

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Экзопланеты: природа и модели

М.Я. Маров, И.И. Шевченко

Экзопланеты представляют собой новый и широчайший класс астрономических объектов, возможности исследований которых открылись лишь с конца прошлого столетия. За двадцать с небольшим лет, благодаря постоянно совершенствующимся методам наземных и особенно космических наблюдений, открыто несколько тысяч планетных систем у других звёзд, и этот процесс непрерывно развивается. Экзопланеты представляют первостепенный интерес для астрофизических, космохимических и динамических исследований. На новую научную основу поставлено решение фундаментальных проблем звёздно-планетной космогонии, в первую очередь проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы. Обнаружение планет земного типа, особенно расположенных в орбитальных зонах, отвечающих климатическим условиям, благоприятным для возникновения и поддержания жизни, открывает новые перспективы для прогресса астробиологии.

**Ключевые слова:** экзопланеты, космогония, планетные системы, Солнечная система

PACS numbers: 05.45.Ac, 45.50.Pk, 95.10.Ce, 96.15.De, 97.82.-j

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038673>

### Содержание

1. Введение (897).
  2. Первые открытия (898).
  3. Методы обнаружения (899).
  4. Самые близкие и самые далёкие обнаруженные экзопланеты (901).
    - 4.1. Планеты в системах Alpha Centauri и Proxima Centauri.
    - 4.2. Наиболее удалённые системы экзопланет.
  5. Типы и физические свойства экзопланет (903).
    - 5.1. Основные типы экзопланет. 5.2. Статистика масс и размеров.
    - 5.3. Связь с металличностью звёзд.
  6. Атмосферы экзопланет (905).
    - 6.1. Общие свойства. 6.2. Атмосферная диссипация.
  7. Архитектура и динамика экзопланетных систем (907).
    - 7.1. Динамическая классификация. 7.2. Критерии устойчивости.
    - 7.3. Миграция и приливные эффекты.
  8. Формирование планетных систем у одиночных звёзд (910).
    - 8.1. Газопылевые диски. 8.2. Эволюция вещества диска. 8.3. Гравитационная и гидродинамическая (потоковая) неустойчивости.
    - 8.4. Фрактальные пылевые кластеры. 8.5. Первичные твёрдые тела, планетезимали и зародыши планет.
  9. Планетные системы двойных и кратных звёзд (915).
    - 9.1. Генезис и устойчивость.
    - 9.2. Мультипланетные системы.
    - 9.3. Статистика резонансов.
    - 9.4. Структуры планетезимальных циркумбинарных дисков.
    - 9.5. Сценарии формирования планет в системах двойных звёзд.
  10. Возможная обитаемость экзопланет (924).
    - 10.1. Основные предпосылки.
    - 10.2. Зоны обитаемости в планетных системах.
  11. Перспективы (928).
  12. Заключение (930).
- Список литературы (930).

### 1. Введение

Экзопланеты (планеты, не принадлежащие Солнечной системе и находящиеся на орbitах других звёзд) представляют собой новый широчайший класс объектов для астрономических, физических и динамических исследований, и в первую очередь для решения проблем звёздно-планетной космогонии и космохимии. Образование планет является широко распространённым, но вместе с тем достаточно сложным процессом, который складывается из последовательности нескольких стадий, включающих различные физико-химические механизмы и взаимодействия. Статистика, основанная на числе обнаруженных планет в ближайших областях нашей Галактики, а также на базовых концепциях формирования и эволюции звёзд, приводит к оценке, согласно которой по крайней мере около трети звёзд в Галактике обладают планетами, и это означает, что их общее количество сопоставимо с числом звёзд или даже превышает его. Если же распространить эту оценку на другие галактики, то общее число планет в наблюдающей Вселенной может быть сопоставимо с числом звёзд ( $\sim 10^{22}$ ) или превосходить его. Однако до недавнего времени обнаружить экзопланеты не удавалось из-за

М.Я. Маров <sup>(1,\*)</sup>, И.И. Шевченко <sup>(2, 3, \*\*)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт геохимии и аналитической химии

им. В.И. Вернадского РАН,  
ул. Косыгина 19, 119991 Москва, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Пулковское шоссе 65, корп. 1, 196140 Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

<sup>(3)</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

E-mail: <sup>(\*)</sup>marovmail@yandex.ru, <sup>(\*\*)</sup>iis@gaoran.ru

Статья поступила 21 мая 2019 г.,  
после доработки 22 сентября 2019 г.

недостаточных возможностей астрономических методов и инструментов.

Идея о том, что планетные системы широко распространены во Вселенной, и в частности в нашей Галактике, была выдвинута задолго до открытия первой внешнесолнечной планеты. Эта идея подкреплялась наблюдаемым видом распределения протозвёзд фиксированной массы по их угловым моментам. Действительно, двойные и кратные звёзды рождаются из протозвёздных газопылевых облаков, если их угловой момент превышает некоторое пороговое значение, при этом в десятки раз меньшие ограничения налагаются на угловой момент звёзд главной последовательности, чтобы обеспечить устойчивость их собственного вращения. В промежуточном диапазоне рождаются звёзды с планетными системами, другими словами, они передают избыток углового момента планетам. Подобно Солнечной системе, в этом случае общая масса всей системы сосредоточена в звезде, а основная часть полного углового момента находится в сформированной планетной системе. Однако точный механизм передачи углового момента от протозвезды к планетной системе до сих пор не вполне ясен.

В отличие от звёзд, доступных статистическому анализу и классификации, например, на диаграмме Герцшпрунга – Рессела, позволяющей прослеживать их эволюцию, мы до недавнего времени имели только один пример планетных систем — нашу Солнечную систему. Её механические, физические и космохимические свойства служат ограничениями при разработке сценариев зарождения и эволюции других планетных систем. Существующие структуры в системах планет и спутников Солнечной системы определённо указывают на единый процесс их формирования, в то время как данные относительно свойств и состава вещества поверхности и атмосферы для планет и малых тел при сравнении с образцами материала их зародышей дают подход к решению основополагающих космохимических проблем.

Полученные данные наблюдений экзопланет привели к выводу, что существуют планеты разных типов начиная от "горячих Юпитеров" — планет с массой, превышающей массу Юпитера, находящихся на очень близких к родительской звезде орbitах, — до маломассивных планет в широком диапазоне размеров орбит. Основываясь на имеющейся статистике, можно считать, что около 20 % от общего числа экзопланет могут быть сопоставимы по размерам с Землёй и планетами земной группы в Солнечной системе. Архитектуры обнаруженных планетных систем оказались совершенно не похожими на Солнечную систему, а их природные комплексы отличаются большим разнообразием. Важно, тем не менее, иметь в виду, что целый ряд известных экзопланет находится в зонах с благоприятными климатическими условиями (так называемых "зонах обитаемости"), пригодными для существования различных форм жизни. Из приведённой выше оценки общего числа планет следует, что в зонах обитаемости могут находиться миллиарды планет, что повышает шансы обнаружения жизни за пределами Земли.

Рост числа открытых экзопланет с разнообразными природными свойствами позволил перейти к новому этапу исследований с использованием геофизических методов анализа. Определение размера и массы планеты сделало возможным определение средней плотности как главного критерия типа планеты: газовой, каменной или ледяной. Данные о структуре и химическом составе атмосфер внесли большой вклад в анализ свойств их газо-

вых оболочек, а в сочетании с оценками температуры и давления — в понимание ожидаемых природных условий на поверхности. Полученные результаты наблюдений позволили наложить важные ограничения на разработку математических моделей физических и космохимических особенностей планет, динамики планетных систем и сценариев эволюции. И, конечно, с открытием экзопланет и протопланетных дисков произошёл настоящий прорыв в звёздно-планетной космогонии, ставшей одним из ключевых направлений современной астрофизики.

## 2. Первые открытия

Первые экзопланеты открыли в начале 1990-х годов Александр Волшан и Дейл Фрейл [1] у пульсара PSR B1257-12 — нейтронной звезды с массой в 1,4 раза больше солнечной. В его радиоимпульсах с периодом 6 мс, соответствующих собственному периоду вращения пульсара, были выявлены дополнительные модуляции. Они были объяснены присутствием у нейтронной звезды обращающихся вокруг неё двух планет с орбитальными периодами 66,54 и 98,21 сут и массами  $3,4 M_{\oplus}$  и  $2,8 M_{\oplus}$  (где  $M_{\oplus}$  — масса Земли) соответственно. Более строго, под оценкой массы понимается произведение  $M_p \sin i$ , где  $M_p$  — масса планеты,  $i$  — наклон плоскости планетной орбиты к картинной плоскости. Позднее были выявлены планеты и у других пульсаров; следует, однако, заметить, что открытия планет у пульсаров, в общем, весьма редки из-за предположительно малого числа планет у "остаточных" звёзд, испытавших стадию сверхновой.

Экзопланету у звезды главной последовательности впервые открыли в 1995 г. Мишель Мейор и Дидье Кело [2]: был обнаружен горячий Юпитер, обращающийся вокруг звезды 51 Pegasi<sup>1</sup>. С тех пор благодаря совершенствованию астрономических методов и инструментов наблюдений, но главным образом благодаря исследованиям при помощи космических аппаратов (КА) прогресс был впечатляющим: менее чем за четверть века было открыто более четырёх тысяч экзопланет, подавляющее большинство которых входит в состав более чем трёх тысяч планетных систем. Темп открытий непрерывно ускоряется и напрямую связан с периодами работы специализированных космических миссий, таких как космический телескоп "Кеплер". Среди открываемых экзопланет примерно треть входит в мультипланетные системы — системы с двумя или большим числом планет [3]. Преобладание однопланетных систем объясняется, однако, эффектом наблюдательной селекции, так как относительно маломассивные планеты обнаружить значительно труднее, чем планеты-гиганты, находящиеся к тому же на орбитах, близких к родительским звёздам; открывают прежде всего наиболее массивные планеты. Эта причина лежит и в основе наблюдаемого "дефицита" многопланетных систем, поскольку обнаружение планет относительно малых (земных) размеров требует использования более совершенных методов и инструментов наблюдений.

История основных астрономических методов, применяемых при исследовании экзопланет, восходит к концу XX века. Среди них измерение вариаций радиальных скоростей (1989 г., первый успех в 1995 г.), пульсартайминг (1992 г.), транзитный метод (1999 г.), метод

<sup>1</sup> За это достижение Мишель Мейор и Дидье Кело удостоены Нобелевской премии по физике 2019 г. с формулировкой "за открытие экзопланеты, обращающейся вокруг солнцеподобной звезды".

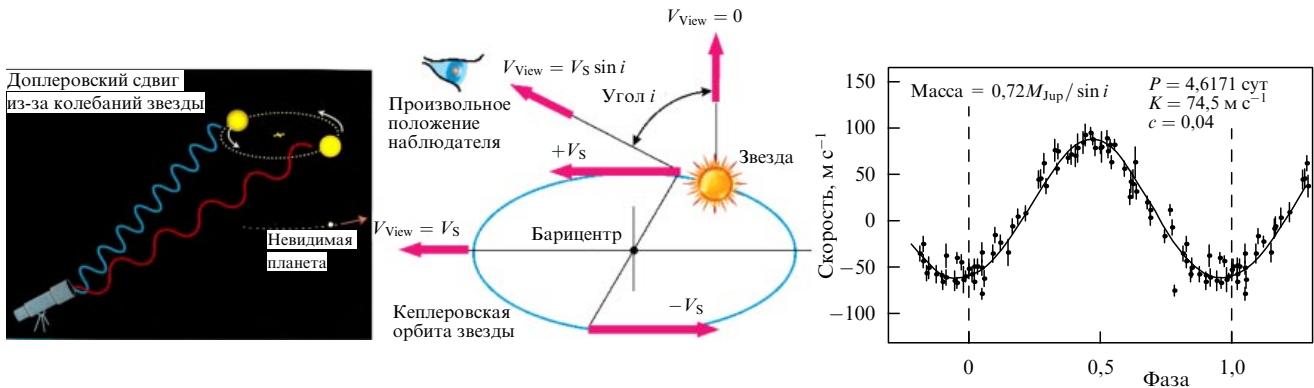


Рис. 1. Схематическое представление метода радиальной скорости и кривая измерений при наличии планеты;  $K$  — полуамплитуда вариаций радиальной скорости,  $c$  — смещение кривой по фазе. (Согласно [2].)

микролинзирования (2004 г.), прямое получение изображений (2004 г.). Кратко рассмотрим эти методы.

### 3. Методы обнаружения

Мы обсудим в первую очередь наиболее эффективные из известных на сегодня методов обнаружения экзопланет, но кратко коснёмся также некоторых перспективных направлений. К сожалению, большинство используемых методов отягощено эффектами наблюдательной селекции, в связи с чем, как уже говорилось, открываются прежде всего массивные планеты на близких к родительской звезде орbitах.

Методы обнаружения экзопланет подразделяются на *косвенные* и *прямые*.

К косвенным методам относятся *астрометрический* — измерение малых колебаний звезды в картинной плоскости из-за наличия у неё планеты (планет); *RV-метод* (от Radial Velocity), или метод радиальной скорости, — измерение периодических вариаций радиальной скорости звезды из смещения линий в её спектре; *пульсартайминг* — измерение вариаций радиосигналов от пульсаров во времени; *метод микролинзирования* — измерение особенностей на изображениях звёзд при наблюдениях событий гравитационного линзирования.

К прямым относятся методы, основанные на непосредственных наблюдениях собственного или отражённого излучения планет. Методы прямых наблюдений чрезвычайно трудны в применении из-за огромного контраста световых потоков от родительской звезды и от планеты; к примеру, контраст потоков в оптическом диапазоне от Солнца и от Земли для удалённого наблюдателя составляет не менее  $\sim 10^{10}$ . В инфракрасной области контраст несколько меньше. Посредством прямых наблюдений открыты планеты у коричневых карликов<sup>2</sup>; первая планета, открытая таким методом — планета-гигант 2M1207-39b [4, 5], но для обнаружения

планет у звёзд использование прямых методов проблематично.

К промежуточным между прямыми и косвенными методами следует отнести широко используемый в настоящее время метод наблюдения *транзитов* — прохождения планеты по диску звезды, что вызывает кратковременное слабое понижение блеска звезды. Разумеется, транзиты могут наблюдаваться только в том случае, если наклон орбиты планеты относительно луча зрения достаточно мал. К нему примыкает метод *вариаций времени транзита TTV* (Transit Timing Variations) — анализ отклонений времени транзита от строгой периодичности<sup>3</sup>.

Обсудим перечисленные методы более подробно.

*RV-метод*, который называют также методом *доплеровской спектроскопии*, заключается в измерении периодических вариаций радиальной скорости звезды, обусловленных наличием планет (рис. 1). В предположении, что орбита планеты круговая, а масса родительской звезды примерно равна солнечной, основная формула RV-метода очень проста:

$$m_p \sin i = 0,035 P^{1/3} \Delta V,$$

где  $m_p$  — масса планеты (в массах Юпитера),  $P$  и  $\Delta V$  — наблюдаемый период (в годах) и полуамплитуда изменения радиальной скорости звезды (в м с<sup>-1</sup>),  $i$  — угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости (см., например, [6, формула (2.29)]). Очевидно, что при  $i = 0$  эффект ненаблюдаем.

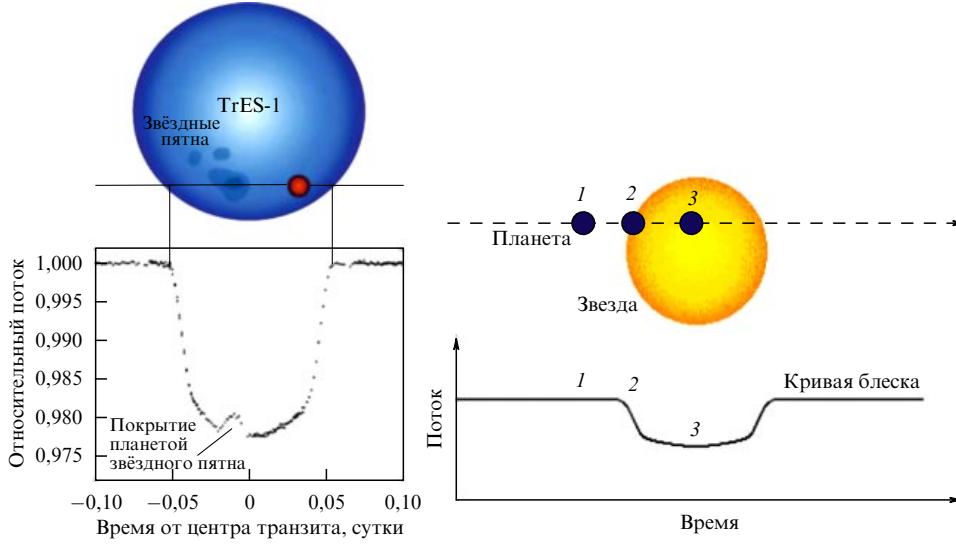
Наблюдаемые RV-кривые, представляющие радиальную скорость звезды как функцию времени, дают материал для моделирования планетных орбит. Как прямо следует из приведённой формулы, Земля вынуждает Солнце совершать радиальные (для удалённого внешнего наблюдателя) периодические колебания с максимальной скоростью 10 см с<sup>-1</sup>, что находится далеко за пределами возможностей современных инструментов: сейчас наилучшее разрешение составляет примерно 50 см с<sup>-1</sup>. Таким образом, обнаружение RV-методом планеты земного типа, находящейся в зоне потенциального существования жизни у звёзд солнечного типа, в настоящее время невозможно.

Как уже отмечалось, первая экзопланета 51 Peg b [2] у звезды главной последовательности была открыта именно RV-методом. Её родительская звезда — почти близ-

<sup>2</sup> Масса планет ( $\sim 0,001$  массы Солнца  $M_\odot$  и менее) незначительна по сравнению с массами звёзд ( $M > 0,08 M_\odot$ ) и промежуточных объектов — коричневых карликов (субзвёзд)  $\sim (0,02–0,08) M_\odot$ . Тепловыделение в недрах коричневых карликов происходит в основном за счёт реакций на ядрах лёгких элементов (дейтерия, лития, бериллия, бора), в отличие от классической протон-протонной реакции термоядерного синтеза у звёзд. После достаточно быстрого исчерпания запасов лёгких элементов коричневые карлики становятся массивными планетоподобными объектами с однородным по глубине химическим составом, что обусловлено полностью конвективным тепломассопереносом на активной стадии эволюции.

1\*

<sup>3</sup> Анализ отклонений фазы применяется и в рамках RV-метода.



**Рис. 2.** Кривая блеска звезды TrES-1 [8]. Малый пик во время транзита вызван тем, что планета покрывает звёздное пятно — аналог солнечных пятен. (Источник: G. Laughlin, <http://oklo.org/>.)

неп Солнца (спектральный класс G5V, масса  $1,06M_{\odot}$ , здесь и ниже  $M_{\odot}$  — масса Солнца). Планета 51 Peg b стала первым представителем нового класса экзопланет, известного как *горячие юпитеры*.

**Метод транзитов.** Феномен транзитов уже давно хорошо известен астрономам — он применялся при наблюдениях прохождения по диску Солнца Венеры и Меркурия. Транзит Венеры вызывает уменьшение полного светового потока от Солнца на 0,01 %. Такого же порядка "транзитный сигнал" следует ожидать и от экзопланет земного типа, обращающихся вокруг звёзд солнечного типа. Интересно, что метод транзитов для поиска экзопланет (наблюдения периодических потемнений звезды из-за прохождения по её диску планеты) впервые предложил в 1952 г. Отто Струве — представитель знаменитой астрономической династии Струве.

В 2000 г. Шарбонно и др. [7] впервые обнаружили планету транзитным методом из анализа кривой блеска звезды HD 209458, у которой эта планета была открыта ранее RV-методом. На рисунке 2 показана кривая блеска звезды TrES-1, построенная Шарбонно и др. [8] по результатам наблюдений при помощи космического телескопа Хаббла (HST, Hubble Space Telescope). Её любопытной деталью является малый вторичный пик вблизи минимума блеска: он вызван тем, что планета покрывает звёздное пятно на родительской звезде.

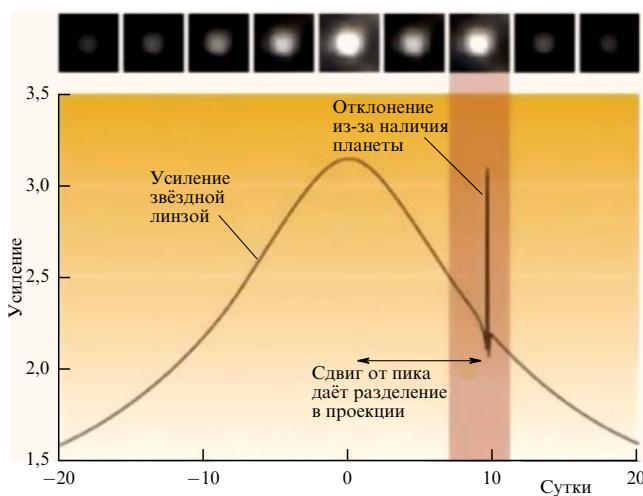
Заметим, что в случае горячих звёзд имеет место эффект наблюдательной селекции: транзиты у них наблюдать сложно, а RV-метод здесь мало что может дать. Возможно, по этой причине планетные системы наблюдаются главным образом у звёзд поздних спектральных классов. С другой стороны, наиболее подходящими для обладания "обитаемыми" планетами являются как раз звёзды поздних спектральных классов (G, K). Однако недостаток массы может приводить к другому сценарию эволюции, при котором образуются такие объекты, как коричневые карлики.

**Метод TTV.** Если система содержит более одной планеты или же родительская звезда кратная, то транзитная планета проходит между наблюдателем и звездой через непостоянные интервалы времени: из-за возмущений орбитальных элементов время транзита колеблется относительно строго периодического сигнала. На ана-

лизе переменности времён транзитов основан метод TTV. Теоретические исследования [9, 10] показали, что путём TTV-моделирования можно получить практически полную информацию о массах и орбитальных элементах транзитных планет. Первые результаты моделирования были получены для систем с несколькими транзитными планетами [11]. Несвортный и др. [12] впервые открыли этим методом "нетранзитную" планету, анализируя TTV-сигнал транзитной планеты. Таким образом, согласно образному высказыванию известного планетолога А. Морбиделли [13], «TTV-анализ возрождает славную эпоху небесной механики, когда Леверье предсказал существование и положение Нептуна из анализа аномалий в движении Урана. Теперь "чудо" Леверье стало обыденным явлением».

**Метод пульсар-тайминга.** Метод состоит в наблюдении и анализе вариаций радиовсплесков от пульсаров во времени (при отсутствии планет всплески строго периодичны). Как отмечено выше, этим методом в 1992 г. были открыты самые первые известные экзопланеты [1, 14]. Однако конфигурация их орбит, вероятно, сформировалась на стадии образования пульсара после взрыва сверхновой, который должен был "разметать" старую систему, если таковая существовала.

**Метод микролинзирования** — пожалуй, наиболее экзотичный из применяемых сейчас методов, однако он даёт реальные результаты и с его помощью открываются экзопланеты. Основу метода составляют фотометрические наблюдения увеличения блеска удалённой звезды из-за гравитационного линзирования её света системой звезда — планета, пересекающей луч зрения "наблюдатель — удалённая звезда". В случае, если линзирующая звезда имеет планету, при прохождении света наблюдается узкий вторичный пик, вызываемый планетой (рис. 3). С целью обнаружения планет этим методом сейчас проводится мониторинг тысяч звёзд в направлении на Магеллановы Области и центр (балдж) Галактики в рамках проектов OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment — эксперимент по оптическому гравилинзированию) и MOA (Microlensing Observations in Astrophysics — наблюдения микролинзирования в астрофизике). Полное наблюдение события микролинзирования может длиться несколько суток и даже около месяца. Замеча-



**Рис. 3.** Моделирование увеличения наблюдавшего блеска удалённой звезды из-за гравитационного линзирования её света системой звезда – планета, пересекающей луч зрения "наблюдатель – звезда". Вторичный узкий пик представляет собой "планетный сигнал". (Источник: PLANET Microlensing Collaboration.)

тельным достоинством этого метода является его малая подверженность эффектам селекции: с его помощью открываются даже планеты земной массы. В настоящее время лишь этот метод, наряду с методом пульсар-тайминга, позволяет открывать планеты столь малых масс. Поэтому он может дать в перспективе ценный материал о *функции масс* планет — распределении планет по массам.

*Астрометрический метод* — это исторически самый первый среди косвенных методов, посредством которого предпринимались попытки открытия экзопланет. Основу метода составляют наблюдения периодических колебаний звезды в проекции на картинную плоскость: звезда при наличии у неё планеты (планет) движется в проекции вокруг барицентра системы звезда – планета. Однако размер этой проекции очень мал. В 1960-е годы Ван де Камп объявил об открытии им периодической модуляции, вызываемой спутником планетной массы, в видимом движении звезды Барнarda — одной из ближайших к Солнцу звёзд. Более поздние наблюдения при помощи космического телескопа Хаббла это открытие не подтвердили. Заметим, что, хотя данный метод имеет весьма продолжительную историю заявленных открытий планет, до сих пор ни одно из них не было подтверждено независимо. Тем не менее совсем недавно, в 2018 г., он позволил на основе данных с КА Гайя (Gaia) уточнить массу планеты  $\beta$  Pic b, открытой ранее путём прямых наблюдений [15].

Метод требует чрезвычайно высокой астрометрической точности. Действительно, вариации положения Солнца относительно барицентра из-за наличия Юпитера, если наблюдать Солнце с расстояния 10 пк, составят менее одной миллисекунды дуги ( $0,001$  угловой секунды); при этом точность астрометрии с HST составляет  $\sim 0,1$  угловой секунды. Однако этот метод перспективен, так как на величину определяемой с его помощью массы планеты не влияет неопределенность в наклоне планетной орбиты относительно луча зрения. Ожидается, что с КА Гайя астрометрическим методом будет открыто от 10000 до 50000 планет-гигантов.

*Метод дифференциальной спектрофотометрии.* Этот метод даёт информацию о составе планетных атмосфер.

Данные спектральных наблюдений во время транзитов сопоставляются с данными перед началом транзита и сразу после него (т.е. непосредственно до и после вторичного затмения). Он может применяться, однако, только на очень больших телескопах. С помощью наблюдений с HST этим методом впервые открыто присутствие натрия (по линиям поглощения) в атмосфере HD 209458b [16], а с КА "Спиртцер" (Spitzer) — присутствие воды и метана в атмосфере HD 189733b [17, 18]. Получены и многие другие интересные данные о химическом составе атмосфер экзопланет.

Наконец, упомянем ещё о перспективных *прямых методах* для выделения слабого планетного сигнала, так или иначе исключающего свет от звезды. К ним относятся: коронография, "обнуляющая" интерферометрия, поляриметрия. *Внезатменившийся коронограф* представляет собой линзу или камеру-обскуру, установленную на пути зрения позади затмевающего диска, блокирующую свет от центрального (яркого) объекта. Такие приборы особенно перспективны для установки на КА. В основе "обнуляющей" интерферометрии лежит комбинирование световых потоков. Если в обычном интерферометре максимумы электромагнитной волны совмещаются и усиливаются, то в обнуляющем интерферометре, наоборот, максимумы и минимумы совмещаются, так что сигнал от главного (яркого) объекта обнуляется, а сигнал от планеты, поскольку он смешён относительно главного, остаётся прежним. Как и коронография, этот метод наиболее перспективен для наблюдений с КА. Используя поляриметрию, можно исключить неполяризованный свет от звезды, чтобы эффективно выделить поляризованный планетный сигнал. Ожидаемая доля поляризованного сигнала составляет при этом не более  $10^{-5}$ . В 2008 г. Бердюгина и др. [19] впервые наблюдали поляризованный сигнал от открытого ранее горячего Юпитера HD 189733b.

