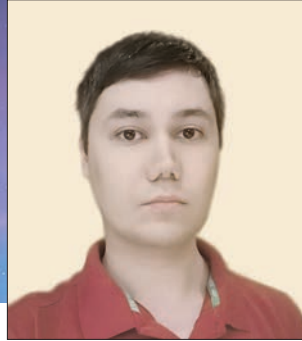


ЭКЗОТАРИУМЫ ДРУГИХ СОЛНЦ: КРУПНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ



ГАДЕЛЬШИН Дамир Раелович,

кандидат физико-математических наук

ВАЛЯВИН Геннадий Геннадьевич,

кандидат физико-математических наук

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

DOI: 10.7868/50044394820030019

Исследования экзопланет – новое направление в астрономической науке. Прошло всего 25 лет с момента первых достоверно подтвержденных обнаружений планет, обращающихся в системах других звезд. Открытие экзопланет стало возможным благодаря постройке инструментов нового поколения, чья стабильность и чувствительность позволили серьезно рассчитывать на расширение знаний об окружающем нас мире.

В настоящее время экзопланетология переживает невероятный подъем, достигнуты очень большие успехи в изучении планетных систем. Количество открытых и подтвержденных планет перевалило за 4000. Они демонстрируют огромное разнообразие по величинам расстояния от своих родительских звезд, эксцентриситетам орбит, степени нагрева поверхности, массам, возрасту и ряду других

параметров. Открыты планеты самых разных типов, многие из которых не представлены в Солнечной системе. Открыты многопланетные системы, в которых количество известных планет не уступает количеству планет в Солнечной системе. Родительские звезды экзопланет также разнообразны, кроме того, открыты планеты в системах не только одиночных, но и двойных и кратных звезд.

У многих экзопланет есть атмосферы, в некоторых из которых зарегистрированы линии нескольких химических элементов. Для каких-то планет даже составлены грубые температурные карты поверхности.

Несмотря на все это, исследования чужих миров еще только начинаются. В частности, интереснейший вопрос о жизни на экзопланетах еще только предстоит изучить. Несомненно, он связан с самими планетами и их эволюцией.

ЧТО ТАКОЕ ЭКЗОПЛАНЕТА?

Несмотря на то, что четкое определение понятия «планета» существует с 2006 г., когда оно было официально утверждено участниками 26-й Ассамблеи Международного астрономического союза, оно не может включать в себя экзопланеты, поскольку те обращаются не вокруг Солнца. И до сих пор точного определения для внесолнечных планет не существует.

Однако в 2001 г. рабочей группой Международного астрономического союза было дано временное определение понятию «планета», которое не привязано к конкретной звезде.

«Планетами» или «экзопланетами» (*exo* – древнегреческое «вне», «за пределами») являются объекты, истинная масса которых ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия. В настоящее время эта предельная масса, вычисленная для объектов солнечной металличности, составляет 13 масс Юпитера. Планеты обращаются по орбите вокруг какой-либо звезды или звездного остатка,

а способ их образования не важен. Минимальная масса, требуемая для того, чтобы внесолнечный объект считался планетой, должна быть такой же, как и в нашей Солнечной системе.

Субзвездные объекты, истинная масса которых выше предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия, являются «коричневыми карликами», независимо от того, как они образовались, и где они находятся. По современным представлениям, масса коричневых карликов лежит в диапазоне 0.012–0.08 массы Солнца.

Свободно плавающие объекты в молодых звездных скоплениях с массой ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия «планетами» также не являются – это «субкоричневые карлики».

ИЗ ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Тысячи лет ученые, философы и писатели пытались понять устройство нашей Вселенной, задавались вопросом о месте человечества в ней. Некоторые мыслители прошлого задолго до появления современных средств и методов

исследования даже высказывали мнение о том, что звезды представляют собой далекие солнца, вокруг которых могут вращаться планеты, подобные Земле и другим планетам Солнечной системы. Одним из таких мыслителей был итальянский монах, философ и поэт Джордано Бруно, живший в XVI веке. Он предполагал, что жизнь есть не только на Земле, что она распространена в бесконечной Вселенной на планетах с разнообраз-

«Планетами» или «экзопланетами» (exo – древнегреческое «вне», «за пределами») являются объекты, истинная масса которых ниже предельной массы для термоядерного синтеза дейтерия. В настоящее время эта предельная масса, вычисленная для объектов солнечной металличности, составляет 13 масс Юпитера

ными условиями, что формы, которые она принимает, бесконечно многообразны. Он также считал, что жизнь неизбежно порождает разум, причем разумные существа других планет совсем не должны походить на людей. В настоящее время истинность многих удивительных утверждений Бруно подтверждается современной наукой.

