

Планетные системы ближайших звезд

Обнаружение планет у других звезд по модуляции лучевых скоростей навсегда останется за пределами возможного.

Р.Г.Айткен. 1938 г.

Л.В.Ксанфомалити, Л.М.Зеленый, А.В.Захаров, О.И.Кораблев

Недавняя смена тысячелетий ознаменовалась сразу несколькими грандиозными открытиями в астрофизике. Мир, еще недавно казавшийся таким надежным, уходит из-под наших ног: на него приходится всего 4% массы таинственной темной Вселенной. Другое вполне сравнимое по масштабам открытие — открытие бесчисленных внесолнечных планетных систем, которое привело к глубокой ревизии представлений о происхождении самой Солнечной системы и к новым идеям о возникновении планетных систем других звезд.

В 1970-х годах аккреционная теория происхождения планетных систем казалась «почти» завершенной [1–3]. Однако, когда в 1990-х годах были открыты внесолнечные планеты, в планетную физику устремились многие талантливые исследователи, и существенный прогресс в теоретических и экспериментальных работах привел к тому, что за последние годы аккреционная теория создана практически заново. Образование планет оказалось явлением в высшей степени хаотическим, приводящим в каждом отдельном случае к различным результатам.

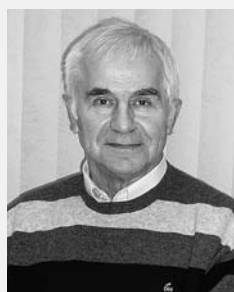
Радикально другими по сравнению с прежними представлениями теории выглядят почти все этапы образования планетных систем вообще и Солнечной системы в частности. Предполагавшаяся ее типичность оказа-



Леонид Васильевич Ксанфомалити, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиометрии Института космических исследований (ИКИ) РАН. Научный руководитель экспериментов по исследованиям планет. Область научных интересов — физика планетных тел Солнечной и звездных систем, поиск жизни на планетах. Член Международного астрономического союза.



Лев Матвеевич Зеленый, академик, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций, включая Международную академию астронавтики. Член редколлегии журнала «Природа».



Александр Валентинович Захаров, доктор физико-математических наук, ученый секретарь ИКИ РАН. Занимается физикой космической плазмы, исследованиями малых тел Солнечной системы. Член Международной академии астронавтики.



Олег Иванович Кораблев, доктор физико-математических наук, заместитель директора и заведующий отделом физики планет того же института. Специалист в области физики планет, научный руководитель экспериментов на отечественных и зарубежных космических аппаратах в программах «Марс-96», «Марс Экспресс», «Венера Экспресс», «Бети Коломбо».

© Ксанфомалити Л.В., Зеленый Л.М., Захаров А.В., Кораблев О.И., 2010

лась иллюзорной, а протосолнечная туманность возникла вовсе не в изолированной от других звезд области. Близкие звезды, среди которых были и сверхновые, сыграли важную роль в ее формировании, а временная шкала образования Солнечной системы оказалась значительно короче, чем полагали прежде. Начальные орбиты газожидких планет Юпитера и особенно Сатурна значительно отличались от современных. «Ледяные гиганты» Уран и Нептун образовались, по-видимому, совсем не там, где сегодня расположены их орбиты. Население пояса астероидов подверглось полному разрушению с последующим обновлением. Среди главных процессов в образовании планет группы Земли были их катастрофические соударения.

Многие физические процессы, которые оказались критическими в формировании планет, были известны и прежде, но почему-то внимание исследователей не привлекали. Здесь мы расскажем лишь о некоторых важных результатах теоретических исследований процессов формирования Солнечной системы и о новых экспериментальных данных, полученных в ходе изучения планетных систем сравнительно близких звезд. Но начать следует с краткого изложения истории открытия внесолнечных планет — сейчас их называют экзопланетами.

Что ожидали найти

Открытие в 1995 г. внесолнечной планеты-гиганта 51 Peg b было стартом новой планетной физики. Исследователи получили уникальный экспериментальный материал, который позволил по-новому взглянуть на аккреционные процессы*. Важным фактором для теории оказалась обнаруженная миграция (смещение) массивных эк-

зопланетных тел с высоких орбит, подобных орбитам Юпитера и Сатурна, до неожиданно низких околозвездных орбит — явление, которого Солнечная система, по-видимому, каким-то образом избежала.

Отправной точкой в поиске других планетных систем в XX в. считалась хорошо известная структура Солнечной системы. Напомним здесь, как она устроена. Близко к Солнцу располагаются четыре планеты земного типа — Меркурий, Венера, Земля с Луной и Марс. Все они имеют высокую среднюю плотность, 3.5–5.5 г/см³ и, за исключением Меркурия и Луны, обладают атмосферами. Их удаленность от Солнца, считая в расстояниях от Земли до Солнца (1 а.е. = 150 млн км), составляет от 0.4 до 1.5 единиц. На схеме рис.1 планеты земного типа находятся в центральной ее части. Гораздо дальше, в 5–30 а.е. от Солнца, располагаются планеты-гиганты, разделенные значительно большими расстояниями. В отличие от Земли они имеют газожидкую при-

роду. Эту группу возглавляет Юпитер (рис.2), масса которого в 318 раз больше массы Земли и составляет удобную одну тысячную (точнее, 1/1047) массы Солнца. Все гиганты имеют кольца разной плотности и огромное количество лун; у Сатурна их больше 60. Между орбитами Марса и Юпитера находятся орбиты многих тысяч малых планет, имеющих небольшие размеры, преимущественно около сотни километров. Размеры трех из них близки к 500 км, а диаметр Цереры около 1000 км. Размеры многих тысяч других — лишь несколько километров, а то и сотни метров (рис.3). Между орбитами гигантов также обращаются малые тела (группа Кентавров). Орбиты транснептуновых объектов (ТНО) располагаются начиная с расстояния 39 а.е. Их возглавляет двойная планета Плутон-Харон, которую, впрочем, Международный астрономический союз в 2006 г. лишил звания планеты. Логика такого решения в том, что обнаружено много других ТНО, причем

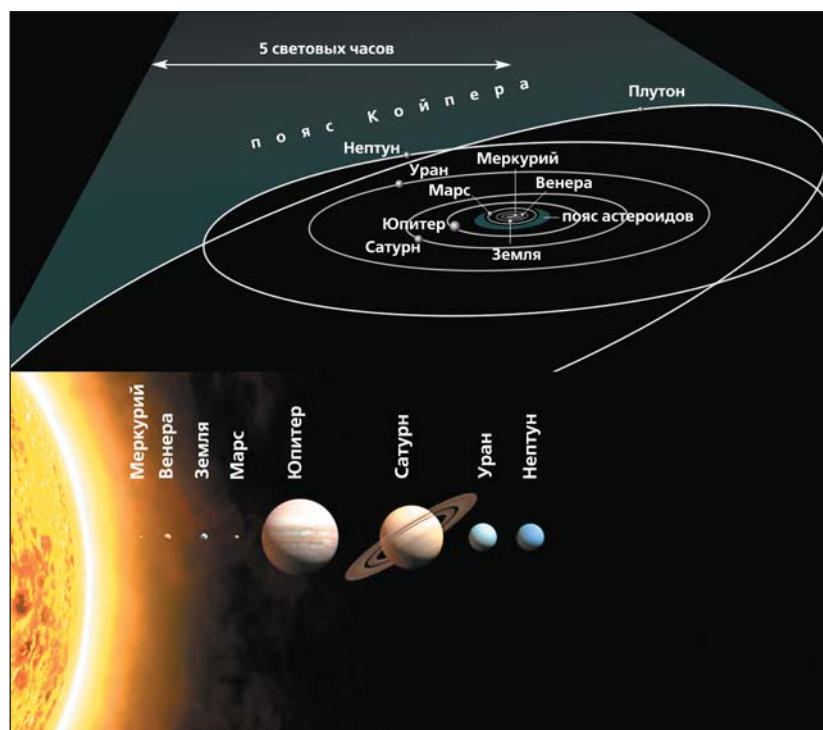


Рис.1. Солнце, орбиты планет и их относительные размеры. Орбиты планет почти компланарны.

* Аккреция — поглощение пыли и газа какими-либо небесными телами.



Рис.2. Планета-гигант Юпитер, масса которой превышает массу Земли в 318 раз. Снимок с аппарата «Cassini».

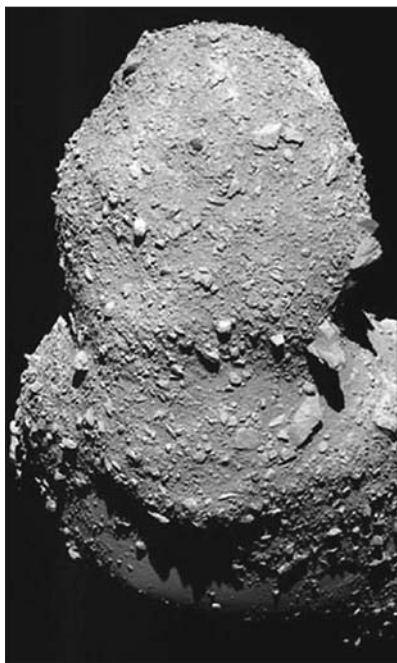


Рис.3. Астероид Итокава. Пояс астероидов состоит из сотен тысяч малых тел, орбиты большинства которых расположены главным образом между орбитами Марса и Юпитера. Но не всех. Орбита астероида Итокава проходит между орбитами Земли и Марса. Размер Итокавы около полукилометра. Снимок с японского аппарата «Hayabusa».

некоторые почти вдвое больше Плутона. Пояс ТНО тянется до 50 а.е. и дальше. Кометы, еще одна группа населения Солнечной системы, имеют типичные размеры небольших астероидов и находятся на очень вытянутых орбитах, с перигелием (самой низкой по отношению к Солнцу точкой орбиты) часто даже ниже орбиты Меркурия и с афелием (максимальным удалением) в десятки тысячи а.е. (у долгопериодических комет). Там, вдалеке, подобные тела образуют Облако Оорта, откуда под действием гравитационных полей разного происхождения они иногда (или периодически) отправляются к Солнцу. Если орбиты планет располагаются примерно в одной плоскости, близкой к плоскости орбиты Земли (эклиптике), то кометы могут прийти откуда угодно. Остается сказать, что все планеты и спутники вращаются вокруг своей полярной оси, причем, если их орбита низкая, как у Меркурия или у галилеевых спутников Юпитера, их вращение синхронизируется с орбитальным обращением. Скорости орбитального движения планет очень различны: от 50 км/с у Меркурия и 30 км/с у Земли до 2 км/с у ТНО, в соответствии с замечательным третьим законом Кеплера. Если в пределах планетных систем расстояния удобно обозначать в а.е., то для звездных расстояний астрономы предпочитают парсек (1 пк — расстояние, которое свет проходит за 3,26 года) или просто световой год. А одна астрономическая единица — это всего 8 световых минут.

Предполагалось, что и другие планетные системы тоже должны выглядеть примерно как Солнечная система с расстояния, скажем, 5 пк (удаленность ближайших звезд). Расчеты показывали, что свет звезды маскирует присутствие планет и при очень больших ухищрениях можно попытаться обнаружить только Юпитер. Так как его орбитальный период 12 земных лет, план поисков должен

был предусматривать постоянные наблюдения в течение 10—30 лет. Поэтому немногочисленные группы астрономов, которые пытались найти внесолнечные планеты, складывали результаты на полки, надеясь разобратся в них как-нибудь на досуге, а теоретики проводили малоутешительные расчеты.

Немного истории

В XX в. самой долгой была история поиска планет у звезды Барнарда, на которую стоит отвлекаться, чтобы рассказать, как их искали.

Звезда Барнарда была открыта в 1916 г. Это четвертая из ближайших к Солнцу звезд, сравнительно холодная и маломассивная красная звезда. Тогда за находки комет правительство США платило премии, и Э.Барнард был охотником за кометами. Звезда Барнарда перемещается по небу быстро, около 10 секунд дуги в год. Позже, в 1938 г., движение звезды Барнарда начал изучать другой исследователь из США, П.Ван де Камп. Он использовал астрометрический метод* и продолжал эту работу до 80-х годов XX в. Ван де Камп утверждал, что, если сложить снимки звезды Барнарда, ее след образует слабоволнистую линию. Он предполагал, что колебания возникают под действием массивной планеты, обращающейся вокруг звезды. Положение центра масс такой системы, барицентра, находится на линии, соединяющей планету и звезду, и во столько же раз ближе к звезде, во сколько масса звезды больше массы планеты. Периодические колебания положения звезды тем заметнее, чем меньше ее собственная масса. Ван де Камп считал, что планета имеет массу не менее массы Юпитера, причем, возможно, имеется не одна, а две планеты. Тогда это были единст-

* Астрометрия — это точное определение координат объекта относительно других звезд.

венные экспериментальные результаты такого рода. Известность исследований де Кампа росла, хотя верили ему не все.

