

Экзопланеты

Теперь их просто захлестывал поток новых фактов: куда бы они ни обернулись — к большим ли солнцам Центавра или к Красному Карлику, — всюду сияли неисследованные планеты. С.Лем. «Магелланово Облако» (1955)

М.Я.Маров, И.И.Шевченко

Экзопланеты — новый широчайший класс астрономических объектов, неизмеримо расширивших наши представления о Вселенной и давших дополнительные возможности для физических и динамических исследований. На 19 мая 2014 г. открыто уже 1791 экзопланета (из них значительная часть — благодаря космическому телескопу «Кеплер») и еще больше кандидатов в планеты. Сейчас известно более 1100 экзосистем (экзопланетных систем), и их число растет лавинообразно (рис.1) — как за счет ввода в действие новых, все более эффективных и точных инструментов (главным образом на космических аппаратах, КА), так и благодаря разработке новых, все более изощренных методов обнаружения. К сожалению, большинство методов несвободно от эффектов наблюдательной селекции: лучше «заметны» большие планеты на близких к родительской звезде орбитах.

Экспериментальные ухищрения

История разработки основных методов поиска описана подробно, в том числе в «Природе» [1]. Напомним лишь о наиболее эффективных сегодня, а также о некоторых перспективных. Методы подразделяются на *прямые* (основанные на непосредственных наблюдениях собственного или отраженного излучения планет) и *косвенные* (все остальные). Первые применяют чрезвы-



Михаил Яковлевич Маров, академик, заведующий отделом планетных исследований и космохимии Института геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского РАН. Лауреат Ленинской премии (1970), Государственной премии СССР (1980), Галаберовской премии по астронавтике (1972), премии Международной академии астронавтики (2011), премии Элвина Сиффа (2013). В 2014 г. награжден медалью Нордберга. Главный редактор журнала «Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы». Занимается вопросами исследований Солнечной системы, включая фундаментальные проблемы ее происхождения и ранней эволюции на основе комплексных теоретических подходов и методов математического моделирования.



Иван Иванович Шевченко, доктор физико-математических наук, заведующий отделом небесной механики и динамической астрономии Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (Санкт-Петербург). Член Международного астрономического союза. Область научных интересов — небесная механика, нелинейная динамика, динамика малых тел Солнечной системы, динамика планетных систем.

чайно трудно из-за огромного различия световых потоков от родительской звезды и от планеты; например, для удаленного наблюдателя поток в оптическом диапазоне от Солнца превышает таковой от Земли более чем на 10 порядков (в инфракрасной области контраст несколько меньше). Для выделения слабого планетного сигнала годятся те методы, которые так или иначе исключают свет от звезды: коронография, «обнуляющая» интерферометрия, поляриметрия. *Коронограф* представляет собой линзу или камеру-обскуру, установленную на луче зрения позади затмевающего диска, который блокирует свет от центрального (яркого) объекта. В «обнуляющем» *интерферометре* в отличие от обычного (где при комбинировании потоков максимумы электромагнитной волны совмещаются и усиливаются) совмещаются максимумы и минимумы, так что сигнал от главного (яркого) объекта обнуляется, а смещенный сигнал от планеты ос-

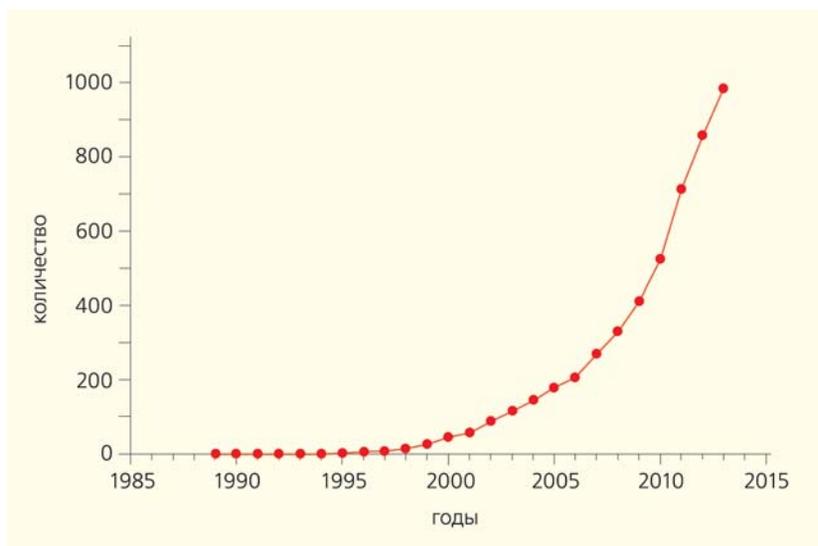


Рис.1. Рост числа открытых экзопланет. График построен по данным Extrasolar Planets Encyclopaedia (<http://exoplanet.eu>) на октябрь 2013 г.

тается прежним. Используя *поляризметрию*, можно исключить неполяризованный свет от звезды, чтобы эффективно выделить поляризованный планетный* (ожидаемая доля поляризованного сигнала в общем световом потоке от звезды и планеты составляет не более 10^{-5}). В 2008 г. С.В.Бердюгина с коллегами впервые наблюдали поляризованный сигнал от открытого ранее горячего юпитера HD189733b. А первой планетой, открытой прямым наблюдением — путем накопления изображения на ПЗС-матрице телескопа, — стала планета-гигант 2M1207-39b у звезды особого типа — коричневого карлика (Г.Шовен и др., 2004).

На косвенных методах остановимся подробнее. *Астрометрический метод* — первый, с помощью которого пытались искать экзопланеты, — исследует периодические колебания звезды в проекции на картинную плоскость: звезда при наличии у нее планеты (планет) движется по орбите вокруг общего центра масс системы. При этом наблюдаемый угловой размер этой орбиты очень мал. В 60-х годах XX в. П.Ван де Камп объявил об открытии им периодической модуляции, вызываемой спутником планетной массы, в видимом движении звезды Барнарда — одной из ближайших к Солнцу. Однако более поздние наблюдения с HST (Hubble Space Telescope — космический телескоп «Хаббл») этот результат не подтвердили. До сих пор данным методом не найдено ни одной планеты, поскольку он требует чрезвычайно высокой астрометрической точности. Так, вариации положения Солнца относительно общего с Юпитером

* При отражении под углом от поверхности планеты (или при наличии рассеивающих частиц в ее атмосфере) свет звезды поляризуется, причем степень вносимой поляризации может быть довольно высокой.

центра масс, если наблюдать с расстояния 10 пк, — менее $0.001''$, а точность астрометрии с HST составляет лишь $\sim 0.1''$. Метод привлекателен тем, что на измеряемую величину массы планеты не влияет неопределенность в наклоне планетной орбиты относительно луча зрения. Ожидается, что им будет открыто от 10 000 до 50 000 планет-гигантов с КА «Гайя» (запущен в ноябре 2013 г.).

RV-метод (называемый также *доплеровской спектроскопией*) заключается в измерении периодических вариаций радиальной скорости звезды, обусловленных наличием планет. Основная формула здесь очень проста: $m_p \sin i = 0.035 P \Delta V$, где m_p — масса планеты (в массах Юпитера M_J), P и ΔV — наблюда-

емый период (в годах) и амплитуда (в м/с) изменения радиальной скорости звезды, i — угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости. При $i=0$ эффект отсутствует. Формула выражает тот факт, что планета вынуждает родительскую звезду совершать радиальные (для удаленного внешнего наблюдателя) периодические колебания относительно центра масс системы. Максимальное изменение радиальной скорости Солнца из-за влияния Земли — 10 см/с, что лежит далеко за пределами возможностей современных инструментов (наилучшее разрешение пока ~ 50 см/с). Поэтому открытие RV-методом планеты земного типа, находящейся в зоне потенциального существования жизни у звезд солнечного типа, сейчас невозможно. Но первая экзопланета, обнаруженная у подобной Солнцу звезды (спектральный класс G5V, масса $1.06 M_\odot$), — массивная (значительно больше Юпитера) планета у звезды 51 Пегаса, была открыта М.Мейором и Д.Кело в 1995 г. именно этим методом. Эта планета — представитель нового класса планет, известного как *горячие юпитеры* (подробнее см., например, [1]). Временные RV-кривые дают материал для моделирования планетных орбит.

Метод *пульсар-тайминга* состоит в наблюдениях и анализе вариаций радиовсплесков от пульсаров во времени (при отсутствии планет всплески строго периодичны). Этим методом в 1992 г. А.Вольщан и Д.Фрейл обнаружили самые первые известные экзопланеты. Эти три планеты с массами 0.025 , 4.3 и $3.9 M_E$ (M_E — масса Земли) обращаются вокруг нейтронной звезды — пульсара PSR B1257+12, находящегося на расстоянии 980 св. лет от Солнца. Сформировались они, скорее всего, уже после взрыва сверхновой, который должен был «разметать» старую систему, если таковая существовала.