С момента появления астрофизики и новых методов исследования небесных объектов в XIX веке в течение почти ста лет неоднократно предпринимались попытки обнаружить планеты у других звезд. Большинство сообщений об открытиях до 1995 г. оказались ошибочными. Только два из них гораздо позднее были признаны мировым научным сообществом как реальные: в 1988 г. канадские астрономы Б. Кэмпбелл, Г. Уолкер и С. Янг сообщили об обнаружении массивной планеты у главного компонента двойной звезды Гамма Цфея (открытие было окончательно подтверждено лишь в 2003 г.); в 1992 г. польским астрономом А. Вольщаном с помощью радиотелескопа Аресибо были открыты две планеты суперземной массы у миллисекундного пульсара PSR1257+12.

Но о первом недвусмысленном открытии объекта планетной массы, обращающегося вокруг нормальной звезды главной последовательности, было объявлено швейцарскими астрономами Мишелем Майором и Дидье Кело в октябре 1995 г.¹ С помощью спектрографа

¹ См. статью К.А. Постнова «Наша Вселенная и другие земли», ЗиВ, №1, 2020 — Прим. ред.

С момента появления астрофизики и новых методов исследования небесных объектов в XIX веке в течение почти ста лет неоднократно предпринимались попытки обнаружить планеты у других звезд. Большинство сообщений об открытиях до 1995 г. оказались ошибочными. Только два из них гораздо позднее были признаны мировым научным сообществом как реальные

ELODIE, установленного на 1.93-метровом телескопе обсерватории Верхнего Прованса во Франции, они обнаружили синусоидальные доплеровские колебания солнцеподобной звезды 51 Пегаса, удаленной на расстояние 50 световых лет от Земли. Эти колебания нельзя было объяснить известными физическими причинами, поэтому швейцарцы предложили единственно возможное объяснение – что их вызывает гравитация массивной планеты, которая движется по орбите с периодом около 4.2 суток. Такой короткий период означает, что планета должна располагаться экстремально близко к своей звезде – примерно в 0.05 астрономической единицы (для сравнения, Меркурий – ближайшая к Солнцу планета нашей системы – рас-

полагается почти в 0.39 а.е. от Солнца, и совершает один оборот по орбите за 88 суток). Амплитуда колебаний говорила о том, что планета должна иметь массу около 0.5 массы Юпитера. Впоследствии такие экзопланеты стали относить к типу «горячие юпитеры».

Научное сообщество в целом не сразу приняло такое объяснение, поскольку существование планеты на подобной орбите не предсказывалось имеющимися в то время моделями образования планетных систем. Современные же модели предполагают, что горячие юпитеры рождаются в протопланетных дисках относительно далеко от родительских звезд, а затем в результате различного рода взаимодействий мигрируют к центру системы.

Майор и Кело опубликовали свой результат в ноябре 1995 г. в журнале *Nature*. Почти сразу же после этого их



Дидье Кело и Мишель Майор на фоне 3.6-метрового телескопа обсерватории Ла-Силья. Фотография Европейской южной обсерватории (ESO)

открытие было независимо подтверждено американскими астрономами Джеффри Марси и Полом Батлером при помощи инструментов Ликской обсерватории в Калифорнии. Для Марси и Батлера достижение их европейских коллег стало большим ударом, поскольку они начали мониторинг большого количества близких звезд с целью обнаружить экзопланеты на много лет раньше. Но они ожидали, что новые планеты будут иметь длительные орбитальные периоды наподобие периодов планет-гигантов Солнечной системы, поэтому просто отбрасывали короткие периоды колебаний как ошибочные. Справедливости ради стоит отметить, что в последующие годы американцам удалось обнаружить сотни экзопланет.

В октябре 2019 г. «за открытие экзопланеты, обращающейся вокруг звезды солнечного типа» Майор и Кело были удостоены Нобелевской премии по физике.

ВАЖНЫЕ ВЕХИ В ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Указаны даты выхода соответствующей публикации. Ссылки на некоторые публикации приведены в конце статьи.

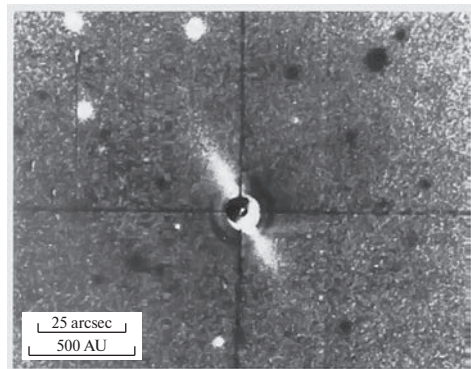
1) **Декабрь 1984 г.** Используя 2.5-метровый телескоп обсерватории Лас-Кампанас, американские астрономы впервые получили оптическое изображение осколочного диска звезды Бета Живописца.