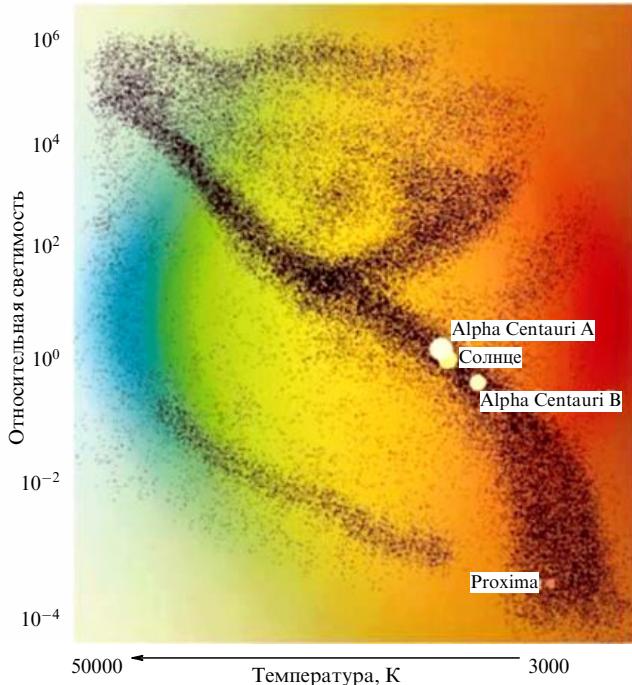
## 4. Самые близкие и самые далёкие обнаруженные экзопланеты

### 4.1. Планеты в системах Alpha Centauri и Proxima Centauri

Двойная звезда Альфа Центавра (Alpha Centauri) находится на расстоянии 1,34 пк от Солнца. Её компоненты — ближайшие к нам звёзды солнечного типа. Ещё ближе к нам (на 0,02 пк) находится звезда Проксима — красный карлик со светимостью  $6 \times 10^{-5}$  светимости Солнца. Согласно результатам расчётов Аносовой с соавторами [20], Проксима гравитационно не связана с двойной Alpha Centauri, т.е. они не образуют тройную систему. Звёзды Alpha Centauri A и B — пятая и одиннадцатая из видимых наиболее ярких звёзд неба; их наблюдаемые звёздные величины равны 0,06 и 0,59 соответственно. Они имеют исторические собственные имена: Толиман и Хадар.

17 октября 2012 г. Дюмюск с соавторами [21] объявили об открытии планеты у звезды Alpha Centauri B. Путём прецизионной доплеровской спектрометрии Дюмюск с соавторами выявили вариации радиальной скорости звезды с полуамплитудой  $51 \text{ см с}^{-1}$  и периодом 3,2 сут. Большая полуось планетной орбиты была определена равной 0,04 а.е., масса планеты  $> 1,1 M_{\oplus}$ .

Как и Alpha Centauri A, компонент B весьма близок по своим характеристикам к Солнцу (см. диаграмму Герцшрунга – Рессела (HR) на рис. 4). Alpha Centauri B холоднее Солнца (температура  $T_{\text{eff}} = 5214 \text{ K}$ , тогда как у



**Рис. 4.** (В цвете онлайн.) Звёзды Alpha Centauri (A, B), Proxima Centauri и Солнце на HR-диаграмме. (Источник: ESOimages.)

Солнца  $T_{\text{eff}} = 5772$  К); спектральный класс K1, масса равна  $0,934 M_{\odot}$ . Она демонстрирует низкую звёздную активность, что благоприятствует RV-наблюдениям. Последние охватывали период с февраля 2008 г. по июль 2011 г. Использовался спектрограф HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher) на 3,6-метровом телескопе Обсерватории Ла Силья (Чили, ESO). Это сейчас лучший инструмент для обнаружения планет RV-методом, его точность  $\sim 80$  см с $^{-1}$ . Число наблюдений спектров звезды составило 459, вероятность ошибки (false alarm probability)  $\sim 0,3\%$ .

Поскольку открытие сделано на пределе возможностей инструмента, существует вероятность ложного открытия; по оценке Дюмюска с соавторами [21], она, однако, составляет лишь 0,3 %. Поэтому большое значение имели бы наблюдения транзита планеты. Они бы позволили качественно улучшить данные об открытой планете и её орбите. Между тем вероятность транзита мала, она оценивается как 10 %, с глубиной транзита  $10^{-4}$ . Так или иначе, возможное открытие планеты у Alpha Centauri B вызывает пока неоднозначную реакцию у специалистов. Действительно, вероятный "планетный сигнал" буквально тонет в шумах. Существуют разнообразные "непланетные" астрофизические (например, связанные с активностью родительской звезды) или методические эффекты, которые потенциально могут индуцировать слабый периодический сигнал или его подобие. Раджапул с соавторами [22] показали, что найденный 3,24-суточный период, возможно, определяется временной выборочной шкалой, принятой Дюмюском с соавторами при статистической обработке наблюдательных данных.

Недавно с много меньшей заявленной вероятностью ошибки открыта планета у звезды, ещё более близкой к нам, чем Alpha Centauri. 25 августа 2016 г. Европейская южная обсерватория (ESO) объявила об открытии кооперацией наблюдателей [23] экзопланеты Proxima Centauri b — планеты, обращающейся вокруг красного кар-

лика (спектральный класс M) Proxima Centauri (Проксима Центавра). Как уже говорилось, Проксима — ближайшая к нам звезда, расстояние до неё составляет всего 1,32 пк (4,3 св. лет). Планета Proxima Centauri b обнаружена также RV-методом. Измерения проводились с помощью двух спектрографов: HARPS на 3,6-метровом телескопе в Обсерватории Ла Силья и UVES на 8-метровом телескопе VLT (Very Large Telescope — Очень большой телескоп).

Звезда Проксима Центавра не видна невооружённым глазом с Земли, её видимая звёздная величина равна 11,1 — много больше предела визуальной наблюдаемости, составляющего приблизительно 6 звёздных величин. В солнечных единицах звезда имеет массу 0,12, радиус 0,14, светимость 0,0015. Эффективная температура её поверхности  $\sim 3000$  К, что в два раза меньше солнечной. Возраст Проксимы составляет  $\sim 4,9$  млрд лет; таким образом, она примерно на 300 млн лет старше Солнца.

Согласно измерениям [23], планета Proxima Centauri b имеет массу  $1,27 \sin i$  (в земных единицах). Если это планета скального (земного) типа, то её радиус составляет 1,1 радиуса Земли или больше. Радиус орбиты Proxima Centauri b равен 0,05 а.е., что в 8 раз меньше радиуса орбиты Меркурия; орбитальный период 11,2 сут. У Проксимы Центавра зона обитаемости имеет радиальную протяжённость от  $\sim 0,042$  до  $\sim 0,082$  а.е. Англада-Эскуде с соавторами [23] установили, что орбита Proxima Centauri b находится внутри этой зоны обитаемости родительской звезды, т.е. при данном радиусе орбиты (0,05 а.е.) инсоляция планеты такова, что на её поверхности может теоретически существовать вода в жидком состоянии.

Заметим, что, хотя Proxima Centauri b находится в зоне обитаемости, она едва ли пригодна для жизни, так как на неё воздействует звёздный ветер с интенсивностью, превышающей интенсивность солнечного ветра у Земли более чем в 2000 раз [24]. К тому же Проксима Центавра представляет собой вспыхивающую звезду, испытывающую сильные внезапные изменения светимости. Но уже одно то, что Proxima Centauri b является, скорее всего, скальной планетой, находящейся в зоне обитаемости, делает её интереснейшим объектом с точки зрения поисков внеземной жизни в каких-либо формах. Большая часть светового потока от Проксимы Центавра приходится на инфракрасный диапазон, поэтому жизнь на Proxima Centauri b, если и существует, должна быть, по-видимому, совсем иной, чем на Земле.

#### 4.2. Наиболее удалённые системы экзопланет

Планеты SWEEPS-04 и SWEEPS-11 были открыты в рамках проекта SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search — Поиск затменных экзопланет в окне Стрельца) по результатам наблюдений планетных транзитов в насыщенном звёздами поле в направлении на балдж<sup>4</sup> Галактики с космического телескопа Хаббла. В рамках проекта SWEEPS проводились наблюдения в течение 7 сут [25, 26] в созвездии Стрельца в направлении на центр Галактики. Поле обзора SWEEPS имеет размеры  $202 \times 202$  угловых секунд и включает 180000 звёзд, у которых с HST возможно выявление планет-гигантов Юпитерианского типа.

<sup>4</sup> Балдж — центральная сфероидальная составляющая нашей Галактики. Состоит в основном из старых звёзд: красных гигантов, красных карликов, переменных типа RR Лиры; включает шаровые скопления. Его радиус равен примерно 2 кпк.

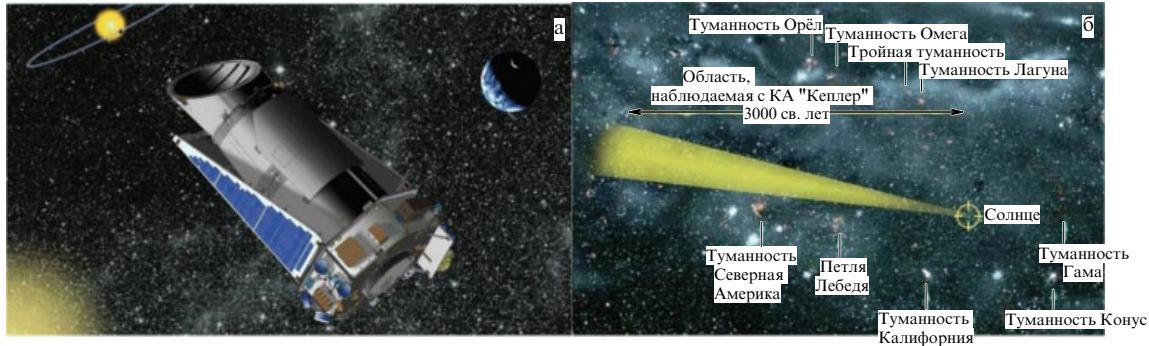


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Телескоп "Кеплер" (а) и область его наблюдения на небесной сфере (б).

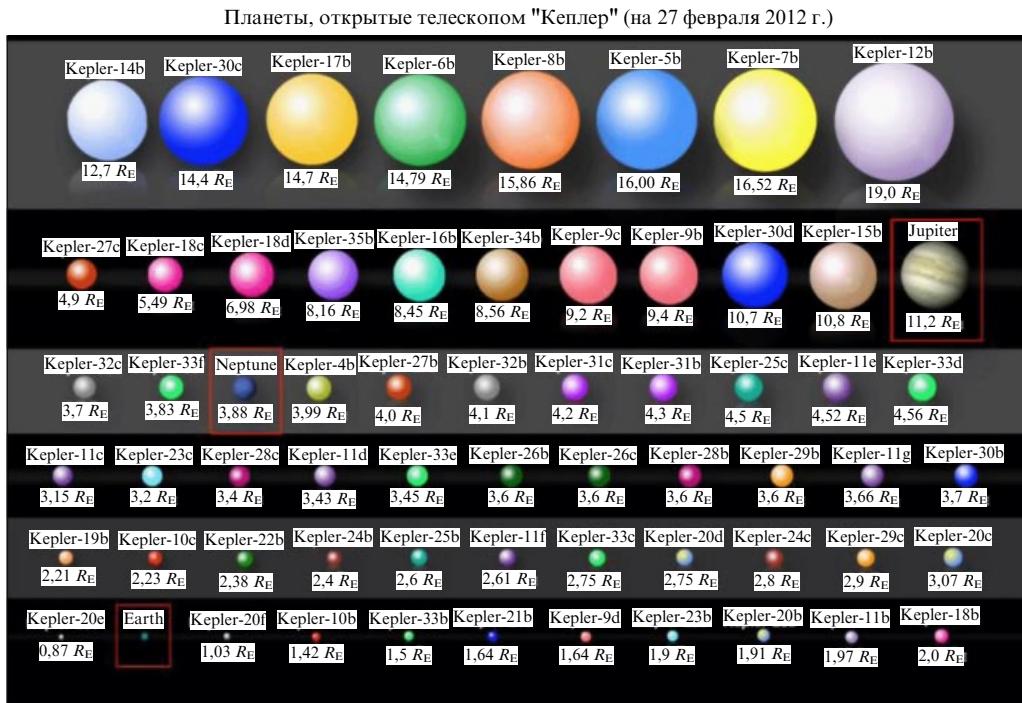


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Примеры основных типов экзопланет, открытых с КА "Кеплер" (выборочная "демография" экзопланет). (Источник: Ames Res. Center, NASA.)

Планеты SWEEPS-04 и SWEEPS-11 — наиболее удалённые от Солнца из известных на сегодня экзопланет. Расстояние до них оценивается в 8,5 кпк, т.е. примерно 30 тыс. св. лет! Массы этих двух планет равны примерно 4 и 10 массам Юпитера, а орбитальные периоды — 4,2 и 1,8 сут. Это типичные горячие юпитеры. Их родительские звёзды — звёзды солнечного типа. Саху и др. [26] построили RV-кривые для SWEEPS-04 и SWEEPS-11 на основе данных наблюдений на 8-метровом телескопе VLT Европейской южной обсерватории (Чили). Как оказалось, фазы транзитов и RV-вариаций для SWEEPS-11 согласуются, что служит хорошим подтверждением открытия этой планеты.

## 5. Типы и физические свойства экзопланет

### 5.1. Основные типы экзопланет

В открытия экзопланет и их классификацию фундаментальный вклад внесли наблюдения, проводившиеся космическим телескопом "Кеплер" (НАСА) с диаметром зеркала 90 см. Приблизительно за три года работы КА

проводены наблюдения свыше 170000 звёзд в созвездиях Лебедя и Лиры, открыты 3630 подтверждённых планет и 4175 кандидатов, требующих подтверждения. Сам аппарат и область наблюдения показаны на рис. 5, а примеры основных открытых им типов экзопланет согласно принятой сейчас классификации — на рис. 6.

### 5.2. Статистика масс и размеров

Открытие тысяч экзопланет позволило охарактеризовать этот класс астрофизических объектов, систематизировать их в виде своего рода "демографии" экзопланет. Первоначальные наблюдения, проведённые методом радиальных скоростей, могли бы создать впечатление, что большинство планет имеют массы порядка юпитерианской (таков вклад горячих юпитеров); однако оказалось, что это явный эффект наблюдательной селекции, так как прежде всего открываются наиболее массивные планеты. Число открываемых планет с массами порядка массы Нептуна и с меньшими массами постоянно увеличивается [27]. С другой стороны, наблюдается резкое уменьшение числа планет большой массы. Распределение планет по массам описывается функцией

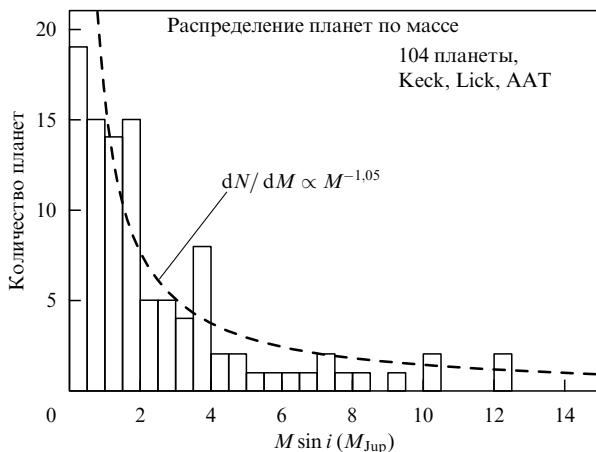
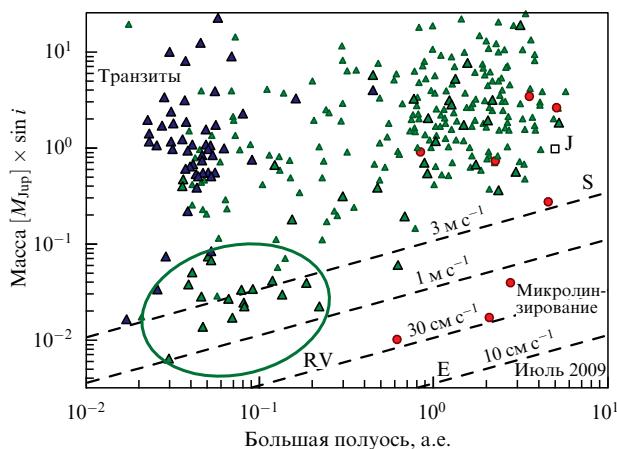


Рис. 7. Распределение планет по массам [27].

Рис. 8. (В цвете онлайн.) Массы экзопланет в зависимости от большой полуоси орбиты. Зелёные треугольники — метод радиальных скоростей, синие треугольники — метод транзитов, красные точки — метод микролинзирования. J, S, E — планеты Солнечной системы (Юпитер, Сатурн, Земля) и соответствующие им амплитуды радиальной скорости (для Земли  $9 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ). (Согласно [28].)

$1/M$ , т.е. носит гиперболический характер (рис. 7). Этот эффект, скорее всего, реален, так как известные эффекты селекции не сказываются на наблюдательных данных о планетах столь больших масс. На рисунке 8 показаны массы наблюдавшихся экзопланет в зависимости от боль-

шой полуоси орбиты  $a$ . На графике заметно как доминирование горячих юпитеров, так и, с другой стороны, дефицит планет меньших масс при относительно больших значениях  $a$ .

На графике масса — радиус для 138 планет с известными массами и размерами [28] наблюдается чёткий излом (рис. 9), соответствующий переходу от планет земного типа и ледяных гигантов ( $M < 150 M_E$ ) к газовым гигантам ( $M > 150 M_E$ ). В первом случае изоденса твёрдого тела имела бы в логарифмических координатах наклон  $1/3$ , однако наблюдаемый наклон приблизительно равен  $1/2$ . Это говорит о возрастающем вкладе летучих веществ с увеличением массы. Во втором случае радиус сохраняет с увеличением массы почти постоянное значение и даже уменьшается; это говорит о вкладе вырожденного электронного газа. Кроме того, во втором случае статистически значимыми являются увеличенные размеры планет при высоких уровнях инсоляции (потока звёздного излучения, падающего на планету); объясняется это тем, что при высоких температурах газовые гиганты "разбухают".

Как видим, спектр масс и размеров открытых экзопланет довольно широк: он охватывает три порядка по массам и немногим более одного порядка по размерам (см. рис. 9). Среди открытых на сегодня планет наибольший размер имеет планета TrES-4 (открытая в рамках проекта Trans-Atlantic Exoplanet Survey — Трансатлантический экзопланетный обзор); её радиус превышает радиус Земли в 19,8 раз, а радиус Юпитера — в 1,8 раз, при почти одинаковой с ним массе. Плотность этой планеты, таким образом, равна примерно  $0,3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , что является рекордно низким значением среди планет с известными размерами и массами [29]. Наименьшей по размерам обнаруженной экзопланетой является "субмеркурий" Kepler-37b, который лишь ненамного больше Луны и имеет массу  $\sim 0,01$  массы Земли. Вообще следует отметить, что диапазон плотностей открытых планет очень широк, что, возможно, связано с эффектом утраты летучих веществ за счёт интенсивной эрозии звёздной радиацией в близкой окрестности звезды.

### 5.3. Связь с металличностью звёзд

Важным параметром звёзд является **металличность**. Этим термином характеризуют относительное содержание в звезде элементов тяжелее водорода и гелия. Согласно наблюдательным данным, существует корреляция металличности звезды с наличием у неё планет: у звёзд малой металличности планетные системы отсут-

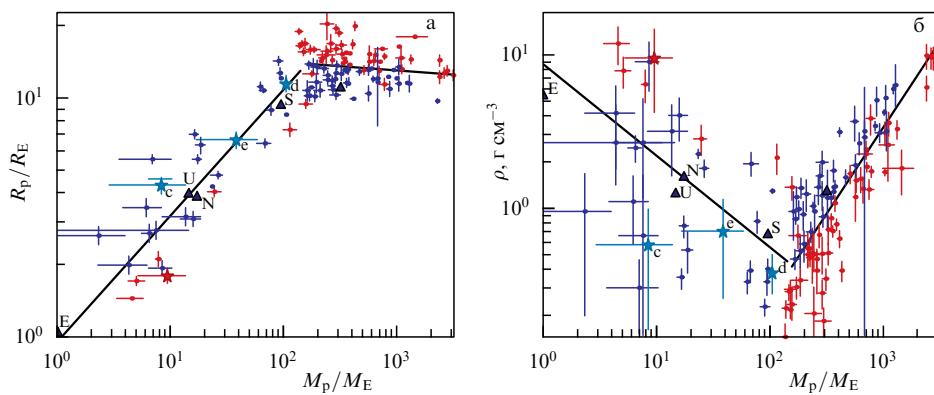
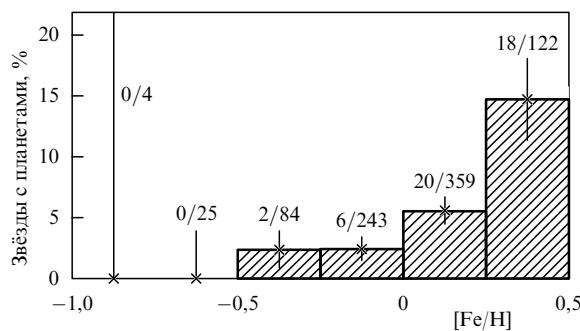


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Соотношение масса — радиус (а) и масса — плотность (б) для открытых экзопланет, согласно [28]. Красные значения — высокая инсоляция, синие значения — низкая инсоляция.



**Рис. 10.** Связь металличности звезды с наличием планет [30]. По горизонтали отложена металличность, по вертикали — доля звёзд, имеющих планеты (в процентах).

ствуют, а при металличности выше солнечной<sup>5</sup> вероятность присутствия у звезды планет резко повышается (рис. 10). Причина, по всей видимости, состоит в том, что звёзды с планетами рождаются в молекулярных облаках, обогащённых продуктами нуклеосинтеза в процессе эволюции предыдущих поколений звёзд, т.е. с относительно высоким содержанием тяжёлых элементов [30]. С ростом металличности повышается содержание железо-силикатных (каменных) пород, образующих ядра планет-гигантов, на которые аккрецируют летучие вещества, и формируются газо-ледяные планеты-гиганты, а также аккумулируются планеты, целиком состоящие из каменных (скальных) пород.

О внутреннем строении экзопланет можно судить по результатам моделирования наблюдаемых статистических зависимостей, таких, например, как масса — радиус (см. рис. 9). Можно ожидать, что внутреннее строение экзопланет 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 в основном определяются радиальным расстоянием от родительской звезды и частично внутренним тепловым потоком. У близких к звёздам планет температура поверхности может достигать  $\sim 1500$  К!

Если при анализе статистики открываемых экзопланет учесть потенциальное влияние эффектов селекции, то можно прийти к выводу, что по меньшей мере у 25 % звёзд солнечного типа в Галактике есть планетные системы [31]. Таким образом, как уже отмечалось, наличие планет у звёзд, особенно у звёзд поздних спектральных классов, отнюдь не редкое, а обычное явление. Большинство открываемых экзопланет, однако, совсем не похожи по своим природным свойствам на планеты Солнечной системы. Ярким примером этого являются горячие юпитеры. Это экзопланеты-гиганты с юпитерианскими и сверхюпитерианскими массами на орбитах, близких к родительской звезде: наблюдаются орбитальные периоды  $T$  порядка нескольких суток. Выделяют горячие юпитеры ( $T < 10$  сут) и тёплые ( $10 < T < 200$  сут). Другим наиболее известным (и, возможно, преобладающим) типом экзопланет являются миниинептуны и сверхземли, наиболее близкие по свойствам к планетам земного типа в Солнечной системе. Выделяемые среди экзопланет земли

и сверхземли имеют массы соответственно  $\sim 1-2 M_{\oplus}$  и  $\sim 2-13 M_{\oplus}$ . Их иногда определяют как планеты с недоминирующими атмосферами, когда протяжённость атмосферы, как у Земли, много меньше радиуса планеты.

Важным параметром является величина  $I/R$  — отношение масс воды (льда) и твёрдого вещества (металлов и скальных пород). В зависимости от значения этого параметра выделяют разные типы планет [32, 33]: 1)  $I/R \sim \sim 10^{-4}$  — 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 и свойства сверхземель, возможно, связаны со срывом газовых оболочек планет-гигантов ультрафиолетовым излучением родительской звезды или соседних к планетной системе массивных звёзд. Вообще наличия систем со сверхземлями можно ожидать в областях формирования звёзд больших масс, а наличия систем тех же размеров с планетами-гигантами — в областях формирования звёзд малых масс [34].

К новому, весьма необычному классу экзопланет относятся *планеты-бродяги*, *планеты-сироты* (free-floating planets, rogue planets, orphan planets) — планеты, не входящие в планетные системы звёзд. Подобные объекты открыты в звёздном скоплении в туманности Ориона [35]. Своим происхождением они могут быть обязаны выбросам из родительских планетных систем на гиперболические орбиты. Может быть выброшена относительно большая часть планет, образовавшихся в системах двойных звёзд [36]. Согласно расчётом [37] на гиперболические орбиты могла быть также выброшена часть планетезималей при формировании планет за орбитой Юпитера. Из численного моделирования долговременной динамики Солнечной системы [38] следует, что Меркурий может быть выброшен из Солнечной системы на временах порядка миллиарда лет.

Экзопланеты, не относящиеся к планетам-бродягам, входят в системы, в большинстве своём весьма отличные по строению и составу от Солнечной системы. Можно выделить следующие основные типы планетных систем [39]: 1) системы без наблюдаемых планет (пример: Тау Кита<sup>6</sup>); 2) системы с наблюдаемыми планетами и остаточными дисками (debris disks), обычно сильно асимметричной формы, состоящими из малых тел и пыли, предположительно оставшихся после формирования планет (пример: Эпсилон Эридана); 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.

## 6. Атмосфера экзопланет

### 6.1. Общие свойства

Наблюдения прохождения планет по дискам родительских звёзд (транзитов) открыли уникальные возможности исследования свойств их атмосфер. Самые общие сведения об атмосфере дают данные о наличии рэлеевского рассеяния, получаемые путём широкополосной фотометрии в оптическом диапазоне длин волн [41] и позволяющие выявить определённые свойства среды.

<sup>5</sup> В состав Солнца входят водород (74,9 %), гелий (23,8 %) и более тяжёлые элементы ("металлы") в виде примесей. Солнце содержит 99,85 % всего вещества (по массе) Солнечной системы.

<sup>6</sup> Вероятно, у Тау Кита планета всё-таки есть, согласно недавним наблюдениям Фенга с соавторами [40].

Сведения о химическом составе и структуре атмосферы экзопланеты позволяет получить метод трансмиссионной спектрометрии — характера и степени поглощения атмосферой планеты света звезды в зависимости от длины волны. Наилучшие условия для таких измерений дают протяжённые атмосферы крупных планет, в первую очередь горячих юпитеров, но также планет с массами Сатурна и Нептуна, при наблюдении спектров высокого разрешения которых легче разделить спектральные свойства звезды и планеты в условиях большого различия их яркостей. Это ограничение ещё сильнее сказывается на отождествлении линий/полос в эмиссионных спектрах с учётом неравновесных процессов и фотохимии, происходящих в хромосфере/короне звезды и верхней атмосфере планеты. Наряду с традиционными, метод трансмиссионной спектрометрии позволяет находить в спектрах поглощения также необычные атмосферные составляющие, являющиеся продуктами дегазации и атмосферной химии. Так, например, в спектрах высокого разрешения экзопланет HD 189733b и WASP-17b были найдены линии серы, что интересно связать с обнаружением молекул серосодержащих соединений в протозвёздных дисках [42–44]. Возможности метода трансмиссионной спектрометрии непрерывно совершенствуются, позволяя наряду с космическими средствами использовать также наземные телескопы, особенно с применением адаптивной оптики. Новые перспективы открывает комплексная программа CHEWIE (Clouds, Hazes and Elements vieWed on gIant Exoplanets) — обзорные наблюдения состава атмосферных газов, облаков и атмосферной дымки гигантских экзопланет.

Подобные измерения позволяют, в свою очередь, отрабатывать методики и инструменты наблюдений, открывающие перспективы изучения менее плотных атмосфер экзопланет с твёрдой поверхностью (субнептуны, сверхземли, земли), характерных для наиболее многочисленных активных карликовых звёзд M-класса (как, например, Proxima Centauri, Trappist-1). В совокупности с данными о размере транзитной планеты и модельными оценками температуры получение дополнительных данных о структуре атмосферы можно ожидать при наблюдениях потемнения краю диска и атмосферного избытка. Сведения о наличии в атмосфере транзитной экзопланеты твёрдых или жидких частиц (например, капель воды в облаках или частиц атмосферной дымки) даёт использование поляриметрии, позволяющей отличить поляризованный свет, отражённый атмосферой или поверхностью планеты, от неполяризованного света звезды. Непрерывно возрастающее число наблюдений транзитов с космических и наземных телескопов (особенно 8-метрового класса) обеспечивает накопление данных о разнообразии свойств атмосфер экзопланет, включая состав, альbedo, термобарические профили, парниковый эффект, перераспределение тепла и даже динамику. Комбинация методов транзитов и радиальных скоростей позволяет определить плотность планеты, обладающей атмосферой, что вносит вклад в понимание её климатической эволюции. Химия малых атмосферных составляющих открывает перспективы обнаружения жизни. Наряду с атмосферной химией и плотностью газовой оболочки, с этой проблемой вплотную связан вопрос о наличии у планеты собственного магнитного поля и магнитосферы и характере взаимодействия с плазмой звёздного ветра, включая формирование отошедшей ударной волны и контактного разрыва, на границе которого происходит разделение вещества натекающего газа и атмосферы.