В 1971 г. аспиранту обсерватории Алледжени (США) Д.Гейтвуду предложили в качестве диссертационной темы исследование движения звезды Барнарда. Когда набралось достаточное количество наблюдений, была запущена программа их обработки. Компьютеры тогда только входили в астрономическую практику. Гейтвуд рассказывал: «Это был странный случай, все произошло так быстро, за минуты. Мы смотрели на выползавшую из принтера распечатку, причем не знали, какая из звезд — Барнарда. И вот появилась звезда с возмущениями около 30 тысячных секунды дуги. Я оживился... Мы нашли! Фантастика! Мы столпились, разглядывая, обсуждая, и тогда я увидел номер звезды. Это *не была* звезда Барнарда! Это была двойная звезда с возмущающим компаньоном». А след звезды Барнарда оказался совершенно ровным.

Ван де Камп умер в 1995 г., в год, совпавший с открытием первой подлинной экзопланеты, 51 Peg b. До конца своих дней он настаивал на существовании планет у звезды Барнарда. Интерес к ней сохранялся почти до конца XX в. Позднее, уже в период 2000—2007 гг. движение звезды Барнарда исследовалось современным методом лучевых скоростей. Результаты, на пределе, могут быть интерпретированы как присутствие планеты с массой 4.7 масс Юпитера и с периодом 45 сут (де Камп говорил о двух планетах, с периодами 12 и 26 лет).

Первая подлинная внесолнечная планетная система была обнаружена на четыре года раньше, чем 51 Peg b, причем не у нормальной звезды, а у пульсара* PSR B1257+12. Пульсар когда-то был звездой огромной массы, примерно 20 масс Солнца, кото-

* Пульсары — быстровращающиеся нейтронные звезды с двумя узкими лучами, как у прожектора маяка.

рая взорвалась как сверхновая и оставила небольшую свою часть в виде сжавшейся до 10 км нейтронной звезды. Когда в 1991 г. 300-метровый радиотелескоп Аресибо (Пуэрто-Рико, США) был остановлен на ремонт, автор будущего открытия, А.Вольцшан, сумел использовать его для поиска пульсаров, расположенных над плоскостью Галактики. Этот радиотелескоп регистрирует излучение радиоисточников, когда благодаря вращению Земли они пробегают через его фокальное поле. Вольцшану удалось обнаружить слабый далекий пульсар PSR B1257+12, который находится на расстоянии 400 пк. Импульсы пульсара устойчиво принимались с периодом 6.2 мс, но с обработкой данных возникли проблемы. Были проведены независимые измерения, однако результаты остались такими же.

В 1993 г. Вольцшан пришел к выводу: причина в том, что у пульсара PSR B1257+12 оказалось три планеты, обращение которых слегка изменяет фазу приходящих импульсов. Сейчас известно, что планеты удалены от него на расстояния 0.19, 0.36 и 0.46 а.е., находящиеся примерно в тех же отношениях, что и расстояния от Солнца Меркурия, Венеры и Земли (0.39/0.72/1). Массы планет довольно значительны (0.2, 4.3 и 3.6 земной), а периоды обращения составляют 25, 67 и 98 сут.

Условия на планетах пульсара очень необычны. На их поверхность каждые 6.2 мс (160 раз в секунду) обрушиваются мощные потоки электронов, позитронов и гамма-излучения. Откуда там взялись планеты — сложный вопрос: это не могут быть планеты, которые когда-то существовали у звезды. (Нейтронные звезды — продукт взрыва некоторых типов звезд в конце их жизни; после взрыва сверхновой масса и тяготение звезды резко уменьшаются, и планеты покидают звезду). Можно предположить, что они возникли уже после взрыва, что рядом существовала другая звез-

да, вещество которой постепенно перетекало к пульсару, ускоряя его вращение, и частично конденсировалось в планеты.

Помимо пульсара PSR B1257+12 наличие планет подтверждено еще у одного или двух пульсаров*. Другие сообщения об открытии планет появлялись и раньше, в течение почти всей второй половины XX в., но они, как в случае астрометрических наблюдений звезды Барнарда, неизменно опровергались.

Наряду с астрометрией, исследователи рассматривали и другие возможные методы поиска планет. Отношение отраженного планетой светового потока к свету звезды очень мало. Например, для Юпитера оно составляет одну миллиардную света Солнца, а для Земли еще в четыре раза меньше. Если установить на орбите спутника идеальную оптическую систему с космическим телескопом диаметром около 2.5 м и с идеальным приемником, можно было бы получить 10—20 фотоэлектронов в секунду от света планеты. Но шум регистрации фототока от самой звезды превзойдет эти значения в 10 тыс. раз, и уменьшить его очень трудно. Система получается сложной, с очень длительными экспозициями.

Теоретически большими преимуществами обладает инфракрасный диапазон, где можно использовать особенности планетовской кривой излучения черного тела. Регистрируется не отраженный свет, а собственное инфракрасное излучение планеты, которое исходит от всей ее поверхности, а не только от освещенной стороны. С учетом свойств уравнения Планка расчетное отношение интенсивности инфракрасного излучения Юпитера и Солнца в диапазоне 25—50 мкм получается в 150 тыс. раз больше отношения их яркостей в оптическом диапазоне, но

* Одна планета обнаружена у пульсара PSR B1620-26, а наличие крохотной (меньше Луны) планеты у пульсара PSR B1828-11 пока под вопросом.

практически выигрыш не превышает 100 раз.

В наши дни все-таки удалось доказать возможность метода прямой регистрации (в оптическом диапазоне) наблюдениями трех очень отдаленных планет у молодой звезды HR8799 (рис.4). Это особый, исключительный, случай. А вообще число открытых на начало 2010 г. экзопланет превысило 400.

Метод, считавшийся «невозможным»

Почти все планеты найдены одним и тем же очень сложным методом, который все же можно объяснить достаточно просто. Все звезды участвуют во вращении Галактики, но каждая звезда имеет собственные, случайные скорости, которые относительно Солнца могут достигать нескольких десятков километров в секунду. Если звезда приближается к наблюдателю или удаляется от него, возникает эффект Доплера, когда световые волны как бы сгущаются или растягиваются вдоль луча, смещая весь спектр звезды в синюю или красную сторону соответственно. Регистрируя доплеровские смещения линий в спектре, удастся измерить лучевые (радиальные) скорости звезд.

Представим теперь, что у далекой звезды есть массивная планета. Она обращается вокруг звезды под действием ее притяжения. Но и звезда тоже находится под действием притяжения планеты. Они вместе обращаются вокруг общего барицентра. Хотя увидеть такую планету практически невозможно, движение самой звезды по такой *кеплеровской* орбите наложит на доплеровскую составляющую лучевой скорости звезды еще одну, переменную, составляющую, которая выдает присутствие планеты. Для нахождения доплеровской составляющей используются сдвиги положения многочисленных спектральных линий звезды относительно спектраль-

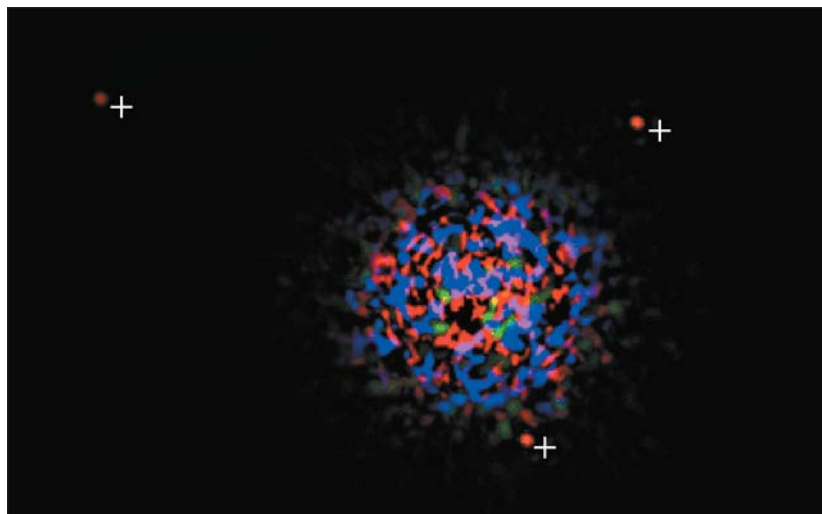


Рис.4. Экзопланеты у молодой звезды HR8799. Длительная экспозиция позволила зарегистрировать три планеты на очень высоких орбитах (24, 38 и 68 а.е.) Снимок сделан с помощью адаптивной оптики в высокогорной обсерватории Мауна-Кеа (Гавайи).

ных линий стабильного лабораторного источника. Сдвиг, который возникает благодаря *кеплеровским* скоростям, — микроскопический, а его измерения больше относятся к искусству, чем к науке. Предельными возможностями метода до 70-х годов XX в. считались скорости примерно 300—500 м/с. Для обнаружения планет по периодическому изменению знака *кеплеровской* составляющей это было совершенно бесперспективно. Поэтому в 1938 г. американский астроном Р.Айткен уверенно писал: «Обнаружение планет у других звезд по модуляции лучевых скоростей навсегда останется за пределами возможного». *Кеплеровские* скорости звезд очень малы. В Солнечной системе максимальная *кеплеровская* скорость Солнца возникает под действием притяжения Юпитера и составляет всего 12,5 м/с, под действием Сатурна — только 2,7 м/с, а под действием Земли — совсем мало, $0,09 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Это в 10—30 раз меньше лучших достигнутых результатов. Поэтому для поиска экзопланет понадобилось придумать и создать метод и аппаратуру, в 100—200 раз более чувствительные к доплеровским скоростям.

Практически все внесолнечные планетные системы (за исключением единичных объектов) найдены именно методом лучевых скоростей (МЛС), который позволил обнаружить много планет-гигантов с массами, сравнимыми с массой Юпитера, причем оказавшихся на неожиданно низких орбитах [4, 5]. Поиск прямых аналогов планет земной группы пока остается за пределами технически возможного. Тем не менее первые экзопланеты с массами в несколько масс Земли уже обнаружены, хотя и на очень низких орбитах («горячие земли»).

Принцип и схема поиска экзопланет по периодическому изменению лучевых скоростей родительской звезды приведены на рис.5. В результате обращения звезды вокруг общего барицентра системы лучевая скорость звезды приобретает знакопеременную (*кеплеровскую*) составляющую. Периодическая составляющая обычно намного меньше полной лучевой скорости. *Кеплеровская* орбитальная скорость звезды определяется периодом планеты, массами звезды и планеты и эксцентриситетом орбиты планеты. Массу звезды в первом приближении

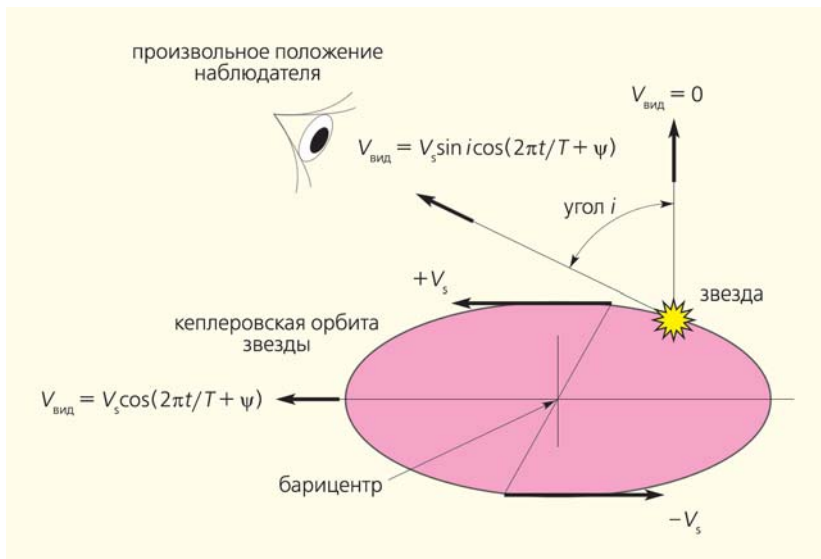


Рис.5. Звезда, обращающаяся вокруг барицентра — общего центра масс планеты и звезды. Регистрируемая методом лучевых скоростей видимая составляющая $V_{\text{вид}}$ кеплеровской лучевой скорости V_s зависит от зенитного расстояния наблюдателя по формуле $V_{\text{вид}} = V_s \sin i$. При расположении наблюдателя вблизи полюса системы кеплеровская составляющая методом лучевых скоростей не обнаруживается, но может быть найдена астрометрическими измерениями.

можно оценить через ее спектральный класс и светимость. Орбитальное расстояние и период обращения планеты связывает с массой звезды (и планеты) 3-й закон Кеплера. Как видно из рис.5, измерения позволяют определить массу планеты только с точностью до синуса угла i ,

причем, если плоскость орбиты перпендикулярна к направлению на наблюдателя, измерения невозможны. Кеплеровская составляющая скорости звезды тем выше, чем больше масса планеты и чем короче большая полуось ее орбиты. Предельные возможности метода лучевых

скоростей определяются главным образом нестабильностью фотосфер звезд солнечного типа. В благоприятном для МЛС случае неспокойствие фотосферы не превышает 2–3 м/с, а предельные возможности самого метода близки к 1 м/с. Рекордом стало недавнее достижение М.Майором и его сотрудниками порога 0.3 м/с (рис.6).