2) **Август 1988 г.** Канадские астрономы заподозрили существование экзопланеты в системе двойной звезды Гамма Цефея, но твердо это было установлено существенно позже.

3) **Январь 1992 г.** Польский радиоастроном открывает две очень странные планеты суперземной массы, обращающиеся вокруг нейтронной звезды PSR1257+12. Вероятно, что эти планеты образовались из части вещества сверхновой и являются планетами второго поколения, либо они являются остатками ядер газовых гигантов, переживших сверхновую, либо же возникли из вещества диска, образовавшегося в результате «мягкого» слияния двух белых карликов.

4) **Ноябрь 1995 г.** Открытие швейцарцами первого горячего юпитера у звезды главной последовательности 51 Пегаса методом лучевых скоростей.

Первое изображение газопылевого диска у другой звезды, сделанное в обсерватории Лас-Кампанас. Диск Беты Живописца виден нам с ребра. Для масштаба указаны отрезки размером 25 угловых секунд и 500 а.е. Рисунок из статьи В.А. Smith & R.J. Terile 1984



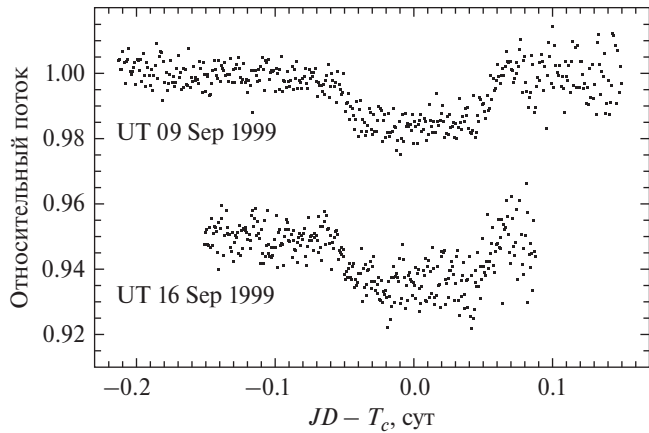
Оно почти сразу было подтверждено независимой группой астрономов из США.

5) **Декабрь 1999 г.** Открытие первой многопланетной системы у звезды Ипсилон Андромеды.

6) **Январь 2000 г.** Сразу две группы астрономов из США независимо друг от друга сообщили о первом обнаружении транзитов горячего юпитера HD209458 b осенью 1999 г., причем их статьи вышли в одном номере издания *The Astrophysical Journal*. Открытие первой транзитной планеты развеяло все оставшиеся сомнения относительно происхождения большинства вариаций лучевых скоростей звезд, подобных тем, что наблюдаются у 51 Пегаса, и придало мощный импульс для крупномасштабных усилий по поиску и изучению транзитных экзопланет, ведь с этого момента стало возможным определять средние плотности экзопланет и накладывать ограничения на их химический состав.

7) **Декабрь 2001 г.** Открытие первой экзопланеты в зоне обитаемости солнцеподобной звезды HD28185. Эта планета представляет собой газовый гигант, который гораздо массивнее Юпитера, но если вокруг него обращается один или несколько крупных спутников, то они могут быть кандидатами в обитаемые миры.

8) **Март 2002 г.** Первая регистрация следов атмосферы в трансмиссионном спектре уже упоминавшегося (см. п. 6) горячего юпитера HD209458 b – были обнаружены линии поглощения дублета натрия на длине волны 589.3 нм. Это замечательное открытие продемонстрировало возможности изучения химического состава и строения атмосфер экзопланет.

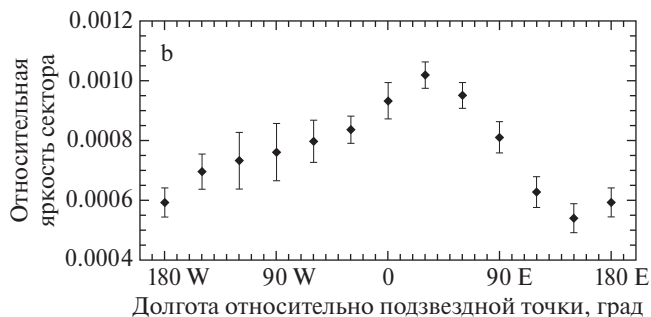
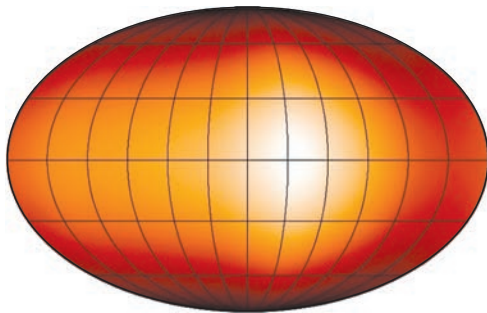


Кривые блеска HD209458, полученные группой Дэвида Шарбонно с использованием красного фильтра, близкого к джонсоновскому R. Видимые здесь провалы блеска являются первыми известными транзитами экзопланеты. Рисунок из статьи D. Charbonneau et al. 2000

Трансмиссионный спектр представляет собой распределение глубин транзитов планеты в зависимости от длины волны электромагнитного излучения.