Наблюдение *событий микролинзирования* — самый экзотичный из применяемых сейчас методов, однако с его помощью открыт уже десяток планет (первый успех — в 2004 г.). Здесь фотометрически регистрируют увеличение блеска удаленной звезды из-за гравитационного линзирования ее света системой звезда—планета, пересекающей луч зрения. Если линзирующая звезда имеет планету, последняя порождает узкий вторичный пик (рис.2). Полное событие микролинзирования может длиться несколько суток и даже порядка месяца. Для поиска планет этим методом сейчас постоянно наблюдаются тысячи звезд в направлении на Магеллановы Облака и балдж* Галактики в рамках проектов OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment — Эксперимент по оптическому гравитационному линзированию) и MOA (Microlensing Observations in Astrophysics — Наблюдения микролинзирования в астрофизике). Замечательное его достоинство — малая подверженность эффектам селекции: обнаруживаются и планеты земной массы (из остальных методов лишь пульсар-тайминг позволяет «видеть» столь небольшие планеты). Поэтому в перспективе этот метод может дать бесценный материал о *функции масс* планет (распределении планет по массам).

Метод транзитов для поиска экзопланет был впервые предложен в 1952 г. О.Струве, представителем знаменитой астрономической династии. Регистрируются периодические потемнения звезды из-за прохождения по ее диску планеты. Разумеется, транзиты могут наблюдаться, только если наклон орбиты планеты относительно луча зрения достаточно мал. Феномен транзитов давно уже хорошо знаком астрономам на примере Венеры и Меркурия, хотя подобные события довольно редки (со времени изобретения телескопа произошло только восемь транзитов Венеры). Венера затеняет световой поток от Солнца на 0.1%; такого же порядка «транзитный сигнал» следует ожидать и у похожих экзопланет, обращающихся вокруг звезд солнечного типа. В 2000 г. Д.Шарбонно с коллегами впервые зафиксировали планетный транзит в кривой блеска звезды HD 209458, у которой планета была открыта ранее RV-методом. На рис.3 показан пример транзита (для звезды TrES-1).

* Балдж — центральная сфероидальная составляющая нашей Галактики радиуса ~2 кпк. Состоит в основном из старых звезд: красных гигантов, красных карликов, переменных типа RR Лирь; включает шаровые скопления.

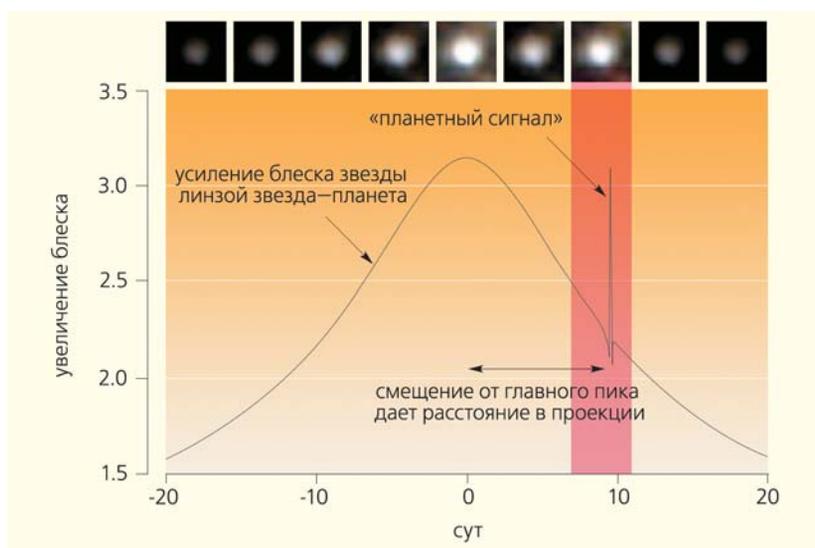


Рис.2. Моделирование увеличения наблюдаемого блеска удаленной звезды из-за гравитационного линзирования ее света системой звезда—планета, пересекающей луч зрения наблюдатель—звезда. Вторичный узкий пик представляет собой «планетный сигнал». (Источник: PLANET Microlensing Collaboration.)

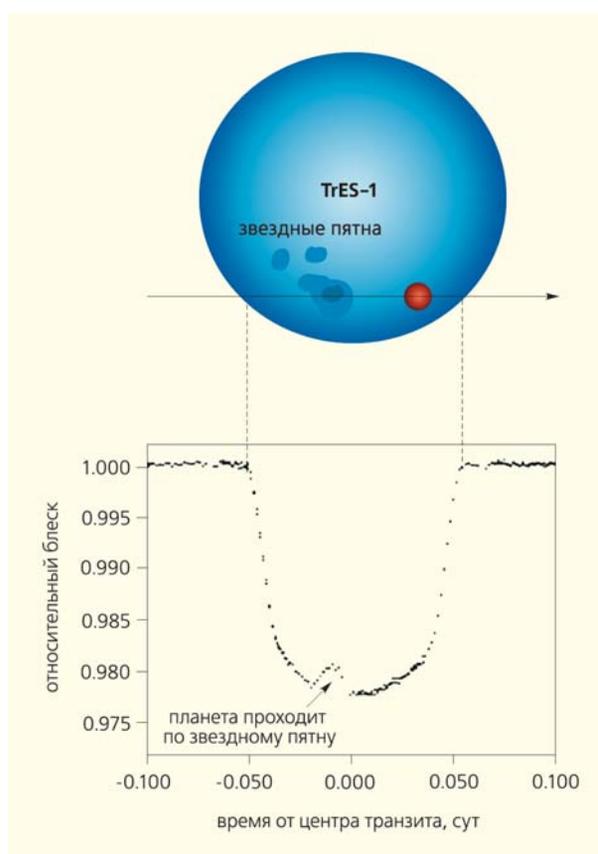


Рис.3. Кривая блеска звезды TrES-1 [2] по результатам наблюдений с HST. Ее любопытная деталь — малый вторичный пик вблизи минимума блеска, вызванный тем, что планета закрывает звездное пятно на родительской звезде. (Графика: G.Laughlin, <http://oklo.org>.)

Если в системе больше одной планеты или звездная система кратная, транзитная планета проходит между наблюдателем и звездой через непостоянные интервалы времени: из-за сложного движения объектов вокруг общего центра масс время транзита колеблется относительно строго периодического сигнала. Теоретические исследования показали, что путем моделирования наблюдаемых TTV (transit timing variations — вариаций времени транзита) можно получить практически полную информацию об орбитальных параметрах планет наблюдаемой системы. Первые TTV были зарегистрированы и смоделированы для систем с несколькими транзитными планетами. Д. Несворный с коллегами в 2012 г. впервые открыли этим методом «нетранзитную» планету, анализируя TTV-сигнал транзитной. Как образно сказал А. Морбиделли, «TTV-анализ возрождает то славное время небесной механики, когда Леверье предсказал существование и положение Нептуна из анализа аномалий в движении Урана. Теперь “чудо” Леверье стало обыденным явлением».

Наконец, дифференциальная спектрофотометрия во время транзитов дает информацию о составе планетных атмосфер. Сопоставляются спектры во время транзитов со спектрами, полученными непосредственно перед и после ухода планеты за звезду. Этот метод может применяться только на очень больших телескопах. С HST таким образом впервые было открыто присутствие натрия (по линиям поглощения) в атмосфере HD 209458b (2002 г.), с КА «Спитцер» — присутствие воды и метана в атмосфере HD 189733b (2007 г.), а также получены многие другие интереснейшие данные о химическом составе атмосфер экзопланет.

По соседству и вдали

Если при анализе статистики открываемых планет учесть влияние эффектов селекции, получится, что по меньшей мере 25% звезд солнечного типа в Галактике имеют планетные системы, т.е. наличие планет у таких звезд — не редкое, а обычное явление. Однако большинство экзопланетных систем весьма отличны по своему строению и составу от Солнечной системы. Можно выделить четыре основных типа планетных систем [3]: (1) системы с наблюдаемыми *дебрис-дисками* (остаточными дисками) — дисками из малых тел и пыли, предположительно оставшимися после формирования планет, но без наблюдаемых планет (пример: Тау Кита); (2) системы с дебрис-дисками и планетами (пример: Эпсилон Эриды); (3) системы с газовыми гигантами на орбитах более 0.1 а.е. («холодные юпитеры»), без заметных дебрис-дисков (пример: Солнечная система); (4) системы с газовыми гигантами на орбитах менее 0.1 а.е., без дебрис-дисков.

