывается из формирующейся системы в межзвездное пространство.

Масса до 0.05—0.10 массы Земли на ее орбите может быть накоплена за 100 тысяч лет и ограничивается этой величиной, так как материала здесь мало. Чем дальше от звезды, тем медленнее рост. Чтобы достичь четырех масс Земли телу на расстоянии, соответствующем современной орбите Юпитера, требовалось несколько миллионов лет. Если линия льдов проходила там же, процесс шел быстрее. Так как протопланетное облако тогда еще не потеряло основные запасы газа, начинается захват газа ядром будущей планеты [10]. Захват чрезвычайно критичен к массе ядра (не менее 10 масс Земли), к составу газа, наличию тяжелых элементов и ряду других факторов. Протопланетных тел-кандидатов на роль ядра будущей планеты оказывается много, но в качестве ядра они редко выживают. Если так случилось, по мере того, как холодное массивное тело испытывает кельвин-гельмгольцево сжатие, твердые частицы постепенно оседают и увеличивают массу ядра. Если газа еще много, его захват и сжатие вызывают интенсивное выделение тепла, затрудняющее формирование планеты. Это — хорошо известное ограничение при образовании звезд. Если отвод тепла неэффективен, и охлаждение слишком медленное, газ может быть потерян и, планета-гигант не возникнет. Газ медленно накапливается в течение около миллиона лет, но затем половина всей газовой массы захватывается всего за 1000 лет. В этот период родившийся гигант излучает колоссальные потоки радиации. В Солнечной системе следы этих событий и в наше время можно видеть на поверхности некоторых спутников Юпитера.

Есть еще несколько факторов, ограничивающих появление гиганта. Среди главных — уже отмечавшаяся миграция [34, 35]. Миграция первого рода возникает при гравитационном взаимодействии формирующейся планеты с рассредоточенной массой окружающей среды, как это показано в упрощенном виде на рис. 11. В прилегающих частях диска движение формирующейся планеты вызывает появление волн, причем в однородной среде их влияние взаимно компенсируется. Но среда неоднородна, её распределенная масса за орбитой планеты (слева на рис. 11) значительно превышает массу внутри орбиты (справа). В результате возникает некоторое торможение планеты, слегка снижающее её орбиту к звезде.

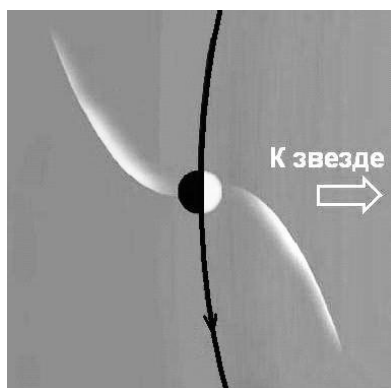


Рис. 11. Возникновение миграции при гравитационном взаимодействии формирующейся планеты с волнами в окружающей среде (адаптировано из работы [34])

За один миллион лет орбита прото-планеты может снизиться на несколько астрономических единиц, вплоть до линии льдов, где миграция останавливается под действием ускоряющего движения газа, так как здесь орбитальная скорость газа опережает кеплеровскую. Запутанность всех сопутствующих процессов еще более усложняется тем, что их временные шкалы примерно совпадают, к тому же таким оказывается и характерное время потери диском газовой составляющей.

Формирующаяся планета-гигант черпает материал из зоны своей орбиты, создавая разрыв в диске (рис. 12). Начиная с какого-то момента, её рост останавливается (как это происходило и в случае планетезималей). Управляющим механизмом снова оказывается гравитационное взаимодействие планеты с газом в окружающей среде. Однако на этом этапе определяющей становится роль планеты, масса которой уже достигла массы Юпитера (0.001 массы материнской звезды в случае звезды солнечного типа). Взаимодействие планеты с газом у разрыва внутри орбиты (справа на рис. 12) замедляет обращение газовых масс, а на внешней стороне разрыва их ускоряет. Нетрудно видеть, что в обоих случаях происходит отклонение газа от встречи с планетой, и её рост останавливается.