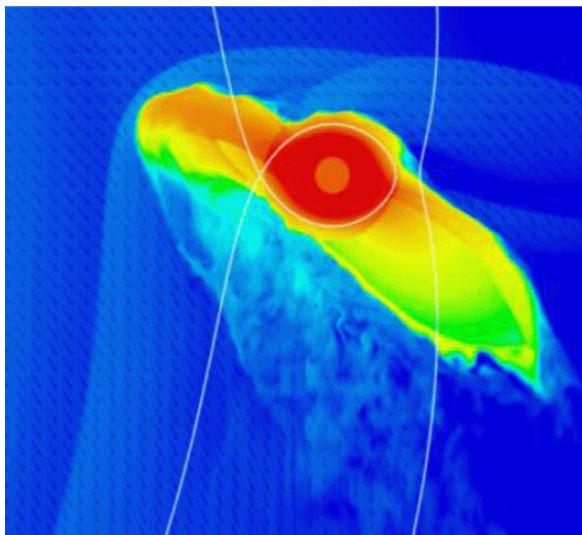
## 6.2. Атмосферная диссипация

Процессы формирования климата планеты и её климатическая эволюция тесно связаны с образованием и удержанием её атмосферы. Экзопланеты, находящиеся на близких к родительской звезде орbitах, подвержены сильному воздействию жёсткой ультрафиолетовой (XUV) и рентгеновской (X-ray) радиации. Она оказывает сильное влияние на текущие состояние и свойства верхней атмосферы и, очевидно, её воздействие было ещё сильнее на начальной стадии планетной эволюции. Здесь можно провести определённую аналогию с такими грандиозными событиями на Солнце, как корональные выбросы массы (CME), оказывающие сильное влияние на состояние атмосферы и магнитосферы Земли. Эти эффекты могли проявляться ещё сильнее для близких планет у звёзд классов G, K и M, приводя к диссипации атмосферы и даже атмосферной эрозии, тем самым препятствуя появлению жизни.

Проблеме диссипации атмосферы в космос неизменно уделялось большое внимание (см., например, [45]). Исследование процессов, в основе которых лежит взаимодействие энергичного солнечного излучения с сильно разреженным газом планетной экзосферы, потребовало разработки оригинальных кинетических моделей с использованием статистических аналогов уравнения Больцмана и алгоритмов численного моделирования Монте-Карло [46–48]. Данные модели лежат в основе интерпретации спектров излучения верхней атмосферы, оценок образования частиц со сверхтепловыми энергиями и потоков убегания при отсутствии термохимического равновесия в разреженном газе и при наличии процессов диффузии и неравновесной фотохимии. Их корректность применительно к изучению Земли и планет земной группы подкрепляется сравнением с результатами соответствующих измерений на космических аппаратах (например, в случае Марса на КА Mars Express и MAVEN). Применение такого подхода к изучению экзопланет позволило построить модели потоков диссирирующего нейтрального газа в гидродинамическом режиме и оценить скорости атмосферных потерь для горячих юпитеров и нептунов [45, 49].

Несмотря на различия в деталях моделей (численные методы решения, предполагаемые основные атмосферные компоненты и химическая сложность среды), все эти модели в целом соответствуют наблюдениям облака водорода, а расчётные скорости потери водорода совпадают друг с другом в пределах нескольких порядков величин. К сожалению, они не позволяют детально изучить эволюцию экзопланет, находящихся на близких орбитах и на больших временных интервалах. Проблема связана в основном с большими неопределённостями в факторах, используемых в моделях, таких как поток звёздной энергии в диапазоне жёсткого ультрафиолетового излучения, эффективность нагрева (преобразования поглощённой энергии фотонов в тепло), геометрические факторы, вклад тяжёлых элементов и др. Вместе с тем представляющие самостоятельный интерес модели атмосфер экзопланет, находящихся на разных стадиях эволюции, позволяют изучать историю убегания атомов из атмосфер планет земной группы в ранней Солнечной системе.

Процессы диссипации водород-доминантных атмосфер горячих юпитеров подробно обсуждаются в работе [45]. Приведены результаты модельных расчётов убегания водорода из обнаруженного протяжённого водородного облака вокруг горячих юпитеров, происходящего в гидродинамическом режиме, поскольку атмосферы мно-



**Рис. 11.** Газовая оболочка планеты HD209458b. Согласно результатам моделирования, она становится существенно несимметричной из-за взаимодействия с газом звёздного ветра [50].

гих из них выходят за пределы полости Роша. На основе одномерной самосогласованной модели атмосферы горячего Юпитера, включающей в себя модуль Монте-Карло, модуль химической кинетики и газодинамический модуль, были рассчитаны скорости нагрева атмосферы в процессах фотохимии и профили макроскопических параметров атмосферы при переходе от гидростатического режима течения к гидродинамическому, с чем связаны процессы теплового и нетеплового убегания. Проведено моделирование атмосферы горячего Юпитера HD 209458b с учётом потенциала Роша и установлено влияние реакций с участием надтепловых фотонов на динамику, изменение химического состава и темп оттока его водородно-гелиевой оболочки. Совокупность этих процессов искажает газовую оболочку планеты, делая её существенно несимметричной (рис. 11). Результаты оказались в хорошем согласии с оценками, следующими из наблюдений с космического телескопа Хаббла, а также с результатами других газодинамических моделей. Полученные значения параметров атмосферы можно использовать в качестве граничных условий для трёхмерных газодинамических расчётов, моделирующих взаимодействие планеты со звёздным ветром. Были получены оценки эффективности преобразования в тепло энергии звёздного излучения в диапазонах мягкого рентгена и жёсткого ультрафиолета, играющего особенно важную роль в процессах ионизации, фотохимии и тепловой диссипации верхних атмосфер планет, подверженных сильным потокам радиационного воздействия жёсткой радиации. Установлено, что рассчитанные эффективности нагрева, полученные для солнечного спектра, могут также применяться и для звёзд моложе Солнца после масштабирования потока фотонов в диапазонах мягкого рентгена и жёсткого ультрафиолета в соответствии с данными наблюдений спектров звёзд. Это позволило провести оценки темпа оттока атмосферы для планет у молодых звёзд, спектр которых отличается от спектра Солнца [50].

В отличие от предшествующих аэрономических моделей, авторами [45] были детально исследованы процессы фотоионизации H и диссоциации H<sub>2</sub> (фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциа-

тивная ионизация и др.), которые являются основными источниками тепловых и надтепловых атомов водорода H<sub>2</sub> → H → H<sup>+</sup> в водород-доминантных атмосферах экзопланет, прежде всего, горячих Юпитеров. Показано, что эффективность переноса энергии сильно зависит от энергии упругих столкновений при малых углах рассеяния и что особенности упругого рассеяния надтепловых атомов водорода на тепловых компонентах H<sub>2</sub>, He и H в существенной степени определяют параметры фракции надтеплового водорода в верхней атмосфере экзопланеты. В разработанной стохастической модели распределение атомов водорода в переходной H<sub>2</sub> → H области верхней атмосферы экзопланеты определяется из решения кинетического уравнения Больцмана с фотохимическим источником надтепловых атомов водорода с избытком кинетической энергии, образующихся в процессах диссоциации H<sub>2</sub>, а функции источника таких атомов определяются из скоростей фотолиза атмосферного газа УФ-излучением звезды и сопутствующим потоком фотоэлектронов. В численной модели учтено, что поглощение жёсткого УФ-излучения звезды сопровождается возбуждением, диссоциацией и ионизацией атмосферных компонентов, а также образованием потока фотоэлектронов с энергиями, достаточными для последующего возбуждения и ионизации атомарного и молекулярного водорода. Для расчёта скоростей фотопроцессов, переноса и столкновительной кинетики фотоэлектронов использована модель Монте-Карло, адаптированная к водородным атмосферам. Разработанная модель позволила впервые оценить скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации H<sub>2</sub> в верхней атмосфере экзопланеты HD209458b, и показать, что источник надтепловых атомов водорода за счёт процессов диссоциации H<sub>2</sub> необходимо включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах экзопланет.

К сожалению, как уже отмечалось, из-за неопределённости в энергетических и геометрических факторах такие расчёты не позволяют прояснить чрезвычайно актуальный вопрос об эволюции атмосфер экзопланет, находящихся вблизи родительской звезды и подверженных воздействию интенсивных потоков плазмы и электромагнитного излучения. Тем не менее предлагаемые модели позволяют наложить важные ограничения на многообразие процессов фотохимии планетных атмосфер и одновременно создают необходимые предпосылки для целенаправленных программ наблюдений экзопланет с помощью наземных и космических телескопов. Можно ожидать, что расширение области исследований далеко за пределы Солнечной системы и дальнейшее совершенствование разрабатываемых математических моделей на основе экзопланетной аэрономии будут способствовать лучшему пониманию эволюционных процессов и ключевых проблем планетной космогонии.

## 7. Архитектура и динамика экзопланетных систем

Солнечная система сильно отличается от большинства известных экзопланетных систем: экзопланеты часто имеют большие эксцентриситеты орбит, тогда как в Солнечной системе у всех восьми планет они близки к нулю; во многих открытых экзосистемах планеты-гиганты находятся на близких к родительской звезде

орбитах (горячие Юпитеры, мини-Юпитеры); к тому же в Солнечной системе отсутствуют сверхземли. Подчеркнём, что здесь речь идёт о сравнении Солнечной системы с известными экзопланетными системами; при учёте же эффекта наблюдательной селекции различия несколько сглаживаются. В частности, горячие сверх-Юпитеры, отсутствующие в Солнечной системе, и в экзопланетных системах довольно редкий феномен, но гораздо легче "выдающий себя" при наблюдениях. Среди множества открытых планетных систем есть и довольно близкие по физическим свойствам к Солнечной системе — например, Gliese 581, 47 UMa,  $\mu$  Arae. Так, у красного карлика Gliese 581 (звезды спектрального класса M3V) вначале было открыто три планеты — горячий Нептун  $b$  и две сверхземли  $c$  и  $d$  [51], а затем было сообщено о наличии ещё трёх планет  $e$ ,  $f$ ,  $g$ , оказавшихся, согласно вычислениям, в зоне обитаемости. Позднее реальность существования горячего Нептуна  $b$  и двух планет земного типа  $c$  и  $e$  была подтверждена, а планет  $f$  и  $g$  — нет. Причиной ложного отождествления последних оказалось наличие артефакта в наблюдательных данных — шума RV-сигнала, как было установлено пулковским астрономом Р.В. Балуевым [52].

### 7.1. Динамическая классификация

Динамика формирующихся протопланетных тел тесно связана с динамикой остаточных дисков. На изображениях остаточных дисков у самых близких звёзд обнаружено большое разнообразие структур, которые можно интерпретировать исходя из их динамики, причём наблюдаемые распределения пыли обеспечивают получение информации относительно распределения более крупных объектов — планетезималей и самих планет.

Важнейшими явлениями, определяющими динамическую структуру экзопланетных систем, являются *резонансы* и *миграция*. Резонансы играют существенную роль в динамике планетных систем на разных этапах эволюции, во многом определяя их архитектуру. Выделяют *резонансы средних движений* и *вековые резонансы*. Первые представляют собой соизмеримости между средними частотами орбитального обращения планет (либо планет и звёзд в кратных звёздных системах), вторые — соизмеримости между скоростями прецессий орбит. Согласно современным космогоническим представлениям, захвачены планетной системы в орбитальные резонансы — это закономерные этапы эволюции, обусловленные миграцией планет в газопылевом диске, протекающей для разных планет с разной скоростью [53, 54].

Современные динамические классификации планетных систем в качестве первого (основного) класса выделяют именно системы с резонансами средних движений. Примерами систем с планетами, находящимися в резонансе 2:1, служат Gliese<sup>7</sup> 876 и HD<sup>8</sup> 82943, в резонансе 3:1 — система 55 Рака. Наличие резонансов средних движений и их взаимодействие в планетных системах обуславливают возможность *хаотического поведения*<sup>9</sup> в орбитальной динамике планет, например, в случае планетной системы Kepler-36 [55].

<sup>7</sup> Префикс "Gliese" означает, что звезда входит в каталог ближайших к Солнцу звёзд В. Глизе (1969). Каталог Глизе включает звёзды в пределах 25 pc от Солнца.

<sup>8</sup> Префикс "HD" означает, что звезда входит в каталог звёзд Генри Дрейпера (Henry Draper catalogue, 1918–1924).

<sup>9</sup> О феномене динамического хаоса, обусловленного "перекрытием" резонансов, см. обзор Б.В. Чиркова [73].

### 7.2. Критерии устойчивости

Зачастую ошибки в определении орбитальных параметров экзопланет из наблюдений бывают больше интервалов их значений, на которых обеспечена долговременная устойчивость системы. Поэтому анализ устойчивости позволяет налагать более строгие ограничения на орбитальные параметры. К настоящему времени разработаны как аналитические, так и численно-экспериментальные *критерии устойчивости* планетных систем. Аналитические критерии основываются на адаптации критерия Хилла [56–59] и критерия *перекрытия резонансов* Чиркова [60, 61]; численно-экспериментальные — на вычислениях *FLI* [62], *MEGNO* [63–65], показателей *Ляпунова* [66, 67], фундаментальных частот движения (частотный анализ [68, 69]), а также на численном анализе условий ухода/столкновений [70–72]. Ляпуновское время — величина, обратная максимальному показателю Ляпунова для динамической системы, — определяет характерное время её предсказуемого движения для заданных начальных условий. Во многих случаях, если задача допускает представление резонанса в модели возмущённого маятника [73], ляпуновское время можно оценить не только численно-экспериментально, но и аналитически, используя теории стандартного и сепаратрисных отображений [74, 75].

Охарактеризуем несколько подробнее аналитические критерии.

*Критерий Хилла.* Критерий Хилла устанавливает границу области устойчивых орбит вокруг тела малой массы ("второго тела" — "спутника", "планеты", компонента двойной звезды), обращающегося вокруг тела большей массы ("первого тела" — планеты, звезды, главного компонента двойной соответственно). Согласно этому критерию, радиус зоны устойчивости прямо пропорционален радиусу сферы Хилла, вычисляемому в перигалактике орбиты второго тела:

$$r_H \approx \left(\frac{\mu}{3}\right)^{1/3} a(1-e),$$

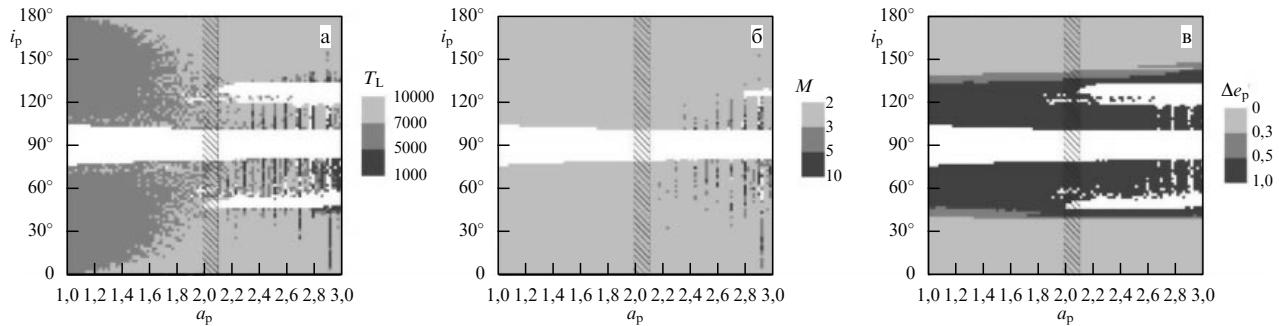
где  $\mu = M_{\text{sec}}/M_{\text{prim}}$  — отношение масс второго и первого тел. Этой формулой задаётся так называемое "масштабирование радиуса сферы Хилла к перигалактике" [76]. Обычный радиус сферы Хилла определяется формулой  $r_H = (\mu/3)^{1/3} a$ .

*Критерий Уиздома.* Критерий Уиздома является адаптацией критерия перекрытия резонансов Чиркова [73, 77] к конкретной небесно-механической задаче. Он даёт размеры области, "расчищаемой" планетой в радиальной окрестности её орбиты благодаря перекрытию резонансов вида  $(p+1):p$  при больших  $p$ . Это резонансы первого порядка; они перекрываются в окрестности орбиты планеты. Движение частиц, попавших в область перекрытия, хаотизируется, и область расчищается.

Согласно этому критерию, в плоской круговой ограниченной задаче трёх тел радиальная полуширина окрестности возмущающего тела, где орбиты неустойчивы, даётся формулой

$$\Delta a_{\text{cr}} \approx 1,3 \mu^{2/7} a',$$

где  $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$  — массовый параметр ( $m_2 \ll m_1$ ),  $a'$  — большая полуось орбиты возмущающего тела; эксцентриситет частицы  $e < 0,15$ . Частицы с большими полуосами орбит в интервале  $a' \pm \Delta a_{\text{cr}}$  движутся хаотично. При этом значение  $p$ , критическое для перекрытия



**Рис. 12.** Свойства долговременной динамики планетной системы  $\gamma$  Сер б при варьировании начальных условий для большой полуоси и наклона орбиты. Параметры устойчивости даны в чёрно-белой градации. (а) Ляпуновские времена (в годах). (б) Параметр MEGNO. (в) Максимальное изменение эксцентриситета планеты (в течение  $10^5$  лет). Белое поле соответствует зоне неустойчивости. Заштрихованная полоса указывает интервал наиболее вероятных, согласно наблюдениям, значений большой полуоси орбиты  $\gamma$  Сер б. (Согласно [80].)

тия резонансов  $(p+1):p$ , равно [60, 78]

$$p_{\text{cr}} \approx 0,51 \mu^{-2/7}.$$

**Критерий Хольмана–Вигерта.** Это сугубо численно-экспериментальный критерий, устанавливающий границы устойчивости для орбит планет в двойных звёздных системах. Например, в случае циркумбинарной<sup>10</sup> системы в плоской задаче радиус  $a_{\text{cr}}$  внутренней зоны неустойчивости движения частицы на первоначально круговой пропградной внешней орбите даётся следующей полиномиальной (по массовому параметру и эксцентриситету) аппроксимацией:

$$\frac{a_{\text{cr}}}{a_b} = 1,60 + 5,10e_b - 2,22e_b^2 + 4,12\mu - 4,27e_b\mu - 5,09\mu^2 + 4,61e_b^2\mu^2,$$

где  $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$  — массовый параметр двойной,  $a_b$  и  $e_b$  — большая полуось и эксцентриситет двойной [70].

**Критерий Мориваки–Накагавы.** Этот критерий устанавливает условия для возможности планетезимальной аккреции в циркумбинарном диске. Таким образом, это не чисто небесно-механический критерий, так как он использует и физические допущения. Если скорости планетезималей друг относительно друга при их столкновениях превышают скорость ухода частиц с поверхности тела, планетезимали не могут аккумулироваться и формировать зародыши планет. Поэтому эксцентриситеты планетезималей должны быть достаточно малыми.

Согласно этому критерию, радиус внутренней границы зоны планетезимальной аккреции для планетезималей с массой  $m$  и собственной плотностью  $\rho$  даётся формулой

$$a_{\text{acc}} \approx \left[ \frac{5}{2}(1-2\mu)a_b e_b \right]^{2/3} \left( \frac{3M^3}{32\pi m^2 \rho} \right)^{1/9},$$

где  $\mu$  — как и выше, массовый параметр двойной,  $M = m_1 + m_2$  — суммарная масса двойной,  $a_b$  и  $e_b$  — большая полуось и эксцентриситет двойной системы [79].

В работе [80] проведён сравнительный анализ современных численных методов исследования глобальной динамики: вычислений показателей Ляпунова (LCE), метода MEGNO и метода максимальных эксцентриситетов

(ME). Построены диаграммы устойчивости для планетных систем  $\gamma$  Сер, HD 196885 и HD 41004, что позволило определить наиболее вероятные значения орбитальных параметров планет. Путём сопоставления диаграмм устойчивости, построенных при помощи различных методов, выполнен сравнительный анализ эффективности методов LCE, MEGNO и ME в приложении к планетным задачам. В качестве примера на рис. 12 представлены диаграммы устойчивости планетной системы  $\gamma$  Сер [80].

### 7.3. Миграция и приливные эффекты

Как подчёркивается в работе [81], современные успешные модели формирования как Солнечной, так и экзопланетных систем основываются на двух ключевых концепциях: орбитальной миграции и динамической неустойчивости. Принципиально важную роль играют также приливные эффекты. Различают разные типы миграций, причём разделение проводится главным образом по тому, проходит ли миграция в исходной газовой среде диска или же после того, как планета сформирует кольцеобразный просвет. Наряду с миграцией приливные взаимодействия дают подход к решению проблемы горячих Юпитеров, вероятно, формирующихся на удалении от родительской звезды и дрейфующих за счёт механизма миграции к текущему положению вблизи звезды. Наличие приливных эффектов от звезды может быть причиной остановки дрейфа к звезде и выживания этих массивных планет [82–84]. Характер миграции обусловлен также возможным возникновением резонансов. Скорость миграции могла быть сравнительно высокой при интенсивной аккреции газа на планету на ранних стадиях эволюции, но в то же время сопровождающий аккрецию нагрев газа мог приводить к росту эксцентриситета орбиты протопланеты и захвату в резонанс [85, 86].

Конфигурации планетных систем в раннюю эпоху, вероятно, сильно отличались от наблюдавшихся в настоящее время. Как уже отмечалось, динамика первичных тел тесно связана с динамикой остаточных дисков. Это подтверждают имеющиеся изображения остаточных дисков у самых близких звёзд, на которых обнаружено большое разнообразие структур. Их можно интерпретировать, основываясь на анализе динамики малых тел в ранних планетных системах, а наблюдаемые распределения пыли обеспечивают получение информации относительно распределения крупных объектов типа планет и их зародышей.

Особый интерес вызывают конфигурации планетных систем со сверхмассивными планетами в непосред-

<sup>10</sup> Циркумбинарными называют орбиты тел, обращающихся вокруг обоих компаньонов двойной системы.

венной близости от звезды — супер-юпитерами. Вероятно, планеты этого типа, рождающиеся в зоне низких температур и мигрирующие в высокотемпературную зону, рано или поздно поглощаются родительскими звёздами. Таким образом, данный механизм может ограничивать продолжительность жизни планеты. Смещение и циркуляризация орбит в планетных системах — естественное следствие взаимодействия планет с остаточным газом диска. С миграцией и динамикой массивных планет может быть связано также формирование планет типа земель и суперземель.

Альтернативная модель исходит из идеи о том, что важную роль в эволюции системы играют массивные планетезимали, оставшиеся вблизи сформировавшейся планеты. Они могли оказать сильное гравитационное воздействие на эволюцию первоначальной орбиты планеты и вызвать её дрейф вместе с роем планетезималей, находящихся вблизи и вдали от звезды, чтобы удовлетворить условию сохранения орбитальной энергии и углового момента в протопланетном диске. Их гравитационное влияние на эволюцию орбиты сформированной планеты могло быть существенным и во многом определить скорость миграции. Совместно с процессами динамической неустойчивости миграция планет приводит к изменению их орбит и определяет архитектуру формирующейся планетной системы. В мультипланетной системе к взаимодействию планета — диск ещё добавляются взаимные планетные возмущения, причём конвергентная миграция ведёт к возникновению орбитальных резонансов между планетами, прежде всего резонансов первого порядка (2:1, 3:2).

Заметим, что процессы миграции, вероятно, оказали влияние на эволюцию планетных орбит во внешних областях ранней Солнечной системы. Согласно существующим представлениям, Сатурн мигрировал внутрь системы и был временно захвачен в резонанс 3:2 с Юпитером. Возникновение этого резонанса могло, в свою очередь, задержать или даже полностью остановить миграцию Юпитера к Солнцу [87, 88]. Этот процесс неизбежно оказал воздействие на планетные зародыши во внутренней области Солнечной системы, в том числе на формирование планет земной группы и их орбиты, а также на положение и аккумуляцию оставшихся первичных тел в главном поясе астероидов. Кроме того, с миграционными процессами на этапе ранней эволюции связано перемещение Урана и Нептуна из области их начального формирования вблизи зоны Юпитера — Сатурна в направлении дальше от Солнца, а также формирование пояса Койпера.

Данный сценарий подтверждается оценками времени, которое было бы необходимо для аккумуляции Урана и Нептуна на их современных орbitах. Как показали результаты моделирования, для этого потребовалось бы время, превышающее возраст Солнечной системы. Модель, которую иногда называют моделью переконфигурации орбит планет-гигантов, или моделью Ниццы (Nice model) [89], предполагает существование первоначального диска массой в несколько десятков земных масс, состоящего из кометоподобных объектов и расположенного за орбитами, на которых в дальнейшем формировались планеты-гиганты. Предполагается, что этот диск был рассеян внутри Солнечной системы вследствие гравитационных взаимодействий между планетами-гигантами и вызвал также миграцию этих планет. Заметим, что модель Ниццы примерно согласуется по времени со временем *поздней тяжёлой бомбардировки* (*LHB*) Луны и планет земной группы и хронологией лунных кратеров.

Она подкрепляется также рядом космохимических соображений.

Миграция планет-гигантов и их взаимодействия должны оказывать сильное влияние на расположение орбит планет в формирующейся экзопланетной системе, создавая, например, конфигурации с большими эксцентриситетами. Эксцентрисичность орбит может приводить к тесным сближениям планет и выбросу некоторых из них из системы на гиперболические орбиты. Такая планета становится упоминавшейся выше "свободной" или "беспризорной" планетой (планетой-сиротой). Подобных беспризорных планет уже сейчас наблюдается порядка 20, реальное же их количество может быть огромно и сопоставимо с числом звёзд в Галактике. Более того, предполагается и наличие категории межгалактических планет-сирот в скоплениях галактик, но такие планеты практически не наблюдаются.

Можно думать, что миграция и транспорт вещества, происходившие в ранней Солнечной системе, оказали большое влияние на геологическую историю Земли и планет земной группы, формирование их природных комплексов. В первую очередь это касается переноса воды и летучих веществ внутрь Солнечной системы из-за снеговой линии (из зон питания Юпитера — Сатурна и занептуновой области) планетезималиями, ледяными ядрами комет, углистыми хондритами, пылью. Они рассматриваются в качестве важного экзогенного источника наполнения земных океанов [37, 90, 91]. Подобные процессы, вероятно, происходили и в других планетных системах, изменения валовый состав слагающего вещества планет (*bulk composition*) и влияя на их тепловой режим и природные условия.

## 8. Формирование планетных систем у одиночных звёзд

Вопрос о том, как образуются планеты и как, в частности, сформировалась Солнечная система, лежит в основе звёздно-планетной космогонии и является одним из ключевых в астрофизике. Сценарии образования планетных систем у одиночных и двойных звёзд имеют вполне определённые сходства и различия на стадиях формирования и эволюции, при этом весьма важными являются проблемы генезиса и звёздно-планетной эволюционной динамики в системах кратных звёзд. Мы рассмотрим вначале современные представления о формировании планетных систем у одиночных звёзд (см. [92, 93]).

### 8.1. Газопылевые диски

Звёзды рождаются в постепенно уплотняющихся кластерах межзвёздных облаков. Путём высокоточных наблюдений с использованием радиотелескопов ALMA и SPHERE внутри последних обнаружены различные тонкие структуры, такие как кольца, перемежаемости, вихри, спиральные рукава [94], что, возможно, свидетельствует о начальной стадии рождения планет. Наблюдения областей звёздных сгущений свидетельствуют о комплексной связи волокон и магнитных полей с процессами звездообразования и формированием протопланетных газопылевых аккреционных дисков. Такими околовзвёздными дисками — остатками протопланетной небулы после образования протозвезды и предвестниками образования планетных систем — окружены многие молодые звёзды. Сама небула является фрагментом гигантского межзвёздного молекулярного облака протяжённостью в десятки парсек, состоящего в основном из водорода и гелия, но обогащённого также более тяжёлыми элементами.

льми элементами, образующимися вследствие процессов нуклеосинтеза в звёздах предыдущих поколений и взрывов сверхновых. В молекулярных облаках присутствуют также многочисленные органические молекулы, включающие азот, кислород, биологически важный углерод и весьма сложные соединения на их основе. Размер фрагмента молекулярного облака составляет, по оценкам, 0,1–1 пк, а скорость истечения газа достигает  $\sim 10\text{--}100 \text{ км с}^{-1}$ . Ранний протозвёздный объект, включающий в себя протозвезду с эмбриональным диском и аккреционной оболочкой, классифицируется по распределению спектральной энергии в протозвезде и окружающем её диске как принадлежащий к классу 0 (его не следует смешивать со спектральным классом горячих звёзд O). В зависимости от распределения спектральной энергии вследствие изменения в распределении масс, скоростей и температур выделяют также классы I и II.