9) **Ноябрь 2005 г.** Первое открытие планеты типа «суперземля», которая обращается вокруг обычной звезды GJ 876. Суперземлями называются планеты, массы которых лежат в диапазоне между массой Земли (крупнейшей планеты земного типа Солнечной системы) и массой Урана (наименьшей из планет-гигантов Солнечной системы).

10) **Декабрь 2006 г.** Запуск первого космического телескопа CoRoT, основной задачей которого являлся поиск транзитных экзопланет. Аппарат был сконструирован Национальным центром космических исследований Франции и несколькими научно-исследовательскими центрами других стран Европы при участии Европейского космического агентства. Диаметр входного зрачка телескопа составлял 27 см. CoRoT не был предназначен для поиска долгопериодических планет –



Распределение яркости по «поверхности» HD189733 b. Рисунок из статьи Н.А. Knutson et al. 2007

наблюдения велись на нескольких различных участках неба с продолжительностью по 150 и по 30 суток. Также он мог находить только достаточно крупные тела – в несколько раз больше Земли. За 6 лет работы с его помощью удалось обнаружить 34 транзитные экзопланеты, которые впоследствии были подтверждены наземными исследованиями.

11) **Май 2007 г.** С помощью данных космического телескопа «Спитцер» (*Spitzer*, NASA), работавшего в инфракрасном диапазоне, впервые была построена карта распределения температур по «поверхности» горячего юпитера HD189733 b. Как и большинство других подобных планет, он всегда повернут одной стороной к родительской звезде, но самая горячая область его облачного покрова оказалась заметно смещена относительно подзвездной точки

по долготе на восток. Это означает, что в атмосфере экзопланеты существуют мощные ветровые течения, эффективно переносящие тепловую энергию с дневной стороны на ночную.

12) **Ноябрь 2008 г.** Получено первое прямое изображение планеты у другой звезды. На снимках с космического телескопа им. Хаббла планета видна как слабый объект, располагающийся вблизи внутреннего края пылевого диска звезды Фомальгаут.

13) **Март 2009 г.** Запуск космической обсерватории NASA «Кеплер» (*Kepler*) на гелиоцентрическую орбиту. Ее основным предназначением являлся поиск экзопланет транзитным методом (другой важной задачей было изучение звезд, например, методами астросейсмологии). С этого момента начинается эпоха массового открытия экзопланет с самыми разнообразными размерами, в том числе очень небольшими.

Диаметр входного отверстия телескопа равен 1 м. Научная аппаратура

Телескоп «Кеплер». Изображение NASA

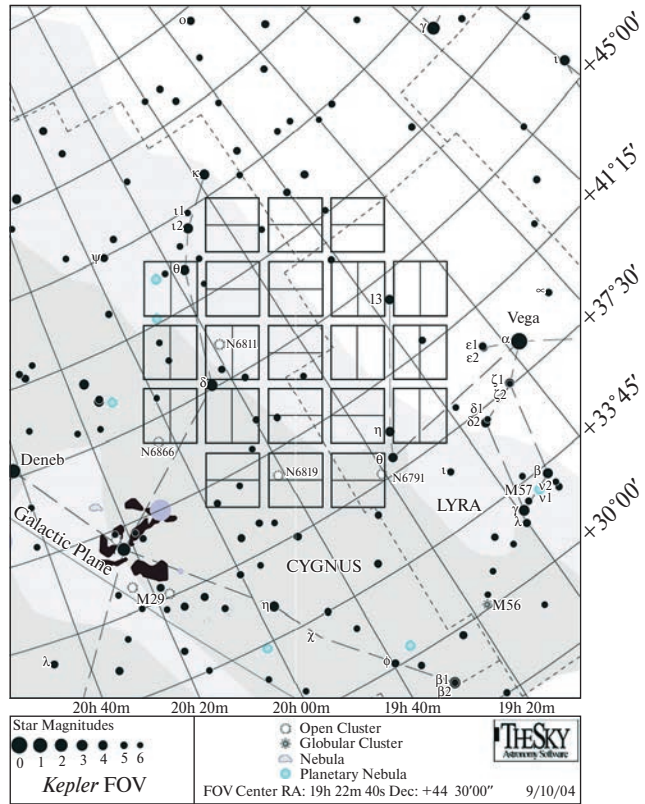


«Кеплера» включала светоприемник, состоящий из 42 ПЗС-матриц с общим разрешением 95 млн пикселей. Поле зрения телескопа, пригодное для исследований, покрывало область неба площадью 105 квадратных градусов.