Короткий период, соответствующий близкому положению планеты типа «горячий юпитер» к родительской звезде, облегчает ее поиск. Именно короткий период позволил обнаружить первую экзопланету у звезды 51 Peg. Вид кривой кеплеровской скорости звезды чрезвычайно чувствителен к эксцентриситету орбиты экзопланеты. Круговая орбита соответствует правильной гармонической функции, а при заметном эксцентриситете появляются четные гармоники (рис.7).

Вторым главным методом поиска должен быть астрометрический, которым пользовался Ван де Камп. Здесь достигнута точность лучше 1 мс дуги, что для поиска экзопланет еще недостаточно. Но есть перспективы улучшения метода, главным образом — космическими средствами. Вообще, теоретически, существует не менее пяти методов поиска, из которых рассматриваемые здесь МЛС и астрометрический — важнейшие инструменты исследований экзопланет. Оба метода тем эффективнее, чем больше масса возмущающего тела (планеты). При этом колебания в положении звезды, который обнаруживает астрометрия, тем больше, чем *дальше* гипотетическая планета. Зато кеплеровская составляющая скорости звезды становится ничтожно малой, а наблюдения растягиваются на десятилетия. Естественно, для близкого тела необходимая длительность МЛС-наблюдений получается намного меньшей. До 1995 г. исследователи неизменно исходили из массы и 12-летнего периода Юпитера и ничего другого не ожидали.

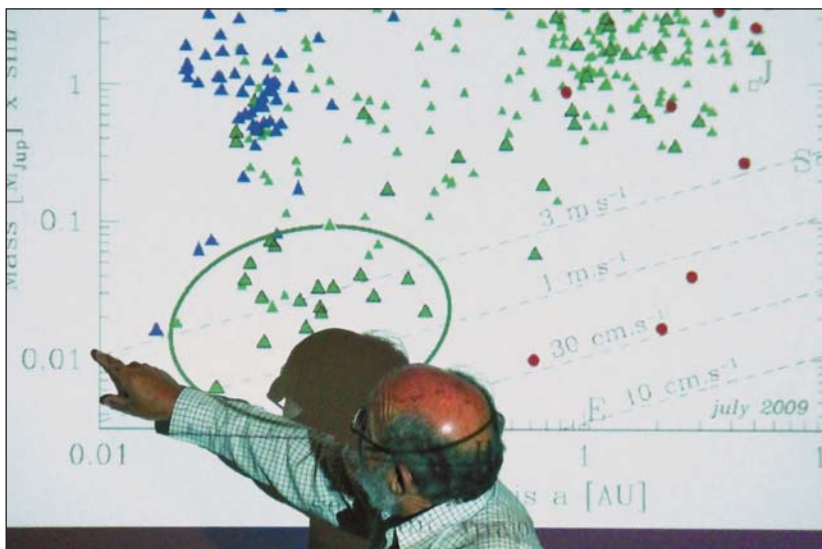


Рис.6. М.Майор, демонстрирующий диаграмму с только что открытыми экзопланетами типа «суперземля» (2009 г.).

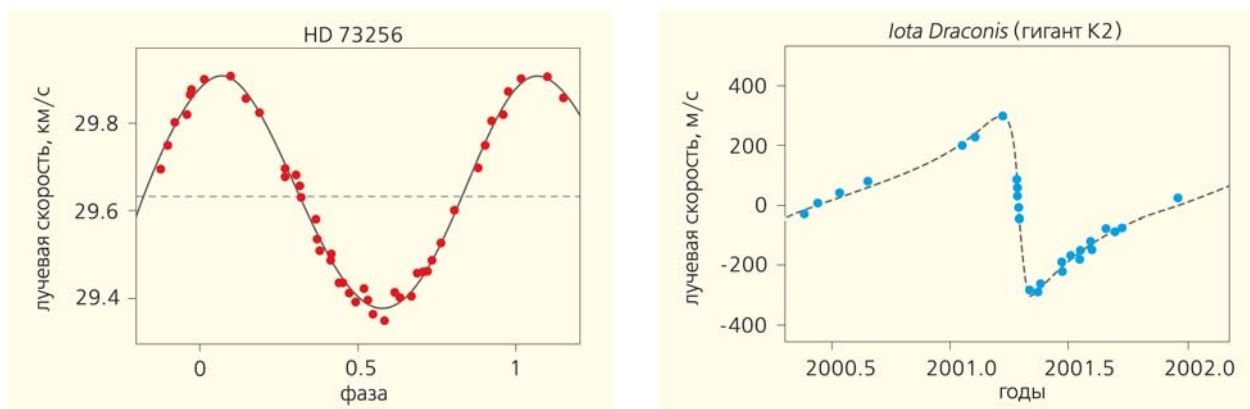


Рис.7. Периодические изменения кеплеровских лучевых скоростей. Их вид указывает на величину эксцентриситета орбиты экзопланеты. Кеплеровская орбита HD 70642 (возможного аналога Юпитера) почти круговая, эксцентриситет $e = 0.04$; у *Iota Draconis* орбита с высоким, «кометным», эксцентриситетом, $e = 0.71$.

Первая экзопланета у нормальной звезды

Астрономы совершенствовали технику и продолжали поиски. Первой «нормальной» планетой, открытой у обычной, солнцеподобной, звезды, стала планета у звезды 51 в созвездии Пегаса. (В дальнейшем экзопланеты стали называть по имени звезды с добавкой строчной буквы: b — для первой планеты, c — для второй и т.д.). Планета 51 Peg b была открыта в 1994 г., но официальное объявление о ее открытии было сделано лишь осенью 1995 г. Открытию предшествовал настоящий прорыв в технике МЛС.

В начале 90-х годов несколько групп в разных странах кропотливо совершенствовали метод лучевых скоростей. Было ясно, что доплеровские смещения линий будут ничтожными. В 1988 г. в Канаде Б.Кэмпбелл и его коллеги сумели зарегистрировать лучевые скорости около 15 м/с. Они сравнивали положение линий в спектре звезды и в наложенном на него лабораторном спектре паров фтористого водорода. Среди многих трудностей была токсичность газа.

Стремясь улучшить чувствительность метода, в Женевской обсерватории (Швейцария) М.Майор и Д.Квелоц, который

тогда был аспирантом Майора, разрабатывали спектрометр другого типа. Вместо фтористого водорода они использовали торий-аргоновый стандарт со световодом. Вскоре им удалось достичь предельной чувствительности 13 м/с. Для поиска планет были отобраны 142 звезды солнечного типа в окрестностях Солнца, включая звезду 51 в созвездии Пегаса. Используя свой спектрометр, в 1994 г. астрономы приступили к наблюдениям во французской обсерватории в Верхнем Провансе.

Аналогичные работы проводились в США. Еще в 1987 г. в Университете Сан-Франциско Д.Марси с сотрудниками начал поиск планет, применяя МЛС. Его аспирант П.Батлер предложил заменить ядовитый фтористый водород парами безвредного йода (в дальнейшем йодный стандарт в астрономии стал применяться очень широко). Йодный стандарт имеет много спектральных линий в наиболее удобной спектральной области, но требует трудоемкой обработки результатов на мощном компьютере. В перспективе чувствительность нового метода должна была составить 10 м/с. Близкие результаты действительно получить удавалось, но хорошие измерения, полученные накануне, в следующую наблюдательную ночь казались ошибочными, а

результаты различались на 20—100 м/с. На доработку техники и программ обработки ушло несколько лет. Вскоре у Марси уже имелся обширный необработанный наблюдательный материал. В 1994 г. порог удалось довести до 3 м/с. Это позволяло обнаружить планету с массой Юпитера по ее влиянию на звезду в системе, удаленной на 10 пк. По-видимому, исходя из 12-летнего периода Юпитера, Марси и Батлер не торопились с обработкой, как и другие группы исследователей. Чтобы ускорить работу, Марси и Батлер в пять раз сократили число наблюдавшихся звезд. В Йельском каталоге ярких звезд 51 Peg значилась как звезда особого беспокойного вида, поэтому 51 Peg вычеркнули тоже. На самом же деле 51 Peg — спокойная звезда солнечного типа. Ошибка в каталоге для Марси и Батлера стала роковой.

Дальнейшее развитие событий было драматическим. В отличие от подхода Марси и Батлера, метод Майора и Квелоца позволял получить результат сразу. Но через несколько месяцев с 51 Peg возникли проблемы. Часть лучевой скорости звезды, изменяясь на 60 м/с, каждые 4 сут меняла знак. Поиски неисправностей в спектрометре остались бесплодными, и в декабре 1994 г. у них в руках оказалась кривая изменения кеплеровской

составляющей лучевой скорости с периодом 4,2 сут. Можно представить себе замешательство Майора и Квелоца: неужели «год» планеты составляет всего 4,2 дня? В существование таких планет никто тогда не мог поверить. Масса планеты должна быть очень большой, вроде Юпитера, но ее орбита должна быть в восемь раз ниже даже орбиты Меркурия, около 1/20 а.е.

Желая проверить все еще раз, Майор и Квелоц решили пока промолчать. Как всегда, в марте Пегас ушел за Солнце, а до его выхода в июле 1995 г. оставалось 4 мес. Они рассчитали, какой должна быть будущая фаза кеплеровской составляющей. В июле 51 Peg появился точно с расчетной фазой. Сомнений не оставалось: найдена первая планета у нормальной звезды, но намного ближе к звезде, чем кто-либо мог предположить. «Поэтому было очень, очень трудно убедить себя, что это планета, а не пульсации звезды, или ее вращение, или что-то еще», — говорил Майор. Срочно была сдана статья в журнал *Nature*, а осенью 1995 г. на конференции в Италии Майор и Квелоц сообщили о своем открытии, что вызвало сенсацию, в том числе благодаря оценке массы планеты. Как показано на рис.5, измерения дают оценку не полной массы M , а величину $M \sin i$. Для 51 Peg b масса составляет, скорее всего, половину массы Юпитера. В дальнейшем этот тип планет из-за близости к звезде получил название «горячий юпитер», поскольку температура планеты очень высока и превышает 1000 К. Отметим, что 51 Peg относится к относительно близким звездам и находится на расстоянии всего 15 пк от Солнца.

Вскоре вести с конференции достигли США и застали Марси и Батлера врасплох. Они вернулись к наблюдениям опрощено оставленной ими 51 Peg. Через четыре ночи стало ясно, что швейцарцы правы. Единственным утешением для Марси

и Батлера было то, что вскоре в центре внимания американской прессы и телевидения оказались они сами. А Майор и Квелоц как-то отеснились на второй план, лишь в конце публикаций упоминалось, что швейцарские исследователи *тоже* обнаружили планету. Марси и Батлеру предоставили время на мощных компьютерах, и они обработали накопленные материалы о 107 звездах. Неожиданности продолжались. Если в Солнечной системе орбиты планет близки к круговым, то экзопланета у звезды 16 Cyg B в созвездии Лебедя оказалась телом с гигантским эксцентриситетом орбиты, больше подходящим комете. В дальнейшем было установлено, что таких планет большинство. В числе первых экзопланет была также τ Boo b, орбита которой имеет ничтожный эксцентриситет. Ее вероятная масса около 4 масс Юпитера, период («год») 3,3 дня, а к родительской звезде она еще ближе, чем экзопланета 51 Peg b.

В Швейцарии у Майора и Квелоца были свои проблемы. Правила *Nature* закрепляют приоритет, но запрещают разглашать содержание находящейся в печати статьи, поэтому Майор и Квелоц были вынуждены молчать, а лавры открытия доставались другим. «Это была полностью вина *Nature*», — говорил Квелоц. — Была масса звонков от журналистов, но все что мы могли сказать, это: «Извините, мы не можем ответить. Может, спросите кого-либо еще».

В последующие годы темпы открытий экзопланет все нарастали, от 6 в 1996 г. до 61 в 2007-м. Когда экзопланет набралось много, стало возможным провести статистические обобщения. Оказалось, что около трети открытых экзопланет — объекты типа «горячий юпитер». А образование планетной системы тем вероятнее, чем выше «металличность» родительской звезды, т.е. чем выше содержание в ней тяжелых элементов по сравнению с Солнцем.

«Горячие юпитеры» и их транзиты

Статистические сведения об орбитальных и массовых характеристиках экзопланет накапливались быстро. Не будет преувеличением сказать, что подавляющая часть полученных данных не предсказывалась классической теорией. Примерами могут быть низкие орбиты примерно 30% экзопланет, разделение на круговые и эксцентрические орбиты и явление миграции. Перечисленные свойства удобно рассмотреть на основе результатов, полученных при исследовании низкоорбитальных транзитов — прохождений экзопланет по диску звезды. «Горячий юпитер» HD 209458 b — первый и наиболее известный объект, у которого в 2000 г. были обнаружены транзиты (в 2009 г. их было уже 50 из 400 тогда известных планет).