Из вещества газопылевых дисков в процессе физико-химической и динамической эволюции образуются планетные системы, подобные Солнечной системе. Современные наблюдения областей звездообразования с высоким пространственным разрешением выявили структурные особенности таких дисков — плоских пылевых структур диаметром  $\sim 50\text{--}100 \text{ а.е.}$  вокруг протозвёзд и молодых звёзд главной последовательности. Содержащаяся в них пыль пополняется за счёт аккрецирующего материала небулы, а в случае остаточных *дебрис-дисков* возобновляемым источником пыли, вероятно, служат ударные процессы в популяции тел, аналогичных транснептуновым объектам. Наблюдения спектров у звёзд типа Т Тельца позволили оценить скорость аккреции (полный поток массы) от диска на центральную звезду: для большинства звёзд она находится в пределах  $\sim 10^{-9}\text{--}10^{-7}$  солнечной массы в год при средней величине  $10^{-8}$  солнечной массы в год. Тенденция уменьшения потока к нижнему пределу  $10^{-9}$  солнечной массы наблюдается у звёзд в диапазоне возрастов  $\sim 10^5$  лет [95]. Трассерами выпадающего на диск вещества на стадии Т Тельца служат молекулярные линии серосодержащих соединений, наблюдавшиеся, как уже упоминалось, в облаках Тельца с помощью радиотелескопа ALMA [42, 43].

По существующим представлениям последовательность процессов образования планетных систем включает фрагментацию постепенно уплотняющегося межзвёздного молекулярного облака, формирование протопланетного аккреционного газопылевого диска вокруг родительской звезды и его распад на первичные гуще-ния, из которых образуются твёрдые тела (планетезимали), зародившие планеты и, в конечном итоге, сами планеты. Ключевую роль в этой последовательности играют различные типы неустойчивостей в диске, служащие основой его фрагментации, образования твёрдых тел, их последующего роста. Главную роль играют гидродинамическая (потоковая) и гравитационная неустойчивости вместе с рассмотренными выше разнообразными динамическими процессами — резонансами, приливными взаимодействиями и миграцией (см., например, [96–99]).

Исторически протопланетные диски были обнаружены вокруг звёзд, более массивных, чем Солнце, таких как Вега ( $\alpha$  Лиры). Первым косвенным свидетельством существования дисков стали наблюдения инфракрасных избыточков у звёзд типа Т Тельца — молодых переменных звёзд возрастом от  $10^5$  до  $10^7$  лет [100], задолго до получения их прямых изображений в инфракрасной и

субмиллиметровой областях спектра. В настоящее время молодые протозвёздные и звёздные объекты наблюдаются во всём доступном диапазоне длин волн. Анализ инфракрасных, субмиллиметровых и миллиметровых спектров позволил выявить кеплеровское вращение газопылевых дисков вокруг сотен звёзд типа Т Тельца. Газопылевые диски были обнаружены у большинства таких звёзд возрастом  $\leq 10^6$  лет и у  $\sim 20\text{--}30\%$  звёзд возрастом  $\leq 10^7$  лет, со средней продолжительностью жизни 3–6 млн лет. Массы дисков оказались равными  $\sim 0,01\text{--}0,2$  масс Солнца, а протяжённость — до  $\sim 10\text{--}100 \text{ а.е.}$ , что сопоставимо с размером орбиты Нептуна в Солнечной системе. Был обнаружен газопылевой диск вокруг звезды TW Hydrae с находящейся внутри него молодой планетой. Наблюдения, выполненные с помощью космического телескопа "Спитцер", позволили обнаружить одновременно несколько молодых звёзд, окружённых дисками, в ограниченной области. В случае звёзд типа UX Ori [101, 102] диски наблюдались с ребра, а звезда  $\beta$  Pic явилась первым примером наблюдения диска с планетой на наклонной орбите [103, 104]. Наиболее существенный вклад в изучение химии дисков внесли измерения эмиссионного излучения газа и пыли в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах длин волн с высоким угловым разрешением. Это касается 2 % примесей к исходному содержанию 98 % водорода и гелия по объёму (само отношение водород/гелий составляет 70,5/27,5 % по массе или  $\sim 10/1$  по числу частиц). При этом примеси находятся в газообразном или твёрдом (лёд) состоянии в зависимости от температуры. Среди них содержание водородсодержащих соединений составляло, по оценкам, от 0,5 до 1,5 %.

Громадный прогресс в изучении околозвёздных дисков и формирования планетных систем обеспечили наблюдения их структуры, состава и динамики, полученные на миллиметровых волнах сетью наземных радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter Array), в частности, исследования в рамках программ "Resolving Star Formation with ALMA" и "Protostellar Interferometric Line Survey" (PILS) (см. [105–108]). Вместе с данными ИК-наблюдений при помощи космических телескопов Hubble, Spitzer, Herschel они дали захватывающую картину того, как сочетаются между собой все компоненты протозвёздной туманности (небулы), создающие из этого "космического рагу" планетные системы. Открытие внесолнечных планет в целом подтвердило основной сценарий формирования планетных систем. Как упоминалось в разделах 2 и 5, в открытия многих тысяч экзопланет основной вклад внесли наблюдения с использованием космического телескопа "Кеплер", хотя была исследована лишь небольшая часть звёздного поля Галактики (в созвездиях Лира и Лебедя). Среди планетных систем найдены разнообразные конфигурации, включая горячие сверх-Юпитеры на орбитах вблизи родительской звезды, а позднее — и менее массивные планеты, в том числе подобные Земле. Большой вклад в реконструкцию этих процессов внесло математическое моделирование физических и химических механизмов, ответственных за формирование и эволюцию протопланетных газопылевых дисков, включая многообразные процессы термической и динамической эволюции дисковой среды, образование и рост в ней первичных твёрдых тел. Формированию планет, в том числе планет земного типа, в системах одиночных звёзд посвящён ряд глубоких численно-экспериментальных исследований (см., например, [109–117]). Тем не менее многие проблемы по-прежнему остаются нерешёнными и пока ещё нельзя

ответить на многие вопросы о ключевых механизмах, лежащих в основе формирования планетных систем у различных классов звёзд, их устойчивости и путях эволюции.

## 8.2. Эволюция вещества диска

Формирование звёзд, газопылевых дисков и планет — это непрерывный процесс эволюции вещества во Вселенной. Вещество протопланетного диска представляет собой сложную систему различного фазового состава, плотности, температуры и степени ионизации, которые изменяются с изменением радиального расстояния от родительской звезды. В целом эта неоднородная газовая среда, содержащая частицы пыли различных размеров и происхождения, представляет собой намагниченную пылевую плазму, находящуюся в состоянии турбулентности, свойства которой зависят от радиального и азимутального положения в диске [118, 119]. Когда основные динамические силы, управляющие состоянием вращающегося диска, находятся в равновесии, доминирующими становятся более слабые факторы, такие как тепловые/вязкие процессы, турбулентность и электромагнитные явления. Они оказывают существенное влияние на конденсацию летучих веществ, относительное содержание газа и пыли, а также на перенос энергии и углового момента в диске. В формировании диска существенную роль играет магнитное поле, которое, в частности, обуславливает перенос момента количества движения газа от звезды к диску; данный эффект известен как "магнитное торможение" (см., например, [120–122]).

В пренебрежении плазменными эффектами движение газопылевой дисковой среды наиболее адекватно моделируется в рамках механики гетерогенных турбулизованных сред с учётом физико-химических свойств фаз, тепломассопереноса, вариаций непрозрачности среды для звёздного излучения, вязкости, химических реакций, фазовых переходов (положения границы испарение–конденсация), коагуляции и др. Строгое математическое рассмотрение этой проблемы содержится в работах [123–125]. В них проанализирован характер динамического взаимодействия турбулентного газа и пыли, включая влияние энергии турбулентности несущей фазы на поведение твёрдых частиц и обратное влияние пылевого компонента на динамический и тепловой режимы газовой фазы.

Наличие полидисперсной примеси частиц в турбулентной среде существенно усложняет гидродинамику диска, способствуя появлению новых структур и дополнительных режимов течения. Во многих дисках действительно наблюдались субструктуры в виде колец и комплексных спиральных образований, с которыми могут быть связаны процессы роста частиц пыли. Локальные области повышенного давления газа могут захватывать твёрдые частицы, приобретающие скорость движения, близкую к скорости газовой среды. Другими словами, газ влияет на динамику и эволюцию твёрдых тел ("gas drives the solids evolution") [126], хотя неясно, какой порог размеров увлекаемых газом частиц является предельным. В то же время турбулентные вихри влияют на фазовые превращения, с которыми связаны аккумуляция твёрдых частиц (как исходных пылевых, так и образующихся вследствие коагуляции), их фрагментация при взаимных соударениях и оседание к средней плоскости диска, где они образуют геометрически тонкий уплотнённый слой — пылевой субдиск повышенной плотности. Дополнительными механизмами, формирующими свойства вязкого аккреционного диска на различных

этапах его эволюции, служат касательные напряжения в пограничных слоях из-за дифференциального вращения дисковой среды [127]. На динамику и процессы тепло- и массопереноса в дифференциально-вращающемся веществе диска влияют также инерционные свойства полидисперсной примеси твёрдых частиц и различие скоростей на границе между газовой и конденсированной фазами. В рамках континуальной модели гетерогенной турбулентной дисковой среды такой режим течения соответствует параметрам на границе экмановского слоя, включая развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [125, 128]. Предполагается также, что на эволюцию турбулентности во вращающемся аккреционном диске влияет гидродинамическая спиральность, ответственная за появление в среде отрицательной вязкости и каскадный процесс обратного переноса энергии от малых вихрей к большим [119].

Очевидно, что решающую роль в эволюции диска, происходящей в процессе его вертикального и радиального сжатия при дифференциальном вращении вещества, играет пылевой компонент. Ещё основатель отечественной космогонической школы О.Ю. Шмидт отмечал: "Мы придаём решающее значение твёрдой фазе, т.е. пыли и другим твёрдым частицам в газопылевом облаке". Он связывал процесс эволюции с необратимой потерей частицами механической энергии при неупругих соударениях, но при сохранении момента количества движения, что приводит "к уплощению системы, к сорбированию частиц в плоский слой повышенной плотности" [129]. Состав и свойства пыли, размеры частиц действительно вносят огромный вклад в особенности неоднородной структуры протопланетного диска, его теплового режима и динамики, особенно внутренних областей.

Что касается генезиса частиц диска, то можно ожидать, что в их состав частично вошла пыль фрагмента молекулярного облака, а другие частицы образовались внутри диска вблизи протозвезды и, вероятно, подверглись процессам испарения–криSTALLизации в процессе радиального перемещения частиц и газа. Кроме того, частицы могли испытать нагрев ударными волнами в зоне акреции и последующее быстрое охлаждение. В согласии с этой концепцией находятся частицы тугоплавких кристаллов в кометах и углистых хондритах. Их наличие в телах, рожденных за пределом снежной линии при низких температурах, объясняется радиальным переносом из областей вблизи Солнца, где они изначально образовались в молодом диске при температурах  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, тугоплавкие частицы могли присутствовать в потоках газа коллапсирующего облака, окружавшего протосолнце, и в дальнейшем могли быть перенесены во внешние области формирующейся планетной системы. Признаки воды в спектрах газопылевого диска, окружающего молодую звезду, могли быть также связаны с выпадением на него ледяных тел типа кометных ядер на более поздней стадии эволюции.

Очевидно, каким бы ни был характер рассматриваемых событий, ясно, что сложные физико-химические процессы, сопровождающие эволюцию гетерогенной среды, в которой происходят столкновения частиц пыли, ответственны за возникновение первых твёрдых тел и их последующую эволюцию [130, 131]. Следует при этом учесть, что турбулентность в газе диска может как препятствовать росту частиц, так и способствовать их объединению в вихрях, что дополнительно усложняет проблему [132]. При разработке моделей необходимо учитывать последовательность изменения агрегатного состояния основных компонентов протопланетного ве-

щества, расположение фронтов конденсации – испарения в зависимости от термодинамических параметров диска (особенно в окрестности снеговой линии, исключительно важной для образования первичных твёрдых тел и планетезималей; см. [133]), роль сублимации – коагуляции частиц в двухфазной среде и перераспределения пыли. С этими процессами связаны механизмы развития гидродинамической и гравитационной неустойчивостей.

### **8.3. Гравитационная и гидродинамическая (потоковая) неустойчивости**

Поверхностная плотность массивного пылевого слоя в субдиске достаточно велика, а внутреннее давление газа недостаточно для предотвращения гравитационного коллапса. При условии, что хаотические турбулентные скорости пылевых частиц не превышают некоторого предела, в субдиске развивается гравитационная (джинсовская) неустойчивость, соответствующая классическому сценарию Гольдрейха – Уорда формирования планетезималей [134]. Гравитационная неустойчивость считается ответственной за появление первичных пылевых скоплений (кластеров) в преобладающей кольцевой конфигурации субдиска [135–137]. Недавно была предложена модификация критерия джинсовской неустойчивости для астрофизических дисков на основе обобщённой статистики Больцмана – Гиббса — статистики Тсаллиса [138]. Этот критерий, выведенный из модифицированного кинетического уравнения со специальной формой интеграла столкновений, лучше отвечает условиям развития неустойчивости в однородной дисковой среде фрактальной структуры в фазовом пространстве [139, 140].

Другим механизмом возникновения и развития неустойчивости в гетерогенной дисковой среде является неустойчивость гидродинамического типа [141, 142]. В основе этого механизма лежит дисбаланс между поверхностной газопылевой плотностью и массопереносом. Предложены два основных сценария такой неустойчивости, и оба связаны с наличием в газе полидисперсной пыли. Первый связан с идеей о том, что турбулентность в диске/субдиске может создавать локальные области с высоким отношением пыль/газ, которые растут, достигая в конечном итоге размера более крупных тел. Предполагается, что происходит либо пассивная концентрация частиц турбулентностью на больших масштабах, сравнимых с диссипативным интервалом турбулентности, либо концентрация частиц внутри турбулентных вихрей, играющих роль своего рода ловушки, на что указывалось также в работе [125]. Допускается возможность возникновения подобных образований в зональных потоках [143], включая возникающие между вихрями области аэродинамического характера [144, 145].

Второй сценарий предполагает наличие обратной связи между газом и конденсированными (пылевыми) частицами в двухфазном потоке за счёт инерции (трения) и силы тяжести, другими словами, обратную реакцию частиц на поток газа. Такую связь между газом и пылью обычно называют линейной неустойчивостью потока [137, 141], ответственной за генерацию исходных зародышей протопланетезималей (отсюда название "потоковая неустойчивость"). При численном моделировании оценены значения плотности пыль/газ и некоторые другие параметры, необходимые для реализации данного механизма. Большие "комки" пыли, особенно содержащие зёरна сантиметровых размеров типа гальки, образовавшиеся в предшествующих процессах столкновения и коагуляции/коалесценции, могут оказывать существенное влияние на стабильность течения газопылевой среды.

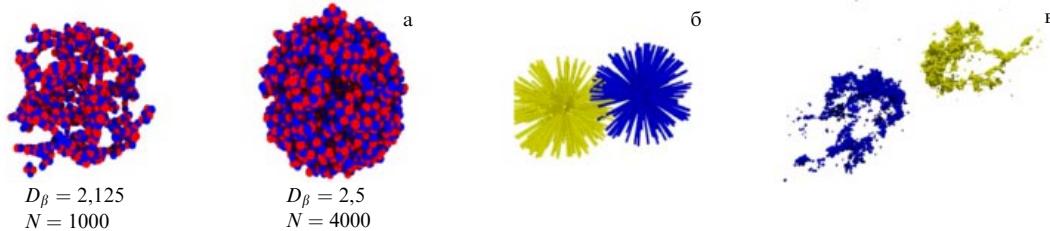
Также показано, что нелинейная эволюция потоковой неустойчивости может сопровождаться гравитационной неустойчивостью при меньших отношениях пыль/газ (см. [99, 143, 146–148]).

Так или иначе, потоковую неустойчивость дисковой двухфазной газопылевой среды можно считать перспективным механизмом образования планетезималей из-за её способности концентрировать твёрдые частицы в плотные структуры, способные вызвать гравитационный коллапс в протопланетном диске [146]. Степень сгущения сильно зависит от интегрированного по высоте отношения массы твёрдых частиц к газу в протопланетном диске. При этом оседание частиц к центральной плоскости диска вместе с радиальным дрейфом является ключевым процессом роста их концентрации. Получаемая при этом высокая массовая нагрузка на газ служит основным фактором, необходимым для достижения большого удельного веса пылевых агрегатов, в то время как турбулентная диффузия газовой фазы способствует выметанию некоторой доли подобных сгущений из пылевого субдиска [143]. Когда отношение плотности пылевой составляющей диска к плотности газа приближается к единице, влияние пыли на движение несущей фазы становится достаточно сильным, чтобы ускорить этот поток и вместе с ним двигаться по круговой орбите со скоростью, близкой к кеплеровой. В результате радиального дрейфа пылевых частиц возникает не связанная с силой тяжести неустойчивость газопылевого потока, вследствие чего появляются локальные флюктуации плотности частиц и формируются фрактальные пылевые агломераты (кластеры) в центральной плоскости диска.

Кластеры, возникающие при начальной фрагментации диска вследствие гравитационной неустойчивости, исходно содержат частицы субмикронного размера, включая небулярную пыль и конденсаты дисковой среды. Последние образуются при различных температурах в зависимости от радиального расстояния: от тугоплавких соединений в непосредственной близости к протозвезде до льдов за снеговой линией. Важную роль в росте частиц играют процессы коагуляции/коалесценции, а дальнейшее укрупнение частиц происходит с участием потоковой неустойчивости. К сожалению, поскольку большое число открытых экзопланет находится в непосредственной окрестности родительской звезды, зона их формирования сужается до плохо разрешимых при наблюдениях областей внутреннего диска в пределах долей астрономической единицы, где вещество активно аккумулирует на молодую звезду. Это приводит к изменению оптической непрозрачности и теплового режима среды, кинетики фотохимических процессов и процессов испарения – конденсации, что существенно усложняет анализ переноса вещества и получение оценок соотношения пыль/газ. Наряду с этим существенно усложняется возможность наблюдения процессов образования в дисковой среде первичных твёрдых частиц и их роста.

### **8.4. Фрактальные пылевые кластеры**

Как свидетельствуют оценки и результаты лабораторных экспериментов, непосредственное объединение даже мелких пылевых частиц малоэффективно. Особенно проблематичным с точки зрения объединения является интервал от сантиметровых до метровых тел. Но даже в диапазонеnano- и микрометровых размеров (типичного размера пыли в межзвёздных облаках) рост пылевых частиц, главным инструментом которого следует, вероятно, считать силы ван-дер-Ваальса и электростатического взаимодействия, является проблематичным. Неко-



**Рис. 13.** (В цвете онлайн.) (а) Структура пылевых кластеров с характерным размером  $\sim 20$  нм. (б) Столкновение двух флаффированных пылевых кластеров с характерным размером 50 нм, фрактальной размерностью 2,55 и числом частиц 8192 в каждом. (в) Столкновение двух пылевых агломератов с характерным размером 75 нм, фрактальной размерностью 2,15 и числом частиц 3072 в каждом [149].

торым исключением могут быть частицы аморфного водяного льда, сосредоточенные за снежной линией. Между тем существуют доказательства образования достаточно крупных тел типа гальки–булыжников и их дальнейшего объединения в виде "галечных груд", связанных гравитационными силами.

Значительно легче происходит объединение при взаимных соударениях сгустков частиц — пылевых кластеров. Согласно подходу [123, 149], разреженные (флаффированные) пылевые кластеры фрактальной природы и их взаимодействие при столкновениях с умеренными скоростями служат ключевым механизмом агломерации пылевых частиц и роста первичных твёрдых тел как основы последующего формирования планетезималей и зародышей планет. Физически такой процесс представляется вполне обоснованным. Реальная структура пылевых кластеров характеризуется чрезвычайно сложной и нерегулярной геометрией, и, хотя используемая массовая фрактальная размерность не отражает полностью геометрические свойства фрактала, она позволяет, тем не менее, учитывать основные свойства рыхлых фрактальных структур при моделировании процессов кластер-кластерной ассоциации (см. [150, 151]) и их пространственно-временную эволюцию. При этом не все частицы газопылевого диска обязательно принадлежат кластерам; часть из них может образовывать пылевые облака, заполняющие сферу Хилла и в дальнейшем выпадающие на планетезимали и зародыши планет.

Взаимодействие пылевых кластеров при соударениях приводит к образованию более плотных структур, причём кластеры могут содержать как плотные, так и рыхлые (пористые) частицы [140, 149]. Пористой, или пушистой (fluffy), структурой предположительно обладают и сами кластеры, которые, подобно снежным частичкам, способны формировать очень рыхлые образования фрактальной природы (рис. 13). Такой подход значительно облегчает математическое моделирование роста тел в диске за счёт столкновения кластеров и частиц внутри них. При объединении большого числа малых пылевых кластеров образуются обладающие самоподобными свойствами на малых расстояниях однородные ворсистые агрегаты, в которых постепенно увеличиваются размеры пустот в занимаемом объёме при одновременном росте средней плотности объединяющихся тел.

Действительно, такие пушистые агрегаты, благодаря их чрезвычайно высокой пористости, являются стойкими к разрушительным столкновениям при высоких скоростях соударений, а их радиальный дрейф в диске является очень медленным. Для типичных ворсистых агрегатов, имеющих по сравнению с компактными пылевыми частицами относительно большие геометрические поперечные сечения, меняется весь режим движения в газовом несущем потоке, в частности, изменяются условия возни-

кновения потоковой неустойчивости в диске из-за значительной модификации аэродинамической силы трения пыли и газа. Кроме этого, может существенно измениться эффективность отталкивания (bouncing) при столкновении пористых структур [93, 149].

Как видим, совокупность рыхлых пылевых кластеров протопланетного субдиска рассматривается нами как особый тип сплошной среды — фрактальной, для которой существуют точки и области, не заполненные её составляющими, что существенно облегчает процесс объединения/роста частиц и образования первичных твёрдых тел. Заметим, что спектральные наблюдения дисков у молодых звёзд типа Т Тельца свидетельствуют о существовании в них мелкой пыли ( $\lesssim 1$  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. от звезды) за это время могли бы вырасти значительно более крупные сгущения эквивалентной массы.

### 8.5. Первичные твёрдые тела, планетезимали и зародыши планет

Последующий процесс в рассматриваемом сценарии включает в себя дальнейший непрерывный рост (укрупнение) формирующихся тел, наиболее крупные из которых поглощают меньшие тела и пыль в результате столкновений и начинаящего играть заметную роль гравитационного притяжения, в то время как газ из внутренних областей диска постепенно выметается. Как свидетельствуют результаты моделирования протопланетного аккреционного диска, он был полностью рассеян в первые 4–5 млн лет после образования. Одновременно происходила аккумуляция первичных твёрдых тел, унаследованных от начальной фазы эволюции. Не обратимый процесс олигархического роста приводит к образованию многочисленных более плотных тел — планетезималей размером от десятков до сотен километров в поперечнике, а затем при их объединении — планетных эмбрионов, из которых в конечном итоге формируются планеты. Рост тел происходит как путём столкновений планетезималей, так и за счёт акреции пыли и более крупных частиц внутри диска. Часть ледяных планетезималей, по-видимому, исчезает из-за испарения при соударениях. Весь процесс занимает  $\sim 10^8$  лет (см., например, [96, 152]). Определённую роль в нём при наличии эффектов самогравитации и вязкости могло бы сыграть резонансное возбуждение волн плотности, оказывающих сильное влияние на особенности морфологии и динамику нелинейных хаотических систем. Конфигурация прообраза Солнечной системы, состоявшей из некоторой первичной системы крупных тел, вероятно, сильно отличалась от существующей. Её современная архитектура, включающая планеты земной группы и планеты-

гиганты, была приобретена в процессе миграции и взаимных гравитационных взаимодействий, о чём говорилось в разделе 7.

Согласно современным теоретическим концепциям, сценарии формирования в Солнечной системе планет земного типа и планет-гигантов имели вполне определённые отличия [93, 153]. В первом случае сценарий включал три стадии.

- Образование и олигархический рост планетезималей, происходящий за счёт меньших тел, вплоть до исчерпания их ресурса (продолжительность этой стадии порядка ста тысяч – миллиона лет).

- Опережающий аккреционный рост крупных тел в диске: большие тела растут быстрее, чем меньшие, за счёт своих больших масс и меньших эксцентриситетов орбит; продолжительность этой стадии порядка миллиона лет.

- Появление зародышей планет с массами от лунных до марсианских на фоне начальной неустойчивости системы зародышей. Ударные столкновения из-за пересечений орбит на временах порядка 100 млн лет. Объединение зародышей при столкновениях в тела с размерами планет земной группы во внутренней области планетной системы.

В то же время планеты-гиганты, по традиционным представлениям, формировались путём аккреции значительной части газа диска на ядро, хотя обсуждаются и модели формирования газовых гигантов без твёрдых ядер [154, 155]. Они постепенно увеличивались, аккумулируя на своих ядрах из скальных пород размерами от единиц до десятков земных радиусов газы за границей снежной линии, где водяной лёд и другие летучие вещества становятся термодинамически устойчивыми. Это объясняет состав газовых (Юпитер, Сатурн) и ледяных (Уран, Нептун) планет, их ледяных спутников и транснептуновых тел.

Можно думать, что основополагающие физические представления о формировании планет Солнечной системы в целом характерны и для планет в других звёздных системах. Специфические особенности их формирования, зависящие в первую очередь от класса звезды, соотношения газа и твёрдой компоненты в диске, температуры на различных радиальных расстояниях от звезды, взаимного расположения протопланет различной массы и других факторов, могли оказаться, однако, сильное влияние на конфигурацию образующейся планетной системы. Вполне вероятно, что подобные ограничения налагаются на формирование планетных систем как у одиночных, так и у двойных звёзд со своеобразной динамикой системы [156].

## 9. Планетные системы двойных и кратных звёзд

### 9.1. Генезис и устойчивость

Физический механизм формирования самой планеты в системах двойных и кратных звёзд, по-видимому, мало отличается от рассмотренного для одиночных звёзд. Однако в таких системах принципиальное значение имеет изучение возможности и условий образования и существования планеты. Поэтому на первый план выступают вопросы поведения и устойчивости динамических систем, на этом и будет сосредоточено основное внимание в настоящем разделе.

До начала или в процессе достаточно быстрого ( $\sim 10^4$  лет) коллапса вращающийся фрагмент молеку-

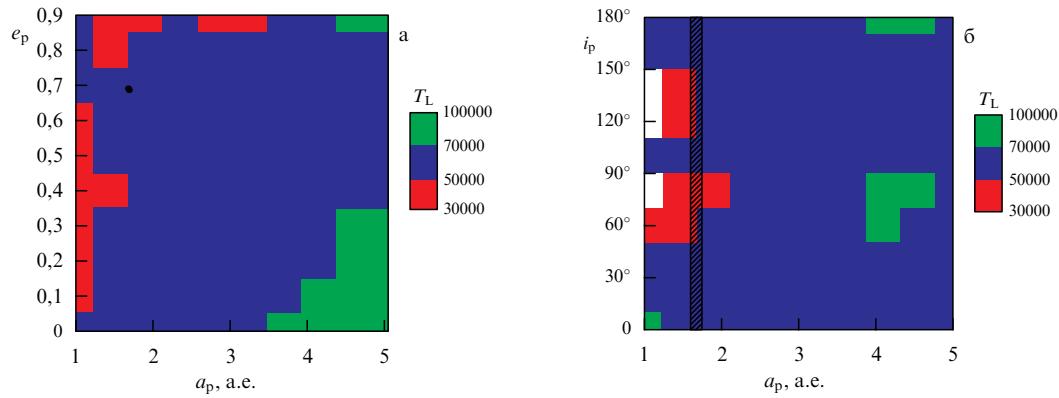
лярного облака может либо сохранять свою центральную наиболее плотную часть (ядро), образующую одиночную звезду, либо разбиваться на отдельные части, которые в процессе последующей эволюции порождают двойную или кратную звезду. Важным фактором, обеспечивающим устойчивость и противодействие дополнительной фрагментации таких протозвёздных объектов, предположительно является магнитное поле. Вокруг быстро коллапсирующих протозвёзд, достигающих состояния гидростатического равновесия, формируется газопылевой диск (диски), на которые аккрециирует оставшееся вещество фрагмента молекулярного облака, постепенно уменьшая свою массу.