Ближайшие к нам звезды солнечного типа — компоненты А и В двойной системы Альфа Центавра, расположенные на расстоянии 1.34 пк от Солнца. Еще ближе к нам (на 0.02 пк) находится звезда Проксима — красный карлик со светимостью в $6 \cdot 10^{-5}$ светимости Солнца, гравитационно не связанный с двойной Альфа [4]. Звезды А и В — пятая и 11-я из самых оптически ярких звезд неба (звездные величины 0.06 и 0.59 соответственно). Обе весьма близки по своим характеристикам к Солнцу, но вторая несколько его холоднее, ее спектральный класс K1, масса $0.93 M_{\odot}$; она имеет низкую звездную активность, что благоприятствует RV-наблюдениям. Грезы многих писателей-фантастов, мечтавших о планетах у ближайших к нам звезд, сбылись 17 октября 2012 г., когда интернациональная группа исследователей [5] объявила, что у компоненты В планета есть. Путем прецизионной доплеровской спектроскопии удалось выявить вариации радиальной скорости звезды с полуамплитудой 51 см/с и периодом 3.2 сут. Радиус планетной орбиты оказался равным всего 0.04 а.е., а масса планеты — порядка массы Земли. Наблюдения охватывали период с февраля 2008 г. по июль 2011 г., и было получено 459 спектров звезды на спектрографе HARPS 3.6-метрового телескопа обсерватории Ла-Силья в Чили, дающем наилучшую точность — несколько десятков см/с. Поскольку прибор работал на пределе своей точности, существует, хотя и небольшая, вероятность ложного открытия (в 2013 г. сомнения усилились). Большое значение имели бы наблюдения транзита планеты, однако вероятность транзита (глубиной 10^{-4}) мала (10%).

Самые удаленные от нас планеты SWEEPS-04 и SWEEPS-11 обнаружены в рамках проекта SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search — Поиск затмевающих экзопланет в окне Стрельца) по результатам наблюдений в течение 7 сут с помощью HST планетных транзитов в насыщенном звездами поле в направлении на балдж Галактики [6]. Поле обзора SWEEPS имеет размеры $202'' \times 202''$ и включает 180 тыс. звезд, у которых с HST возможно выявление планет-гигантов юпитерианского типа. Расстояние до SWEEPS-04 и -11 оценивается в 8.5 кпк, т.е. примерно в 30 тыс. световых лет! Массы этих двух планет равны примерно 4 и $10 M_{J}$, орбитальные периоды — 4.2 и 1.8 сут. Это типичные «горячие юпитеры». Родительские звезды — солнечного типа. В 2007 г. К. Саху с коллегами построили RV-кривые для SWEEPS-04 и -11 на основе данных наблюдений на 8-метровом телескопе VLT (Very Large Telescope — Очень большой телескоп Европейской южной обсерватории в Чили). Как оказалось, фазы транзитов и RV-вариаций для SWEEPS-11 согласуются, что служит хорошим подтверждением открытия этой планеты.

Сходство и различия

Классификация. Первоначально планеты Солнечной системы отождествлялись по характеру их видимого движения по небосводу*. Сегодня астрономический взгляд на планеты наполнился новым содержанием: под ними мы понимаем астрофизический класс объектов, по своим свойствам занимающий промежуточное положение между звездами (включая коричневые карлики), с одной стороны, и разнообразными «малыми телами» (включая планеты-карлики) — с другой.

Современное определение *планеты*, принятое на XXVI Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (Прага, 2006), по существу основано на характеристиках тел Солнечной системы. Планета определяется как небесное тело, которое: (1) обращается вокруг Солнца; (2) обладает достаточной массой, чтобы самогравитация обеспечила гидростатически равновесную (почти сферическую) форму; (3) расчистило окрестность своей орбиты. *Планета-карлик* (к которым отнесены, например, Плутон и Церера) удовлетворяет пунктам (1) и (2), но при этом она (3) не расчищает окрестность своей орбиты и (4) не является планетным спутником. Все остальные тела ниже определенного порога массы, обращающиеся вокруг Солнца, считаются *малыми телами* (это кометы, большинство астероидов, транснептуновых объектов). Решение, принятое в Праге, базировалось на четкой объективной основе, в частности, — на небесномеханических критериях устойчивости орбит. С точки зрения астрофизики планеты характеризуются тем, что их масс не хватает ($M < 0.013 M_{\odot} = 4100 M_{\oplus}$), чтобы инициировать

* В переводе с древнегреческого «планета» означает «блуждающая». В отличие от звезд, планеты Солнечной системы довольно быстро перемещаются по небесной сфере, иногда выписывая петли, поэтому их так и назвали.

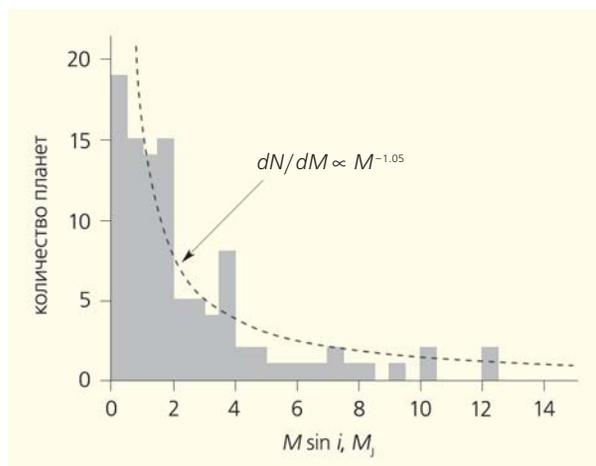


Рис.4. Распределение планет по массам [7].

и поддерживать ядерную реакцию слияния ядер дейтерия в своих недрах. Коричневые карлики — объекты промежуточного типа между планетами и звездами ($0.013 M_{\odot} < M < 0.075 M_{\odot}$) — способны поддерживать реакции слияния ядер дейтерия, но не водорода (термоядерного синтеза гелия); температура в центре тела ниже 6 млн градусов.

Соотношение масса—радиус. Большинство известных экзопланет имеют массы $\sim M_J$ и больше (таков вклад горячих юпитеров). Это явный эффект селекции, и число открываемых планет с массами порядка массы Нептуна и меньше постоянно растет. Зато резкий (гиперболический) спад числа планет при больших массах (рис.4), скорее всего, реален, так как эффекты селекции не сказываются на наблюдательных данных о планетах столь больших масс.

Спектр масс и размеров открытых экзопланет довольно широк: он охватывает три порядка по массам и несколько более одного порядка по размерам (рис.5). Пока наибольший размер имеет

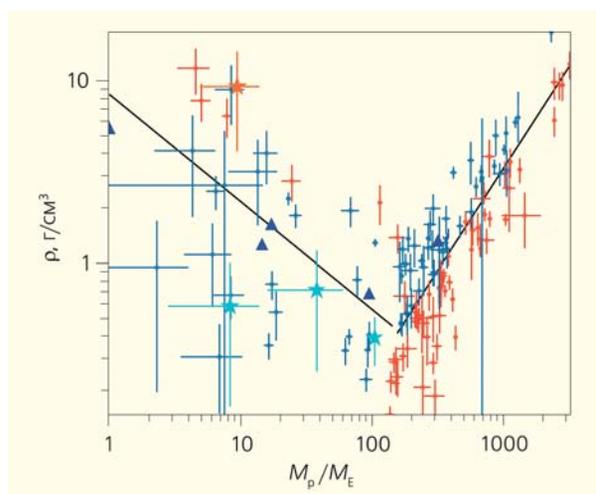
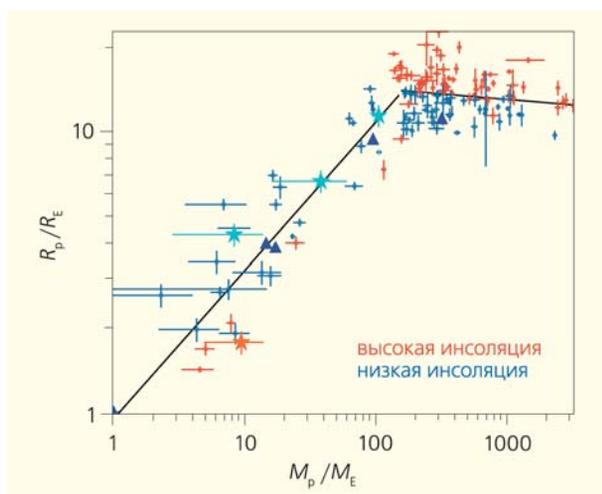


Рис.5. Соотношения масса—радиус и масса—плотность [8].