Свойства обнаруженных внесолнечных планетных систем говорят о нетипичности нашей низкоэнтропийной Солнечной системы с ее круговыми планетными орбитами и массивными планетами на высоких орбитах (орбиты наших планет все практически круговые, за исключением Меркурия). Число систем, у которых обнаружено несколько планет, постоянно возрастает и превысило 30. Система коричневого карлика GJ 876 имеет две планеты (причем с орбитальным резонансом 2:1), Иpsilon Andromedae — три, 55 Cancri — 4 планеты, из которых одна имеет массу $M \sin i$, близкую к массе Нептуна (около 17 масс Земли). Разумеется, планеты земного типа, с большой полуосью орбиты, подобной земной, пока обнаружить существующими методами невозможно, но структура найденных планетных систем не походит на Солнечную: очень массивные планеты находятся на разных орбитах, в том числе на орбитах с большой полуосью от 0,05 до 2 а.е. (рис.8), а граница у 0,16—0,20 а.е. условно делит орбиты на круговые и эксцентрические.

Почему границы между круговыми короткопериодическими и долгопериодическими (преимущественно эксцентрическими) орбитами с периодом более 30 сут находятся на таком близком расстоянии от звезд, до конца не ясно. Почти все экзопланеты, которые обращаются по очень низким круговым орбитам, имеют параметр $M\sin i$ в среднем около 0.5–0.6 масс Юпитера. И наоборот, для экзопланет на высоких орбитах, соответствующих орбитам Венеры, Земли, Марса и астероидов в Солнечной системе, характерны большие и очень большие эксцентриситеты орбит, вплоть до величин, присущих кометам. Причина подобного разделения лежит, по-видимому, в механизме миграции, который переводит планеты с высоких орбит, где они образуются, на околозвездные орбиты «горячих юпитеров». Но как их орбиты превращаются в круговые и почему миграция здесь останавливается, остается неизвестным. Возможно, ответ лежит в том, что универсальным механизмом формирования планетных систем служит именно миграция планет из внешних областей во внутренние. Такой механизм отсутствует в Солнечной системе, но, возможно, существовал в пору ее формирования.

Миграция гигантов к звезде может представлять серьезную угрозу существованию таких планет, как Земля: в ходе миграции на низкие околозвездные орбиты планета масштаба Юпитера оставляет мало шансов на выживание планетам земного типа из-за неизбежных катастрофических столкновений с формирующимися телами. Фактически в ходе своей эволюции такой гигант может поглотить весь материал формирующихся планет земного типа. Другая угроза — возникновение резонансных орбит, не допускающих объединение протопланетных тел, подобно тому, как Юпитер в нашей Солнечной системе не позволил появиться планете

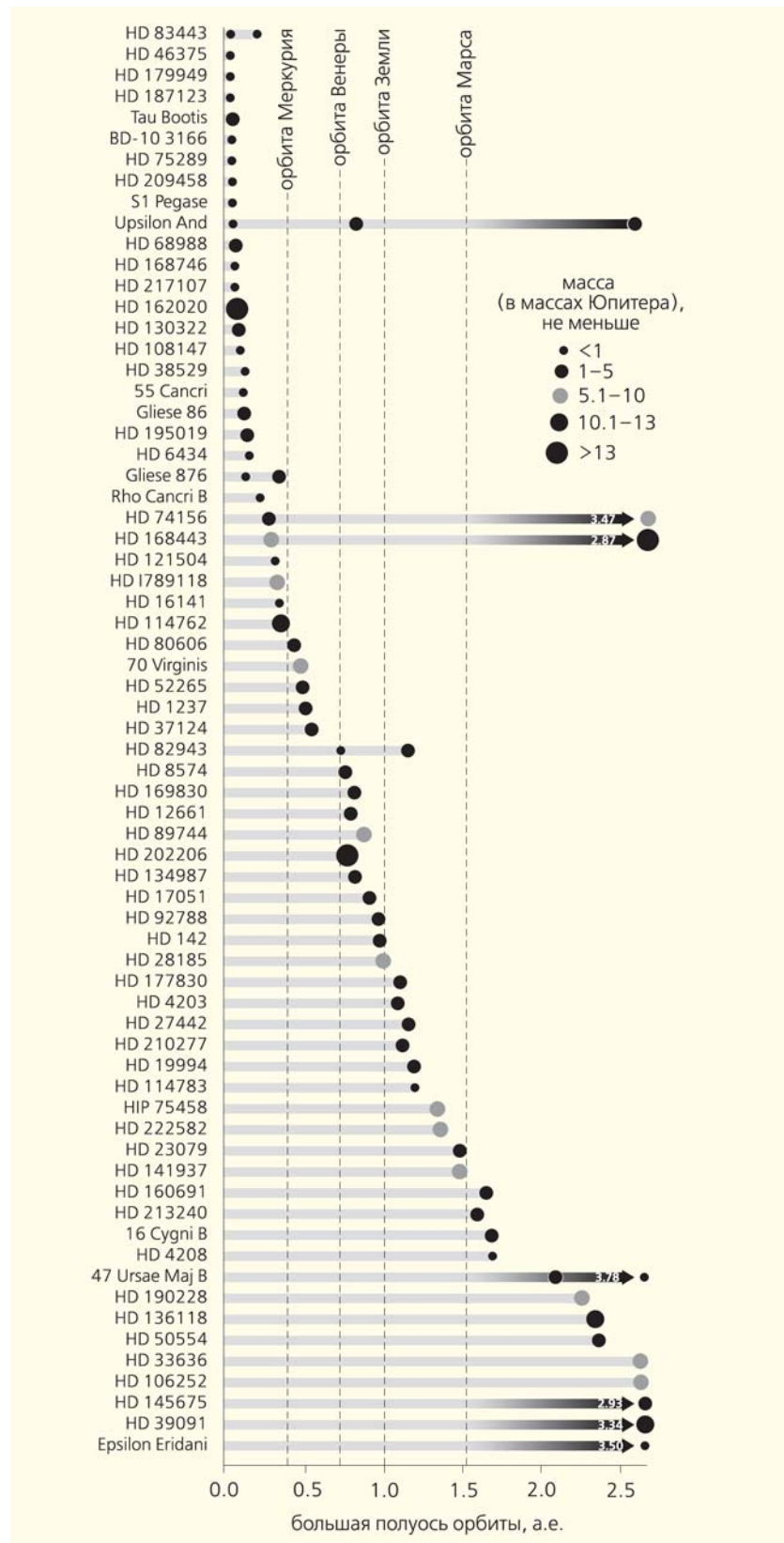


Рис.8. Распределение орбит экзопланет. Около 30% экзопланет-гигантов находятся на крайне низких круговых орбитах, менее 0.20—0.17 а.е. Более высокие орбиты характеризуются большими эксцентриситетами.

в поясе астероидов, между орбитами Марса и Юпитера.

Среди экзопланет на низких орбитах, с очень коротким периодом, известны объекты с периодом около 10 ч. Их орбита удалена от поверхности звезды всего на пару миллионов километров. Такая близость планеты к звезде приводит к тому, что некоторые из «горячих юпитеров» оказываются «очень горячими юпитерами», с температурой до 1600 К и выше. Высокой температуре способствует также низкая отражательная способность «горячих юпитеров», темные аэрозоли в атмосфере которых состоят из паров и конденсатов силикатов, углерода и металлов. Планеты с большой массой в состоянии удерживать атмосферу, даже со столь высокой температурой и состоящую из легких газов —

водорода и гелия, на которые во многих случаях приходится основная масса планеты. Но не всегда. Среди нарушителей правил — экзопланета HD 149026 b (подробности — во второй части статьи).

У звезд с планетами типа «горячий юпитер» заметная часть открытых экзопланет, около 100, имеет большую полуось орбиты в пределах 0.15 а.е., что в несколько раз ниже, чем орбита Меркурия в Солнечной системе (рис.9). При случайном благоприятном положении наблюдателя относительно плоскости орбиты экзопланеты (вернемся к рис.5) удастся регистрировать транзиты. Вероятность обнаружить такую систему невысока. Открытая в 2000 г. первая экзопланета с транзитами, HD 209458 b, в течение пяти лет вообще оставалась единст-

венным таким объектом среди близких звезд.

Незадолго до открытия первого короткопериодического «горячего юпитера» (51 Peg b) возможности обнаружения транзитов, исходя из свойств Юпитера, оценивались пессимистически. Но открытие «горячих юпитеров» все изменило. Для планет на низких, менее 0.15 а.е. орбитах, вероятность наблюдения регулярных транзитов составляет более 6% для удвоенного угла j ($j = 90^\circ - i$). Рисунок 10 показывает, как происходят транзиты. На врезке показано положение орбиты, необходимое для их наблюдений. Для системы вроде HD 209458, с радиусом круговой орбиты экзопланеты 0.047 а.е. и радиусом звезды на 15% больше солнечного, вероятность достигает 10%. Это несравнимо выше известной низкой вероятности обнаружения внешним наблюдателем прохождений Юпитера по диску Солнца (все-го $8 \cdot 10^{-4}$) при его 12-летней периодичности. В системе HD 209458 транзиты повторяются каждые 3.5 сут.

Продолжительность самих транзитов определяется радиусом звезды, большой полуось орбиты планеты (на круговой орбите — радиусом орбиты) и суммарной массой звезды и планеты. Радиусы звезд, начиная от поздних подклассов F и до ранних подклассов M, различаются не слишком значительно. Из 3-го закона Кеплера удастся найти длительность экваториального транзита. Например, для экзопланеты HD 209458 b длительность транзита составляет 3.15 ч. Глубина ослабления яркости, вызываемая транзитами планеты, составила 1.5%. Как было показано позже, глубина модуляции даже 0.15% все еще позволяет получить необходимые данные. Транзиты позволяют узнать много подробностей о физических свойствах планеты, ее атмосферы (и даже самой звезды) и служат главным астрофизиче-

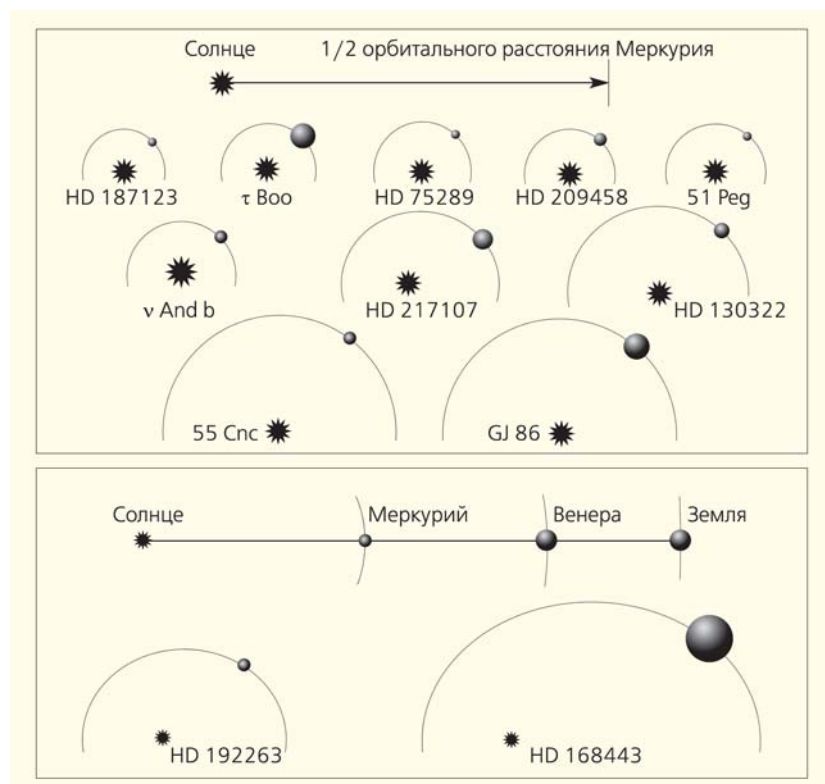


Рис.9. Орбиты первых экзопланет в сравнении с характерными расстояниями в Солнечной системе. В это было трудно поверить: орбитальный период («год») первых обнаруженных внесолнечных планет составлял всего несколько суток. В верхней части рисунка масштаб указан половиной большей полуоси орбиты Меркурия, в нижней — орбитами Меркурия, Венеры и Земли. Примерно выдержаны относительные размеры звезд и планетных орбит.

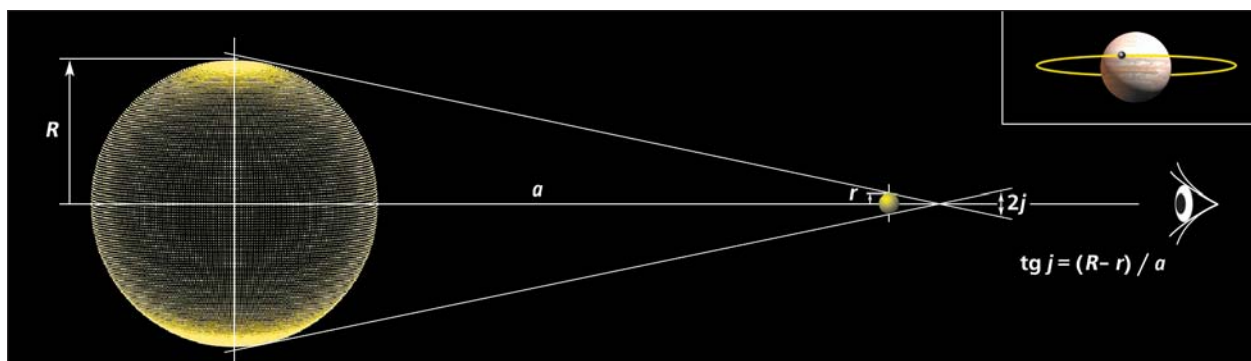


Рис.10. Схема наблюдений прохождения экзопланеты по диску звезды (транзитов), проявляющегося в периодическом ослаблении блеска звезды. Ослабление светового потока при транзитах планеты HD 209458 b достигает 1.6% в видимой части спектра. Вероятность случайного расположения наблюдателя в пределах угла $2j$ раскрыва кольцевого сектора зависит от большой полуоси a орбиты планеты. Если вероятность того, что транзиты Юпитера увидит внешний наблюдатель, составляет всего $6 \cdot 10^{-4}$; вероятность наблюдения транзитов планеты HD 209458 b достигает 0.16.