В некоторых случаях возникает более сложное явление, миграция второго рода. В прилегающих областях диска возникают турбулентные зоны, из которых турбулизированный газ все же может попасть в зону разрыва. Его гравитационное взаимодействие с планетой вызывает очень медленную потерю орбитального момента планеты и, опять-таки, медленное снижение орбиты планеты. Процессы миграции второго рода пока не вполне понятны.

Через гравитационное взаимодействие сформировавшийся гигант очищает зону астероидов первого поколения [32] и значительно ускоряет образование последующих планет-гигантов, если не весь газ уже потерян. По-видимому, с задержкой на несколько миллионов лет формировался Сатурн, когда газа уже оставалась немного, поэтому его масса в 3.3 раз меньше массы Юпитера. Но если бы не влияние последнего, процесс длился бы еще дольше, и масса Сатурна была бы еще меньше. Вероятно, в таких условиях формировались Уран и Нептун, хотя не совсем ясно, где это происходило, так как эти планеты, скорее всего, мигрировали с начальных орбит вблизи Сатурна. Име-

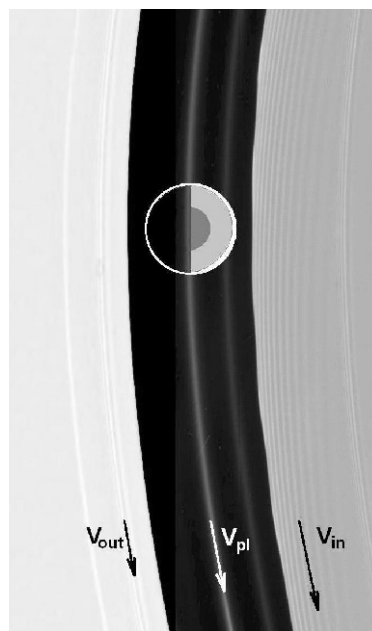


Рис. 12. Механизм ограничения роста планеты-гиганта

ются некоторые свидетельства, что начальное положение орбит Урана и Нептуна было обратным современному. Образование их затянулось, ядра достигли 10—20 масс Земли, а газа оставалось мало и хватило всего на 1-2 земных массы в каждом случае. Ясно, что относить Уран и Нептун к группе планет-гигантов не приходится, это особая категория, ледяные гиганты, масса которых менее 0.19 масс Юпитера. Это критическая величина, когда масса становится недостаточной для металлизации водорода и образования из него внешней оболочки ядра. Именно такая оболочка определяет многие свойства Юпитера и Сатурна. В целом на формирование этих четырех планет ушло значительно меньше 10 млн лет.

Дальнейшие события в зоне гигантов развивались медленнее. Образовавшиеся Уран и Нептун выбрасывали остающиеся планетезимали в зону пояса Койпера, и отчасти — к Солнцу, а Юпитер отправлял их в облако Оорта. (История возникновения малых тел Солнечной системы — комет, астероидов и малых спутников — очень сложна и подробно рассматривается во многих работах, например, [37, 49]).

Теория последовательной аккреции предполагает, что во внесолнечных планетных системах планеты типа Земли должны быть более распространены, чем планеты-гиганты. Но до обнаружения еще неоткрытых внесолнечных землеподобных планет теория может опираться лишь на данные о Солнечной системе. Условия формирования четырех планет земной группы, которые расположены в пространстве внутри линии льдов, и четырех внешних планет, находящихся за ней, сильно различаются. Четыре планеты земной группы, Меркурий, Венера, Земля и Марс, сформировались во внутренней части системы в основном из веществ с высокой температурой испарения, таких как железо и силикатные породы. Как уже отмечалось, ближе к Солнцу, где плотность солнечной радиации очень высока (рис. 13), частицы нагревались. В результате лед и другие летучие (вещества с низкой температурой кипения) испарялись, образуя почти свободную от пыли прозрачную зону радиусом до 5 а. е., известную по исследованиям протопланетных дисков.