планета TrES-4 (открытая в рамках проекта Trans-Atlantic Exoplanet Survey — Трансатлантический экзопланетный обзор); ее радиус превышает в 19.8 раза радиус Земли и в 1.8 раза радиус Юпитера, при почти одинаковой с ним массе. Плотность этой планеты ($\approx 0.3 \text{ г/см}^3$) рекордно низка среди планет с известными размерами и массами. Самая же маленькая из известных сегодня экзопланет — Кеплер-37b. Она лишь немногим больше Луны, а масса ее равна $0.01 M_E$.

На графике «масса—радиус» для 138 планет с известными массами и размерами [8] наблюдается четкий излом (см. рис.5), соответствующий переходу от планет земного типа и ледяных гигантов ($M < 150 M_E$) к газовым гигантам ($M > 150 M_E$). Для первых график (при постоянной плотности) имел бы в логарифмических координатах наклон $1/3$, однако на деле наклон приблизительно равен $1/2$, что говорит о возрастающем с увеличением массы вкладе легучих. Для вторых радиус остается почти постоянным и даже уменьшается. Кроме того, для них статистически значимым оказывается увеличение размеров планет при высоких уровнях инсоляции; объясняется это тем, что при больших температурах газовые гиганты «разбухают».

Состав. *Металличность*, важнейший параметр звезд, характеризует относительное содержание железа, которое отражает содержание и других тяжелых элементов. Согласно наблюдательным данным, металличность звезды коррелирует с наличием планет: у звезд с малой металличностью планетные системы отсутствуют, а при металличности выше солнечной* вероятность

* В состав Солнца входят (по массе) водород (74.9%), гелий (23.8%) и более тяжелые элементы («металлы»). Оно содержит 99.85% всего вещества Солнечной системы.

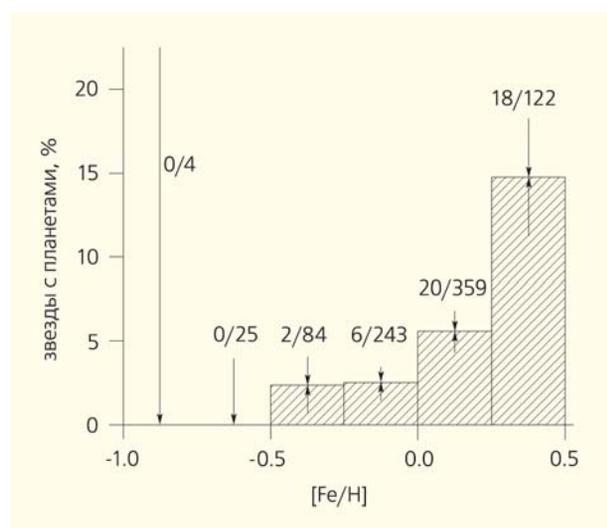


Рис. 6. Связь металличности звезды с наличием планет [9]. (По горизонтали отложена металличность, по вертикали — процент звезд, имеющих планеты.)

присутствия планет резко повышается (рис.6). Причина, по всей видимости, в том, что звезды с планетами рождаются в молекулярных облаках с относительно высоким содержанием тяжелой компоненты [9], способствующим образованию крупных ядер из скальных пород. На этих ядрах конденсируются летучие, аккрецирует газ диска и формируются газо-ледяные планеты-гиганты.

О внутреннем строении экзопланет можно судить, моделируя наблюдаемые статистические зависимости, такие как масса—радиус (см. рис.5). Внутреннее строение экзопланет, видимо, в целом отвечает моделям планет земной группы и планет-гигантов. Различия могут зависеть от металличности родительской звезды и состава протопланетного диска. Температура поверхности, состав и свойства атмосферы определяются расстоянием до родительской звезды. У близких к звездам планет температура поверхности может составлять $\sim 1500 \text{ K}$!

Типы. Большинство открываемых экзопланет совсем не похожи по своим наблюдаемым свойствам на планеты Солнечной системы. Яркий пример — упомянутые выше *горячие юпитеры* — гиганты с юпитерианскими массами на орбитах, близких к родительской звезде (наблюдаются орбитальные периоды порядка нескольких суток и даже меньше). Такие планеты формируются на удалении от звезды, и как планета попадает (мигрирует) в текущее положение, почему она там останавливается и «выживает», остается загадкой. Впрочем, возможно, планеты этого типа рано или поздно поглощаются своими звездами.

Второй после планет-гигантов основной тип планет — *земной*. В Солнечной системе к таковым относятся твердотельные («скальные») внутренние планеты — Меркурий, Венера, Земля и Марс. Среди же экзопланет *земли* и *сверхземли* определяются как планеты с недоминирующими атмосферами (высота атмосферы много меньше радиуса планеты) и массами $\sim 1-2$ и $\sim 2-13 M_E$ соответственно. В зависимости от значения параметра I/R (отношения массы воды/льда и твердого вещества — металлов и скальных пород) мы имеем разные типы планет [10]: (1) $I/R \sim 10^{-4}$: скальная планета с содержанием воды, как у Земли; (2) $I/R \sim 0.3-0.5$: планета с жидким океаном под ледяной оболочкой, подобная спутникам Юпитера Европе и Ганимеду; (3) $I/R \sim 1$: полностью океаническая планета. Образование сверхземель возможно, вообще говоря, в результате срыва газовых оболочек планет-гигантов ультрафиолетовым излучением соседних к планетной системе массивных звезд. Итак, наличие систем со сверхземлями можно ожидать в областях формирования звезд больших масс, а систем тех же размеров с планетами-гигантами — в областях формирования звезд малых масс.

К новому, весьма необычному классу экзопланет относятся *планеты-бродяги*, планеты-сироты — не входящие в планетные системы звезд. По-

добные объекты открыты в звездном скоплении в туманности Ориона. Своим происхождением они могут быть обязаны выбросам из планетных систем (в особенности двойных звезд) в межзвездное пространство. То, что это возможно, небесные механики знают давно: Меркурий может покинуть Солнечную систему примерно через миллиард лет. Большая доля планет, образовавшихся в системах двойных звезд, может со временем быть выброшена.

Многоликая динамика

Подобно физическим свойствам, динамические свойства большинства известных экзопланетных систем существенно иные, чем у Солнечной системы: экзопланеты обычно имеют относительно сильно вытянутые орбиты, а планеты-гиганты зачастую обращаются на орбитах, очень близких к родительской звезде. Важнейшие явления, определяющие динамическую архитектуру этих систем, — *резонансы и миграция*. Выделяют *резонансы средних движений* и *вековые резонансы*. Первые представляют собой соизмеримости между средними частотами орбитального обращения планет (либо планеты и звезды в кратных звездных системах), вторые — соизмеримости между скоростями прецессий орбит [11]. Согласно современному космогоническому представлению, захваты планетной системы в орбитальные резонансы — закономерные этапы эволюции, обусловленные миграцией планет в газово-пылевом диске, которая протекает для разных планетных систем с различной скоростью.

В современной динамической классификации планетных систем в качестве первого (основного) класса выделяют системы с резонансами средних движений. Примерами систем с планетами, находящимися в резонансе 2/1, служат Глизе* 876 и HD 82943, в резонансе 3/1 — система 55 Рака. Наличие резонансов средних движений и их взаимодействие в планетных системах обуславливает возможность *хаотического поведения*** в орбитальной динамике планет — например, в случае планетной системы Кеплер-36 [13].

Зачастую ошибки в определении планетных орбитальных параметров из наблюдений много больше интервалов их значений, на которых обеспечена долговременная устойчивость системы. Поэтому анализ устойчивости позволяет налагать более строгие ограничения на орбитальные параметры. К настоящему времени разрабо-

таны как аналитические, так и численно-экспериментальные *критерии устойчивости* планетных систем. Из первых наиболее востребованы критерии Хилла и Уиздома. Критерий Хилла устанавливает границу области устойчивых орбит тела пренебрежимой массы вокруг гравитирующего соседа («второго тела» — спутника, планеты, одной из компонент двойной звезды), когда последний обращается вокруг объекта большей (по сравнению со вторым телом) массы («первого тела» — планеты, звезды, главной компоненты двойной соответственно). Согласно этому критерию, радиус зоны устойчивости прямо пропорционален радиусу «сферы Хилла». Критерий Уиздома адаптирует критерий перекрытия резонансов Чирикова [12] к конкретной небесномеханической задаче: он дает размеры области, «расчищаемой» планетой в окрестности своей орбиты благодаря перекрытию соседних орбитальных резонансов (соседних в том смысле, что им соответствуют близкие друг к другу целочисленные отношения периодов). Движение частиц (тел пренебрежимой массы), попавших в область перекрытия, хаотизируется, и область расчищается. Этот критерий, в частности, служит одним из немногих строгих математических обоснований для определения понятия «планета», приведенного выше. Численно-экспериментальные критерии базируются на вычислениях MEGNO***, показателей Ляпунова, фундаментальных частот движения, а также на анализе условий ухода/столкновений.