ским инструментом исследования экзопланет.

Продолжительность транзита зависит также от близости наблюдателя к плоскости орбиты. Глубина ослабления света при транзитах (рис.11) сразу дает отношение диаметров планеты и звезды, отношение продолжительности транзита к расчетному значению указывает широту прохождения, крутизна склонов кривой содержит информацию об атмосфере экзопланеты. Форма кривой транзита вместе с длиной волны указывает на свойства атмосферы самой звезды (так называемый «закон потемнения к краю»). Транзиты сразу позволяют исключить неизвестный множитель $\sin i$ из массы экзопланеты (он становится близким к единице). Благодаря небольшому различию в знаке смещения спектральных линий от правого и левого лимбов вращающейся звезды в некоторых случаях удается разделить слабые признаки пересечения планетой приближающегося или удаляющегося лимбов. Все это

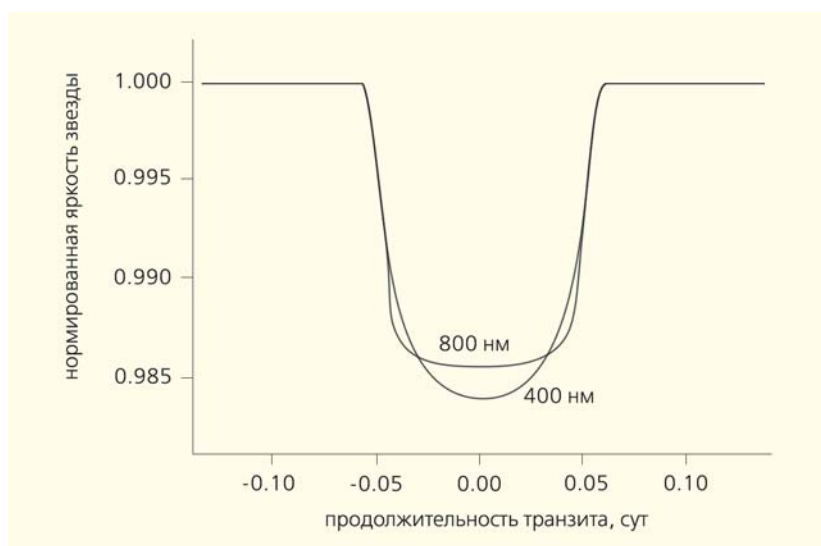


Рис.11. Первые наблюдения транзитов экзопланеты HD 209458 b, выполненные в 2000 г. с орбитальной обсерватории HST.

удается получить из транзитов, если звезда достаточно яркая. Полученные из ослабления света звезды размеры планеты позволяют определить ее среднюю плотность, которая у разных экзопланет оказалась совершенно различной, от плотности газо-

жидких планет 0.3 г/см^3 до плотности ядра из каменных пород, 5.5 г/см^3 . Различия с высокой вероятностью указывают на разные условия и, возможно, на разные процессы формирования этих тел. ■

Окончание следует

Литература

1. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 1969.
2. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М., 1979.
3. Hayashi C., Nakazawa K., Nakagawa Y. Formation of the Solar System // Protostars and Planets II / Eds D.C.Black, M.S.Mathews. Tucson, 1985. P.1100—1153.
4. Ксанфомалити Л.В. // Астрон. вестн. 2004а. Т.38. №4. С.344—353.
5. Ксанфомалити Л.В. // Астрон. вестн. 2004б. Т.38. №5. С.428—439.

Планетные системы ближайших звезд

Л.В.Ксанфомалити, Л.М.Зеленый, А.В.Захаров, О.И.Кораблев

Три «горячих юпитера»

Свойства многочисленных экзопланет типа «горячий юпитер», проанализированные рядом научных коллективов, иллюстрируют три примера: экзопланеты HD 209458 b, HD 149026 b и HD 189733 b. Во всех трех случаях наблюдаются транзиты, поэтому масса этих экзопланет определена достаточно точно. На диаграмме рис.12 первые две расположены в самой верхней (HD 209458 b) и нижней (HD 149026 b) ее частях, а последняя (HD 189733 b) представляет «очень горячие юпитеры».

HD 209458 b. Свойства системы HD 209458, включающей первую экзопланету с транзитами, оказались удобными для исследований, несмотря на ее умеренную удаленность (47 пк). HD 209458 — звезда близкого к солнечному классу (G0V), слишком слабая для невооруженного глаза. Ее спокойная фотосфера допускает МЛС-измерения вплоть до 3 м/с. Звезда немного больше Солнца по массе (1.06 солнечной массы) и по радиусу (1.18 солнечного). Она старше Солнца (возраст 5.2 млрд лет); ее планетная система прошла долгий путь эволюции. Хотя пока нам известна только одна ее планета, это именно тот наиболее интересный объект нового типа — «горячий юпитер» с 3.5-суточным периодом, типичный для внесолнечных систем, но отсутствующий в Солнечной системе.

Окончание. Начало см. в №8.

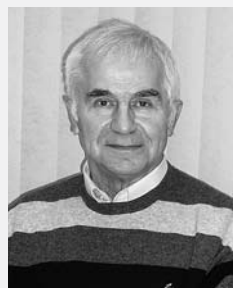
© Ксанфомалити Л.В., Зеленый Л.М., Захаров А.В., Кораблев О.И., 2010



Леонид Васильевич Ксанфомалити, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией радиометрии Института космических исследований (ИКИ) РАН. Научный руководитель ряда экспериментов по исследованиям планет. Область научных интересов — физика планетных тел Солнечной и звездных систем, поиск жизни на планетах. Член Международного астрономического союза.



Лев Матвеевич Зеленый, академик, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций, включая Международную академию астронавтики. Член редколлегии журнала «Природа».



Александр Валентинович Захаров, доктор физико-математических наук, ученый секретарь ИКИ РАН. Занимается физикой космической плазмы, исследованиями малых тел Солнечной системы. Член Международной академии астронавтики.



Олег Иванович Кораблев, доктор физико-математических наук, заместитель директора и заведующий отделом физики планет того же института. Специалист в области физики планет, научный руководитель экспериментов на отечественных и зарубежных космических аппаратах в программах «Марс-96», «Марс Экспресс», «Венера Экспресс», «Бени Колombo»

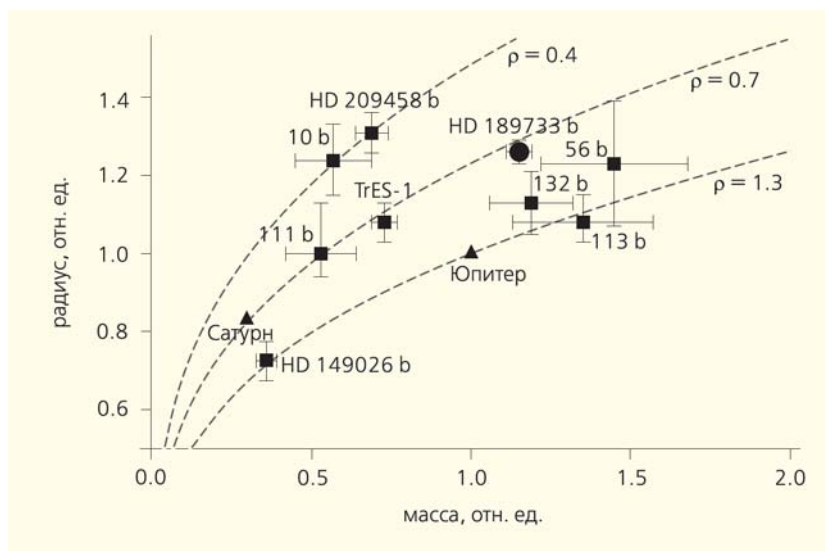


Рис.12. Характеристики масса—радиус для девяти экзопланет с транзитами (включая HD 209458 b, HD 149026 b, TrES-1) и пяти объектов, открытых по программе OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, квадраты) и HD 189733 b (кружок), в сравнении с Юпитером и Сатурном (треугольники), согласно [6]. У штриховых кривых указана средняя плотность в г/см³.

Впервые транзиты экзопланеты HD 209458 b (рис.11, см. первую часть статьи) наблюдались наземными и космическими средствами почти одновременно, в 2000 г. Глубина уменьшения яркости звезды при проходе планеты достигает 1.6%. Период HD 209458 b, благодаря частым транзитам, определен с высокой точностью, 3.524738 сут. Большая полуось планетной орбиты составляет 0.045 а.е. По длительности транзита найдена широта прохождения планеты по диску звезды (угол $i = 86^\circ$). Масса HD 209458 b установлена точно и составляет 0.67 массы Юпитера. Это соответствует очень низкой средней плотности планеты, 0.29—0.33 г/см³, что вдвое меньше средней плотности Сатурна (0.64 г/см³). Из результатов наблюдений HD 209458 b были сделаны первые важные выводы относительно природы других аналогичных гигантов.

Температура атмосферы данного «горячего юпитера» составляет примерно 1350 К на уровне, эквивалентном 1 кбар в атмосфере настоящего Юпитера. Вы-

сокая температура определяется и низкими отражательными свойствами атмосферы экзопланеты (менее 0.28), и тем, что постоянная излучения родительской звезды HD 209458 в 1.5 раза превышает солнечную. В отличие от планет-гигантов Солнечной системы, экзопланеты очень темные. Атмосфера «горячего юпитера» должна быть обеднена тугоплавкими элементами (железом, алюминием, кремнием), конденсирующимися при температурах 1700—2500 К (они оседают в атмосфере). На уровне давления 10 бар предполагается расположение плотных облаков, в составе которых — силикаты, Mg₂SiO₄ и/или MgSiO₃. Возможно присутствие других соединений и частиц восстановленного железа. В спектре планеты, в ближнем ИК-диапазоне, должны наблюдаться полосы CO, CO₂ и CH₄. Надоблачная атмосфера должна содержать пары H₂O, TiO и CH₄. Проведенные спектральные исследования атмосферы HD 209458 b подтвердили такие предположения.

HD 149026 b. В 2005 г. были обнаружены транзиты экзопла-

неты у второй (после HD 209458) сравнительно яркой звезды близкого к солнечному класса, HD 149026. Расстояние до нее составляет 79 пк. Звезда в 1.3 раза массивнее Солнца, а ее радиус больше солнечного в 1.45 раза. В противоположность предыдущей, эта звезда моложе Солнца (возраст около 2 млрд лет). Масса планеты около 0.36 массы Юпитера (1.2 массы Сатурна, или 115 масс Земли), период 2.8766 сут, орбитальное расстояние 0.042 а.е. Радиус орбиты всего в шесть раз больше радиуса звезды, а отношение радиусов звезды и планеты равно 20.

Уже первые результаты наблюдений транзитов HD 149026 b указали на необычные свойства экзопланеты. Малое ослабление яркости звезды при транзите (в пять раз меньше, чем в случае HD 209458 b) указывает на относительно небольшой радиус планеты (он составляет 0.85 радиуса Сатурна), что противоречит ее сравнительно большой массе. HD 149026 b представляет собой новый класс внесолнечных планет. По своему положению она соответствует «горячим юпитерам», но обладает массивным ядром из тяжелых элементов: судя по массе и радиусу, у HD 149026 b есть гигантское ядро (массой около 67 масс Земли) из плотных составляющих, со средней плотностью около 5.5 г/см³. Формирование такой планеты трудно объяснить в рамках существующих теорий. В поисках объяснения привлекаются аналогии с Нептуном (в свою очередь, возникновение Нептуна в Солнечной системе объяснить тоже сложно). Если следовать теории гравитационной неустойчивости (см. ниже), формирование планеты происходило под действием излучения находившейся достаточно близко массивной звезды, что вызвало испарение внешних газовых оболочек. В конце концов, если исходить из солнечного состава протопланетного диска, так мог возникнуть странный Нептун с ядром в 17 масс Земли. Но в случае

экзопланеты HD 149026 b с ее гигантским ядром сценарий гравитационной нестабильности должен быть сложнее. Такому объекту вообще трудно окончательно сформироваться за время существования системы HD 149026.

На рис.13 сравнивается предполагаемое внутреннее строение HD149026 b и Юпитера. Только значительное различие в строении этих гигантов может объяснить высокую среднюю плотность планеты. Предложены несколько гипотез о каменном или ледяном (в планетофизическом смысле) составе ядра HD149026 b.