Известно, что более половины всех наблюдаемых звёзд главной последовательности входят в кратные (включая двойные) звёздные системы [157, 158]. Газопылевые околозвёздные диски у одиночных звёзд имеют много общего с околозвёздными дисками у двойных звёзд.

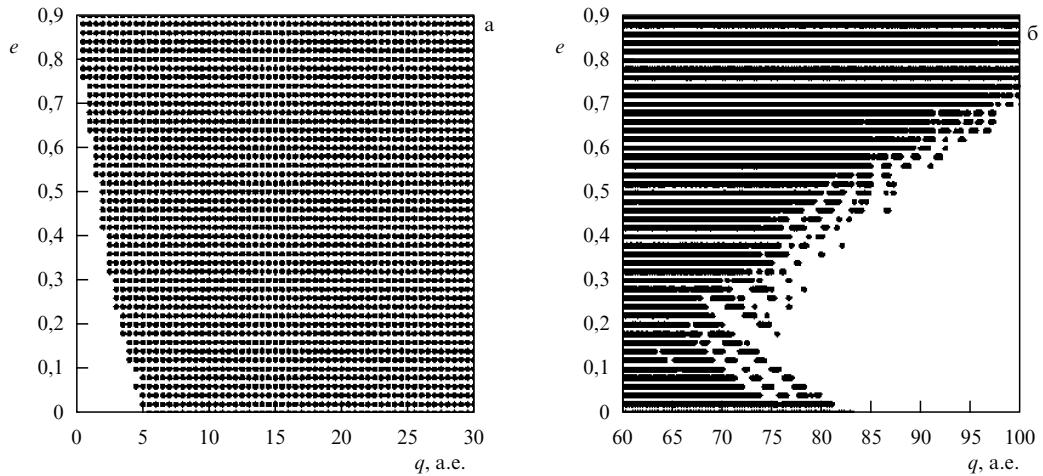
Исследования долговременной устойчивости гипотетических планетных систем в кратных звёздных системах были инициированы ещё в 1980-е годы французским учёным Д. Бене (D. Benest). В настоящее время известно о существовании планет в более чем ста кратных звёздных системах. Большинство планет, обнаруженных у двойных звёзд, находится на орbitах *S-типа* (вокруг одного компонента двойной; эти орбиты также называют внутренними), а остальные находятся на орбитах *P-типа* (вокруг обоих компонентов; такие орбиты также называют внешними или *циркумбинарными*). Сценарии формирования планет и наблюдавшая планетная динамика (часто "на пределе устойчивости") в двойных звёздных системах выдвигают ряд теоретических вызовов, особенно в отношении циркумбинарных планет [159, 160].

Астрономические наблюдения привели к выводу о существовании в системах двойных звёзд планет как *S*, так и *P*-типа. В долговременной динамической эволюции планет *S*-типа двойных звёздных систем определяющую роль может играть эффект Лидова – Козаи. Суть его состоит в периодических высокоамплитудных связанных колебаниях эксцентриситета и наклона орбиты планеты из-за возмущений со стороны звезды на внешней орбите, обладающей большим наклонением по отношению к орбитальной плоскости планеты [161]. В работе [162] рассмотрена орбитальная динамика планет *S*-типа двойных звёзд 16 Cyg и HD 196885. Как оказалось, динамика планеты в широкойvizуально-двойной звёздной системе 16 Cyg является практически регулярной с ляпуновским временем более 30 тыс. лет (при орбитальном периоде планеты, равном 2,2 года). Планетная система HD 196885 близка к резонансу Лидова – Козаи (см. [163]). Для наиболее вероятных значений орбитальных параметров HD 196885b вычислены ляпуновские времена. Оказалось, что динамика HD 196885b является практически регулярной с ляпуновским временем более 50 тыс. лет, если движение происходит вдали от сепаратрисы резонанса Лидова – Козаи (при орбитальном периоде планеты, равном 3,7 лет). На рисунке 14 приведены диаграммы устойчивости для планетной системы 16 Cyg.

Исследование, проведённое в работе [66], позволило определить области устойчивого движения гипотетических планет в двойной системе Alpha Centauri в пространстве орбитальных параметров планеты (рис. 15) ещё до объявленного открытия планеты в этой системе. Открытая планета находится в области устойчивости —



**Рис. 14.** (В цвете онлайн.) Ляпуновские времена планетной системы 16 Cyg в цветовой градации, в годах.  $a_p$  (в а.е.),  $e_p$  и  $i_p$  — начальные значения соответственно большой полуоси, эксцентриситета и наклонения орбиты 16 Cyg Bb. Положение планеты указано кружком (а) и заштрихованной полосой (б). (Согласно [162].)



**Рис. 15.** Диаграммы устойчивости на плоскостиperiцентрическое расстояние  $q$  — эксцентриситет  $e$  планеты, построенные для системы Alpha Centauri. Белым показаны области устойчивости, чёрным — неустойчивости. (а) Диаграмма для внутренних орбит, (б) для внешних [66].

глубоко внутри белого "треугольника устойчивости" на рис. 15. В случае циркумбинарного движения внешняя граница области хаоса на диаграммах устойчивости соответствует большой полуоси орбиты планеты более 80 а.е. Согласно результатам расчётов, наиболее вероятные значения ляпуновского времени (характерного времени предсказуемого движения) в зонах неустойчивости составляют  $\sim 500$  лет для внешних орбит и  $\sim 60$  лет для внутренних орбит [66].

До наблюдений с КА "Кеплер" было известно  $\sim 50$  планет в двойных звёздных системах, причём большинство из них — внутренние, т.е. обращающиеся вокруг одной из звёзд. Было известно и несколько циркумбинарных систем (HW Vir, NN Ser, UZ For, DP Leo, FS Aur, SZ Her) у тесных двойных с компонентами, не относящимися к звёздам главной последовательности. С использованием телескопа "Кеплер" методом транзитов было открыто несколько циркумбинарных планетных систем и у звёзд главной последовательности: это системы Kepler-16, 34, 35, 38 и 47 [164–167], причём система Kepler-47 является *мультипланетной*, включающей две планеты.

Орбитальная конфигурация циркумбинарной планетной системы Kepler-16 показана на рис. 16. Размеры двойной (0,22 а.е.) примерно в 100 раз меньше, чем у Альфа Центавра (23,4 а.е.). Диаграмма устойчивости на

плоскости начальных условий periцентрическое расстояние — эксцентриситет показывает (рис. 17), что планета Kepler-16b находится в опасной близости к области хаоса — она расположилась между "зубьями" неустойчивости в пространстве орбитальных параметров. Однако планета Kepler-16b "выживает" (не уходит из системы и не падает на родительские звёзды), потому что её орбита близка к полуцелому орбитальному резонансу 11/2 с центральной двойной. В Солнечной системе данный феномен аналогичен выживанию Плутона и объектов плутино в поясе Койпера, находящихся в полуцелом орбитальном резонансе 3/2 с Нептуном. Границы хаоса — порядок на диаграммах устойчивости демонстрируют фрактальную структуру, обусловленную наличием орбитальных резонансов.

Большой интерес представляет вопрос о том, как формируются циркумбинарные планеты. Согласно современным расчётом в рамках модели *планетезимальной акреции*, предпочтительным является сценарий, в котором планетное ядро формируется во внешних областях протопланетного диска (там, где благоприятны условия для акреции), а затем мигрирует внутрь, пока миграция не останавливается на границе внутренней полости диска, порождаемой центральной двойной [159, 160, 168]. Полость примерно соответствует по размерам области

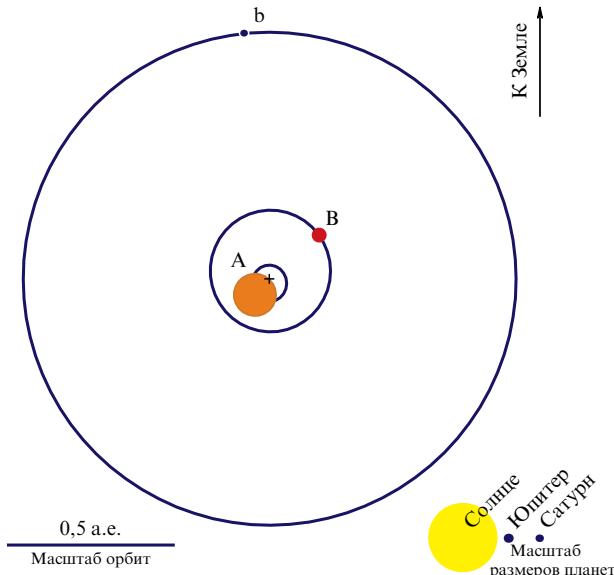


Рис. 16. Система Kepler-16 [164].

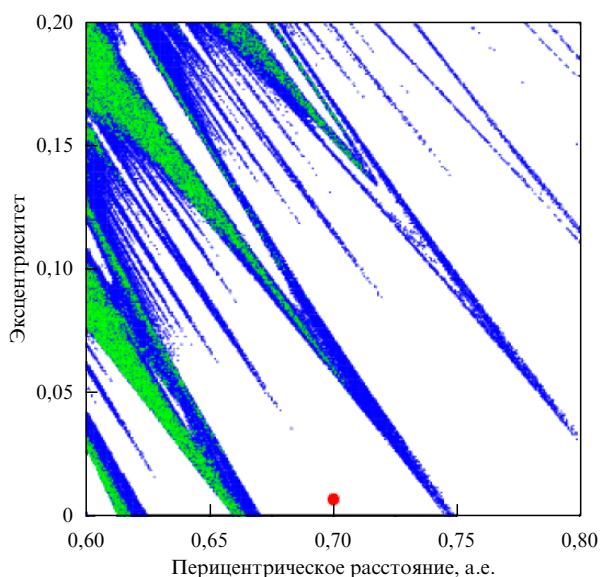


Рис. 17. (В цвете онлайн.) Диаграмма устойчивости для системы Kepler-16. Зелёным цветом показаны орбиты, неустойчивые по критерию ухода – столкновений, синим — по критерию значения показателя Ляпунова [67].

хаоса для орбит вокруг двойной. Хотя формирование циркумбинарных планет *in situ* в принципе возможно, это менее вероятно из-за неблагоприятных условий для планетезимальной акреции — высоких скоростей столкновений планетезималей и их относительно малой концентрации.

Каким образом можно теоретически описать границу хаос–порядок на диаграммах, подобных представленной на рис. 17? В работе [169] аналитически оценена радиальная протяжённость зоны хаотических орбит частицы малой массы вокруг системы двух гравитационно-связанных тел (двойной звезды, двойной чёрной дыры, двойного астероида) как функция эксцентриситета орбиты частицы. С помощью теории сепаратрисных отображений показано, что централь-

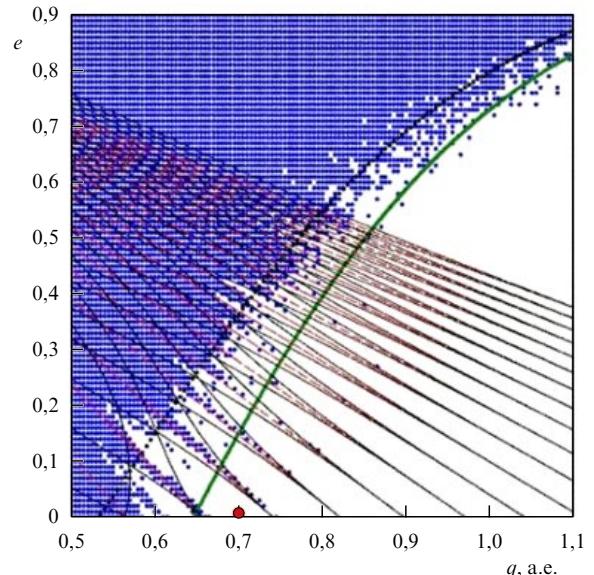


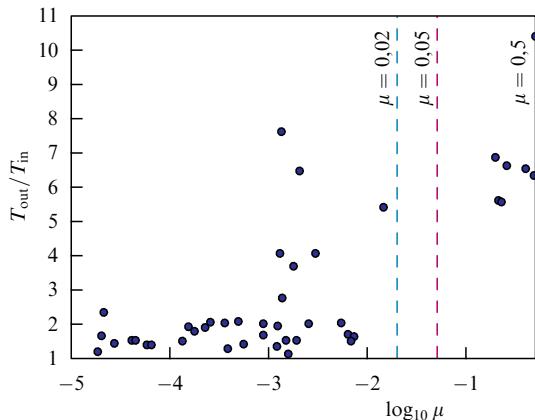
Рис. 18. (В цвете онлайн.) Диаграмма устойчивости для системы Kepler-16 в координатахperiцентрическое расстояние – эксцентриситет. Синим точечным фоном выделена зона хаоса. Крупный красный кружок — планета. Сплошные и штриховые кривые указывают границы области хаоса и сепаратрисы целых резонансов средних движений с центральной двойной, согласно современным теоретическим моделям. (Согласно [170].)

ная непрерывная зона хаоса проявляется выше некоторого порога по массовому параметру центральной двойной благодаря перекрытию орбитальных резонансов, соответствующих целочисленным отношениям  $p:1$  между периодами обращения частицы и центральной двойной. В этой зоне имеет место неограниченная хаотическая орбитальная диффузия частицы, вплоть до выброса частицы из системы. Оценено значение массового параметра ( $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$ , где  $m_1$  и  $m_2$  — массы компонентов центральной двойной,  $m_1 \geq m_2$ ), выше которого такая хаотическая зона присутствует универсально при всех начальных эксцентриситетах частицы.

Путём массовых численных экспериментов выявлены области хаотического движения на плоскости начальных условий periцентрическое расстояние – эксцентриситет для планетных орбит [170]. Исходя из аналитического критерия [169] хаотичности планетных орбит в двойных звёздных системах дано аналитическое описание диаграмм устойчивости: построены теоретические кривые, описывающие глобальную границу области динамического хаоса вокруг центральной двойной для каждой из систем. На основе теории [171], описывающей отдельные резонансные "зубцы" (соответствующие целым резонансам между орбитальными периодами планеты и двойной), построены локальные границы хаоса. Теоретические модели успешно описывают (рис. 18) как глобальную, так и локальные границы хаос – порядок на построенных численно диаграммах устойчивости, что говорит о применимости этих теорий и их эффективности при использовании аналитических критерий хаотичности планетных орбит.

В работе [169] показано, что наблюдаемое разнообразие орбитальных конфигураций бипланетных систем<sup>11</sup> и циркумбинарных планетных систем согласу-

<sup>11</sup> Здесь бипланетная система определяется как одиночная звезда с двумя планетами.



**Рис. 19.** Зависимость отношения орбитальных периодов от массового параметра для бипланетных и циркумбинарных экзосистем (показаны точками). Вертикальные штриховые линии соответствуют теоретическим порогам по  $\mu$ , при которых проявляется центральная хаотическая зона. Данные (на 30 июня 2014 г.) для экзосистем взяты из "The Extrasolar Planets Encyclopedia" (exoplanet.eu). (Согласно [169].)

ется с существованием порогового значения  $\mu$ . Анализ проведён путём построения эмпирической зависимости отношения орбитальных периодов  $T_{\text{out}}/T_{\text{in}}$  частицы и центральной двойной от массового параметра центральной двойной  $\mu$ . Для применимости используемого теоретического критерия необходимо, чтобы планета на наиболее удалённой орбите имела наименьшую массу в системе, и только такие системы были включены в выборку.

Итоговый график показан на рис. 19; положение экзосистем отмечено точками. Все бипланетные системы оказываются слева от вертикальной штриховой линии, указывающей теоретический порог  $\mu \approx 0,05$  для появления центральной хаотической зоны, тогда как циркумбинарные системы находятся справа от неё. Очевидно также полное отсутствие экзосистем с  $T_{\text{out}}/T_{\text{in}} < 5$  при  $\mu > 0,05$ , что согласуется с теорией: при  $\mu > 0,05$  формируется центральная хаотическая зона, где орбиты частицы с любыми начальными эксцентриситетами подвержены неограниченной хаотической диффузии, вплоть до выброса частицы из системы. Отметим также, что, согласно рис. 19, при  $\mu < 0,01$  много экзосистем группируется вблизи резонанса  $2/1$ , тогда как при  $\mu > 0,01$  экзосистемы группируются скорее при полуцелочисленных, чем при каких-либо целочисленных резонансах. Этот факт согла-суется с выводами [67]: хотя наблюдаемые циркумбинарные планеты и расположены вблизи границы хаоса в пространстве орбитальных элементов, они "выживают", потому что находятся в "безопасности" в регулярных областях внутри резонансных ячеек, образуемых неустойчивыми целочисленными резонансами высокого порядка.

Значительный интерес представляет долговременная орбитальная эволюция циркумбинарных систем. Насколько они "долговечны"? В работе [172] показано, что циркумбинарные планетные системы подвержены универсальному приливному распаду, имеющему место благодаря присущему им вынужденному орбитальному эксцентриситету орбит. Циркумбинарные планеты высвобождаются из родительских систем, когда из-за медленного "сжатия" орбит они входят в циркумбинарную хаотическую зону. На относительно малых временных масштабах (существенно меньших возраста Вселенной) этот

эффект может объяснять (по крайней мере частично) наблюдаемое отсутствие циркумбинарных планет у достаточно тесных двойных звёзд (с периодами менее 5 сут). На более длительных временных масштабах (порядка современного возраста Вселенной,  $\sim 14$  млрд лет), но значительно меньших времени жизни родительских звёзд (в случае красных карликов время жизни может составлять триллионы лет), этот процесс может обеспечивать массовое высвобождение проэволюционировавших циркумбинарных планет. Наблюдательные проявления эффекта могут включать: 1) преобладание крупных каменных планет (сверхземель) в полной популяции свободных (free-floating) планет (если данный механизм — единственный источник таких планет); 2) зависящий от массы родительских звёзд дефицит циркумбинарных планет в системах маломассивных звёзд, причём чем меньше масса родительских звёзд, тем больше дефицит.

Действительно, рассмотрим плоскую систему трёх гравитирующих тел: центральную массивную двойную звезду и значительно менее массивный объект (частицу), обращающуюся на орбите вокруг двойной. Начальная орбита частицы полагается круговой, однако эксцентриситет орбиты периодически возмущается на вековых и локальных временных шкалах [79, 173]. Следовательно, начальная орбита не может постоянно оставаться круговой. Данный эффект обеспечивает естественный универсальный механизм внутреннего приливного трения и нагрева циркумбинарных планет [174]. Частица на медленно сжимающейся круговой орбите в конечном итоге попадает в хаотическую зону вокруг центральной двойной и, следовательно, уходит из системы [169]. Как первоначально предполагалось в [174], процесс ухода планеты может в конечном итоге иметь место из-за орбитальной эволюции двойной звезды-хозяина (из-за потери массы звезды и взаимных приливов), а не самой планеты. В частности, на ранней стадии эволюции тесной двойной системы из-за приливной передачи углового момента от вращающихся звёзд орбита двойной может расширяться до тех пор, пока не будет достигнуто состояние приливной синхронизации (спин-орбитального резонанса  $1:1$ )<sup>12</sup>. В этот момент, согласно [175], размер циркумбинарной хаотической зоны максимален.

Заметим, что отсутствие тесных двойных звёзд с циркумбинарными планетами можно объяснить также дестабилизацией орбит планет из-за их попадания в циркумбинарную хаотическую зону [175]. Однако рассмотренный в [175] механизм ухода отличается от механизма, рассмотренного в [172]. В сценарии [172] планетная орбита медленно сжимается, а размер хаотической зоны остаётся постоянным. В приливном сценарии [175], напротив, хаотическая зона расширяется (поскольку орбита двойной расширяется из-за приливной передачи углового момента от вращающейся звезды), тогда как большая полуось планетной орбиты остаётся постоянной. Следует отметить, что приливный сценарий [175] относится к ранней (до выхода на главную последовательность) стадии эволюции родительской звезды, тогда как сценарий [172] действует на гораздо более длительных временных шкалах и, таким образом, способен обеспечить уход уже сильно проэволюционировавших планет.

<sup>12</sup> Родственный спин-орбитальный резонанс  $3:2$  присутствует в движении Меркурия в Солнечной системе.

## 9.2. Мультипланетные системы

Примерно треть из числа открытых к настоящему времени экзопланет входит в мультипланетные системы, т.е. в системы с двумя или большим числом планет [3]. Наличие орбитальных резонансов в мультипланетных системах широко распространено и подтверждено вычислениями временного поведения резонансных аргументов. Известные системы с резонансом средних движений 2/1 — Gliese 876 и HD 82943; пример системы с резонансом 3/1 — 55 Рака (55 Cancri). Система Gliese 876 — пример системы с соотношением орбитальных периодов 4:2:1 [176], такого же, как у внутренних галилеевых спутников Юпитера, — *резонанса Лапласа*. Более того, недавно открыта "плотно упакованная" резонансная мультипланетная система Kepler-223, демонстрирующая резонанс средних движений 8:6:4:3 [11]. Среди наиболее интересных примеров мультипланетных систем — 55 Рака, Иpsilon Андромеды, Kepler-11 и Kepler-223.

Мультипланетная система двойной звезды 55 Рака изучена достаточно подробно. Вокруг главного компонента — жёлтого карлика (звезды спектрального класса G8) — обращается по меньшей мере 5 планет с массами от 0,034 до 3,84  $M_{\oplus}$ ; их орбитальные периоды составляют от 2,8 до 5200 суток. 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" [177].

Иpsilon Андромеды (*Upsilon Andromedae*) — двойная звезда, состоящая из жёлтого (спектрального класса F8) и красного карликов; размер двойной 750 а.е. Вокруг жёлтого карлика обращаются три планеты-гиганта с массами от 0,69 до 3,93  $M_{\mathrm{J}}$  [178] и орбитальными периодами от 4,6 до 1290 суток. Система в целом устойчива [179]. Планеты c и d близки к резонансу 11/2. Обращает на себя внимание схожесть резонансной конфигурации с обсуждавшимся выше резонансом в циркумбинарной планетной системе Kepler-16.

Kepler-11 — одиночный жёлтый карлик, в системе которого обнаружено 6 транзитных планет с массами от 4,3 до 300  $M_{\oplus}$  и орбитальными периодами от 10,3 до 118 суток. Пять внутренних планет движутся на очень тесных орbitах: расстояния между ними малы как в относительных единицах (в единицах радиуса орбиты внутренней планеты), так и в абсолютных: орбита пятой (самой внешней) планеты лишь немногим больше орбиты Меркурия. Система в целом нерезонансна, устойчива; однако её конфигурация совершенно нетипична [180]. Две самые близкие к родительской звезде планеты близки к резонансу 5/4. Возможно, что существуют и другие более внешние (нетранзитные) планеты.

Kepler-223 — жёлтый карлик (звезда спектрального класса G5V), у которого открыты 4 транзитные планеты. Из наблюдений транзитов определены их радиусы: 1,8, 2,1, 2,8, 2,4  $R_{\oplus}$ , т.е. это сверхземли. Орбитальные периоды составляют 7,4, 9,8, 14,8 и 19,7 суток; таким образом, планеты близки к резонансу 8:6:4:3. Эта планетная система — наиболее выдающейся из известных сейчас примеров плотно упакованной резонансной системы [11].

Как в мультипланетных системах, так и в системах кратных звёзд, если возмущающее тело находится на наклонной орбите, определяющую роль в формировании динамической архитектуры системы может играть упомянутый выше эффект Лидова — Козаи, также имеющий резонансную природу [161]. К подобным объектам относится Kepler-56 и около сотни других ему подобных, у каждого из которых открыта компактная мультипла-

нетная система суперземель и мининептунов с периодами < 200 суток (*Systems of Tightly Packed Inner Planets*, STIPs). Такая компактная конфигурация, вероятно, образовалась из-за наличия второго звёздного компаньона.

## 9.3. Статистика резонансов

Насколько распространены орбитальные резонансы в динамике экзопланет? В работе [181] на основе данных *Exoplanet Encyclopedia* исследована статистика проявлений резонансов в мультипланетных системах (с двумя или более планетами у одиночных звёзд) и в системах с одной или более планетами у двойных звёзд. Суммарное число планетных систем в исследуемой выборке составило 143. В случае двойных звёзд "главной" звездой считалась либо наиболее массивная компонента, либо та, вокруг которой обращается планета. Вычислялись отношения орбитальных периодов для всех пар объектов в каждой системе. В итоге построены дифференциальные распределения отношений периодов для двух альтернативных случаев: а) более массивное ("возмущающее") тело находится на орбите, расположенной ближе к главной звезде, чем менее массивное; б) наоборот, менее массивное ("возмущаемое") тело находится на орбите, более близкой к главной звезде, чем более массивное, и, следовательно, орбитальный период менее массивной планеты меньше периода более массивной. В каждом случае внутреннее тело обозначается как второе (период обращения  $T_2$ ), а внешнее — как первое (период обращения  $T_1$ ).

На рисунке 20 представлена гистограмма отношений  $T_1/T_2$ , построенная для случая а) — внутреннего возмущающего тела. Как видим, особенно выделяются пики вблизи резонансов первого порядка 3/2 и 2/1; также присутствуют пики вблизи резонансов 5/2, 3/1 и 4/1. На рисунке 21 дана гистограмма для случая б) — внешнего возмущающего тела; здесь максимумы присутствуют в областях тех же значений  $T_1/T_2$ , за исключением резонанса 5/2. Обе гистограммы аппроксимированы аналитическим выражением в виде суммы нормальных рас-

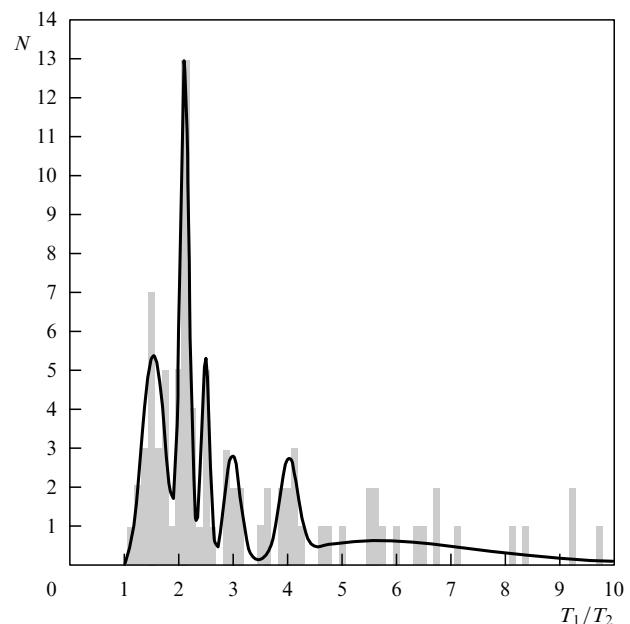
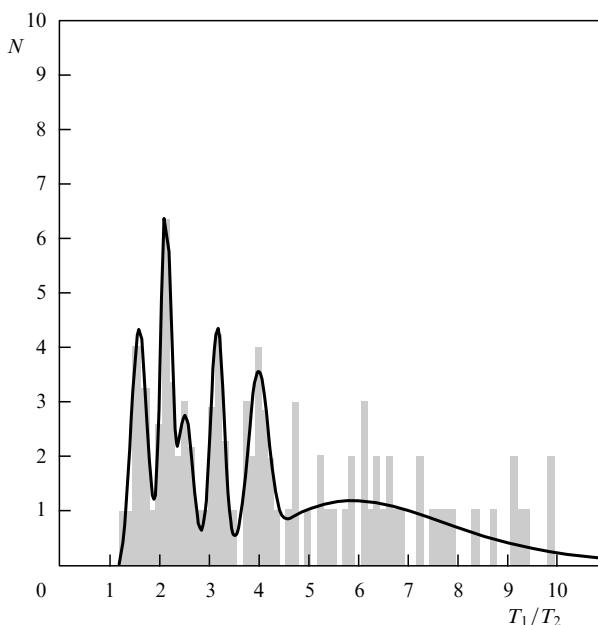


Рис. 20. Гистограмма отношений орбитальных периодов для случая внутреннего возмущающего тела. Сплошной кривой показана модельная аппроксимация. (Согласно [181].)