Более половины всех наблюдаемых звезд главной последовательности входят в кратные (включая двойные) звездные системы. Исследования долговременной устойчивости гипотетических планетных систем в кратных звездных системах были инициированы еще в 80-х годах прошлого века французским ученым Д.Бене. Сейчас известно о существовании планет в более чем 60 кратных звездных системах. Большинство планет, обнаруженных у двойных, находится на орбитах *S-типа* (вокруг одной компоненты двойной; их также называют внутренними), а остальные — на орбитах *P-типа* (вокруг обеих компонент; такие орбиты именуют еще внешними или *циркумбинными*).

За месяц до объявления об открытии планеты у Альфа Центавра, в сентябре 2012 г., был опубликован анализ устойчивости планетной динамики в этой двойной звездной системе [14], который позволил определить области устойчивого движения гипотетических планет двойной в пространстве орбитальных параметров (рис.7). Открытая планета находится в области устойчивости — глубоко внутри белого «треугольника устойчивости» на рис.7, *слева*. В случае циркумбинарного движения внешняя граница области хаоса на диаграм-

* Название «Gliese» означает, что звезда входит в каталог ближайших (до 25 пк) к Солнцу звезд, составленный в 1969 г. немецким астрономом В.Глизе.

** О феномене динамического хаоса, обусловленного «перекрытием» резонансов, подробнее см. в обзорах Б.В.Чирикова [12] и И.И.Шевченко [11].

*** От англ. mean exponential growth number — среднее значение экспоненциального роста (расхождения траекторий).

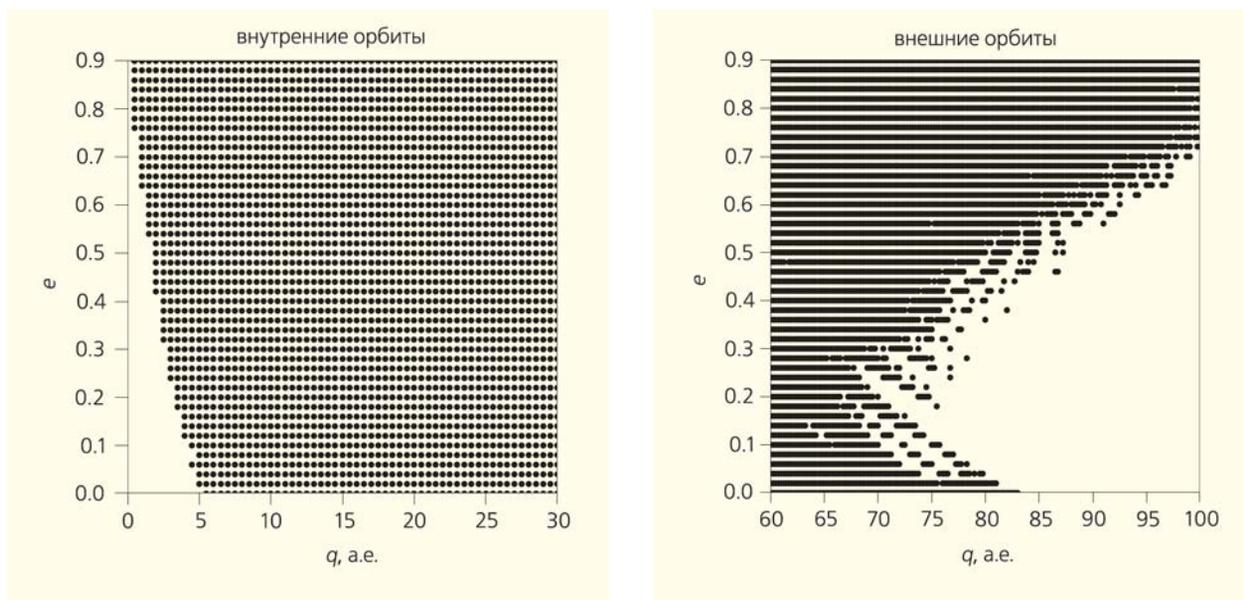


Рис.7. Диаграммы устойчивости на плоскости «перигелическое расстояние q — эксцентриситет e » планеты, построенные для системы Альфа Центавра [14]. Белым показаны области устойчивости, черным — неустойчивости. На обеих диаграммах зоны хаоса расширяются с увеличением эксцентриситета. Каково бы ни было q , движение становится неустойчивым при достаточно большом эксцентриситете, так как сильно вытянутые орбиты при внесении возмущений легко хаотизируются.

мах устойчивости соответствует большим полуосям орбит планет более 80 а.е. Согласно результатам расчетов, наиболее вероятные значения ляпуновского времени движения планет (характерного времени предсказуемого движения [11]) в зонах неустойчивости составляют ~500 лет для внешних орбит и ~60 лет для внутренних орбит.

До наблюдений с КА «Кеплер» было известно порядка 50 планет в двойных звездных системах,

причем большинство из них — внутренние. Встретились и несколько циркумбинарных систем (HW Vir, NN Ser, UZ For, DP Leo, FS Aur, SZ Her) среди тесных двойных с компонентами, не относящимися к звездам главной последовательности. Недавно с КА «Кеплер» методом анализа транзитов открыто несколько циркумбинарных планетных систем у звезд главной последовательности — Кеплер-16, -34, -35, -38 и -47, причем система Кеплер-47 включает две планеты. Орбитальная конфигурация системы Кеплер-16, согласно [15], показана на рис.8. Размеры двойной (0.22 а.е.) примерно в 100 раз меньше, чем у Альфа Центавра (23.4 а.е.). Диаграммы устойчивости на плоскости «перигелическое расстояние—эксцентриситет» показывают [16], что планета Кеплер-16b находится в опасной близости к области хаоса — она расположилась между «зубьями» неустойчивости (рис.9). Однако эта планета «выживает» (не уходит из системы и не падает на родительские звезды), потому что ее орбита близка к полуцелому орбитальному резонансу $11/2$ с центральной двойной. В Солнечной системе данный феномен аналогичен выживанию Плутона и плутино*, находящихся в полуцелом орбитальном резонансе $3/2$ с Нептуном. Границы хаоса—порядок на диаграммах устойчивости демонстрируют фрактальную структуру, обусловленную наличием орбитальных резонансов.

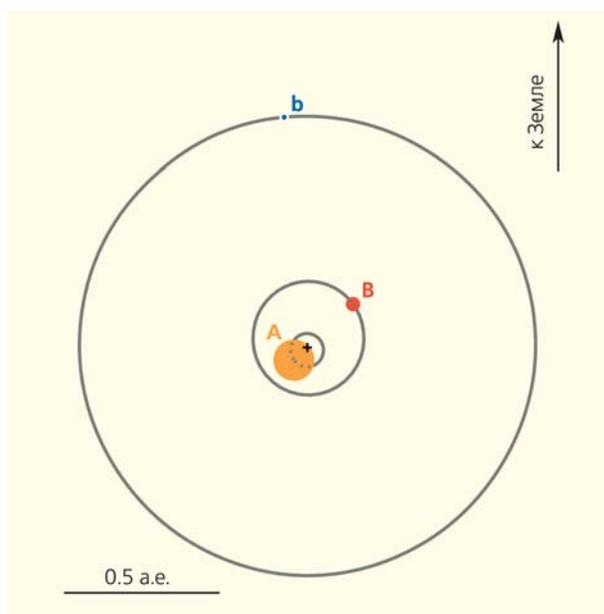


Рис.8. Система Кеплер-16 [15].

* Плутино — объекты той же резонансной группы, что и Плутон, но более мелкие.

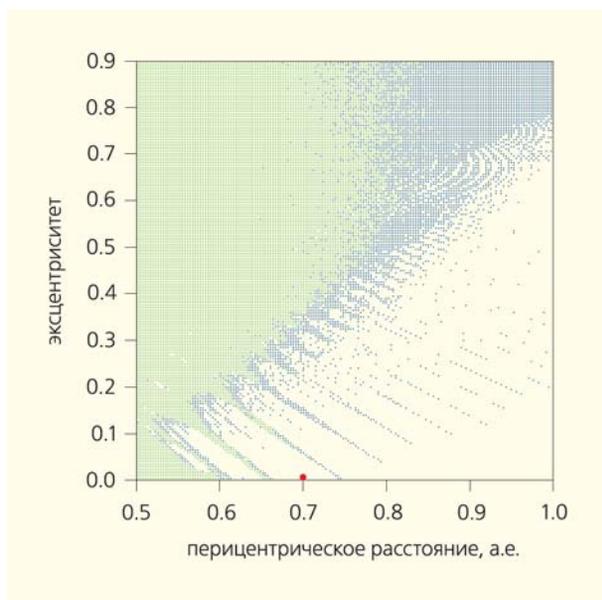


Рис.9. Диаграмма устойчивости для системы Кеплер-16. Зеленым цветом показаны орбиты, неустойчивые по критерию ухода—столкновения, синим — по критерию значения ляпуновского показателя [16].