HD 189733 b. Одна из наиболее интересных планет с наблюдаемыми транзитами, HD 189733 b, относится к «очень горячим юпитерам» (находящимся на наиболее низких орбитах). Звезда HD 189733 находится гораздо ближе к Земле, чем HD 209458, всего в 19.3 пк. Она меньше Солнца, более позднего класса (K1-K2); ее масса — 0.82, а радиус — 0.76 солнечных. Отношение радиусов планеты и звезды равно 0.172. Благодаря этим особенностям и близости система с планетой HD 189733 b относится к удобным объектам исследований. Глубина ослабления потока от звезды при транзитах HD 189733 b рекордная (3%), причем транзиты были сначала обнаружены спектроскопически (по эффекту смещения спектральных линий при пересечении лимба). Период планеты всего 2.219 сут, большая полуось орбиты — 0.0313 а.е.; масса составляет 1.15 массы Юпитера, а радиус превышает радиус Юпитера в 1.26 раз. Средняя плотность 0.75 г/см^3 , выше плотности Сатурна. Таким образом, масса и радиус HD 189733 b наибольшие из всех перечисленных.

История низкоорбитальных «горячих юпитеров» неизбежно предполагает миграцию их орбит — с высоких на околосредние. Они не могли образоваться на своих наблюдаемых сегодня

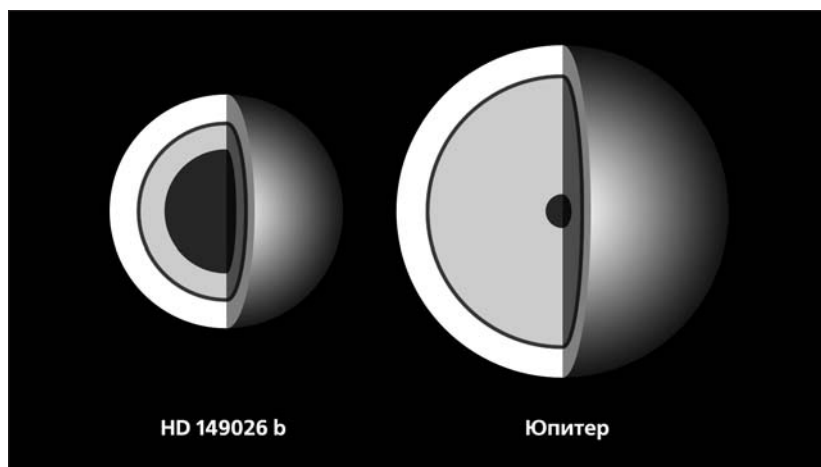


Рис.13. Предполагаемое внутреннее строение экзопланеты HD 149026 b в сравнении с Юпитером. Высокая средняя плотность (вероятно, около 1.2 г/см^3) указывает на новый тип короткопериодических экзопланет.

орбитах. Ниже мы перейдем к этим противоречиям, но сначала следует рассказать о наиболее интересных последних открытиях — экзопланетах, чем-то похожих на Землю.

«Суперземли» — экзопланеты малой массы

Поиск экзопланет, подобных Земле по массе и орбитальному расстоянию, наземными средствами с помощью МЛС пока невыполним. Но именно такие планеты вызывают наибольший интерес. Нет идеи, более популярной, чем поиск жизни в других мирах. Еще философы античности в своих догадках об устройстве Вселенной рассуждали о возможности обитания живых существ вне Земли. Обитаемость планет считалась почти очевидной. Ныне поиск жизни на планетах, пусть даже на самом примитивном уровне, активно обсуждается учеными. В этом отношении большие надежды вызывают два исследовательских аппарата на околоземной орбите — «CoRot», который работает уже два года и «KEPLER», запущенный в марте 2009 г. Оба предназначены для поиска экзопланет, причем «KEPLER» должен исследовать до

100 тыс. звезд. С помощью аппарата «CoRot» в 2007 и 2008 гг. изучались два участка неба по 4 кв. градуса, в направлениях центра и антицентра Галактики. Обнаружены 46 экзопланет с транзитами.

Главная и наиболее интересная находка — экзопланета CoRoT-7b, первая планета малой массы с транзитами, которые позволили достаточно точно определить ее свойства. Родительская звезда — оранжевая K0V, 0.93 массы Солнца, с эффективной температурой 5275 К. Звезда далекая, на расстоянии около 150 пк, к тому же с неспокойной фотосферой, что ограничивает возможность МЛС. Поэтому результаты были получены объединением наблюдений транзитов с борта «CoRot» со спектральными наблюдениями на спектрографе HARPS (телескоп 3.5 м, европейская обсерватория La Silla в Чили). В системе звезды обнаружены две планеты, CoRoT-7b и 7c. Обе находятся на очень низких орбитах, 0.0172 и 0.046 а.е. Масса CoRoT-7b в 4.8 раз, а радиус — в 1.7 раз больше массы и радиуса Земли, что дает среднюю плотность 5.6 г/см^3 , очень близкую к средней плотности Земли (5.52 г/см^3). Ускорение свободного падения всего на 66% боль-

ше земного, но на этом сходство «суперземли» CoRoT-7b с Землей заканчивается: из-за низкой орбиты и высокой светимости родительской звезды температура поверхности планеты достигает 2000 К, что исключает какие-либо надежды на присутствие биосферы. Орбитальный период необычайно короткий — менее суток, всего 20.4 ч. Период второй экзопланеты, CoRoT-7c, — 3.7 сут, а масса, по первым оценкам, 8.4 массы Земли.

Еще до открытия CoRoT-7b о другой «суперземле» сообщили М.Майор и его швейцарские коллеги. Коллектив Майора, который открыл первую экзопланету 51 Peg b, настолько усовершенствовал метод лучевых скоростей, что у небольшой звезды позднего класса Gl 581 им удалось обнаружить четыре экзопланеты с орбитальными периодами от 3.15 до 67 сут и массами, соответственно, от 1.94 до 7 масс Земли. Главная особенность эксперимента, обеспечившая успех, заключается в малой массе звезды, благодаря чему кеплеровские орбита и скорость звезды значительно возрастают.

Д.Шарбонэ с международным коллективом (в который также входит Майор) пошел еще дальше. В окрестностях Солнца были выбраны 2000 небольших (карликовых) звезд (с массами от 0.10 до 0.35 солнечной), которые в поисках транзитов систематически наблюдались автоматизированной системой из восьми небольших телескопов. Идея в том, что у небольшой звезды транзиты планеты должны создавать более глубокое ослабление света. Так и оказалось. У старой карликовой звезды GJ 1214 (удаленность от Солнца 13 пк) с диаметром 0.21 солнечного обнаружены транзиты длительностью 52 мин, повторяющиеся каждые 1.58 сут, достаточно глубокие, чтобы определить свойства планеты. Свойства GJ 1214 b оказались новым экзопланетным сюрпризом. Ее масса оценена как 6.55 массы

Земли, а радиус — 2.68 радиуса Земли, что дает среднюю плотность всего 1.87 г/см³. Ускорение свободного падения на поверхности 91% земного. Родительская звезда сравнительно холодная (3030 К), поэтому эффективная температура планеты GJ 1214 b тоже невысока и в зависимости от альбедо оценивается в 393—541 К, несмотря на то, что орбита планеты проходит всего в 2 млн км над поверхностью звезды.

Массы планет CoRoT-7b и GJ 1214 b близки, но сравнение плотности последней с теоретическими моделями указывает на совсем другую природу GJ 1214 b. Исходный материал протопланетных дисков более или менее сходен по составу. Диски состоят из газовой смеси водорода и гелия и включают 1—2% твердого вещества — соединений или конденсатов углерода, азота, кислорода, кремния, магния, железа и никеля. Такой состав характерен почти для всех звезд нашей Галактики, в том числе Солнца. Относительные содержания элементов различаются не более чем в два раза. В образующихся планетах земного типа кислород связывается в горных породах, но значительная его часть уходит на образование воды. Поэтому, исходя из состава газовой пылевой протопланетных дисков и молодых звезд, плотности 1.9 г/см³ более всего соответствует комбинация скальных пород и металлов в ядре, большого количества воды и протяженной водородно-гелиевой атмосферы, на которую приходится около 0.05% массы планеты. Большая высота атмосферы отчасти снижает среднюю плотность планеты. Вероятно, GJ 1214 b — это планета с водородно-гелиевой атмосферой и глобальным океаном над металло-силикатными ядром и мантией. По характеристикам GJ 1214 b находится где-то между планетой-океаном (состоящей на 75% из H₂O, на 22% из Si и на 3% из Fe, сосредоточенного в ядре планеты) и пла-

нетой типа Земли (67.5% Si в мантии и 32.5% Fe в ядре планеты). Такой мир немного напоминает Нептун, но очень мало похож на Землю и вряд ли может рассматриваться в качестве возможного места обитания жизни, тем более что даже минимальную для него температуру 393 К трудно считать комфортной для аминокислотной формы жизни. Давление у поверхности океана при такой температуре (120°C) должно составлять 2 бар, атмосфера будет насыщена водяным паром. Если температура близка к верхней оценке (268°C), вода все еще остается жидкой (критическая точка воды 374°C), но давление атмосферы, насыщенной водяным паром, должно достигать 55 бар.

Открытие планет типа «суперземля» неизбежно затрагивает наши представления о том, где во Вселенной могла бы зародиться жизнь. Так называемые «зоны обитаемости», пригодные для существования аминокислотной формы жизни, в звездных системах узки. На рис.14 показаны положения комфортных зон для Солнечной системы и для системы Gl 581. У нас такая зона фактически включает только Землю и лишь слегка задевает Марс. Но сравнение с Gl 581 показывает, что положение не так уж безнадежно. Уже первые экзопланеты с малой массой, «суперземли», демонстрируют, что разнообразие их физических свойств несколько не меньше, чем у «горячих юпитеров».

О противоречиях классической аккреционной теории

Планеты Солнечной системы, как и планеты других звезд, представляют собой сложный конгломерат твердого и жидкого вещества, нейтрального газа и плазмы, с захватываемыми 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 образования звезд и планетных дисков была разработана давно, но теперь, благодаря успехам теоретической астрофизики и наблюдательной астрономии, процессы формирования планетных систем становятся более понятными.

Основы аккреционной теории были заложены в XVIII в. работами Э.Сведенборга, И.Канта и П.-С.Лапласа. Позднее, уже в XX в., в нашей стране важный вклад в теорию образования планетных систем внесли О.Ю.Шмидт и его школа из Института физики Земли РАН. Согласно данной концепции, в каком-то фрагменте гигантского межзвездного газовой-пылевого 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.15), появляются мелкие центры конденсации, затем планетезимали, те, в свою очередь, сталкиваясь и объединяясь, становятся зародышами планет, протопланетами. Затем, в результате множественных столкновений, протопланеты образуют планеты, которые возникают благодаря аккреции вещества из газовой-пылевого диска, окружающего звезду, на образующееся ядро планеты.

В классической аккреционной теории предполагалось, что образование планет-гигантов происходит в несколько этапов. Во второй половине XX в. общепринятой была двухступенчатая схема образования Юпитера и Сатурна. В схематичном из-

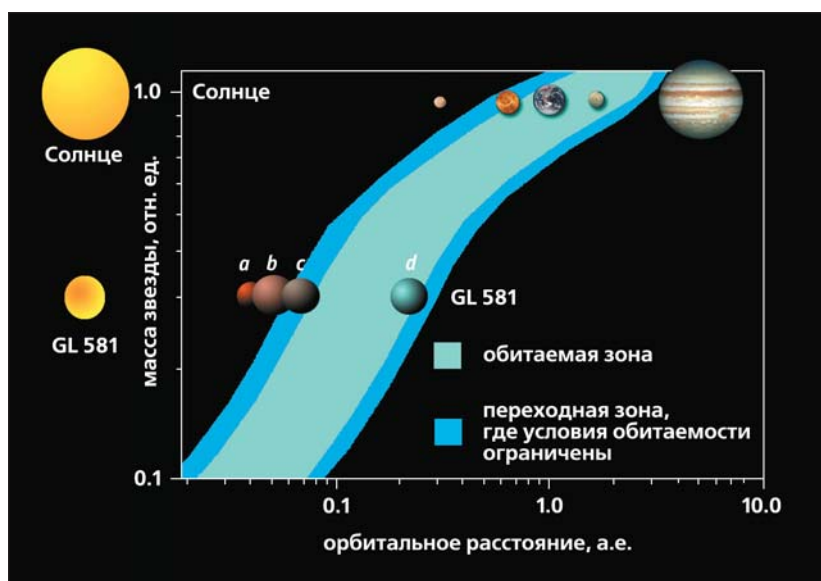


Рис.14. Расположение зоны обитаемости в зависимости от типа звезды, комфортной для жизни аминокислотно-нуклеино-кислотного типа. (Из работы [7].)

ложении — это длительная, до 10^8 лет, столкновительная аккреция субмикронных частиц твердого материала во внутренней части протопланетного диска, которые превращались сначала в частицы микронного 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 объединялись в столкновениях и создавали ядро будущей планеты-гиганта с массой от 10 до 25 масс Земли (в более поздних работах произведена «уценка» массы ядра до 5—10 и даже до 2—3 масс Земли). Затем происходил более быстрый захват ядром вещества газовой фазы (главным образом водорода) из протопланетного диска. Расчеты неизменно показывали, что на весь процесс должно было уходить до 10^8 лет.