Продолжительность основной миссии «Кеплера» составила почти ровно 4 года – с мая 2009 по май 2013 г., но после ее окончания научная программа была продолжена в рамках расширенной миссии «K2». В октябре 2018 г. NASA объявило об окончании работы телескопа в связи с исчерпанием топлива на борту.

Без преувеличения, собранные аппаратом данные позволили совершить революционный скачок в нашем понимании устройства планетных систем, а чрезвычайно разнообразие физико-химических и орбитальных свойств экзопланет превзошло все ожидания. За почти 10 лет работы «Кеплера» учеными разных стран мира было опубликовано около 3000 статей в рецензируемых изданиях, но анализ данных телескопа продолжается и сегодня.

14) Декабрь 2009 г. Первое открытие транзитного «мининептуна». Планета обращается вокруг звезды – красного карлика GJ 1412, и впервые была детектирована сетью роботизированных телескопов проекта MEarth. Мининептуны – новый тип экзопланет, массы которых лежат в диапазоне значений суперземель. В отличие от планет земной группы (или скалистых планет) мининептуны содержат много летучих веществ в своем составе, например,



Область наблюдения «Кеплера» на карте неба в рамках основной миссии охватывала часть созвездий Лебедя, Лиры и Дракона. Размеры кружков обозначают звездную величину. Звочки используются для обозначений (сверху вниз): открытых скоплений, шаровых скоплений, туманностей, планетарных туманностей. Координаты центра поля зрения: RA 19 ч 22 м 40 с Dec. +44 30' 00". Изображение NASA

воду, метан, аммиак, водород и гелий, которые значительно увеличивают оптический радиус планеты.

15) Октябрь 2010 г. Открытие первой мультитранзитной системы Kepler-9, в которой транзитными являются сразу несколько планет.

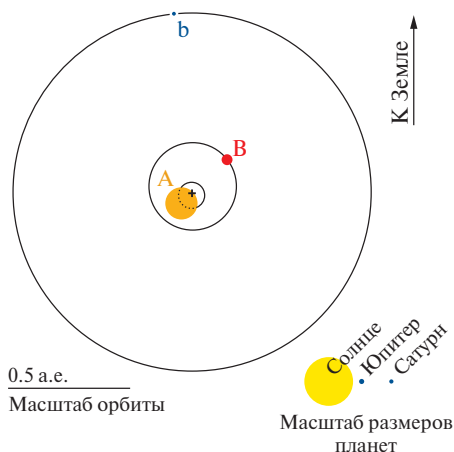
16) Февраль 2011 г. Открытие невозмущенной системы Kepler-11 с шестью транзитными мининептунами,

орбиты которых упакованы в пределах 0.5 а.е. от родительской звезды, показало, насколько плоскими бывают планетные системы. И хотя орбиты планет Солнечной системы наклонены друг к другу в пределах нескольких градусов, внешний наблюдатель никогда бы не увидел транзитными более трех планет в ней одновременно.

В последующие годы «Кеплером» и другими проектами было обнаружено множество плоских компактных мультитранзитных систем. По плотности упаковки некоторые системы сравнимы скорее не с Солнцем и его планетами, а с Юпитером и галилеевыми спутниками – в них орбиты сразу четырех, пяти или даже шести планет располагаются в пределах 0.1–0.2 а.е. от родительской звезды.

17) **Сентябрь 2011 г.** Открытие первой транзитной планеты, обращающейся вокруг тесной двойной звезды Kepler-16, состоящей из компонентов, принадлежащих главной последовательности. Орбита планеты в этой системе наклонена к плоскости орбиты родительской пары всего на 0.5° , что говорит об образовании ее из общего для двух звезд протопланетного диска.

Схема системы Kepler-16. Рисунок из статьи L.R. Doyle et al. 2011



В настоящее время обнаружено уже более десяти аналогичных систем, где планеты обращаются вокруг пары звезд как целого.

18) **Январь 2014 г.** Открытие первой сверхраздутой планеты суперземной массы в системе Kepler-87 явилось большой неожиданностью для астрономов – как и открытие некоторых других типов экзопланет – и никак не предсказывалось теориями формирования планетных систем. В отличие от мининептунов такие планеты включают в себя очень много водорода и гелия: их массовая доля может составлять более половины полной массы планеты (против нескольких процентов у мининептунов).

В настоящее время обнаружено уже больше десятка подобных экзопланет.

19) **Апрель 2014 г.** Обнаружена первая землеразмерная планета в зоне обитаемости красного карлика (Kepler-186).