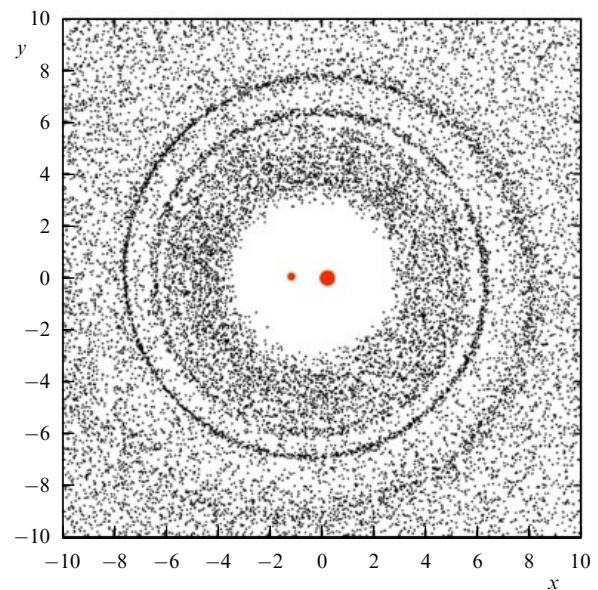
**Рис. 21.** Гистограмма относений орбитальных периодов для случая внешнего возмущающего тела. Сплошной кривой показана модельная аппроксимация. (Согласно [181].)

пределений относений периодов в окрестностях резонансов, а также функцией, описывающей монотонное убывание в хвосте распределения. Полученные аппроксимации показаны сплошными кривыми. На обеих гистограммах доминирующие пики  $3/2$  и  $2/1$  несколько смещены вправо относительно своих номинальных резонансных положений. Аналитическая аппроксимация даёт точные значения смещений. Наличие таких смещений — известный и широко обсуждаемый эффект [182–184]. Имеются две основные гипотезы относительно причин статистических отклонений  $T_1/T_2$  относительно номинальных значений: 1) возникновение смещения на начальных этапах динамической эволюции системы, если планеты со временем увеличивают массу [184]; 2) возникновение смещения в процессе долговременной приливной эволюции [182, 183].

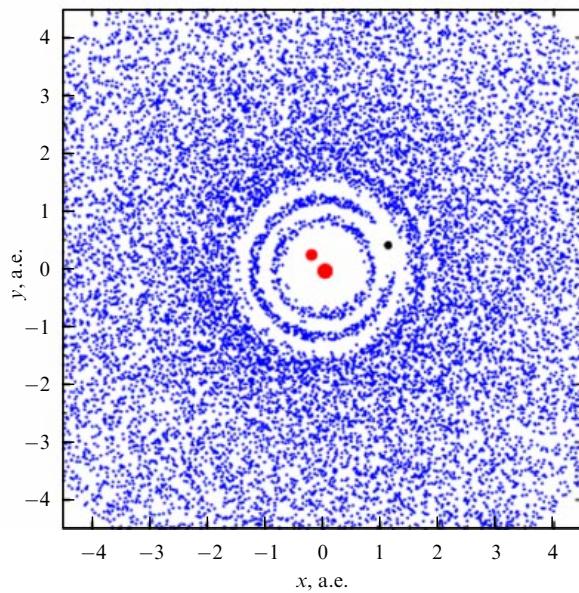
#### 9.4. Структуры планетезимальных циркумбинарных дисков

Существенную роль в космогонии циркумбинарного протопланетного диска (диска вокруг двойной звезды) играют динамические возмущения, особенно в эпоху потери диском газовой составляющей. В работе [173] предложена теория для вековой динамики планетезималей в циркумбинарном безгазовом диске, в которой показано, как формируется циркумбинарная спиральная структура. Численно и аналитически изучена эволюция структуры в ходе распространения волны плотности по диску на вековой шкале времени; выведены аналитические формулы, описывающие возникающие структурные особенности; они в частности описывают численно-экспериментальную картину. Оценено влияние остаточного газа на распространение волны. Пример циркумбинарной спиральной структуры приведён на рис. 22.

Планета в планетезимальном диске формирует характерную многополосную структуру в нём. Теоретически и путём численного моделирования выяснено, как формируется такая структура, состоящая из нескольких колец вокруг центральной одиночной или двойной звезды.



**Рис. 22.** Пример спиральной структуры в планетезимальном циркумбинарном диске [173].



**Рис. 23.** Пример кольцевой структуры в циркумбинарном диске с планетой, полученный путём численного моделирования [185].

ды, заполненных веществом или свободных от него [185]. В наиболее яркой форме этот эффект проявляется в случае циркумбинарных дисков. При некоторой предельной массе планеты система из многих колец сокращается до трёхполосной: заполненного веществом коорбитального с планетой кольца и двух кольцеобразных полосей, положение которых соответствует орбитальным резонансам  $2:1$  и  $1:2$  с планетой. На рисунке 23 приведён полученный путём численного моделирования пример кольцевой структуры в циркумбинарном диске с планетой.

Закономерности формирования кольцевых многополосных структур, обусловленных наличием планет, в планетезимальных дисках одиночных и двойных звёзд рассмотрены в [185], и на основе аналитических критерий устойчивости предложено объяснение при-

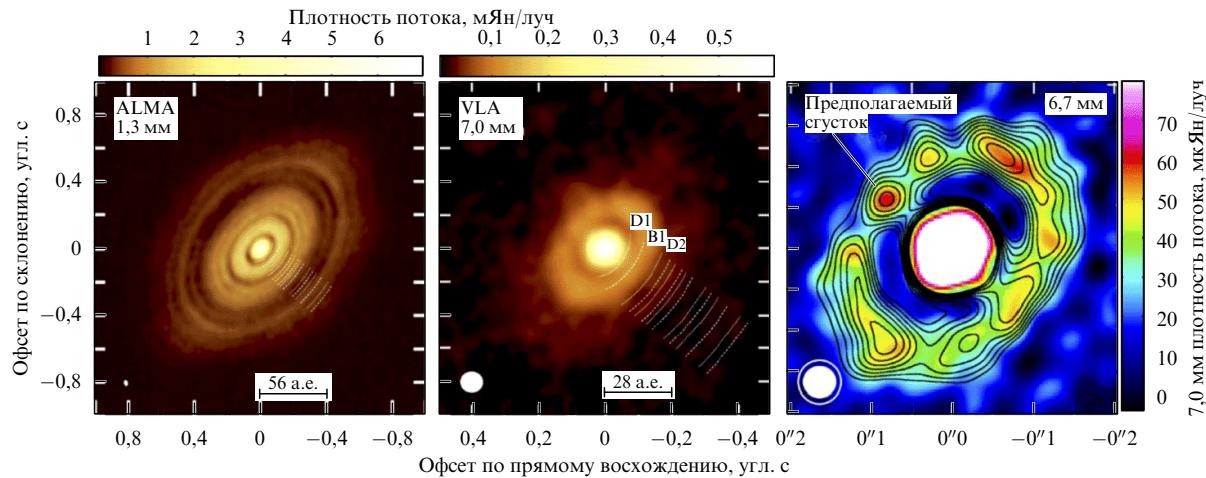


Рис. 24. (В цвете онлайн.) Наблюданная многополосная кольцевая структура в протопланетном диске HL Tau [186].

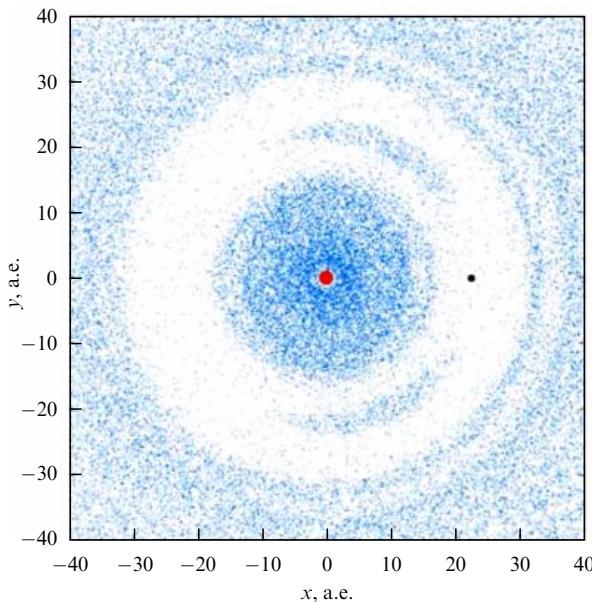


Рис. 25. Пример кольцевой структуры в модели с параметрами HL Tau [187].

роды трёхполосной структуры в протопланетном диске HL Tau. Многополосная кольцевая структура в диске по наблюдениям телескопа ALMA [186] показана на рис. 24.

Формирование резонансных многополосных структур в циркумбинарных остаточных молодых дисках звёзд с планетами эффективно исследуется с помощью численного моделирования [187]. Численные эксперименты позволили, в частности, обнаружить формирование коорбитальных с планетами подковообразных структур. Эти долгоживущие резонансные структуры, контролируемые планетами, в общем случае являются многополосными, состоящими из нескольких концентрических колец. Между параметрами колец и параметрами орбит планет имеются чёткие статистические зависимости [185]. Пример такой кольцевой структуры в модели с параметрами HL Tau приведён на рис. 25.

Массовые численные расчёты эволюции планетизимальных дисков в системах с параметрами Kepler-16, Kepler-34 и Kepler-35 показали [188], что коорбитальные

структуры образуются обычно в системах с умеренными орбитальными эксцентриситетами планетных орбит и родительских двойных звёзд (как в случаях Kepler-16 и Kepler-35). Таким образом, любая наблюдательная идентификация характерных резонансных кольцеобразных структур в дисках может указывать на присутствие планет, контролирующих эти структуры. Вблизи орбит планет разрушается спиральная структура, выявленная в [173]; однако на периферии диска она сохраняется. В то время как в системах Kepler-16 и Kepler-35 формируется устойчивое коорбитальное кольцо, в случае Kepler-34 оно малозаметно. Действительно, существенный эксцентриситет двойной звезды Kepler-34 ( $\sim 0,5$ ) в сочетании с заметно некруговой орбитой её циркумбинарной планеты (эксцентриситет  $\sim 0,2$ ) препятствуют образованию долгоживущей структуры.

### 9.5. Сценарии формирования планет в системах двойных звёзд

Известно, что к двойным системам и системам большей кратности относится примерно половина звёзд Галактики. Определённые различия в механизме образования планет в системах двойных и кратных звёзд по сравнению с одиночными обусловлен более сложным характером гравитационных полей, влияющих на структуру и эволюцию околозвёздных дисков и формирование в них планетных тел.

К сожалению, пока ещё трудно реконструировать сценарии образования планет вокруг двойных и кратных систем при аккреции первоначального газопылевого облака и обмена веществом между компонентами системы. Картина процессов сильно усложняется, в первую очередь, из-за динамических взаимодействий. Тем не менее имеющиеся данные позволяют понять общий характер ранней эволюции таких звёздно-планетных систем и наложить ряд дополнительных ограничений на разрабатываемые модели формирования планет. Исследование кратных планетных систем способствует развитию представлений о динамике и космогонии экзопланет, хотя ответы на ключевые вопросы их происхождения могут быть, по-видимому, получены только путём изучения состава самого вещества, образующего эти тела. Здесь астрономия и методы спектроскопии наиболее тесно связаны с космохимией.

Интересно, что проблема передачи углового момента легче решается в рамках модели диска, формирующегося

и эволюционирующего вокруг тесной двойной или кратной звёздной системы, чем вокруг одиночной звезды. Предполагается, что диски формируются в пределах этих систем, и первичная материя, входящая в планеты, действительно косвенно наблюдалась вокруг одного или обоих компонентов некоторых молодых двойных звёзд. Подобно формированию Солнечной системы в пределах газопылевого диска, процесс аккреции мог быть общим также и в системе двойных звёзд, хотя окружающий первичный "циркум-компонентный" диск искажён близким компаньоном. Действительно, у некоторых из систем в пространстве, окружающем двойную звезду, имеются звёздные компаньоны на довольно близких орбитах, что предполагает динамически сложную эволюцию дисков у таких систем, отличную от эволюции у планетных систем вокруг одиночных звёзд. Альтернативным сценарием может быть распад в диск одного из компонентов двойной системы около более массивного компаньона. Не исключаются и другие возможности, каждая из которых представляет большой интерес, прежде всего, с точки зрения общих проблем эволюции планетных систем.

Удельный угловой момент первичного газопылевого облака является главным фактором, определяющим различие между ранними эволюционными стадиями двойных и одиночных звёзд и устойчивость планетной системы. Тесные двойные звёзды могут служить своего рода "полигоном" для моделей формирования системы, выявления некоторых критических параметров и предельных состояний. Так, например, одна из планет в двойной системе HD 196885 имеет орбиту с большой полуосью 2,6 а.е. в сильно возмущённой области — почти на пределе орбитальной устойчивости. Её формирование, возможно, было наиболее чувствительно к возмущениям первичных планетезималей от обоих компаньонов двойной системы. С таким сценарием связаны проблемы как окончательной аккумуляции планеты, так и её дальнейшей орбитальной устойчивости.

Формирование планет в системах S-типа двойных звёзд во многом аналогично процессу в системах одиночных звёзд, так как влияние второй звезды сводится к вековым возмущениям протопланетного диска, тем меньшим, чем более широкой является звёздная пара. В то же время в системах P-типа (циркумбинарных системах) процесс может быть качественно отличен, поскольку вокруг двойной всегда существует циркумбинарная зона динамического хаоса [169], где формирование и существование планет невозможно.

Наблюдаемые циркумбинарные планеты, открытые с КА "Кеплер", имеют массы в диапазоне от 0,1 до 0,5 массы Юпитера [164–167], т.е. они подобны Нептуну или Юпитеру. Не были найдены циркумбинарные планеты, подобные Земле или принадлежащие классу сверхземель. Ясно, однако, что преобладание больших масс не исключает возможности существования в тех же системах планет меньшей массы из-за эффекта наблюдательной селекции, поскольку транзитный сигнал от планеты земного типа или сверхземли примерно в 100–1000 раз меньше, чем от планеты, подобной Юпитеру.

В отличие от образования планет земного типа в системах одиночных звёзд, формирование подобных планет в циркумбинарных системах является совершенно новой темой, да и сами циркумбинарные планеты у звёзд главной последовательности были обнаружены сравнительно недавно. Нет физических оснований считать, что обсуждавшиеся ранее физико-химические процессы начального и последующих этапов образования и роста

первичных твёрдых тел из пылевых кластеров в газопылевых протопланетных дисках у одиночных звёзд существенно отличаются от процессов в циркумбинарных дисках. Вместе с тем можно предполагать, что при формировании циркумбинарных планет более сложными являются процессы, происходящие на этапе аккреции планетезималей километровых размеров в условиях доминирования гравитации над силами аэродинамического сопротивления в газопылевом диске. Так, например, аналитически показано [79], что радиус циркумбинарной области, неблагоприятной для парной аккреции планетезималей, существенно больше центральной хаотической зоны (полости). Барицентрический радиус этой неблагоприятной зоны обычно на порядок больше радиуса центральной полости. Аккреция препятствует тот факт, что центральная двойная звезда индуцирует эксцентризитет и дифференциальную (зависящую от расстояния от барицентра) прецессию планетезимальных орбит, что вызывает разрушающие столкновения планетезималей. Относительные скорости при столкновениях становятся достаточно малыми и допускают аккрецию лишь достаточно далеко от барицентра. На меньших радиальных расстояниях планетезимали, эксцентризитеты орбит которых обусловлены бинарностью звезды, могут быть апсидально выровнены лишь благодаря торможению в остаточном газе диска. Однако сопротивление зависит от размеров тел, что индуцирует дифференциальное орбитальное смещение по фазе, усиливая процесс столкновительного разрушения планетезималей [189].

Что касается близкого к завершающему этапу образования планетных эмбрионов, то в циркумбинарных дисках, очевидно, могут создаваться более разнообразные многопланетные орбитальные конфигурации [190, 191]. В рамках аккреционной модели предпочтительным является следующий сценарий формирования циркумбинарных планет [159, 160, 168]: планетное ядро образуется во внешней зоне протопланетного диска, благоприятной для аккреции; затем оно мигрирует внутрь и останавливается на границе центральной полости. На основе моделирования эволюции планет в циркумбинарных дисках, включая формирование планетезималей километровых размеров, был сделан вывод, что планеты Kepler-16b, 34b и 35b вряд ли были сформированы *in situ* [160]. Между тем, как отмечалось в [192], во внешних областях циркумбинарных дисков планеты формируются почти таким же образом, как и их аналоги в системах с одной звездой. Интересно, что циркумбинарное окружение может быть даже более благоприятным для формирования планет. Однако миграция в диске представляется необходимым фактором формирования конечной орбитальной архитектуры. Расположение орбит наблюдаемых планет-гигантов в системах, открытых КА "Кеплер", воспроизводится при определённых параметрах вязкого сопротивления и моделей профилей дисков [193–195].

Миграция циркумбинарных планет в дисках впервые была исследована путём гидродинамического моделирования [196], которое показало, что планета-гигант, подобная Юпитеру, может быть захвачена в резонанс 4/1 с центральной двойной. Между тем циркумбинарные планеты с меньшей массой (от 5 до 20 земных масс) могут останавливаться на границе центральной полости, и это позволило предсказать возможность обнаружения здесь нептуноподобных циркумбинарных планет [168], что было подтверждено открытием таких планет КА "Кеплер". Выявлена также важная роль орбитальных резо-

нансов [197, 198]. Резонансы с центральной двойной, такие как 4/1 и 5/1, могут служить "ловушками" для мигрирующих планет, оказывая влияние на процесс формирования и орбитальную эволюцию планет-гигантов с массами порядка массы Сатурна, "встроенных" в диск. Эти выводы подтверждены результатами более детального моделирования с учётом баланса вязкого нагрева и радиационного охлаждения диска [194], а также анализом процесса роста планетезималей с учётом возмущений из-за прецессии эксцентртического диска [199].

Особо следует упомянуть об исследовании миграции планет I типа малых (земных) масс в газовых циркумбинарных дисках, в результате которого было обнаружено, что миграция может быть остановлена на краю центральной полости [168]. В случае газового диска остановка объясняется уравновешиванием отрицательного линдбладовского крутящего момента положительным коротационным крутящим моментом, и такая "планетная ловушка" работает, когда имеется резкий положительный градиент поверхностной плотности диска [200]. В рамках гидродинамического моделирования многопланетных систем, встроенных в циркумбинарные диски, показано [197], что в двухпланетной системе, когда наибольшая из двух планет останавливается на границе полости, а меньшая продолжает мигрировать внутрь, результат обычно представляет собой равновесную конфигурацию с планетами, запертными в орбитальных резонансах. Если же сначала на границе полости останавливается меньшая планета, то обычно происходит рассеяние планет системы. В моделировании системы с пятью планетами стабильным конечным результатом является образование полностью резонансной трёхпланетной системы. Последнее не противоречит возможности существования планет меньшей массы на орbitах, внешних по отношению к наблюдаемым "ведущим" планетам-гигантам.

Приведённые результаты гидродинамического моделирования согласуются с аналитическими предсказаниями упомянутой выше концепции "планетной ловушки" в модели миграции. Проблема состоит в том, что миграция может быть слишком быстрой по сравнению со скоростью формирования планеты, так что планета может вообще не успеть образоваться. Когда же имеется резкий положительный градиент поверхностной плотности диска на некотором радиальном расстоянии от центра, то, как уже упоминалось, отрицательный линдбладовский крутящий момент может быть уравновешен положительным коротационным крутящим моментом, и тогда в этой зоне может скапливаться планетное вещество большой массы [200]. Выявлены возможные местоположения ловушек: кроме края центральной полости, ими могут быть внешние границы резонансных кольцеобразных зон, очищенных от газа гигантскими протопланетами, причём, как оказалось, циркумбинарный вариант аналогичен варианту с одной звездой. Менее крупные планеты, внешние по отношению к наблюдаемой "ведущей" планете-гиганту, могут быть остановлены на этих локальных границах.

На основе концепции планетной ловушки было выдвинуто предположение, что крупные планетезимали формируются на краю полости, где давление газа максимально, а поверхностная плотность содержащихся твёрдых частиц относительно велика; в этом случае может происходить формирование циркумбинарных планет *in situ*, причём в системах тесных двойных звёзд оно может протекать даже легче, чем у одиночных звёзд [201, 202]. Действительно, обычно считается, что циркумби-

нарный диск полностью турбулизован и ионизован, хотя более вероятно, что он стратифицирован относительно средней плоскости и состоит из радиально расширенного нетурбулентного внутреннего слоя и двух сильно турбулентных поверхностных слоёв. Можно думать, что внутренняя зона, где твёрдые частицы могут оседать на среднюю плоскость, благоприятна для формирования планет и что циркумбинарные планеты образуются легче, чем в дисках одиночных звёзд [202]. Дело в том, что, в отличие от одиночных звёзд, у которых радиальные положения планетных ловушек в дисках определены нечётко [203], циркумбинарный протопланетный диск имеет физически выделенный масштаб, определяемый размером двойной звезды, и поэтому радиальное положение резкого положительного градиента поверхностной плотности чётко определено. Другими словами, в отличие от моделей дисков одиночных звёзд, модели циркумбинарных дисков не нуждаются в "тонкой настройке параметров" для обеспечения подходящих радиальных положений орбит планет.

У одиночных звёзд теоретически возможно большое разнообразие конечных орбитальных архитектур систем планет земного типа, поскольку процесс акреции у таких планет сильно зависит от начальной орбитальной конфигурации и эволюции формирующихся раньше их планет-гигантов [204]. Можно, вообще говоря, ожидать даже большего разнообразия у планетных систем S-типа (циркумзвёздных) для широких двойных звёзд, но не для систем P-типа (циркумбинарных). Сравнивая архитектуру циркумбинарных планетных систем с архитектурой Солнечной системы, легко увидеть, что циркумбинарные системы можно рассматривать как "усечённую версию" Солнечной системы, внутренняя часть которой, где должны находиться планеты земной группы, просто отсутствует, так как она формально находится в циркумбинарной хаотической зоне. В большинстве известных циркумбинарных планетных систем близко к границе этой зоны обращается планета-гигант, аналог Нептуна или Юпитера. Если модель "усечённой системы" верна, то орбитальная архитектура, внешняя по отношению к ведущему гиганту, может быть довольно простой, сходной по структуре с поясом Койпера. При этом ледяные/каменные тела имеют тенденцию находиться в орбитальных резонансах с "пасущим" их гигантом; роль последнего в Солнечной системе играет Нептун. Такая архитектура предполагает существование циркумбинарных планет земного типа, внешних по отношению к ведущей планете-гиганту.

Наблюдательными свидетельствами существования планет, внешних по отношению к захваченным на краю центральной полости гигантам, служат такие экзопланеты, как Kepler-47c, Kepler-1647b и OGLE-2007-BLG-349L (AB)c [166, 205–208]. Их обнаружение показывает, что не у всех планет миграция прекращается лишь на краю полости: некоторые останавливаются на гораздо больших расстояниях от центральной двойной. В случае двухпланетной системы Kepler-47 между Kepler-47b и 47c есть много свободного орбитального пространства для возможного устойчивого присутствия планет малых масс [206], т.е. наблюдаемая двухпланетная система никоим образом не является "плотно упакованной". Системы Kepler-1647 и OGLE-2007-BLG-349L (AB) могут к тому же содержать планеты малых масс на орбитах, расположенных внутри орбит наблюдаемых планет-гигантов, поскольку размеры орбит последних в достаточной степени больше центральной хаотической зоны.

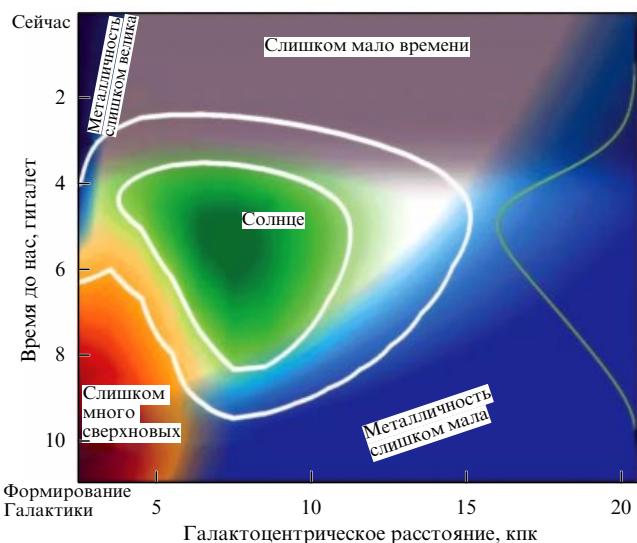
## 10. Возможная обитаемость экзопланет

### 10.1. Основные предпосылки

К сожалению, обнаружение признаков жизни в околопланетных "зонах обитаемости" в космосе пока находится за пределами современных методов и инструментов астрономии. Нет заметного прогресса и в решении теоретических проблем, связанных с происхождением жизни. В.И. Вернадский относил эту проблему к одной из семи мировых загадок Дюбуа Реймона<sup>13</sup> и считал саму постановку вопроса зависящей от того, признавать ли жизнь всемирным (космическим) или земным явлением. Он полагал, что "в геологическое время зарождение живого организма из мёртвой среды не могло иметь места", обосновывая это утверждение геохимическими свидетельствами. Это делало более вероятным представление о связи зарождения жизни на Земле с внешней космической средой. Открытие экзопланет сильно всколыхнуло внимание к этой проблеме и привело к выводу о реально существующих планетах с более или менее пригодными для жизни природными условиями, хотя каких-либо свидетельств их биогенности не обнаружено. И тем не менее появилось больше оснований считать жизнь космическим, а не ограниченным земным явлением. Кратко рассмотрим некоторые имеющиеся косвенные данные и ограничения.

На окраинах Галактики металличность звёзд низка и это препятствует образованию каменных планет земного типа. С другой стороны, ближе к центру Галактики, где процесс звездообразования интенсивен, металличность высока, но высока и частота взрывов сверхновых; и это приводит к невозможности устойчивого развития сложных форм жизни на планетах. На важность этих ограничений обратили внимание Лайнвивер с соавторами [209]. Путём модельных расчётов галактической эволюции они нашли, что галактическая зона обитаемости — зона, где возможно существование жизни земного типа — ограничена кольцом радиальной протяжённости от 7 до 9 кпк от центра Галактики; в ней находятся звёзды, сформировавшиеся 8–4 млрд лет назад (рис. 26). Оказывается, что в этой кольцеобразной области сосредоточено большинство (75 %) звёзд, у которых могут существовать планеты со сложными формами жизни; эти звёзды старше Солнца в среднем на  $\approx 1$  млрд лет. Таким образом, возможно, что пик образования сложных форм жизни в Млечном Пути уже давно пройден [209, 210].

В межзвёздной среде, особенно в областях гигантских межзвёздных молекулярных облаков, обнаружено большое разнообразие органических соединений, в составе которых содержатся азот, кислород и биологически важный углерод. Его особенно много (до 10 %) в поликлинических ароматических углеводородах (РАН), со средоточенными преимущественно в молекулярных облаках, где они образуют сложные углеродные цепи и решётки типа фуллеренов, а при низких температурах ( $\sim 10$  К) захватываются ледяными оболочками пылевых



**Рис. 26.** (В цвете онлайн.) Галактическая зона обитаемости, согласно Лайнвиверу и др. [209]. По горизонтали — расстояние от центра Галактики, по вертикали — возраст звёзд. Серым цветом выделена зона, где для формирования сложных форм жизни недостаточно времени; красным — где развитию жизни препятствуют взрывы сверхновых; синим — где металличность родительских звёзд слишком мала (справа) или, наоборот, велика (слева) для формирования и выживания планет земного типа. Отложенная по вертикали зелёная кривая справа — рассчитанное Лайнвивером и др. распределение (по времени) ожидаемого числа обитаемых планет (со сложными формами жизни). (Согласно [209].)

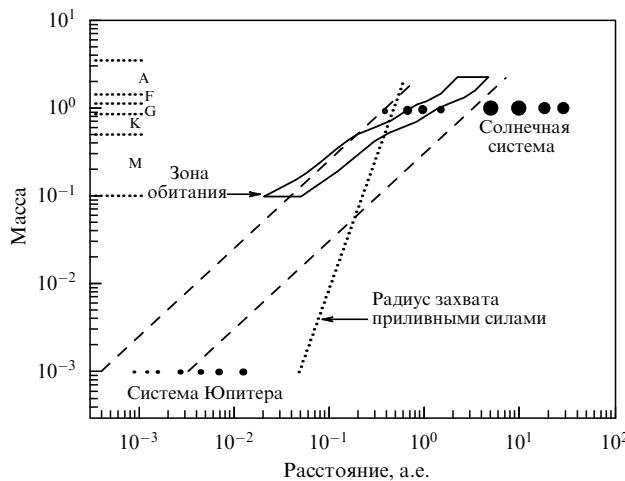
частиц облака. Ледяные мантии состоят из  $\text{H}_2\text{O}$  с примесью метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ),  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{NH}_3$ <sup>14</sup>, а через процессы фотолиза они функционально связаны с образованием кетонов, метила, алкоголя, карбоксильных групп и других сложных органических соединений [211]. Измерения с высоким спектральным и пространственным разрешением сетью высокочувствительных наземных радиотелескопов ALMA выявили наличие многих сложных молекул, важных с точки зрения предбиогенной химии. Среди них молекулы формальдегида ( $\text{H}_2\text{CO}$ ), этанола ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), гликольальдегида ( $\text{CH}_2\text{OHNCCHO}$ ), этиленгликоля ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ), метилформиата (метилового эфира муравьиной кислоты  $\text{CH}_3\text{OCCHO}$ ), диметилэфира ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ), а также много других соединений, включая обогащённые дейтерием. Особый интерес вызывают молекулы, содержащие пептидные связи, и простые сахара [212], а также метиламин ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ), являющийся предшественником простейшей аминокислоты глицина ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ). Всё это указывает на чрезвычайно богатую предбиогенную химию межзвёздной среды, особенно молекулярных облаков и окрестностей молодых звёзд, что расширяет перспективы обнаружения в их планетных системах признаков жизни. И тем не менее сама эта вероятность остаётся достаточно низкой.