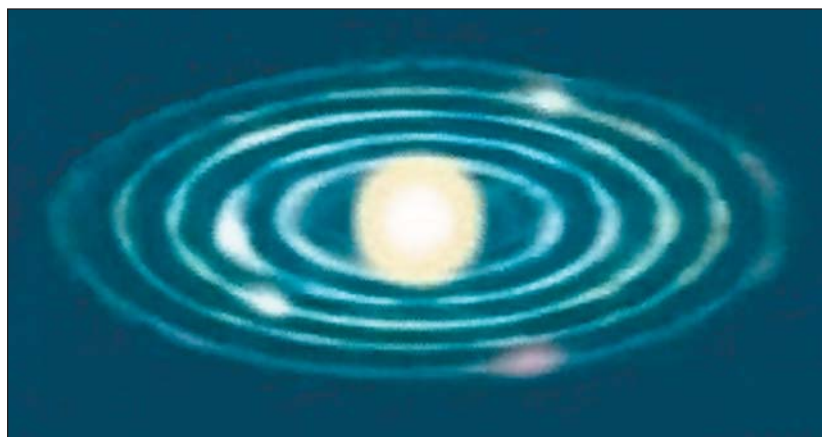


Рис.15. Формирование Солнечной системы согласно ранним представлениям аккреционной теории (XX в.). Газово-пылевое облако вращается и постепенно уплощается, превращаясь в тонкий диск вокруг формирующегося в центре Солнца. Образуются кольца, из которых затем формируются планеты.

Однако выполненные в конце XX в. многочисленные наблюдения протопланетных дисков в стадии формирования звездно-планетных систем свидетельствуют о весьма ограниченном времени исчезновения водорода и гелия из диска. Они удерживаются там менее 10^7 , а в ряде случаев даже менее 10^6 лет. Естественно, это противоречит известному водородному (в основном) составу атмосфер Юпитера и Сатурна. На газообразную составляющую приходится 98% исходной массы протопланетных дисков. Проводились новые расчеты, где учитывались новые эффекты самоускоряющегося роста протопланеты. Но время все еще оставалось слишком большим, около 10^7 лет, что противоречит наблюдательным данным. Последующие наблюдения показали, что на завершение диссипации (потери) газообразной составляющей уходит в среднем 3 млн лет. После этого газового мате-

риала для формирования планеты практически не остается.

Классическая схема встречается также с большими трудностями при попытках объяснить распределение углового момента в Солнечной системе. Парадоксальный факт — низкая величина углового момента Солнца — был известен давно. Убедительных объяснений ему теория предложить не смогла, что вызвало известный скепсис в отношении теории. Проблема до конца не решена и сегодня, хотя учет магнитогидродинамического взаимодействия звезды и плазмы потери углового момента как-то объясняет.

Когда стали известны внесолнечные планеты, выяснилось, что классическая схема не может объяснить происхождение их сильно вытянутых орбит. Объяснить приливными эффектами круговую орбиту Юпитера также не удается.

С накоплением экспериментальных данных разрабатывае-

мые теории все более усложнялись. Процессы образования планет оказались значительно сложнее начальных стадий образования самих звезд. Но в самых общих своих чертах схема аккреционной теории наблюдениями подтверждается. Обнаружено около 150 протопланетных дисков, дающих представление о том, как выглядела протосолнечная туманность 5 млрд лет назад (рис.16). Физика протозвезд и молодых звезд сложна и включает ряд не вполне понятных процессов. Часто наблюдаются так называемые «джеты», полярные выбросы, которые можно видеть на рис.16. Важную роль в образовании протопланет играет турбулентность среды в диске. Дальнейшее исследование протопланетных дисков обнажало все новые противоречия с аккреционной теорией.

В конце XX в. А.Босс стал развивать гипотезу гравитационной неустойчивости [8], основная идея которой была впервые предложена Г.Койпером еще в 1951 г. Согласно этой гипотезе, возникающие в протопланетном диске неустойчивости могут вызвать гравитационный коллапс, способный образовать планету всего за 10—50 тыс. лет. Концепция активно развивается, но встречается с трудностями и серьезной критикой. Например, предполагается, что к быстрому возникновению масштабной конденсации приводят локальные гравитационные неустойчивости и турбулентность в протопланетном диске. Однако они в такой же мере способны и разрушить зарождающуюся конденсацию.

Аккреционная теория была более разработанной, но и ее радикальная ревизия стала неизбежной, прежде всего в отношении временной шкалы явлений. В результате серьезного пересмотра теории стало понятно, что именно вода, другие летучие вещества и так называемая «линия льдов» (или «линия снега») относятся к важнейшим

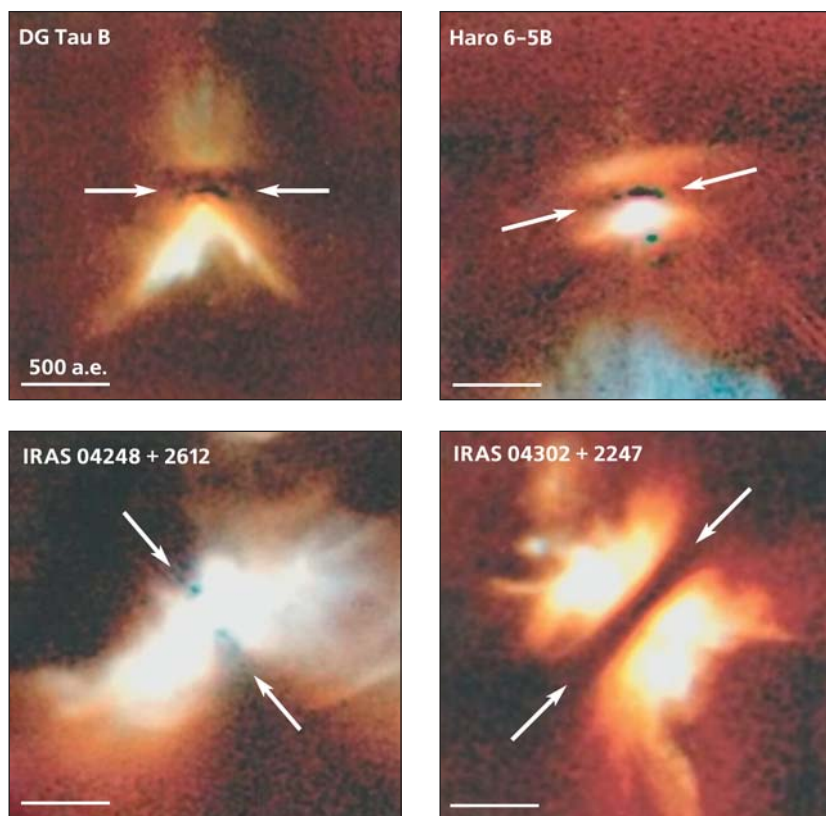


Рис.16. Газово-пылевые диски вокруг молодых звезд типа Т-Тельца.

факторам формирования будущей планетной системы. Планеты формируются под одновременным действием противоположных факторов, что делает ход их рождения 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 400 экзопланет [9].

Как идет последовательная аккреция

Новая, значительно усложненная аккреционная теория [10] обратила более пристальное внимание на определяющую роль последовательности происходящих процессов, 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, которые и составляют чередующиеся этапы формирования планетной системы, последовательно повторяясь много раз, приводят к различным результатам. Феномен чрезвычайно сложен и критичен к окружающим условиям. По-видимому, именно это обстоятельство приводит к тому, что среди обнаруженных внесолнечных планет трудно найти похожие.

Согласно наиболее развитым представлениям, последовательная аккреция имеет следующие особенности. Конденсация массивного межзвездного газопылевого облака происходит 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 формирующейся звезды возникает протопланетное облако из остаточного материала, благо-

даря вращению приобретающее форму диска. Пыль составляет всего 1–2 % массы облака, остальное — водород (около 90%) и гелий. Пылевая составляющая представляет собой частички субмикронных размеров неправильной формы. Сталкиваясь, частицы могут как объединяться, так и разрушаться. Но с формированием звезды в этот процесс включаются новые факторы. Под действием усиливающейся радиации молодой звезды начинается испарение летучих (воды и включений летучих в силикатных частицах) из внутренней части диска. 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 таким образом энергию до внутренних затененных областей, разогревая их до высокой температуры. Происходит быстрая отгонка летучих — их вытеснение из ближних к звезде областей (из правой части рис.17). Но на периферии внутренней зоны температура уже недостаточна для испарения летучих. На границе конденсации летучих, прежде всего, воды, возникает линия льдов (на рисунке — АВ), на которой и за внешней стороной которой происходит концентрация колоссальных масс протопланетного материала. Компьютерное моделирование показывает, что небольшая случайная конденсация может породить в диске короткоживущие волны и кольца плотности. Судя по изображениям протопланетных дисков, внешние пределы зоны конденсации могут отстоять на сотни астрономических единиц (рис.18). 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

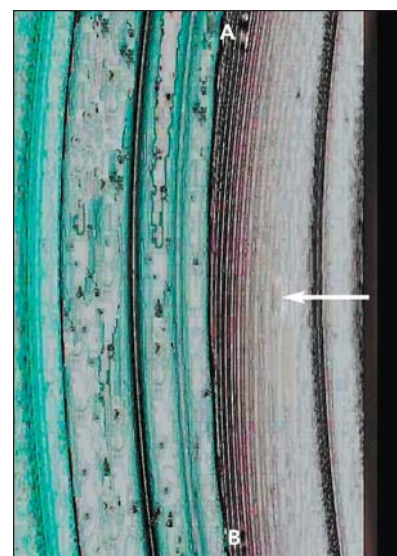


Рис.17. Отгонка летучих от звезды (правая часть рисунка) за линию льдов АВ. Случайные уплотнения создают короткоживущие кольца, разрывы и волны в газопылевом диске.

приходится на газ, плотность которого убывает с расстоянием от звезды. Вблизи линии льдов единственный объем газа находится под сложным влиянием гравитации звезды и самого облака, давления газовой среды и центробежных сил. В результате притока газа с периферии у линии льдов орбитальная скорость газа и захваченных частиц оказыва-



Рис.18. Звезда 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.

ется меньше кеплеровской. Достаточно крупные частицы, более 1 мм, со скоростью меньше кеплеровской выпадают к звезде из-за торможения в газовой среде. Мигрируя во внутренние области относительно линии льдов, они нагреваются, конденсаты плавятся и быстро слипаются. Образуются планетезимали, заготовки материала будущих планет, достигающие километровых размеров. На их образование уходит примерно 1 млн лет. Вначале рост их массы происходит при случайных столкновениях. Но чем больше становятся планетезимали, тем более сильной гравитацией они обладают и тем быстрее они поглощают своих соседей небольшой массы. Так возникают тела, которые можно назвать зародышами планет. Они обладают сравними массами и перехватывают оставшиеся планетезимали из узкой полосы вдоль своей орбиты. Когда большая часть планетозималей 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. Но 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 до миллиарда; в результате множественных столкновений они образуют тела, достигающие размеров Луны и более, которые захватывают остающийся материал и подавляют рост соседей. После достижения нескольких процентов земной массы рост протопланет огра-

ничивается 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. Одновременно с диссипацией из диска водорода и гелия система обедняется мелкими частицами, которые снижаются по пологой спирали и достигают Солнца благодаря эффекту Пойнтинга—Робертсона* (частичная потеря орбитального момента частицы при поглощении радиации, излучаемой звездой).

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. Протопланетное облако тогда еще не потеряло основные запасы газа, и происходил захват газа ядром будущей планеты. Захват чрезвычайно критичен к массе ядра, 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. На выживших, по мере того как холодное массивное тело сжимается и разогревается, оседают твердые частицы, увеличивая массу ядра. Ес-

* Эффект Пойнтинга—Робертсона — процесс, благодаря которому в Солнечной системе пылевые частицы медленно падают по спирали в сторону Солнца. При поглощении солнечного излучения энергия (т.е. масса) частицы увеличивается при неизменной тангенциальной составляющей импульса, поэтому скорость частицы уменьшается. Эффект был впервые описан в 1903 г. Дж.Пойнтингом, который объяснил его в рамках эфирной теории электромагнетизма. Правильную трактовку эффекта с точки зрения общей теории относительности дал Г.Робертсон в 1937 г.

ли газа еще много, происходит интенсивное выделение тепла, затрудняющее формирование планеты. Такое же ограничение известно при образовании звезд. Если теплоотвод неэффективен, газ будет потерян и планета-гигант не возникнет. Около миллиона лет газ накапливается медленно, но затем половина всей газовой массы захватывается всего за 1 тыс. лет. В этот период родившийся гигант излучает колоссальные потоки радиации. В Солнечной системе следы этих событий можно видеть в наше время на поверхности некоторых спутников Юпитера.