В мультипланетные системы (с двумя и более планетами) входит примерно треть из числа открытых к настоящему времени экзопланет. Наличие орбитальных резонансов в таких системах широко распространено и подтверждено вычислениями поведения резонансных аргументов. В системе **Глизе 876** орбитальные периоды относятся как 4:2:1 — так же, как у внутренних спутников Юпитера. Вокруг главного компонента подробно изученной двойной системы **55 Рака** — желтого карлика (спектрального класса G8) — обращается по меньшей мере пять планет с массами от 0.034 до 3.84 M_J ; их орбитальные периоды составляют от 2.8 до 5200 сут. Планеты b и c находятся в резонансе 3/1. Система в целом устойчива; она может содержать и другие планеты, так как далека от состояния «плотной упаковки». Желтый карлик двойной **Уpsilon Андромеды** (спектрального класса F8) имеет три планеты-гиганта с массами от 0.69 до 3.93 M_J и орбитальными периодами от 4.6 до 1290 сут, образующих устойчивую систему. Планеты c и d близки к резонансу 11/2. Обращает на себя внимание схожесть резонансной конфигурации с резонансом в упоминавшейся выше циркумбинарной планетной системе Кеплер-16. **Кеплер-11** — одиночный желтый карлик, у которого обнаружено шесть транзитных планет с массами от 4.3 до 300 M_E и орбитальными периодами от 10.3 до 118 сут. Пять внутренних планет движутся на очень тесных орбитах, расстояния между которыми малы как в относительных единицах (в единицах радиуса орбиты внутренней планеты), так и в абсо-

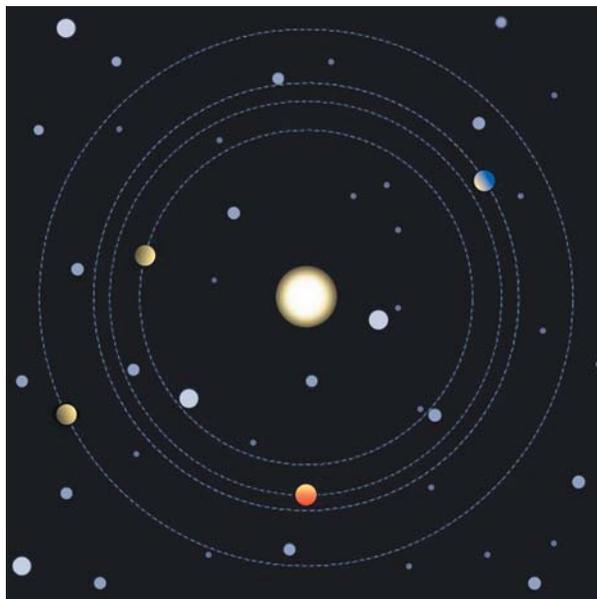


Рис.10. Плотная упакованная резонансная система KOI-730. Четыре планеты-сверхземли обращаются на весьма близких друг к другу резонансных орбитах. (Графика: Wikimedia Commons.)

лютных: орбита самой внешней планеты лишь немногим больше орбиты Меркурия. Система в целом нерезонансна, устойчива; однако ее конфигурация совершенно нетипична. Две самые близкие к родительской звезде планеты близки к резонансу 5/4; возможно наличие внешних (нетранзитных) планет. **KOI-730** (Kepler Object of Interest — 730) — желтый карлик (звезда спектрального класса G5V), у которого открыты четыре транзитные планеты-сверхземли с радиусами: 1.8, 2.1, 2.8, 2.4 R_E (рис.10). Орбитальные периоды составляют 7.4, 9.8, 14.8 и 19.7 сут; таким образом, планеты близки к резонансу средних движений 8:6:4:3. Эта планетная система — наиболее выдающийся из известных сейчас примеров *плотно упакованной резонансной системы*.

Таинство рождения

Открытие экзопланет вкупе с исследованием химического состава комет, астероидов, метеоритов поставило планетную космогонию, изучающую зарождение и эволюцию планетных систем, на новую основу. По современным представлениям, планеты формируются из протопланетной туманности после коллапса центрального сгущения и «конденсации» газовой-пылевой вещества в аккреционный диск [17, 18]. Такие диски — плоские пылевые структуры вокруг протозвезд и молодых звезд главной последовательности — имеют много общего с аккреционными дисками у двойных звезд, образующимися за счет перетекания веще-

ства от обычной звезды на соседний массивный компакт. И в том, и в другом случае речь идет о турбулентной многокомпонентной газовой пылевой среде [19], для которой, вообще говоря, характерны кинетические процессы с разнообразными химическими реакциями. Новые астрофизические и химические данные накладывают существенные ограничения на космогонические модели, в первую очередь на сценарии формирования плотных газовой-пылевых сгустков (кластеров) и рождения первичных твердых тел.

Газово-пылевые кластеры образуются благодаря развитию джинсовской гравитационной неустойчивости, когда отношение пылевого и газового компонентов растет в процессе радиального и вертикального сжатия диска. Еще основатель отечественной космогонической школы О.Ю.Шмидт отмечал: «Мы придаем решающее значение твердой фазе, т.е. пыли и другим твердым частицам в газопылевом облаке». Он связывал процесс эволюции с необратимой потерей частицами механической энергии при неупругих соударениях, но при сохранении момента количества движения, что приводило «к уплотнению системы, к собиранию частиц в плоский слой повышенной плотности». Такой пылевой субдиск получается в результате дифференциального вращения газовой-пылевой вещества протопланетного облака по орбите вокруг звезды и процессов аккреции, когда пылевая составляющая оседает к экваториальной плоскости, перпендикулярной оси вращения диска. Если плотность вещества в этом слое достигает некоторого критического значения, субдиск становится гравитационно-неустойчивым и распадается на многочисленные пылевые сгущения, а это, в свою очередь, создает предпосылки для прогрессирующего роста частиц с образованием астероидоподобных тел — *планетезималей*.

Тот факт, что из вещества газопылевых дисков в процессе дальнейшей эволюции первичных твердых тел и рождаются планеты, по существу не вызывает сомнений. Но как это происходит? Наиболее вероятным механизмом их укрупнения считаются соударения, приводящие как к объединению, так и к разрушению сталкивающихся объектов — в зависимости от физических свойств и динамического характера взаимодействий. При определенных условиях процессы объединения преобладают, что приводит в итоге к появлению планетной системы. С динамикой пылевых частиц и вероятными механизмами их укрупнения до размеров планетезималей связаны ключевые проблемы планетной космогонии, решение которых пока далеко от завершения. Представления о последовательном укрупнении частиц в газовой-пылевой среде в результате соударений (при относительно высоких скоростях тел с сантиметровыми и тем более метровыми размерами) не подтверждаются ни теоретичес-

кими, ни экспериментальными оценками. Так вести себя пылевые частицы могли бы, вообще говоря, в турбулентной гетерогенной среде — из-за эффективности происходящих в вихревых структурах процессов коагуляции. Определенную роль при наличии эффектов самогравитации и вязкости могло бы сыграть резонансное возбуждение волн плотности, оказывающих сильное влияние на особенности морфологии и динамики нелинейных хаотических систем. Наиболее реалистичным нам представляется сценарий, согласно которому образующиеся в пылевом субдиске (вследствие гравитационной неустойчивости) кольцевые сгущения распадаются на отдельные пылевые кластеры в виде рыхлых структур [20, 21]. Здесь обеспечиваются значительно более благоприятные условия для объединения и уплотнения таких структур при соударениях и постепенного их укрупнения до размеров планетезималей, что подкрепляется численными расчетами в широком диапазоне параметров моделей. Совокупность рыхлых пылевых кластеров протопланетного субдиска рассматривается при этом как особый тип сплошной среды — фрактальной, для которой существуют точки и области, не заполненные ее составляющими, с сильным гравитационным взаимодействием. Заметим, что спектральные наблюдения дисков у молодых звезд типа Т Тельца свидетельствуют о существовании в них мелкой пыли (≤ 1 мкм) в течение 1—10 млн лет. В то же время, если исходить из модельных оценок, во внутренней части диска (на расстояниях < 10 а.е.) за это время могут вырасти крупные тела размером ~100—1000 км или еще более крупные сгущения эквивалентной массы.