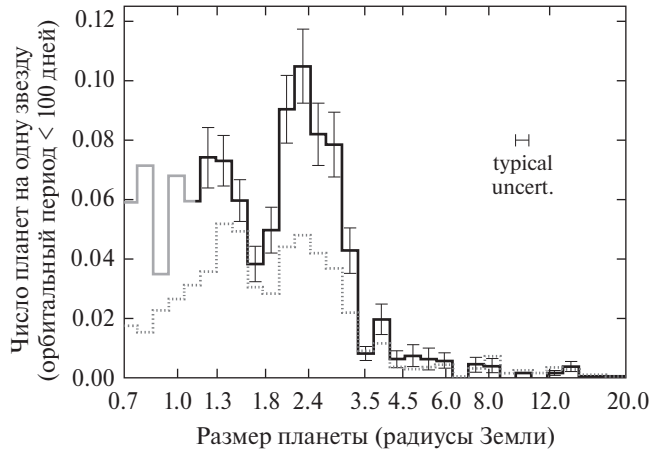
20) **Август 2016 г.** Обнаружен потенциальный аналог Земли в системе ближайшей к Солнцу звезды – Проксимы Центавра (Proxima Centauri b).

21) **Сентябрь 2017 г.** В распределении более чем 2000 экзопланет «Кеплера» по размерам обнаружен значительный недостаток планет с радиусами 1.5–2 радиуса Земли, который впоследствии назовут «зазором Фултона» (по имени астронома, открывшего явление). Этот «зазор» разделяет две популяции экзопланет по составу: те из них, радиусы которых меньше 1.5 радиуса Земли, вероятнее всего, относятся к скалистым планетам; а те из них, радиусы которых превышают 2 радиуса Земли, с большой вероятностью являются мининептунами. И хотя со все возрастающим количеством планет с измененными плотностями «граница» между планетами разных типов была определена еще в 2013–2014 гг., вывод о ее существовании был подкреплён с появлением надежных данных о расстояниях

до звезд «Кеплера» от космического телескопа *Gaia*.

При этом, согласно более поздним расчетам, зазор Фултона не может быть объяснен только фотоиспарением (испарением под действием излучения звезды) внешних оболочек мининептунов. По-видимому, имеют значение и начальные факторы, вроде испарения оболочек с активных горячих ядер, образования планет в богатых и бедных летучими веществами областях протопланетных дисков (и их миграции), эрозии атмосфер в результате серии столкновений протопланет.

22) **Февраль 2018 г.** Открыта восьмая планета у звезды Kepler-90. Таким образом, эта система по количеству известных планет сравнялась с Солнечной. Совершенно очевидно, что некоторые планетные системы могут

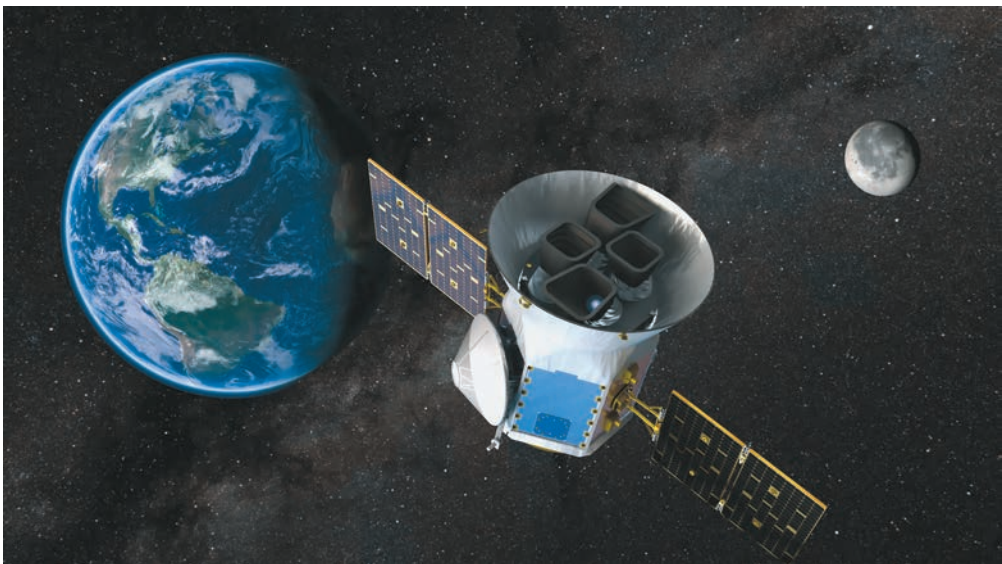


Зазор Фултона в распределении планет «Кеплера» по радиусам. Рисунок из статьи B.J. Fulton & E.A. Petigura 2018

сильно превосходить нашу по этому показателю.