В обедненной зоне внутри линии льдов протопланеты могли вырасти лишь до 0.1 земной массы, т. е. немного больше, чем масса

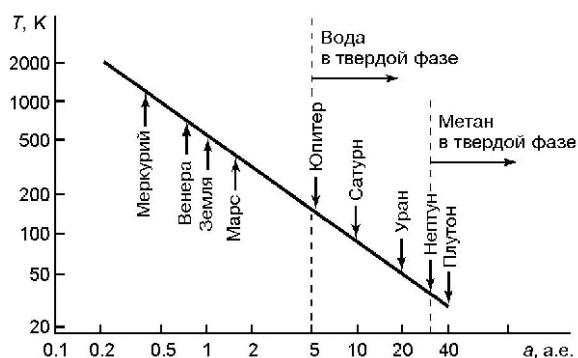


Рис. 13. Зависимость температуры от расстояния до Солнца при формировании Солнечной системы

Меркурия. Для того чтобы их масса продолжала увеличиваться свыше 0.1 массы Земли, протопланеты должны были перейти на вытянутые (некруговые) пересекающиеся орбиты, допускающих столкновения. Такими орбиты могли стать под возмущающим действием планеты-гиганта [32]. Следовательно, образование первой планеты-гиганта, в первые 2-3 миллиона лет, должно было предшествовать этим процессам. Если орбиты компланарны и не связаны резонансными соотношениями, столкновение и объединение таких тел — только вопрос времени. По некоторым оценкам теории последовательной аккреции вскоре после возникновения Юпитера образовался обновленный пояс астероидов (в первые 4 млн лет), Марс (10 млн лет), затем Земля (30—50 млн лет). Гораздо труднее объяснить произошедшую затем постепенную циркуляризацию новых орбит, возникших после столкновений протопланет. Орбиты планет земного типа со времени их возникновения существенно не изменялись, планеты не мигрировали. В формировании их орбит могли сыграть свою роль оставшиеся планетезимали или остаточный газ.

После того как первые протопланеты зоны Земли сформировались, остатки вещества протопланетного облака постепенно удалялись из внутренних областей Солнечной системы в процессе рассеяния за счет гравитационного взаимодействия с уже существовавшей планетой-гигантом, под давлением солнечного излучения (эффект Пойнтинга — Робертсона) и, наконец, были поглощены протопланетами в столкновениях. Рассеяние остаточного материала протопланетного облака в процессе гравитационного взаимодействия приводило к выбрасыванию тел на периферию системы, и отчасти к Солнцу.

Изредка случающиеся в наше время столкновения планет с малыми телами, например столкновение кометы Шумейкеров — Леви с Юпитером в 1994 г., можно рассматривать как затухающее эхо мощнейших столкновительных процессов, происходивших в ранней истории формирования Солнечной системы. Тяжелую «метеоритную бомбардировку» планеты пережили на ранних этапах существования Солнечной системы, особенно 3.9—3.8 млрд лет назад, когда наблюдался пик такой бомбардировки. Наиболее вероятной его причиной могло быть прохождение системой Юпитер — Сатурн орбитального резонанса 1:2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планеты — это конечная стадия процесса аккреции вещества, окружающего ядро протосолнечной туманности. В грандиозных масштабах объектов Вселенной планеты занимают скромное место. Вместе с тем развитие представлений современной теории происхождения планетных систем и физики планетных тел показывает, что планеты — самые сложные и наиболее разнообразные объекты астрофизики.

Только на планетах так тесно связаны астрономические явления, химические, физические, геологические и биологические процессы. Излишне напоминать, что биофизика связывает с планетами проблему происхождения аминокислотной формы жизни (единственной формы жизни, известной сегодня). Парадоксальным образом происхождение планет, как и происхождение жизни, оказалось связанным с физическими циклами фазовых переходов воды.

1. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. — М.: Мир, 1979.
2. Ксанфомалити Л. В. Внесолнечные планетные системы // Астрон. вестн.— 2000.—**34**, № 6.—С. 529—544.
3. Ксанфомалити Л. В. О природе объекта HD 209458b: выводы из сравнения экспериментальных и теоретических данных // Астрон. вестн.—2004.—**38**, № 4.—С. 344—353.
4. Ксанфомалити Л. В. Закономерности внесолнечных планетных систем и роль металличности звезд в образовании планет // Астрон. вестн.—2004.—**38**, № 5.—С. 428—439.
5. Ксанфомалити Л. В. Внесолнечные низкоорбитальные планеты. Диссипация их атмосфер и вероятное магнитное поле // Письма в Астрон. журн.—2007.—**33**, № 7.—С. 550—560.
6. Макалкин А. Б. Проблемы эволюции протопланетных дисков // Современные проблемы механики и физики космоса / Под ред. В. С. Авдуевский, А. В. Колесниченко. — М.: Физматлит, 2003.—С. 357—396.
7. Рускол Е. Л., Сафронов В. С. Рост Юпитера как важный фактор формирования планетной системы // Астрон. вестн.—1998.—**32**, № 4.—С. 291—300.
8. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.—244 с.
9. Alonso R., Brown T. M., Torres G., et al. TrES-1: The transiting planet of a bright K0V sztrasolar giant planets // Icarus.—2000.—**143**.—P. 2—14.
11. Borucki W. J., Scargle J. D., Hudson H. S. Detectability of extrasolar planetary transits // Astrophys. J.—1985.—**291**.—P. 852—854.
12. Boss A. P. Gas giant protoplanet formation: Disk instability models with thermodynamics and radiative transfer // Astrophys. J.—2001.—**563**.—P. 367—373.
13. Boss A. P. Rapid formation of outer giant planets by disk instability // Astrophys. J.—2004.—**599**.—P. 577—581.
14. Bouchy F., Udry S., Mayor M., et al. ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters. II. A very hot Jupiter transiting the bright K star HD189733 // 2005.—arXiv:astro-ph/0510119v1.
15. Burrows A. The emerging theory of brown dwarfs and giant planets // Planetary Systems: the Long View / Eds L. M. Celnikier, J. Tran Thanh Van. — Frontieres, France, 1998.—P. 373—380.
16. Burrows A. A theoretical look at the direct detection of giant planets outside the Solar System // Nature.—2005.—**233**.—P. 261—268.
17. Butler R. P., Marcy G. W., Fisher D. A., et al. Statistical properties of extrasolar planets // Planetary systems in the Universe — observations, formation and evolution / Eds A. Penny, et al. — Ann Arbor, Michigan, USA, 2004.—P. 3—11.—(Proceedings of the 202nd Symposium of IAU, Manchester, 2002).
18. Charbonneau D. Current challenges facing planet transit surveys // Extrasolar Planets Encyclopedia / Ed. by J. Schneider.— 2003.— arXiv:astro-ph/0302216.