По существующим оценкам, эволюция кластеров и укрупнение пылевых частиц происходит относительно быстро, за $\sim 10^6$ лет, а завершение процесса формирования планетной системы типа Солнечной занимает $\sim 10^8$ лет. Сейчас признано, что планеты земного типа создает *аккумуляция планетезималей* [17, 22], включающая в себя три стадии: (1) опережающий аккреционный рост малых тел в диске (характерная продолжительность этой стадии — менее миллиона лет; большие тела растут быстрее, чем меньшие, за счет своих больших масс и меньших эксцентриситетов орбит); (2) олигархический рост, когда планетные зародыши растут за счет меньших тел, пока ресурс меньших тел не исчерпывается (продолжительность — порядка ста тысяч — миллиона лет); (3) стадию, начало которой соответствует появлению планетных зародышей с массами от лунных до марсианских. Система зародышей изначально неустойчива. На временах ~ 100 млн лет из-за пересечений орбит происходят их ударные столкновения. Во внутренней области планетной системы зародыши при столкновениях слипаются в тела с размерами порядка земного.

Что касается планет-гигантов, то они, по традиционным представлениям, формируются путем аккреции газа на ядро из скальных пород размерами от единиц до десятков земных радиусов. На расстояниях далее так называемой *снежной линии* (границы конденсации воды и других летучих) температура становится достаточно низкой, чем объясняется образование ледяных гигантов Урана и Нептуна и существование их крупных спутников, состоящих преимущественно из водяного льда.

Можно думать, что эти основополагающие физические представления в целом характерны и для планет в других звездных системах. Их специфические особенности зависят, однако, от конфигурации планетной системы и в первую очередь от радиального расстояния, определяющего эффективную температуру и соотношение газовой и твердотельной оболочек, а также от взаимного расположения планет различной массы. Наличие газового и пылевого компонентов приводит к медленному радиальному смещению орбиты планеты в диске по направлению к звезде или от нее. Скорость миграции относительно высока при интенсивной аккреции газа на планету на ранних стадиях эволюции. Моделирование планетных систем при наличии вязкого газово-пылевого диска позволяет выяснить, как наличие диска определяет возможные резонансные конфигурации планетных систем в итоге эволюции.

Где может быть жизнь?

На окраинах Млечного Пути металличность звезд низка, и это препятствует образованию планет земного типа. Ближе к центру Галактики, где процесс звездообразования интенсивен, металличность высока, но высока и частота взрывов сверхновых, что исключает устойчивое развитие жизни на планетах. На важность этих ограничений обратили внимание Ч.Лайнвивер с соавторами [23]. Путем модельных расчетов галактической эволюции они нашли, что *галактическая зона жизни* ограничена кольцом радиальной протяженности от 7 до 9 кпк от центра Галактики; в ней находятся звезды, сформировавшиеся 8–4 млрд лет назад (рис.11), и большинство из тех, у которых

могут быть планеты со сложными формами жизни, старше Солнца в среднем на ~1 млрд лет. Таким образом, пик развития жизни в Млечном Пути, возможно, уже давно пройден [23, 24].

Зону жизни можно определить и внутри планетной системы. Это область, где на поверхности планет земного типа может присутствовать вода и при этом климатические условия достаточно устойчивы [25]. Широкий температурный диапазон жидкой фазы воды определяет и обширность зоны жизни (по размерам орбиты), и устойчивость климата. Поскольку у льда плотность меньше, чем у воды, океаны замерзают, начиная с поверхности, и жизнь может сохраняться подо льдом. А высокая температура кипения предохраняет океаны от обращения в пар при сезонных изменениях температуры. Как и в Галактике, зона жизни имеет форму кольца (с центром в звезде), до внутреннего радиуса которого на планетах «слишком жарко», а за внешним — «слишком холодно». Границы и ширина зоны изменяются со временем. Есть еще понятие *зоны динамической обитаемости* — области вокруг звезды, где пла-

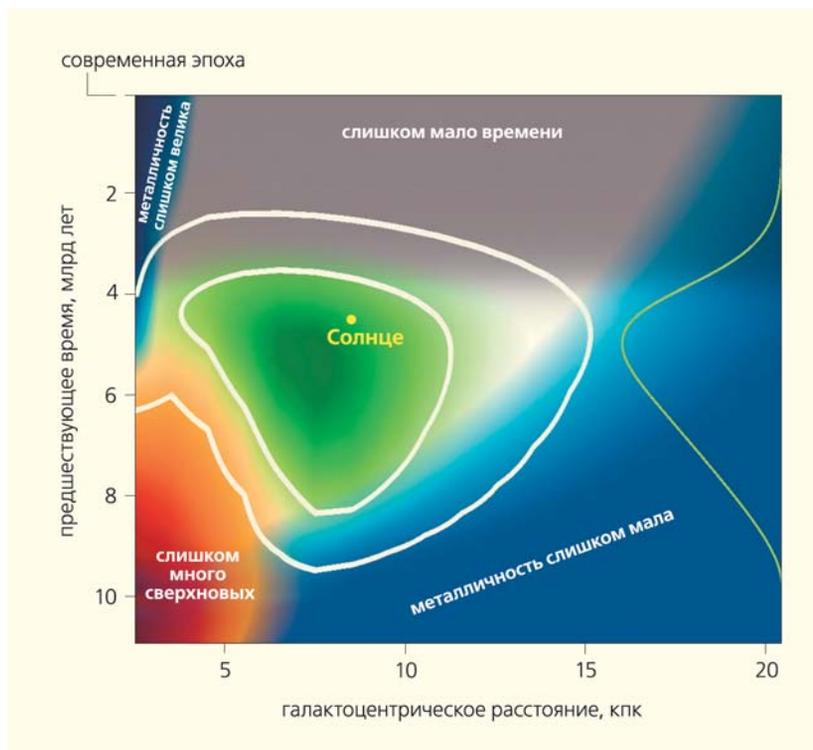


Рис.11. «Галактическая зона жизни», согласно Ч.Лайнвиверу и др. [23]. По горизонтали — расстояние от центра Галактики, по вертикали — возраст звезд. Серым цветом выделена зона, где для формирования сложных форм жизни недостаточно времени; красным — где развитию жизни препятствуют взрывы сверхновых; синим — где металличность родительских звезд слишком мала или, наоборот, велика для формирования и выживания планет земного типа. Отложенная по вертикали зеленая кривая справа — рассчитанное в [23] распределение во времени ожидаемого числа обитаемых планет со сложными формами жизни.

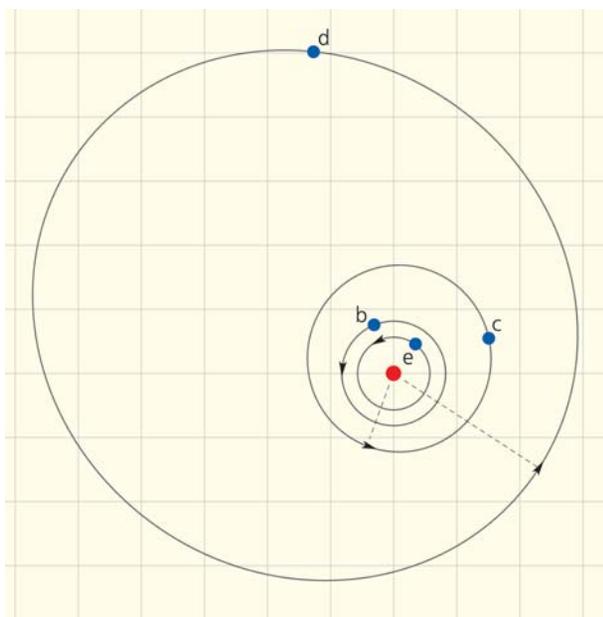


Рис.12. Система Gliese 581. Существование внешней планеты (планеты d) не подтверждено. Масштаб ячейки схемы 0.05×0.05 а.е. (Графика: Wikimedia Commons.)