23) **Апрель 2018 г.** Запуск действующего ныне космического аппарата TESS (NASA и Массачусетский технологический институт) с целью поиска

TESS оснащен четырьмя 10-сантиметровыми телескопами с очень широкими полями зрения. Аппарат вращается на лунно-резонансной орбите вокруг Земли с периодом около 13.7 суток. Изображение NASA





LHS3844 b в представлении художника. Этот скалистый голый мир размером 1.3 размера Земли обращается по орбите вокруг тусклого красного карлика с периодом всего лишь 11 часов. Изображение NASA

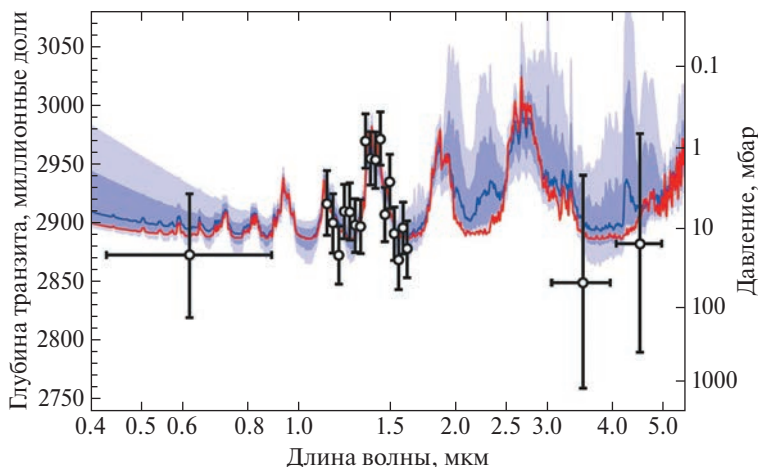
транзитных экзопланет у ярких звезд. В рамках основной и расширенной миссии он покроет наблюдениями значительную часть небесной сферы. Большинство участков наблюдается им лишь в течение одного месяца – там будут обнаружены планеты с короткими периодами.

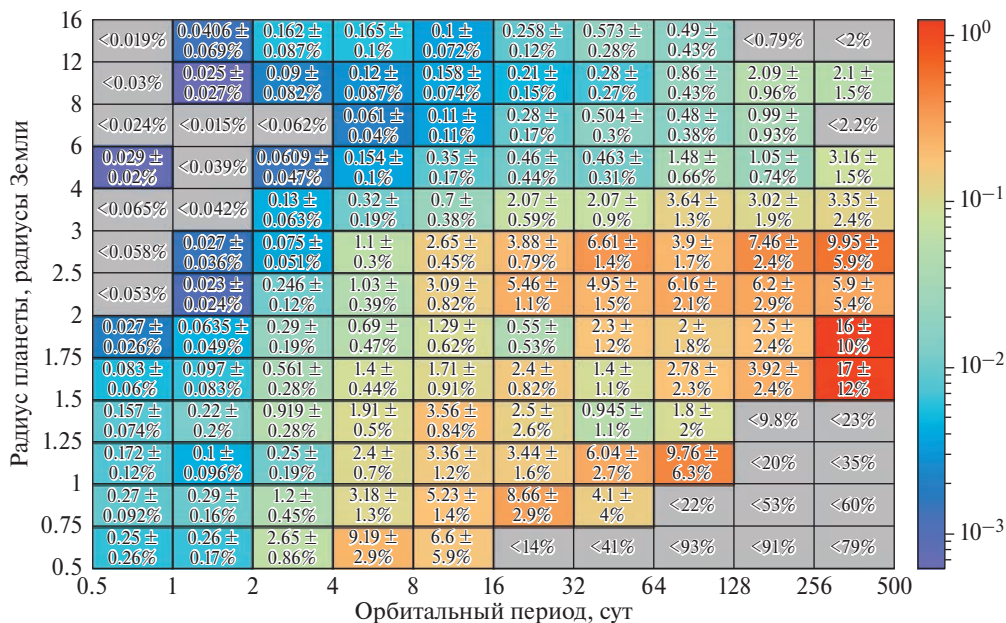
24) **Август 2019 г.** По данным космического телескопа «Спитцера» составлена карта поверхностной яркости транзитной суперземли LHS3844 b, ранее открытой телескопом TESS. Она

оказалась очень контрастной и симметричной относительно подзвездной точки. Это значит, что данная скалистая планета лишена плотной атмосферы. Даже более того – вероятнее всего, ее поверхность напоминает безвоздушную поверхность Луны или Меркурия.

25) **Сентябрь 2019 г.** В богатой водородом атмосфере мининептуна K2-18 b, обращающегося в зоне обитаемости красного карлика, впервые обнаружен водяной пар. Трансмиссионный спектр этой планеты был получен в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью телескопа им. Хаббла. К сожалению, наличие водных облаков на планете, получающей почти столько же энергии от своей звезды, сколько наша Земля получает от Солнца, вовсе не означает ее потенциальной обитаемости. Низкая средняя плотность K2-18 b и доминирование водорода в ее атмосфере практически однозначно свидетельствуют о том, что под слоем внешних облаков скрывается мощная оболочка из сверхкритической жидкости, которая простирается на тысячи километров вглубь планеты.