19. *Charbonneau D.* HD 209458 and the power of the dark side // ASP.—2003.—**294**.—P. 449—456.—(Scientific frontiers in research on extrasolar planets / Eds D. Deming, S. Seager).
20. *Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., Mayor M.* Detection of planetary transits across a Sun-like star // *Astrophys. J.*—2000.—**529**, N 1.—P. L45—L48.
21. *Charbonneau D., Allen L. E., Megeath S. T., et al.* Detection of thermal emission from an extrasolar planet // *Astrophys. J.*—2005.—**626**.—P. 523—529.
22. *Charbonneau D., Winn J. N., Latham D. W., et al.* Transit photometry of the core-dominated planet HD 149026b // *Astrophys. J.*—2006.—**636**.—P. 445—452.
23. *Giampapa M. S., Craine E. R., Hott D. A.* Comments on the photometric method for the detection of extrasolar planets // *Icarus*.—1995.—**118**.—P. 199—210.
24. *Guilott T., Chabrier G., Gautier D., Morel P.* Effect of radiative transport on the evolution of Jupiter and Saturn // *Astrophys. J.*—1995.—**450**.—P. 463—472.
25. *Hayashi C., Nakazawa K., Nakagawa Y.* Formation of the Solar system // *Protostars and Planets II* / Eds D. C. Black, M. S. Mathews. — Tucson, Univ. Arizona Press, 1985.—P. 1100—1153.
26. *Hubbard W. B., Burrows A., Lunine J. I.* Theory of giant planets // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2002.—**40**.—P. 103—136.
27. *Hubbard W. B., Podolak M., Stevenson D. J.* The interior of Neptune // *Neptune and Triton* / Ed. by D. P. Cruikshank. — Tucson, Arizona Univ. Press, 1995.—P. 109—138.
28. *Ida S., Lin D. N. C.* Toward a deterministic model of planetary formation. I. A desert in the mass and semimajor axis distributions of extrasolar planets // *Astrophys. J.*—2004.—**604**.—P. 388—413.
29. *Klahr H., Brander W.* (Eds). *Planet formation: Theory, observation, and experiments.* — Cambridge: Univ. Press, 2006.
30. *Kokubo E., Ida S.* Oligarchic growth of protoplanets // *Icarus*.—1998.—**131**.—P. 171—178.
31. *Kokubo E., Ida S.* Formation of protoplanets from planetesimals in the solar nebula // *Icarus*.—2000.—**143**.—P. 15—27.
32. *Kortenkamp S. J., Wetherill G. W.* Terrestrial planet and asteroid formation in the presence of giant planets // *Icarus*.—2000.—**143**.—P. 60—73.
33. *Kuiper G. P.* On the origin of the Solar System // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*.—1951.—**37**.—P. 1—14.
34. *Lin D. N. C.* Formation of planets and planetary systems // *Planetary systems: The long view* / Eds L. M. Celnikier, J. Tran Thanh Van. — Frontiers, France, 1998.—P. 391—394.
35. *Lin D. N. C., Bodenheimer P., Richardson D. C.* Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location // *Nature*.—1996.—**380**.—P. 606—607.
36. *Marcy G. W., Butler R. P.* Detection of extrasolar giant planets // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1998.—**36**.—P. 57.
37. *Marov M. Ya.* Small bodies in the Solar system and some problems of cosmogony // *Physics-Uspokhi*.—2005.—**175**, N 6.—P. 668—678.
38. *Mayor M.* The search for very low-mass planets // Abstract book. XXVII General Assembly of International Astronomical Union, 3—14 August 2009, Rio de Janeiro, Brasil. — Rio de Janeiro, 2009.—P. 449.—SpS06.
39. *Pollack J. B., Hubickyj O., Bodenheimer P., et al.* Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas // *Icarus*.—1996.—**124**.—P. 62—85.
40. *Safronov V. S., Ruskol E. L.* On the origin and initial temperature of Jupiter and Saturn // *Icarus*.—1982.—**49**.—P. 284—296.

41. Santos N. C., Benz W., Mayor M. Extrasolar planets: Constraints for planet formation model // *Science*.—2005.—**310**.—P. 251.
42. Sato B., Fischer D. A., Henry G. W., et al. A transiting hot Saturn around HD 149026 with a large dense core // *Astrophys. J.*—2005.—**663**, N 1.—P. 465—473.
43. Weidenshilling S. G. Growing Jupiter's core by runaway accretion // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**180**.—P. 57—70.
44. Wetherill G. W. How special is Jupiter? // *Nature*.—1995.—**373**.—P. 470—478.
45. Wetherill G. W. The formation and habitability of extra-solar planets // *Icarus*.—1996.—**119**.—P. 219—238.
46. Wuchterl G. Giant planet formation // *Icarus*.—1995.—**106**.—P. 323—334.
47. Wuchterl G. Giant planet formation — a theoretical timeline // *Planetary systems in the Universe — observations, formation and evolution / Eds A. Pennyet et al. — Ann Arbor, Michigan, USA, 2004.*—P. 167—174.—(Proceedings of the 202nd Symposium of IAU, Manchester, 2002).
48. Zelenyi L. M., Zakharov F.V., Ksanfomality L.V. The Solar system: current understanding and future prospects // *Physics-Uspekhi*.—2009.—**179**, N 10.—P. 1118—1140.
49. Zuckerman B., Foveille T., Kastner J. H. Inhibition of giant planet formation by rapid gas depletion around young stars // *Nature*.—1995.—**373**.—P. 494—496.

Поступила в редакцию 01.10.09