### 10.2. Зоны обитаемости в планетных системах

Жизнь, как известно, может существовать лишь в очень ограниченном диапазоне природных условий. Это означает, что с самого начала существуют довольно сильные ограничения на механические, термодинамические и

<sup>13</sup> Дюбуа Реймон — немецкий физиолог и философ, представитель механистического материализма, основоположник электрофизиологии (электрических явлений в мышцах и нервах) и теории биопотенциалов. Ему принадлежит формула "ignoramus et ignorabimus" (не знаем и никогда не узнаем).

<sup>14</sup> CO считается наилучшим индикатором переноса массы вещества в протопланетном диске. В таком качестве этот компонент используется, в частности, в наблюдениях ALMA и служит для оценки массового содержания пыль/газ.



**Рис. 27.** Радиус зоны обитаемости для звёзд разных спектральных классов. По вертикальной оси — спектральный класс и масса звезды в солнечных единицах, по горизонтальной оси — радиус орбиты в астрономических единицах. Штриховые линии показывают границы области существования планет земного типа в зависимости от класса звезды и радиуса орбиты, пунктирующая линия показывает радиус приливного захвата (tidal lock radius). Три планеты Солнечной системы: Земля, Венера и Марс — находятся в благоприятной зоне, в пределах границ зоны возможной обитаемости ("Goldilocks Zone"), ограниченной сплошной линией. (Согласно [216].)

космохимические свойства небесного тела, на котором могла бы возникнуть жизнь. Планета, подходящая для обитания, должна отвечать некоторым чётким критериям. Во-первых, это размер и масса, поскольку большая планета аккумулирует материал до тех пор, пока не становится газовым гигантом, в то время как маленькая планета легко теряет свою атмосферу. Во-вторых, это радиальное расстояние от родительской звезды, которое обеспечивает благоприятные климатические условия, включая температуру и давление на поверхности, допускающие присутствие жидкой воды. В-третьих, это существование атмосферы с подходящим химическим составом, исключающим агрессивное воздействие на процессы метаболизма. Наконец, это размеры орбиты, оптимальные в отношении приливных эффектов, поскольку планета, находящаяся от звезды слишком близко, благодаря приливному взаимодействию захватывается в синхронный спин-орбитальный резонанс, неблагоприятный для развития жизни (рис. 27). Кроме того, очевидно, что для возникновения жизни, обеспечения её существования и эво-

люции необходима устойчивость климатических условий в течение длительного времени [213 – 215].

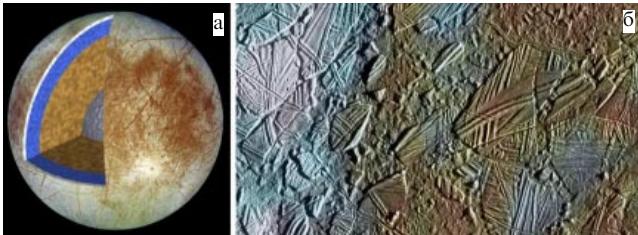
Зона обитаемости внутри Солнечной системы, отвечающая перечисленным выше критериям, показана на рис. 28. Она имеет форму кольца с центром в Солнце, ограниченного внутренним и внешним радиусами: на внутренней границе слишком жарко, на внешней — слишком холодно. Как видим, наиболее благоприятное положение занимает Земля, в то время как Венера выходит далеко за пределы зоны обитаемости, а Марс находится на краю внешней границы. Следует заметить, что границы и ширина зоны обитаемости в системах экзопланет могут изменяться со временем. Поэтому вводится понятие зоны динамической обитаемости — области вокруг звезды, где планеты земного типа могут существовать на длительных шкалах времени, не испытывая существенных возмущений орбит со стороны других планет (или звёзд-компаньонов в системах двойных звёзд).

Конечно, первостепенный интерес для поиска признаков жизни представляют экзопланеты земного типа, включая суперземли, расположенные в зонах обитаемости. Как уже говорилось, критическим обстоятельством является возможность существования на поверхности жидкой воды, а также наличие углерода и других летучих веществ, поступление которых на планету, подобную Земле, могло бы обеспечиваться за счёт миграции планетезималей и малых тел (комет, астероидов класса углистых хондриотов) с периферии во внутренние зоны Солнечной системы на ранней стадии эволюции за счёт механизма гетерогенной аккреции [90, 217]. Вместе с тем примитивная жизнь могла бы возникнуть и вне зоны обитаемости, если благоприятные условия создаются под поверхностью планеты или спутника. Такие условия можно ожидать, например, на спутниках экзопланет, подобно предполагаемым тёплым водным океанам на галилеевых спутниках Юпитера — Европе и Ганимеде (рис. 29), энергетическим источником которых служит высвобождение приливной энергии. Аналогичный механизм, по-видимому, отвечает за геологическую активность спутника Сатурна Энцелада (рис. 30), на котором обнаружены водяные гейзеры — проявление криовулканизма. На Земле, в её твёрдой оболочке (в верхнем коровом слое толщиной ~ 2–3 км) существует глубинная биосфера, основанная на обменных энергетических и производственных процессах хемосинтеза, отличных от фотосинтеза. Нельзя исключить, что подобная биосфера есть и на Марсе.

Глубинная биосфера Земли — это подземная высокотемпературная экосистема, существующая на основе ак-



**Рис. 28.** (В цвете онлайн.) Зона обитаемости в Солнечной системе.



**Рис. 29.** (В цвете онлайн.) Модель внутреннего строения галилеева спутника Юпитера Европы с предполагаемым тёплым солёным океаном глубиной  $\sim 100$  км (а) под ледяной поверхностью толщиной  $\sim 10$  км (б). (Источник: NASA.)

тивных микробиологических процессов. Населяющие её многоклеточные эукариоты приспособились к экстремальным условиям на глубине до нескольких километров — анаэробной среде, высоким температурам ( $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ) и давлениям (в сотни атмосфер). Бактериальная жизнь в этих условиях неожиданно оказалась весьма богатой и разнообразной: её составляют гетеротрофные и автотрофные бактерии, в основном метаногены, археи и эубактерии. В отличие от основополагающего процесса, контролирующего жизнь на поверхности, — фотосинтеза, эти бактерии — хемолитоавтотрофы — получают энергию за счёт окисления неорганических веществ (хемосинтеза). Общая биомасса глубинных бактерий сопоставима с поверхностной биомассой Земли. Вероятно, эти микробные сообщества образовались из поверхностных микроорганизмов в результате медленной эволюции, и их геном может быть сопоставим с геномом гидротермальных микробов (см., например, [218]).

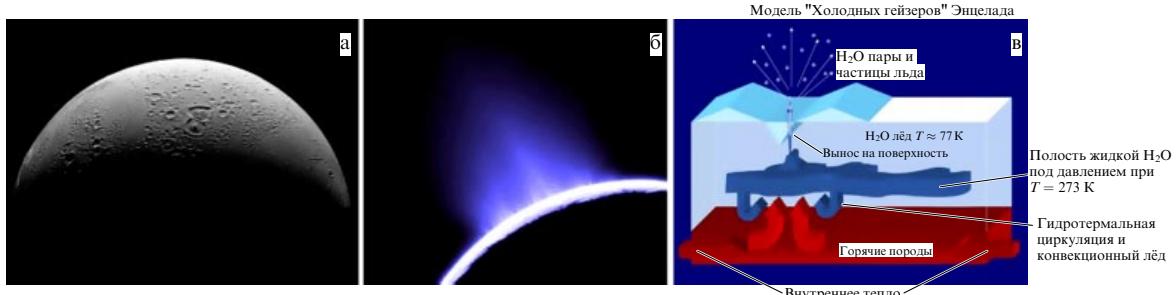
Как видим, для астробиологии представляет наибольший интерес лишь небольшая доля среди открытых экзопланет — земель, субземель и суперземель, находящихся в благоприятной климатической зоне. В ней равновесная температура лежит в диапазоне примерно от 185 до 300 К, что позволяет воде находиться в жидком состоянии (с учётом возможного парникового эффекта и источников внутреннего тепла). У большинства же открытых планет радиус в 3–4 раза больше земного, что, вероятно, отражает реально существующий в Галактике характер распределения планет по размерам. Ряд известных планет земных размеров находится в "горячей" зоне, близкой к родительской звезде. Так, например, Kepler-78b только на 80 % больше Земли по размеру, но обращается вокруг подобной Солнцу звезды на расстоянии от неё всего двух её радиусов. Заметим, кстати, что такое расположение маломассивного тела



**Рис. 31.** Гипотетический вид поверхности горячей планеты в близкой окрестности родительской звезды в изображении художника. Точка на звёздном диске — транзит планеты. (Согласно Astronomy.com.)

предоставляет уникальную возможность одновременно использовать методы транзита и лучевых скоростей и тем самым определить среднюю плотность планеты. Оказалось, что плотность Kepler-78b составляет приблизительно  $5,5 \text{ г см}^{-3}$ , что фактически идентично плотности Земли. Таким образом, эта планета состоит из горных пород, но по своим природным свойствам это "адский мир", возможно, похожий на изображение в представлении художника на рис. 31.

То же самое можно сказать о пяти планетах вокруг солнцеподобной звезды Kepler-444, находящейся от нас на расстоянии 117 св. лет. Эти скальные горячие планеты, одна из которых похожа по размерам на Меркурий, другая — на Венеру, а остальные три — на Марс, обращаются вокруг своей звезды с периодами в пределах 10 земных суток. Они, однако, привлекают к себе особое внимание. Дело в том, что по вариациям блеска звезды удалось определить скорость акустических волн в её недрах и тем самым оценить соотношение водорода и гелия — ключевого параметра при суждении о продолжительности звёздной эволюции. Оказалось, что возраст Kepler-444, а значит, и его планетной системы составляет 11,2 млрд лет, т.е. они образовались вскоре после рождения Вселенной, возраст которой составляет 13,7 млрд лет. Если допустить, что на других подобных планетах, но с более благоприятными климатическими условиями, могла возникнуть жизнь и ничто не помешало её эволюции, то трудно даже вообразить, как далеко вперёд от



**Рис. 30.** (В цвете онлайн.) Спутник Сатурна Энцелад (а), водяные гейзеры на лимбе (б), модель внутреннего строения и природы криовулканизма (в). (Источник: EKA.)

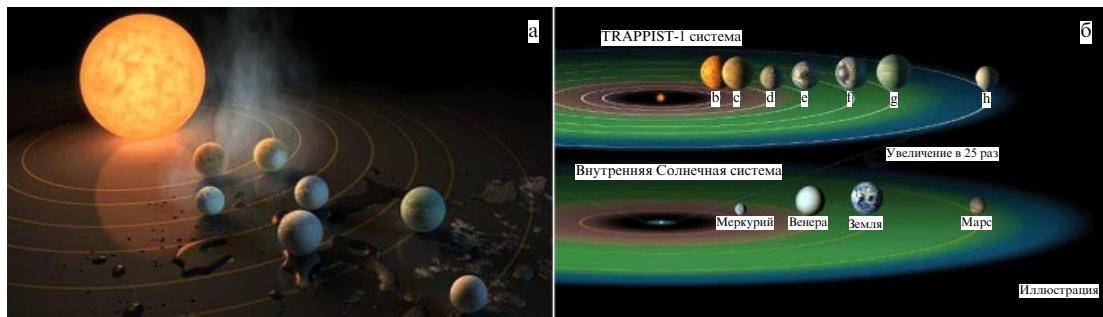


Рис. 32. Система семи планет у красного карлика Trappist-1 (а) и её сопоставление с расположением и размерами планет земной группы в Солнечной системе (б).

земной такая жизнь ушла бы в своём развитии. Конечно, ключевая задача — чётко сформулировать ограничения, препятствующие возникновению и развитию жизни на громадном многообразии экзопланет.

Среди землеподобных планет внимание привлекает также экзопланета Kepler-452b, находящаяся на расстоянии 1400 св. лет от Земли и обращающаяся вокруг солнцеподобной звезды на расстоянии от неё, лишь на 5 % большем, чем радиус орбиты Земли. Другим примером служит обнаруженная на расстоянии 42 св. лет от Солнца планета с периодом обращения  $\sim 200$  земных суток у карликовой звезды HD 40307, менее яркой, чем Солнце. Такие планеты могут быть окутаны плотными облаками из водяных капель и/или кристаллов, а некоторые даже могут состоять наполовину из воды или иметь сплошные океаны на поверхности. Ряд планет находится в промежуточной области между близкими к звезде горячими газовыми гигантами (супер-Юпитерами) и далёкими планетами с температурой  $< 100 - 150$  К, напоминающими планеты-гиганты Солнечной системы и, возможно, имеющими подобные им системы ледяных спутников. Экзопланеты в диапазоне температур порядка нескольких сот градусов могут походить на Венеру или же при массе, подобной Нептуну, иметь совершенно иную природную среду.

Интересные примеры других похожих на Землю экзопланет — Kepler-186f и Kepler-438b. Kepler-186f — одна из пяти планет, обращающихся вокруг красного карлика со светимостью в 25 раз меньше солнечной, находящегося в созвездии Лебедя на расстоянии около 500 св. лет от Солнца. Планета расположена в зоне с умеренными температурами довольно близко (в пределах 0,4 а.е.) к родительской звезде, что почти соответствует орбите Меркурия в Солнечной системе, и совершает один орбитальный оборот за 129,9 суток. Освещённость на её поверхности составляет 32 % от солнечной на поверхности Земли, и это означает, что она находится в зоне, пригодной для обитания. Конечно, следует учесть, что спектральный состав излучения, продолжительность года и, вероятно, некоторые другие характеристики отличаются от земных. И тем не менее планета была названа кузиной Земли. Другая из названных планет, Kepler-438b, также обращающаяся вокруг красного карлика, по размеру и температуре практически идентична нашей планете (лишь на 12 % больше Земли и получает примерно на 40 % больше света). Её до недавнего времени считали обладательницей максимального на сегодняшний день так называемого индекса подобия Земле (Earth Similarity Index, ESI). Однако наблюдения самих красных карликов обнаружили их чрезвычайно высокую

активность с часто повторяющимися вспышками типа СМЕ, по мощности на порядок превосходящими солнечные. Такие супервыбросы плазмы должны срывать атмосферу планеты, даже обладающую сильным магнитным полем, не говоря уже о катастрофическом воздействии звёздной радиации. Вряд ли в таких условиях возможна жизнь, как и на других подобных Земле планетах, обращающихся на сравнительно близких к своей звезде орbitах. Среди последних большой интерес представляют планеты Kepler 20e ( $R = 0,87 R_E$ ) и Kepler 20f ( $R = 1,03 R_E$ ), подобные по своим размерам соответственно Венере и Земле, но отличающиеся по другим параметрам. Самой близкой к Земле по климатическим условиям оказалась планета Kepler 22b ( $R = 2,38 \pm 0,13 R_E$ ) с равновесной температурой 262 К и периодом обращения 289,86 суток, но её размер более чем вдвое превышает земной.

Сенсационным явилось обнаружение в 2016 г. на обсерватории Ла Силья в Чили системы из семи планет Trappist-1 у звезды — красного карлика спектрального класса M8 V с поверхностной температурой  $\sim 4000$  К и светимостью почти в 2000 раз меньше светимости Солнца (рис. 32). Все эти планеты близки по размерам к Земле ( $\sim 0,7 R_E$ ) и находятся на соседних друг к другу орбитах с периодами обращения от единиц до  $\sim 20$  суток в близкой окрестности звезды. Их периоды кратны друг другу и находятся в резонансе. Три планеты расположены в зоне обитаемости с равновесной температурой  $\sim 300$  К и у них могут быть вода на поверхности и атмосфера, возможность её удержания которой ставится, однако, под сомнение с учётом высокой активности родительской звезды. И тем не менее по крайней мере на какой-либо из этих планет не исключается наличие жизни, и система Trappist-1 рассматривается как перспективная для её обнаружения.

Похоже, что наличие планет в зонах обитаемости у маломассивных звёзд — типичное явление. Это подтверждает недавнее открытие двух землеподобных планет в зоне обитаемости у звезды Тигардена [219]. Однако эта звезда, находящаяся всего лишь в четырёх парсеках от Солнца, имеет массу около  $\sim 0,08$  солнечной и фактически может классифицироваться как коричневый карлик.

В целом нельзя исключить, что с учётом громадного числа и огромного разнообразия планетных систем Земля не является уникальным местом для возникновения и распространения жизни, хотя и нет достаточных оснований считать её принадлежащей к категории "типичных" обитаемых планет. Благоприятными для возникновения жизни обстоятельствами можно считать, на-

пример, большую площадь поверхности у сверхземель и "долговечность" планеты у родительской звезды в системах красных карликов [220]. Важную роль может играть кратность родительской звезды. Действительно, как показал совместный анализ условий устойчивости и обитаемости экзопланетных систем одиночных и кратных звёзд, ряд условий обитаемости может удовлетворяться на циркумбинарных планетах у звёзд главной последовательности с большей вероятностью, чем на Земле, где эти условия, возможно, возникли достаточно случайно. Поэтому есть основания считать, что жизнь в каких-либо формах может существовать на циркумбинарных планетах у звёзд определённых классов, и проблема их возможной обитаемости заслуживает дальнейшего изучения [174].

Среди других возможностей заслуживает внимания потенциальная обитаемость крупных спутников экзопланет. Есть основания полагать, что двойные планеты с компонентами сравнимых масс (как в случае Земля – Луна) — довольно редкий феномен: вероятность того, что планета земного типа приобретёт большой лунный спутник, с космогонической точки зрения крайне низка [221]. Не случайно этот вопрос привлекает к себе повышенный интерес. В серии массовых численных экспериментов с учётом эффектов фрагментации и столкновений тел без их слияния получена статистика ударных взаимодействий на поздних этапах формирования землеподобных планет у звёзд солнечного типа и показана возможность вероятного образования в протопланетных системах за счёт данного механизма крупных экзолун [222]. Согласно [223] они могут сильно отличаться от спутников планет Солнечной системы, в частности, быть существенно более крупными. Данные численного моделирования свидетельствуют, например, о том, что у супер-Юпитеров могут формироваться даже спутники размерами с Землю. Условия потенциальной обитаемости экзолун определяются орбитальной устойчивостью, параметрами инсоляции и приливного нагрева, а магнитное экранирование может быть обеспечено протяжённой магнитосферой самой планеты [224–227]. Пределами для возможной обитаемости считается обращение спутника либо на орбите, удалённой от планеты, рядом с границей устойчивости по Хиллу, либо, наоборот, близкой к планете, вблизи порога приливной синхронизации [228].

Что касается двойных звёзд, то как в системах Р-типа, так и в системах S-типа планеты могут обладать спутниками внутри своих сфер Хилла, подобно планетам у одиночных звёзд. В частности, поскольку все известные циркумбинарные планеты являются гигантами, размеры их экзолун могут быть велики и, вообще говоря, они могли бы быть потенциально пригодными для возникновения жизни. Следует, однако, иметь в виду, что условия обитаемости экзолун в системах двойных звёзд должны быть сильно модифицированы, так что надо, скорее, говорить о гипотетических обитаемых нишах, как, например, для гипотетической экзолуны планеты-гиганта Kepler-16b типа Сатурна. У находящейся в зоне обитаемости другой планеты-гиганта Kepler-47c может быть потенциально обитаемый спутник земного типа, однако в условиях циркумбинарной системы его климат подвержен сильным колебаниям [223, 229, 230]. Данное обстоятельство служит принципиальным ограничением потенциальной обитаемости экзолун, обладающих атмосферой.

Подводя итоги обсуждения проблемы возможного обнаружения жизни на экзопланетах (экзолунах), удалён-

ных от нас на расстояния в тысячи световых лет, следует говорить о совокупности факторов. В первую очередь, планета должна быть похожа на Землю и находиться в зоне обитаемости у родительской звезды. Помимо размеров, свойств поверхности и атмосферы, особенностей теплового режима и динамики, приливных эффектов, наличия магнитного поля (магнитосферы), приемлемой радиационной обстановки, должно иметь место уникальное сочетание этих условий, формирующих в совокупности благоприятную природную среду. Например, сильные климатические изменения в системах двойных звёзд могут проявляться на различных временных масштабах, определяемых орбитальными параметрами экзопланеты (экзолуны), и могут оказаться фатальными для её биосфера. Вариации, связанные с орбитальным движением компонентов родительской звезды, ещё более усложняют картину. Неблагоприятными для жизни могут быть сильнейшие ветры в атмосфере, подобные обнаруженным на экзопланете HD 189733b при помощи спектрографа HARPS на обсерватории Ла Силья в Чили. Их скорость достигает нескольких километров в секунду, что в десятки раз сильнее земных ураганов. Вместе с тем следует иметь в виду, что, хотя жизнь может существовать в весьма ограниченном диапазоне природных условий, она обладает большой степенью адаптации к чрезвычайно суровым условиям окружающей среды. Известно, что живые организмы (экстремофилы) способны выживать в довольно широком диапазоне температур и давлений, в том числе в глубоком вакууме, в сильно кислотной среде (при низких значениях pH) и при высоких дозах радиации.

И тем не менее многие обстоятельства, к сожалению, препятствуют оптимистическим ожиданиям обнаружить жизнь, по крайней мере в своей основе похожую на земную. В связи с этим ключевым является вопрос о том, существуют ли на экзопланетах формы жизни, обладающие высокой степенью приспособляемости и устойчивости или даже возникшие на другой химической основе и других принципах. Хотя ответа на этот вопрос пока нет, можно, тем не менее, утверждать, что углерод, составляющий основу органических соединений и способный образовывать разветвлённые полимерные цепи, и вода являются самой подходящей комбинацией для процессов биосинтеза. В совокупности всё это служит основой биоразнообразия. К этому добавим, что процессы создания очень сложных органических соединений в космосе и транспорта вещества в результате миграции небесных тел являются универсальными и в совокупности эти процессы можно, вероятно, рассматривать как некую парадигму.

## 11. Перспективы

За 20 с небольшим лет достигнуты поразительные успехи в совершенно новой области астрономии — исследовании внесолнечных планет. Произошёл шквал открытий небесных тел этого нового класса, неизмеримо обогативший наши представления о Вселенной, о многообразии природных процессов за пределами Солнечной системы и поставивший на новую основу звёздно-планетную космогонию. Совершенствуются методы и инструменты наблюдений, включая крупные наземные и космические телескопы. Ведущими мировыми научными державами разработаны амбициозные планы по изучению экзопланет. Этот процесс непрерывно развивается, и его перспективы поистине огромны. Упомянем лишь о некоторых проектах, показанных на рис. 33.

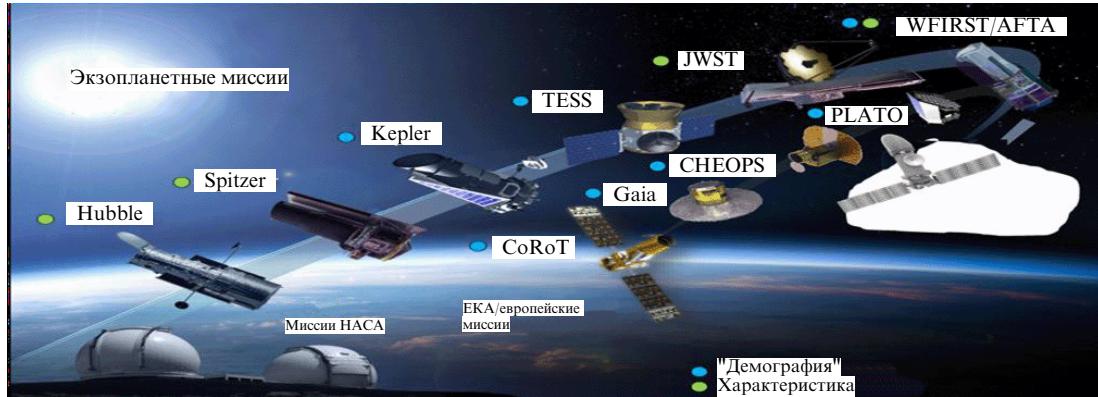


Рис. 33. Осуществлённые и планируемые космические миссии для исследований экзопланет. (Источник: НАСА.)

Выведенный на орбиту ещё в 1990 г. космический телескоп Хаббла в настоящее время широко используется для спектрофотометрического анализа состава атмосфер экзопланет. С космического телескопа "Спitzer", работавшего на орбите в 2003 – 2020 гг., проведены исследования экзопланет в ИК-области спектра. Первым в мире космическим аппаратом, снабжённым небольшим специализированным телескопом для исследования экзопланет, стал "Коро" (CoRoT), выведенный на орбиту в 2006 г. Заметим, что, помимо исследований экзопланет, он внёс определённый вклад в развитие астросейсмологии. КА "Кеплер/K2", запущенный в 2009 г., был впервые ориентирован на обнаружение экзопланет транзитным методом, особенно в зонах обитаемости. Миссия "Гайя" (Gaia, запуск в 2013 г.), помимо выполнения основной задачи — картографирования Млечного Пути, потенциально была нацелена на открытие сотен и даже тысяч планет астрометрическим методом, чего, однако, добиться не удалось. Недавно начал работу космический аппарат "ТЭСС" (TESS, Transiting Exoplanet Survey Satellite), призванный продолжить открытия экзопланет транзитным методом, столь успешно начатые КА "Кеплер", причём путём наблюдений не в ограниченном поле, а по всей небесной сфере, хотя и внутри относительно близкой галактической окрестности Солнца.

Планируемый ESA совместно со Швейцарией проект КА "Хеопс" (Cheops) позволит получить подробные данные о параметрах уже открытых экзопланет размерами от суперземель до нептунов с использованием высокоточной фотометрии и 30-см телескопа системы Ричь – Кретьена. Проект обеспечит уникальную возможность определения радиусов планет и их спутников в сверхземельном диапазоне масс с точностью до 10 %. КА "Платон" (Plato, проект ESA) позволит исследовать планеты земного типа в зонах обитаемости, что, естественно, вызывает особый интерес. С помощью КА "Ариэль" (Ariel, проект ESA) планируется провести анализ состава атмосфер у крупных выборок планет различных типов. Запуск КА намечен на 2028 г. Миссия разработана консорциумом из более чем 60 институтов из 15 стран-членов ЕКА. Её цель — исследовать атмосферы планет, обращающихся вокруг далёких звёзд, с целью решения фундаментальных вопросов относительно их состава и вопросов о том, как формируются и развиваются планетные системы. За 4 года функционирования КА предполагается наблюдать тысячи экзопланет с размерами сверхземель и выше в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах. Основное внимание будет уделено изучению спектров тёплых и горячих планет на

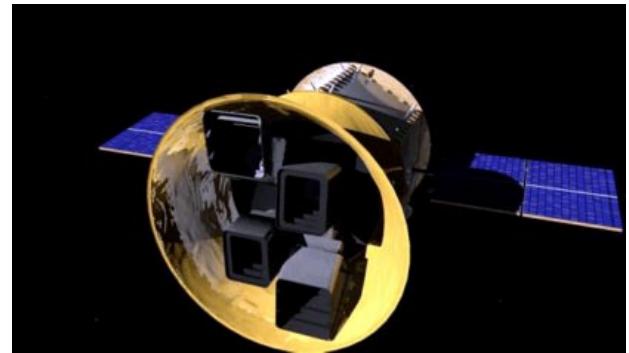


Рис. 34. Космический аппарат "ТЭСС". (Источник: НАСА.)

орбитах вблизи родительских звёзд и планет в зонах обитаемости. Анализ спектров позволит получить сведения об атмосферных газах и конденсатах и выявить планеты, наиболее перспективные для дальнейших исследований.

В Российской космической программе исследования экзопланет планируются в рамках проекта "Спектр-УФ" в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Запуск аппарата намечен на 2024 г.