Среди главных факторов, ограничивающих появление гиганта, — миграция. Миграция первого рода возникает при гравитационном взаимодействии формирующейся планеты с рассредоточенной массой окружающей среды, как это показано в упрощенном виде на рис.19. В прилегающих частях диска движение формирующейся планеты вызывает появление волн, причем в однородной среде их влияние взаимно компенсируется. Но среда неоднородна, ее распределенная масса за орбитой планеты (слева на рис.19) значительно превышает массу внутри орбиты (справа). В результате возникает тормо-

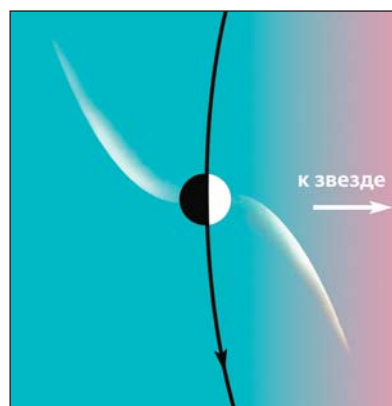


Рис.19. Возникновение миграции при гравитационном взаимодействии формирующейся планеты с волнами в окружающей среде. (Адаптировано из работы [11]).

жение планеты, слегка смещающее ее орбиту к звезде. За 1 млн лет орбита протопланеты может снизиться на несколько астрономических единиц, вплоть до линии льдов, где миграция останавливается под действием ускоряющего движения газа, так как здесь орбитальная скорость газа превышает кеплеровскую. Картина всех сопутствующих процессов усложняется тем, что их временные шкалы примерно совпадают, таким же оказывается и характерное время потери диском газовой составляющей.

Формирующаяся планета-гигант черпает материал из зоны своей орбиты, создавая разрыв в диске (рис.20). Но начиная с какого-то момента ее рост останавливается, как и в случае планетезималей. Ключевым механизмом снова оказывается гравитационное взаимодействие планеты с газом окружающей среды. Однако на этом этапе определяющей становится роль планеты, масса которой уже достигла массы Юпитера (0.001 массы звезды солнечного типа). Взаимодействие планеты с газом у разрыва внутри орбиты (справа на рис.20) замедляет обращение газовых масс, а на внешней стороне разрыва их ускоряет. Оба случая не способствуют встрече газа с планетой, и ее 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 медленное снижение орбиты планеты.

Через гравитационное взаимодействие сформировавшийся гигант очищает зону астероидов первого поколения и значительно ускоряет образование последующих планет-гигантов, если потерян еще не весь газ. С задержкой на несколько мил-

лионов лет формировался Сатурн. Газо оставалось уже немного, поэтому масса Сатурна в 3.3 раза меньше массы Юпитера. Но без Юпитера процесс длился бы дольше, а 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. Имеются 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. Относить Уран и Нептун к группе планет-гигантов не приходится, их выделяют в особую категорию — ледяных гигантов, масса которых менее 0.19 массы Юпитера. Это критическая величина, когда масса становится недостаточной для металлизации водорода и образования из него внешней оболочки ядра. Такая оболочка определяет многие свойства Юпитера и Сатурна. В целом формирование упо-

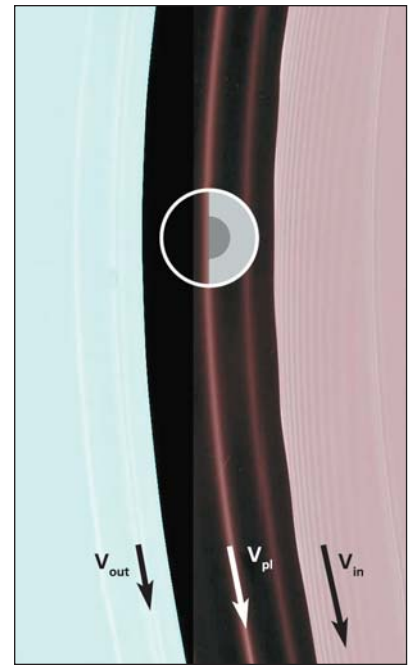


Рис.20. Механизм ограничения роста планеты-гиганта.

мянутых четырех планет заняло значительно меньше 10 млн лет.

Дальнейшие события в зоне гигантов развивались медленнее. Образовавшиеся Уран и Нептун выбрасывали остающиеся планетезимали в зону пояса Койпера

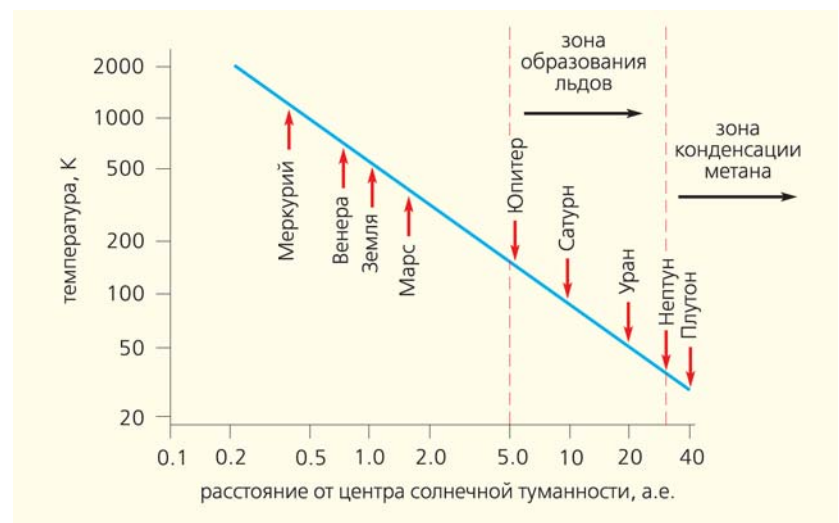


Рис.21. Зависимость равновесной температуры тела от расстояния до Солнца при формировании Солнечной системы. Вокруг звезды находилась зона радиусом 2—4 а.е., свободная от летучих. Приблизительно на уровне орбиты Юпитера (5 а.е.) находилась линия льда — граница, за которой вода (лед) и другие летучие конденсируются. Вблизи орбиты Нептуна (30 а.е.) располагалась еще одна особая зона — граница конденсации метана.

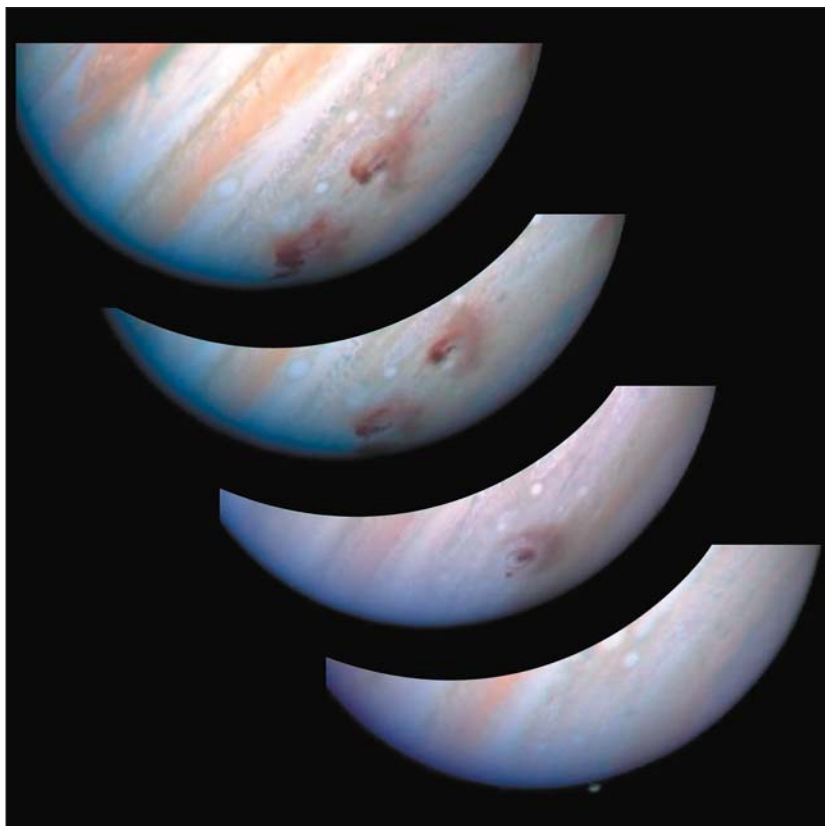


Рис.22. Космическая катастрофа у Юпитера в 1994 г. Ее масштабы были примерно такими же, как у катастрофы, произошедшей 65 млн лет назад на Земле. Последовательные снимки столкновений фрагментов кометы Шумейкеров—Леви с Юпитером получены с помощью широкоугольной планетной камеры космического телескопа «Hubble» (NASA).

и отчасти — к Солнцу, а Юпитер отправлял их в Облако Оорта. История возникновения малых тел Солнечной системы — комет, астероидов и малых спутников — не менее сложна [12].

Теория последовательной аккреции предполагает, что во внесолнечных планетных системах планеты типа Земли должны быть более распространены, чем планеты-гиганты. Пока теория может опираться лишь на данные о Солнечной системе. Условия формирования планет земной группы, орбиты которых расположены внутри линии льдов, и четырех внешних планет, находящихся за ней, сильно различаются. Четыре планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс — сформировались в основном из веществ с высокой

температурой испарения, таких как железо и силикатные породы. Ближе к Солнцу, где плотность солнечной радиации очень высока (рис.21), частицы нагревались и лед и другие летучие вещества испарялись, образуя почти свободную от пыли прозрачную зону радиусом до 5 а.е., известную по протопланетным дискам.

В обедненной зоне внутри линии льдов протопланеты могли вырасти лишь до 0.1 земной массы, что немногим больше массы Меркурия. Для того чтобы их масса продолжала расти дальше, протопланеты должны были перейти на вытянутые пересекающиеся орбиты, допускающие столкновения. Такими орбиты могли стать под возмущающим действием планеты-гиганта. Следовательно,

образование первой планеты-гиганта, в первые 2—3 млн лет, должно было предшествовать этим процессам. Если орбиты компланарны и не связаны резонансными соотношениями, объединение таких тел при столкновениях — только вопрос времени. По некоторым оценкам теории, 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, как новые орбиты, возникшие после столкновений, стали круговыми. Положение орбит планет земного типа менялось мало, планеты не мигрировали. В формировании орбит могли сыграть свою роль оставшиеся планетезимали или остаточный газ.

После того как протопланеты зоны Земли сформировались, остатки вещества протопланетного диска удалялись из внутренних областей Солнечной системы благодаря гравитационному рассеянию при взаимодействии с уже существовавшей планетой-гигантом, под давлением солнечного излучения, в результате эффекта Пойнтинга—Робертсона и просто поглощались протопланетами в столкновениях. Гравитационное взаимодействие приводило к выбрасыванию тел на периферию системы и отчасти на Солнце.

Может показаться, что изложенная схема образования планетной системы неправдоподобно сложна. На самом деле она все еще недостаточно сложна, чтобы объяснить все особенности и многообразие путей формирования планетных систем.

Иногда случающиеся в наше время столкновения малых тел с планетами можно рассматривать как затухающее эхо интенсивных столкновительных процессов, происходивших в ранней истории формирования Солнечной системы. Пример такой недавней катастрофы — столкновение кометы Шумейке-

ров—Леви с Юпитером в 1994 г. (рис.22). Около 20 обломков ядра кометы размерами до 10 км один за другим врезались в облачную поверхность Юпитера со скоростью 60 км/с. По выделяемой энергии взрывы были эквивалентны миллионам мегатонных водородных бомб. Широко известное событие примерно таких же масштабов произошло на Земле 65 млн лет назад, когда погибло 80% всех обитавших на Земле видов. Такую тяжелую «метеоритную бомбардировку» 3.9–3.8 млрд лет назад планеты переживали постоянно.

Наиболее вероятной его причиной могло быть прохождение системой Юпитер—Сатурн орбитального резонанса 1:2.

* * *

Планеты — конечная стадия процесса аккреции вещества, окружавшего ядро протосолнечного диска. В грандиозных масштабах Вселенной они занимают скромное место. Вместе с тем развитие представлений современной теории происхождения планетных систем и физики планетных тел показывает, что планеты относятся к самым

сложным и наиболее разнообразным объектам астрофизики. Только на планетах так тесно связаны астрономические явления, химические, физические, геологические и биологические процессы. С природой планет биофизика связывает 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. ■

Литература

6. *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 // *Astronomy & Astrophysics*. 2008. V.5.
7. *Selsis F., Kasting J.F., Levrard B. et al.* Habitable Planets Around the Star Gliese 581? // *Astronomy & Astrophysics*. 2007. V.476. P.1373.
8. *Boss A.P.* Rapid Formation of Outer Giant Planets by Disk Instability // *Astrophysical Journal*. 2004. V.599. P.577—581.
9. *Schneider J.* Extrasolar Planets Encyclopaedia. 2009 // <http://exoplanet.eu/>
10. *Planet Formation: Theory, Observation, and Experiments* / Eds H.Klahr, W.Brandner. Cambridge, 2006.
11. *Lin D.N.C.* Formation of Planets and Planetary Systems // *Planetary Systems: the Long View: 9th Rencontres de Blois, June 22—28, 1997, France* / Eds L.M.Celnikier, J.Travn Thanh Van. Paris, 1998. P.391.
12. *Маров М.Я.* Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии // *УФН*. 2005. Т.175. С.668—678.