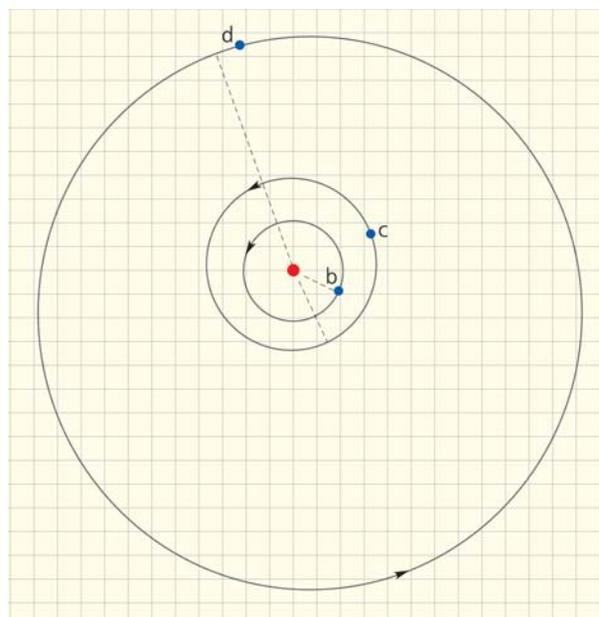


Рис.13. Система 47 UMa. Не исключено, что она содержит и другие планеты. Масштаб ячейки схемы 1×1 а.е. (Графика: Wikimedia Commons.)

неты земного типа могут существовать на длительных шкалах времени, не испытывая существенных возмущений орбит со стороны других планет (или звезд-компаньонов в системах двойных звезд).

Естественно, что планеты земного типа, расположенные в зонах жизни, представляют перво-степенный интерес. В системе **Глизе 581** (рис.12), состоящей из красного карлика (звезды спектрального класса M3V) и трех планет — горячего нептунa и двух сверхземель, одна из последних, массой $5 M_E$ и с орбитальным периодом 13 сут, оказалась, согласно вычислениям, в зоне обитаемости. Близка по конфигурации к Солнечной (с учетом эффектов селекции) система **47 Большой Медведицы** — желтый карлик (спектральный класс G0) и три планеты-гиганта с массами 2.53 , 0.54 и $1.64 M_J$ и орбитальными периодами 1078, 2390 и 14000 сут. Две из них имеют орбиты, близкие к круговым (рис.13). В зоне жизни здесь могут быть гипотетические планеты с орбитами радиусом от 0.8 до 1.3 а.е. Может содержать больше планет (так как далека от состояния «плотной упаковки») и система **μ Жертовника** — желтый карлик (спектральный класс G3), у которого пока обнаружены имеющие почти круговые орбиты сверхземля и три планеты-гиганта. Массы планет составляют 0.033 , 0.52 , 1.68 и $1.81 M_J$, орбитальные периоды — 9.6, 311, 643 и 4206 сут. Вторая и третья близки к резонансу 2/1; обе эти планеты входят в зону жизни.

«Другие миры» таят много загадок и ждут своих исследователей.

Сестра Земли

Более полувека назад, в 1959 г., в СССР и США одновременно вышли две научно-фантастические повести — «Сестра Земли» Георгия Мартынова и «Планета-сестра» («Sister Planet») Пола Андерсона. Названия говорят сами за себя: речь идет о планетах, мало отличимых от Земли и так же пригодных для жизни. Когда наша статья была уже в процессе подготовки к печати, мировые СМИ облетело известие: найдена экзопланета, которую можно назвать сестрой Земли (сбылись и эти грезы писателей-фантастов!) — хотя и не родной, а скорее двоюродной (кузиной). Открытие состоялось благодаря все тому же великолепному космическому телескопу «Кеплер». Более трех лет ученые тщательно обрабатывали полученные с его помощью данные о транзитах у одной из многих наблюдавшихся звезд, прежде чем объявить об открытии 17 апреля 2014 г. [26]. Планета-кузина получила наименование Кеплер-186f. Она входит в систему красного карлика Кеплер-186, расположенного в созвездии Лебедя на расстоянии 500 св. лет от нас. Кроме планеты f, система включает еще по меньшей мере четыре планеты; все они ближе к своему солнцу, чем планета f. Почему кузина, а не сестра? Кеплер-186f — скальная планета таких же (с погрешностью в пределах десятка процентов) размеров, что и Земля; как и Земля, она находится в «зоне жизни»; однако родительская звезда существенно меньше Солнца по размерам, массе (в два раза), существенно холоднее (это красный, а не желтый карлик) и слабее Солнца по светимости

(в 25 раз!), поэтому околозвездная зона жизни компактнее: ее внешняя граница имеет радиус всего 0.4 а.е. (это радиус орбиты Меркурия). «Кузина» движется вблизи этой внешней границы; соответственно, ее орбитальный период в 3 раза меньше земного года — точнее, он равен 130 сут. Таким образом, Кеплер-186f отличается от Земли спект-

ральным составом падающего на нее излучения и продолжительностью года. Это серьезные отличия; однако сейчас, когда открытия новых экзопланет земного типа следуют одно за другим, мало кто сомневается, что со временем, и возможно очень скоро, во Вселенной найдутся и «родные сестры», и «близнецы» Земли. ■

Литература

1. Ксанфомалити Л.В., Зеленый Л.М., Захаров А.В., Кораблев О.И. Планетные системы ближайших звезд // Природа. 2010. №8. С.3—13; №9. С.3—13.
2. Charbonneau D., Brown T.M., Burrows A. et al. When extrasolar planets transit their parent stars // Protostars and Planets V / Eds B.Reipurth, D.Jewitt, K.Keil. Tucson, 2007. P.701—716.
3. Greaves J.S., Fischer D.A., Wyatt M.C. et al. Predicting the frequencies of diverse exoplanetary systems // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2007. V.378. P.L1—L5.
4. Anosova J., Orlov V.V., Pavlova N.A. Dynamics of nearby multiple stars. The Alpha Centauri system // Astron. Astrophys. 1994. V.292. P.115—118.
5. Dumusque X., Pepe F., Lovis C. et al. An Earth-mass planet orbiting α Centauri B // Nature. 2012. V.491. P.207—211.
6. Sabu K.C., Casertano S., Bond H.E. et al. Transiting extrasolar planetary candidates in the Galactic bulge // Nature. 2006. V.443. P.534—540.
7. Marcy G., Butler R.P., Fischer D. et al. Observed properties of exoplanets: masses, orbits, and metallicities // Progress of Theoretical Physics Supplement. 2005. V.158. P.24—42.
8. Weiss L.M., Marcy G.W., Rowe J.F. et al. The mass of KOI-94d and a relation for planet radius, mass, and incident flux // Astrophys. J. 2013. V.768. P.14—32.
9. Fischer D.A., Valenti J. The planet-metallicity correlation // Astrophys. J. 2005. V.622. P.1102—1117.
10. Sotin C., Grasset O., Mocquet A. Mass-radius curve for extrasolar Earth-like planets and ocean planets // Icarus. 2007. V.191. P.337—351.
11. Шевченко И.И. Непредсказуемые орбиты // Природа. 2010. №4. С.12—21.
12. Чуриков Б.В. Нелинейные резонансы и динамическая стохастичность // Природа. 1982. №7. С.15—25.
13. Deck K.M., Holman M.J., Agol E. et al. Rapid dynamical chaos in an exoplanetary system // Astrophys. J. 2012. V.755. P.L21—27.
14. Попова Е.А., Шевченко И.И. Планетная динамика в системе Alpha Centauri: диаграммы устойчивости // Письма в Астрон. журн. 2012. Т.38. С.652—659.
15. Doyle L.R., Carter J.A., Fabrycky D.C. et al. Kepler-16: A transiting circumbinary planet // Science. 2011. V.333. P.1602—1606.
16. Popova E.A., Shevchenko I.I. Kepler-16b: safe in a resonance cell // Astrophys. J. 2013. V.769. P.152—158.
17. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 1969.
18. Современные проблемы механики и физики космоса / Под. ред. В.С.Авдеевского, А.В.Колесниченко. М., 2003.
19. Marov M.Ya., Kolesnichenko A.V. Turbulence and self-organization. Modeling astrophysical objects. N.Y., 2013.
20. Маров М.Я. Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии // УФН. 2005. Т.175. №6. С.668—678.
21. Колесниченко А.В., Маров М.Я. // Астрон. вестник. 2014. №5. В печати.
22. Chambers J.E. Terrestrial planet formation // The search for other worlds / Eds S.S.Holt, D.Deming. American Institute of Physics Conference Series. 2004. V.713. P.203—212.
23. Lineweaver C.H., Fenner Y., Gibson B.K. The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way // Science. 2004. V.303. P.59—62.
24. Bounama C., Von Bloh W., Franck S. How rare is complex life in the Milky Way? // Astrobiology. 2007. V.7. P.745—756.
25. Kasting J.F., Catling D. Evolution of a habitable planet // Annual Review of Astron. Astrophys. 2003. V.41. P.429—463.
26. Quintana E.V., Barclay T., Raymond S.N. et al. An Earth-sized planet in the habitable zone of a cool star // Science. 2014. V.344. P.277—280.