Наиболее обширная программа исследований экзопланет намечена американским НАСА, в том числе в рамках концепции технологического развития (ExEP). Как уже говорилось, на смену завершившему чрезвычайно эффективную программу исследований экзопланет КА "Кеплер" пришёл новый проект TESS — КА, запущенный в марте 2018 г. (рис. 34). Он оснащён четырьмя фотометрическими камерами  $23 \times 23$  см с общим полем зрения 2300 градусов, в 400 раз превышающим поле зрения телескопа "Кеплер". Предполагается, что за первые два года работы будет исследовано  $\sim 200000$  экзопланет вокруг самых ярких звёзд, в том числе землеподобные планеты и планеты двойных звёзд. Всего же за 10 лет работы будут получены изображения и данные фотометрии примерно о 30 млн звёзд и галактиках ярче 16-й звёздной величины. Намечаемый программой TESS расширенный обзор районов северного и южного полюсов эклиптики позволит обнаружить экзопланеты, наиболее интересные для детального изучения с помощью крупных наземных и космических телескопов будущего.

С КА TESS уже получены первые интересные результаты. Так, у не очень активного красного карлика TOI-270 (TESS Object of Interest – 270), находящегося всего лишь в  $\sim 20$  пк от Солнца, обнаружены три пла-

неты: одна землеподобная (радиусом 1,25 земных) и два мининептуна (оба радиусами  $\sim 2$  земных) [231]. Особенno интересны мининептуны, как объекты промежуточного типа между землеподобными планетами и планетами-гигантами. Внешняя планета находится в зоне обитаемости.

Значительное время для всестороннего изучения экзопланет предполагается выделить в наблюдательной программе наиболее амбициозного проекта НАСА — космического многоцелевого телескопа им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope, JWST) с эквивалентом диаметра зеркала 6,5 м. Этот телескоп, значительно превышающий по своим возможностям телескоп им. Хаббла, явится крупным вкладом в наблюдательную астрономию и откроет, в частности, новую страницу в исследовании экзопланет. Он планируется к запуску в 2021 г.

## 12. Заключение

Исследования экзопланет представляют собой один из ключевых разделов современной астрономии, дающий подход к решению проблем образования планетных систем у звёзд разных спектральных классов, включая образование Солнечной системы. Открыто уже более четырёх тысяч экзопланет — от самой близкой у Proxima Centauri до наиболее удалённых SWEEPS-04 и SWEEPS-11. Расстояния до известных экзопланет охватывают интервал от 3 до 28000 св. лет, т.е. около четырёх порядков величины.

Важное значение имеет решение проблемы формирования конфигураций планетных систем, в том числе систем с горячими Юпитерами, и условия формирования класса сверхземель, отсутствующих в Солнечной системе. Большое внимание привлекают планетные системы у двойных звёзд. Сценарии их формирования и эволюции представляют вызов для теоретической космогонии и небесной механики. Особый интерес представляют планеты земного типа, расположенные в орбитальных зонах обитаемости, где возможно существование условий, благоприятных для возникновения и существования жизни, что открывает новую страницу в астробиологии.

За последние два десятилетия экзопланетология стала одним из наиболее актуальных разделов астрономии, обогатившим звёздно-планетную космогонию, сравнительную планетологию, космохимию и астробиологию. Совершенствуются методы и инструменты исследований, непрерывно растёт число публикаций по различным аспектам изучения экзопланет в наиболее авторитетных научных изданиях. Ряд важных проблем, таких как обнаружение экзопланет методами микролинзирования [232] и высокоточной спектроскопии [233], обсуждался на страницах УФН. Среди открывающихся перспектив хотелось бы особо отметить вклад в космохимию астрометрических, фотометрических и спектрополяриметрических методов при наблюдениях транзитов планет у родительских звёзд различных спектральных классов с использованием разрабатываемой отечественной наземной и орбитальной аппаратуры [233]. Обнаружение землеподобных планет, обладающих умеренными климатическими свойствами и пригодных для зарождения жизни, становится на ближайшие десятилетия одной из главных стимулирующих задач современной науки о Вселенной, имеющей также громадное философское значение.

Несомненно, что осуществление новых наземных и космических наблюдательных проектов по изучению экзопланетных систем с использованием усовершенство-

ванных методов и передовых технологий уже в ближайшие десятилетия неизмеримо расширит наши знания о соседних мирах в необъятных просторах Вселенной. На пути отыскания этих миров, особенностей их природы, возможного потенциала для возникновения жизни и многообразия её форм пока что предприняты только первые шаги. Но сам факт существования экзопланет, реальное число которых только в нашей Галактике соизмеримо с числом населяющих её звёзд, из которого по крайней мере  $\sim 10$  млрд могут быть подобны Земле, обещает много новых удивительных открытий.

**Благодарности.** Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания и комментарии. Данная работа выполнена в рамках госзаданий ГЕОХИ РАН, ГАО РАН, СПбГУ и поддержана частично Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 17-02-00507, 17-02-00028) и частично Программой фундаментальных исследований Президиума РАН КП19-270 (№ 17). Также работа (разделы 7–9) поддержана в рамках гранта "Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет" Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер заявки 2020-1902-01-133).

## Список литературы

1. Wolszczan A, Frail D A *Nature* **355** 145 (1992)
2. Mayor M, Queloz D *Nature* **378** 355 (1995)
3. Rein H *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **427** L21 (2012)
4. Chauvin G et al. *Astron. Astrophys.* **425** L29 (2004)
5. Chauvin G et al. *Astron. Astrophys.* **438** L25 (2005)
6. Perryman M *The Exoplanet Handbook* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018)
7. Charbonneau D et al. *Astrophys. J.* **529** L45 (2000)
8. Charbonneau D et al., in *Protostars and Planets V* (Eds B Reipurth, D Jewitt, K Keil) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2007) p. 701
9. Agol E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **359** 567 (2005)
10. Holman M J, Murray N W *Science* **307** 1288 (2005)
11. Lissauer J J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **197** 8 (2011)
12. Nesvorný D et al. *Science* **336** 1133 (2012)
13. Morbidelli A (Morbidelli A), Частное сообщение (2013)
14. Wolszczan A *Science* **264** 538 (1994)
15. Snellen I A G, Brown A G A *Nat. Astron.* **2** 883 (2018)
16. Charbonneau D et al. *Astrophys. J.* **568** 377 (2002)
17. Tinetti G et al. *Nature* **448** 169 (2007)
18. Swain M R, Vasisht G, Tinetti G *Nature* **452** 329 (2008)
19. Berdyugina S V et al. *Astrophys. J.* **673** L83 (2008)
20. Anosova J, Orlov V V, Pavlova N A *Astron. Astrophys.* **292** 115 (1994)
21. Dumusque X et al. *Nature* **491** 207 (2012)
22. Rajpaul V, Aigrain S, Roberts S *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **456** L6 (2016)
23. Anglada-Escudé G et al. *Nature* **536** 437 (2016)
24. Garraffo C, Drake J J, Cohen O *Astrophys. J. Lett.* **833** L4 (2016)
25. Sahu K C et al. *Nature* **443** 534 (2006)
26. Sahu K C et al., in *Extreme Solar Systems, Proc. of the Conf., 25–29 June, 2007, Santorini Island, Greece* (ASP Conf. Ser., Vol. 398, Eds D Fischer et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2008) p. 93
27. Marcy G et al. *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **158** 24 (2005)
28. Weiss L M et al. *Astrophys. J.* **768** 14 (2013)
29. Mandushev G et al. *Astrophys. J.* **667** L195 (2007)
30. Fischer D A, Valenti J *Astrophys. J.* **622** 1102 (2005)
31. Grether D, Lineweaver C H, in *Stars as Suns: Activity, Evolution and Planets. Proc. of the 219th Symp. of the Intern. Astronomical Union, the IAU General Assembly XXV, Sydney, Australia, 21–25 July 2003* (Eds A K Dupree, A O Benz) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2004) p. 798, CD-ROM
32. Sotin C, Grasset O, Mocquet A *Icarus* **191** 337 (2007)
33. Kuchner M J *Astrophys. J.* **596** L105 (2003)
34. Boss A P *Astrophys. J.* **644** L79 (2006)
35. Zapatero Osorio M R et al. *Science* **290** 103 (2000)
36. Zinnecker H, in *Microlensing 2000: A New Era of Microlensing Astrophysics* (ASP Conf. Proc., Vol. 239, Eds J W Menzies, P D Sackett) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2001) p. 223
37. Маров М Я, Ипатов С И *Астрон. вестн.* **52** 559 (2018); Marov M Ya, Ipatov S I *Solar Syst. Res.* **52** 392 (2018)

38. Laskar J *Astron. Astrophys.* **287** L9 (1994)
39. Greaves J S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **378** L1 (2007)
40. Feng F et al. *Astron. J.* **154** 135 (2017)
41. de Leon J, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
42. Sakai N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **467** L76 (2017)
43. Miura H et al. *Astrophys. J.* **839** 47 (2017)
44. Khalafinejad S, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
45. Шематович В И, Маров М Я *УФН* **188** 233 (2018); Shematovich V I, Marov M Ya *Phys. Usp.* **61** 217 (2018)
46. Marov M Ya, Shematovich V I, Bisikalo D V *Space Sci. Rev.* **76** 1 (1996)
47. Marov M Y et al. *Nonequilibrium Processes in the Planetary and Cometary Atmospheres: Theory and Applications* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 217) (Dordrecht: Springer, 1997)
48. Шематович В И, Цветков Г А, Крестьяникова М А, Маров М Я *Астрон. вестн.* **41** 113 (2007); Shematovich V I, Tsvetkov G A, Krestyanikova M A, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **41** 103 (2007)
49. Ионов Д Е, Шематович В И, Павлюченков Я Н *Астрон. журн.* **94** 381 (2017); Ionov D E, Shematovich V I, Pavlyuchenkov Ya N *Astron. Rep.* **61** 387 (2017)
50. Бискало Д В и др. *Астрон. журн.* **90** 779 (2013); Bisikalo D V et al. *Astron. Rep.* **57** 715 (2013)
51. von Bloh W et al. *Astron. Astrophys.* **476** 1365 (2007)
52. Baluyev R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **429** 2052 (2013)
53. Szuszkiewicz E, Papaloizou J C B *EAS Publ. Ser.* **42** 303 (2010)
54. Ketchum J A, Adams F C, Bloch A M *Astrophys. J.* **726** 53 (2011)
55. Deck K et al. *Astrophys. J. Lett.* **755** L21 (2012)
56. Gladman B *Icarus* **106** 247 (1993)
57. Brasser R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **332** 723 (2002)
58. Veras D, Armitage P J *Icarus* **172** 349 (2004)
59. Donnison J R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **369** 1267 (2006)
60. Duncan M, Quinn T, Tremaine S *Icarus* **82** 402 (1989)
61. Mudryk L R, Wu Y *Astrophys. J.* **639** 423 (2006)
62. Pilat-Lohinger E, Dvorak R *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **82** 143 (2002)
63. Cincotta P M, Giordano C M, Simó C *Physica D* **182** 151 (2003)
64. Goździewski K *Astron. Astrophys.* **398** 1151 (2003)
65. Goździewski K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **430** 533 (2013)
66. Попова Е А, Шевченко И И *Письма в Астрон. журн.* **38** 652 (2012); Popova E A, Shevchenko I I *Astron. Lett.* **38** 581 (2012)
67. Popova E A, Shevchenko I I *Astrophys. J.* **769** 152 (2013)
68. Correia A C M et al. *Astron. Astrophys.* **496** 521 (2009)
69. Laskar J, Correia A C M *Astron. Astrophys.* **496** L5 (2009)
70. Holman M J, Wiegert P A *Astron. J.* **117** 621 (1999)
71. Pilat-Lohinger E, Funk B, Dvorak R *Astron. Astrophys.* **400** 1085 (2003)
72. Kholshevnikov K V, Kuznetsov E D *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **109** 201 (2011)
73. Chirikov B V *Phys. Rep.* **52** 263 (1979)
74. Shevchenko I I, in *Near Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk, Proc. of the IAU Symp. 236* (Eds G B Valsecchi, D Vokrouhlický, A Milani) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007) p. 15
75. Shevchenko I I *Phys. Lett. A* **378** 34 (2014)
76. Hamilton D P, Burns J A *Icarus* **96** 43 (1992)
77. Чириков Б В *Атомная энергия* **6** 630 (1959); Chirikov B V *Sov. J. Atom. Energy* **6** 464 (1960)
78. Wisdom J *Astron. J.* **85** 1122 (1980)
79. Moriwaki K, Nakagawa Y *Astrophys. J.* **609** 1065 (2004)
80. Мельников А В *Астрон. вестн.* **52** 427 (2018); Mel'nikov A V *Solar Syst. Res.* **52** 417 (2018)
81. Raymond S N, Izidoro A, Morbidelli A, arXiv:1812.01033
82. Batygin K et al. *Astrophys. J.* **699** 23 (2009)
83. Van Laerhoven C, Greenberg R *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **113** 215 (2012)
84. Correia A C M et al. *Astron. Astrophys.* **553** A39 (2013)
85. Chrenko O, Brož M, Lambrechts M *Astron. Astrophys.* **606** A114 (2017)
86. Eklund H, Masset F S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **469** 206 (2017)
87. Nesvorný D, Youdin A N, Richardson D C *Astron. J.* **140** 785 (2010)
88. Nesvorný D *Astron. J.* **150** 73 (2015)
89. Crida A, in *Reviews in Modern Astronomy* Vol. 21 *Formation and Evolution of Cosmic Structures* (Ed. S Röser) (New York: Wiley-VCH, 2009) p. 215
90. Marov M Ya, Ipatov S I, in *Collisional Processes in the Solar System* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 261, Eds M Ya Marov, H Rickman) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001) p. 223
91. Marov M Ya, Ipatov S I, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
92. Marov M Ya *The Fundamentals of Modern Astrophysics. A Survey of the Cosmos from the Home Planet to Space Frontiers* (New York: Springer, 2015)
93. Marov M Ya "The formation and evolution of the solar system", in *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science* (Eds P Read et al.) (Oxford: Oxford Univ. Press, 2018) id.2
94. Rab Ch, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
95. Дорофеева В А, Макалкин А Б *Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты* (М.: УРСС, 2004)
96. Сафронов В С *Эволюция дополнительного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969); Пер. на англ. яз.: Safronov V S *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets* (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1972)
97. Contopoulos G *Order and Chaos in Dynamical Astronomy* (Berlin: Springer, 2002)
98. Маров М Я *УФН* **175** 668 (2005); Marov M Ya *Phys. Usp.* **48** 638 (2005)
99. Armitage P J *Astrophys. J.* **665** 1381 (2007)
100. Mendoza V E E *Astrophys. J.* **143** 1010 (1966)
101. Гринин В П и др. *Письма в Астрон. журн.* **14** 514 (1988); Grinin V P et al. *Sov. Astron. Lett.* **14** 219 (1988)
102. Grinin V P et al. *Astrophys. Space Sci.* **186** 283 (1991)
103. Burrows C J et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **27** 1329 (1995)
104. Heap S R et al. *Astrophys. J.* **539** 435 (2000)
105. ALMA Partnership, Brogan C L et al. *Astrophys. J.* **808** L3 (2015)
106. Bjerkeli P, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
107. Bjerkeli P et al. *Nature* **540** 406 (2016)
108. Jorgensen J K, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
109. Raymond S N, Barnes R, Kalb N A *Astrophys. J.* **644** 1223 (2006)
110. Raymond S N, Quinn T, Lunine J I *Icarus* **183** 265 (2006)
111. Raymond S N, Scalo J, Meadows V S *Astrophys. J.* **669** 606 (2007)
112. Wada K et al. *Astrophys. J.* **702** 1490 (2009)
113. Armitage P J, astro-ph/0701485
114. Davies M B et al., in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014) p. 787
115. Marov M Ya, Rusol A V *J. Mod. Phys.* **6** 181 (2015)
116. Marov M Ya, Rusol A V *J. Pure Appl. Phys.* **3** 16 (2015)
117. Estrada P R, Cuzzi J N, Morgan D A *Astrophys. J.* **818** 200 (2016)
118. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **40** 3 (2006); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **40** 1 (2006)
119. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **41** 3 (2007); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **41** 1 (2007)
120. Balbus S A, Hawley J F *Rev. Mod. Phys.* **70** 1 (1998)
121. Tsukamoto Y et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 278 (2015)
122. Маров М Я, Куksa М М *Астрон. вестн.* **49** 359 (2015); Marov M Ya, Kuksa M M *Solar Syst. Res.* **49** 324 (2015)
123. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **43** 424 (2009); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **43** 410 (2009)
124. Колесниченко А В, Маров М Я *Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред* (М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009)
125. Marov M Ya, Kolesnichenko A V *Turbulence and Self-Organization. Modeling Astrophysical Objects* (New York: Springer, 2013); Колесниченко А В, Маров М Я *Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред* (М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014)
126. Andrews S, in *XXXth General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
127. Nakagawa Y, Sekiya M, Hayashi C *Icarus* **67** 375 (1986)
128. Garaud P, Lin D N C *Astrophys. J.* **608** 1050 (2004)
129. Шмидт О Ю *Четыре лекции о теории происхождения Земли* (М.: Изд-во АН СССР, 1957); Пер. на англ. яз.: Shmidt O Yu *A Theory of Earth's Origin; Four Lectures* (Moscow: Foreign Languages Publ. House, 1958)
130. Birnstiel T, Fang M, Johansen A *Space Sci. Rev.* **205** 41 (2016)
131. Morbidelli A, Raymond S N *J. Geophys. Res. Planets* **121** 1962 (2016)
132. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **47** 92 (2013); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **47** 80 (2013)
133. Armitage P J, Eisner J A, Simon J B *Astrophys. J. Lett.* **828** L2 (2016)
134. Goldreich P, Ward W R *Astrophys. J.* **183** 1051 (1973)
135. Toomre A *Astrophys. J.* **139** 1217 (1964)
136. Nakamoto T, Nakagawa Y *Astrophys. J.* **421** 640 (1994)
137. Youdin A N, Shu F H *Astrophys. J.* **580** 494 (2002)
138. Tsallis C *J. Stat. Phys.* **52** 479 (1988)
139. Колесниченко А В *Статистическая механика и термодинамика Тсаллиса неаддитивных систем. Введение в теорию и приложения* (М.: ВРСС, 2018)
140. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **48** 383 (2014); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **48** 354 (2014)
141. Youdin A N, Goodman J *Astrophys. J.* **620** 459 (2005)
142. Колесниченко А В, Маров М Я *Астрон. вестн.* **53** 195 (2019); Kolesnichenko A V, Marov M Ya *Solar Syst. Res.* **53** 181 (2019)
143. Johansen A, Youdin A, Klahr H *Astrophys. J.* **697** 1269 (2009)
144. Cuzzi J N, Hogan R C, Shariff K *Astrophys. J.* **687** 1432 (2008)
145. Pan L et al. *Astrophys. J.* **740** 6 (2011)
146. Bai X-N, Stone J M *Astrophys. J.* **722** 1437 (2010)
147. Dražkowska J, Dullemond C P *Astron. Astrophys.* **572** A78 (2014)

148. Jacquet E, Balbus S, Latter C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** 3591 (2011)
149. Маров М Я, Русол А В *Письма в Астрон. журн.* **44** 517 (2018); Marov M Ya, Rusol A V *Astron. Lett.* **44** 474 (2018)
150. Wiltzus P *Phys. Rev. Lett.* **58** 710 (1987)
151. Смирнов Б М *Физика фрактальных кластеров* (М.: Наука, 1991)
152. Wetherill G W, Stewart G R *Icarus* **77** 330 (1989)
153. Lissauer J J, de Pater I *Fundamental Planetary Science. Physics, Chemistry, and Habitability* (New York: Cambridge Univ. Press, 2013)
154. Rafikov R R *Astrophys. J.* **621** L69 (2005)
155. Nayakshin S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **408** L36 (2010)
156. Маров М Я, Шевченко И И *Экзопланеты. Экзопланетология* (М. – Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2017)
157. Duquennoy A, Mayor M *Astron. Astrophys.* **248** 485 (1991)
158. Mathieu R D et al., in *Protostars and Planets IV* (Eds V Mannings, A P Boss, S S Russell) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2000) p. 703
159. Meschiari S *Astrophys. J.* **752** 71 (2012)
160. Paardekooper S-J et al. *Astrophys. J. Lett.* **754** L16 (2012)
161. Shevchenko I I *The Lidov–Kozai Effect — Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy* (Berlin: Springer, 2017)
162. Мельников А В *Письма в Астрон. журн.* **42** 136 (2016); Melnikov A V *Astron. Lett.* **42** 115 (2016)
163. Satyal S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **443** 1310 (2014)
164. Doyle L et al. *Science* **333** 1602 (2011)
165. Welsh W et al. *Nature* **481** 475 (2012)
166. Orosz J A et al. *Science* **337** 1511 (2012)
167. Orosz J A et al. *Astrophys. J.* **758** 87 (2012)
168. Pierens A, Nelson R P *Astron. Astrophys.* **472** 993 (2007)
169. Shevchenko I I *Astrophys. J.* **799** 8 (2015)
170. Попова Е А, Шевченко И И *Письма в Астрон. журн.* **42** 525 (2016); Popova E A, Shevchenko I I *Astron. Lett.* **42** 474 (2016)
171. Mardling R A, in *The Cambridge N-Body Lectures* (Lecture Notes in Physics, Vol. 760, Eds S J Aarseth, C A Tout, R A Mardling) (Dordrecht: Springer, 2008) p. 59
172. Shevchenko I I *Astron. J.* **156** 52 (2018)
173. Demidova T V, Shevchenko I I *Astrophys. J.* **805** 38 (2015)
174. Shevchenko I I *Astron. J.* **153** 273 (2017)
175. Fleming D P et al. *Astrophys. J.* **858** 86 (2018)
176. Martí J G, Giuppone C A, Beaugé C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **433** 928 (2013)
177. Raymond S N, Barnes R, Gorenstein N *Astrophys. J.* **689** 478 (2008)
178. Butler R P et al. *Astrophys. J.* **526** 916 (1999)
179. Michtchenko T A, Malhotra R *Icarus* **168** 237 (2004)
180. Lissauer J J et al. *Nature* **470** 53 (2011)
181. Popova E A, Shevchenko I I *J. Phys. Conf. Ser.* **572** 012006 (2014)
182. Lithwick Y, Wu Y *Astrophys. J. Lett.* **756** L11 (2012)
183. Batygin K, Morbidelli A *Astron. J.* **145** 1 (2013)
184. Petrovich C, Malhotra R, Tremaine S *Astrophys. J.* **770** 24 (2013)
185. Demidova T V, Shevchenko I I *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463** L22 (2016)
186. Carrasco-González C et al. *Astrophys. J.* **821** L16 (2016)
187. Демидова Т В *Астрон. вестн.* **52** 184 (2018); Demidova T V *Solar Syst. Res.* **52** 180 (2018)
188. Демидова Т В, Шевченко И И *Письма в Астрон. журн.* **44** 140 (2018); Demidova T V, Shevchenko I I *Astron. Lett.* **44** 119 (2018)
189. Thébault P, Marzari F, Scholl H *Icarus* **183** 193 (2010)
190. Quintana E V, Lissauer J J *Icarus* **185** 1 (2006)
191. Quintana E V, Lissauer J J, in *Planets in Binary Star Systems* (Astrophysics and Space Science Library, Volume 366, Ed. N Haghighipour) (Berlin: Springer, 2010) p. 265
192. Bromley B C, Kenyon S J *Astrophys. J.* **806** 98 (2015)
193. Pierens A, Nelson R P *Astron. Astrophys.* **556** A134 (2013)
194. Kley W, Haghighipour N *Astron. Astrophys.* **564** A72 (2014)
195. Kley W, Haghighipour N *Astron. Astrophys.* **581** A20 (2015)
196. Nelson R P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **345** 233 (2003)
197. Pierens A, Nelson R P *Astron. Astrophys.* **478** 939 (2008)
198. Pierens A, Nelson R P *Astron. Astrophys.* **483** 633 (2008)
199. Lines S et al. *Astron. Astrophys.* **590** A62 (2016)
200. Masset F S et al. *Astrophys. J.* **642** 478 (2006)
201. Meschiari S *Astrophys. J.* **790** 41 (2014)
202. Martin R G, Armitage P J, Alexander R D *Astrophys. J.* **773** 74 (2013)
203. Pelupessy F I, Portegies Zwart S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **429** 895 (2013)
204. Morbidelli A et al. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **40** 251 (2012)
205. Kostov V B et al. *Astrophys. J.* **770** 52 (2013)
206. Hines T C et al. *Astrophys. J.* **799** 88 (2015)
207. Kostov V B et al. *Astrophys. J.* **827** 86 (2016)
208. Bennett D P et al. *Astron. J.* **152** 125 (2016)
209. Lineeweaver C H, Fenner Y, Gibson B K *Science* **303** 59 (2004)
210. Bouama C, von Bloh W, Franck S *Astrobiology* **7** 745 (2007)
211. Chen T, in *XXXI General Assembly of the Intern. Astronomical Union, Vienna, Austria, August 20–31, 2018*
212. Ligerink N F W et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **469** 2219 (2017)
213. Huang S *Publ. Astron. Soc. Pacific* **72** 489 (1960)
214. Hart M H *Icarus* **37** 351 (1979)
215. Kasting J F, Catling D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **41** 429 (2003)
216. Kasting J F, in *Planetary and Interstellar Processes Relevant to the Origins of Life* **27** (Origins of Life and Evolution of the Biosphere, Vol. 27, Eds D C B Whittet) (Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., 1997) p. 291
217. Marov M Ya, Grinspoon D H *The Planet Venus* (New Haven: Yale Univ. Press, 1998)
218. Маров М Я *Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной* (М.: Физматлит, 2016); Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. 2-е изд., испр. и доп. (М.: Физматлит, 2018)
219. Zechmeister M et al. *Astron. Astrophys.* **627** A49 (2019)
220. Heller R, Armstrong J *Astrobiology* **14** 50 (2014)
221. Lissauer J J *Nature* **389** 327 (1997)
222. Quintana E V et al. *Astrophys. J.* **821** 126 (2016)
223. Heller R, Pudritz R *Astrophys. J.* **806** 181 (2015)
224. Kaltenegger L *Astrophys. J.* **712** L125 (2010)
225. Heller R *Astron. Astrophys.* **545** L8 (2012)
226. Heller R, Barnes R *Astrobiology* **13** 18 (2013)
227. Heller R, Zuluaga J *Astrophys. J.* **776** L33 (2013)
228. Hinkel N R, Kane S R *Astrophys. J.* **774** 27 (2013)
229. Quarles B, Musielak Z E, Cuntz M *Astrophys. J.* **750** 14 (2012)
230. Forgan D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437** 1352 (2014)
231. Günther M N et al. *Nat. Astron.* **3** 1099 (2019)
232. Захаров А Ф *УФН* **181** 1114 (2011); Zakharov A F *Phys. Usp.* **54** 1077 (2011)
233. Панчук В Е и др. *УФН* **190** 605 (2020); Panchuk V E et al. *Phys. Usp.* **63** 562 (2020)

## Exoplanets: nature and models

**M.Ya. Marov<sup>(1,\*)</sup>, I.I. Shevchenko<sup>(2,3,\*\*)</sup>**

<sup>(1)</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,

ul. Kosygina 19, 119991 Moscow, Russian Federation

<sup>(2)</sup> The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo,

Pulkovskoe shosse 65, korp. 1, 196140 St. Petersburg, Russian Federation

<sup>(3)</sup> St. Petersburg State University, Universitetskaya naberezhnaya 7/9, 199034 St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: <sup>(\*)</sup>marovmail@yandex.ru, <sup>(\*\*)</sup>iis@gaoran.ru

Exoplanets represent a broad new class of astronomical objects, which became accessible for observations and studies only just before the end of the last century. Owing to continually improving techniques of ground-based observations, and especially observations from space, for a little bit more than two decades thousands of planetary systems of other stars have been discovered, and this process is escalating. Exoplanets are of paramount interest for astrophysical, astrochemical, and dynamical studies. Exoplanetary studies have opened up new horizons to gain insights into fundamental problems of stellar-planetary cosmogony and, in particular, into the question of the origin and evolution of the Solar System. Discoveries of Earth-like planets, especially those orbiting in stellar habitable zones favorable to giving rise to and sustaining life, open new prospects for progress in astrobiology.

**Keywords:** exoplanets, cosmogony, planetary systems, Solar System

PACS numbers: 05.45.Ac, 45.50.Pk, 95.10.Ce, 96.15.De, **97.82.-j**

Bibliography — 233 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **190** (9) 897–932 (2020)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.10.038673>

Received 21 May 2019, revised 22 September 2019

Physics – Uspekhi **63** (9) (2020)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.10.038673>