Трансмиссионный спектр K2-18 b. Красной и синей линиями показан модельный спектр, а кружками – наблюдательные данные. Главной особенностью этого спектра является полоса поглощения водяного пара с длиной волны около 1.4 мкм. Рисунок из статьи V. Venneke et al. 2019





Частота встречаемости планет у звезд классов F, G и K по данным телескопа «Кеплер». Рисунок из статьи D.C. Hsu et al. 2019

26) **Декабрь 2019 г.** Состоялся запуск на околоземную орбиту небольшого космического телескопа «Хеопс» (CHEOPS), принадлежащего Европейскому космическому агентству. Главной задачей миссии за 3.5 года наблюдений будет уточнение размеров известных экзопланет, поиск транзитов планет, найденных методом лучевых скоростей, измерение масс планет путем тайминга транзитов, а также поиск новых планет в системах с уже известными транзитными планетами.

ОСНОВНАЯ СТАТИСТИКА ОТКРЫТИЙ. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ПЛАНЕТ У ЗВЕЗД

Согласно сайту «Энциклопедия внесолнечных планет»², на сегодняшний день открыто около 4200 экзопланет, обращающихся примерно в 3100 системах.

Около 72% всех известных экзопланет открыто транзитным методом, 21% экзопланет – методом лучевых скоростей, 3.2% открытий сделано путем получения прямых изображений, 2.5% приходится на метод гравитационного микролинзирования, и менее 2% открытий сделано всеми остальными методами.

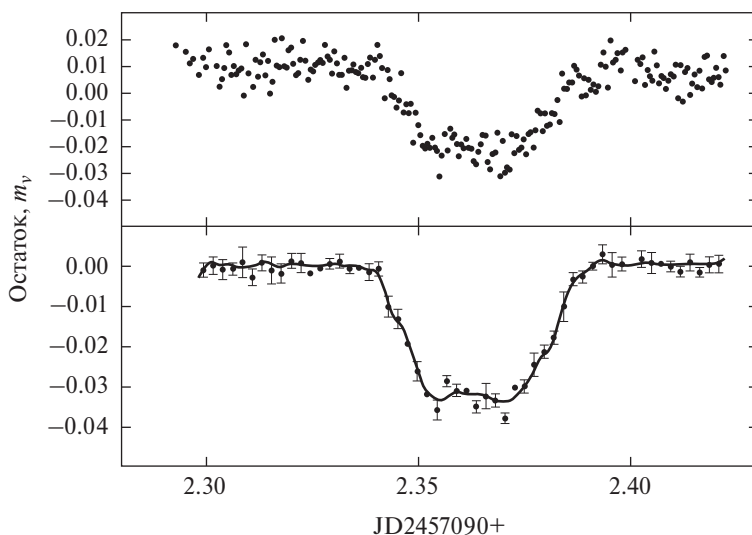
Такая большая доля транзитного метода объясняется успехами основной и расширенной миссии «Кеплера»: согласно экзопланетному архиву NASA (NASA Exoplanet Archive)³, по состоянию на февраль 2020 г. в ее рамках открыто и подтверждено более 2740 экзопланет, и еще около 3300 остаются в статусе кандидатов. Почти половина всех кандидатов «Кеплера» имеют радиусы менее 2 радиусов Земли, и 41% всех кандидатов входит в состав мультитранзитных систем.

² <http://exoplanet.eu>

³ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>



Два главных оптических инструмента САО РАН: 6-метровый и 1-метровый телескопы. Фотография из личного архива С.В. Драбека



Фотометрический портрет транзита горячего юпитера WASP-43 b, полученный с помощью 1-м телескопа САО РАН 11 марта 2015 г.

На основе данных «Кеплера», накопленных за время работы основной миссии, неоднократно была вычислена частота встречаемости планет у звезд. Более поздние работы учитывают не только геометрические вероятности транзитной конфигурации, неполноту каталога «Кеплера» (некоторые транзитные планеты могут так и остаться не обнаруженными из-за слишком низкого отношения «сигнал-шум»), присутствие в нем ложных кандидатов (астрофизического или технического характера), но и мультитранзитность

многих систем, тенденцию планет собираться в группы в рамках одной системы (в Солнечной системе, например, имеются две выделенные группы больших планет: планеты земной группы и планеты-гиганты) и другие особенности.

Согласно разным авторам, доля звезд спектрального класса F, G и K, имеющих хотя бы одну планету в пределах досягаемости «Кеплера» (т.е. в пределах орбитальных периодов от 0.5–3 до 300–500 суток), составляет от 0.5 до 1. При этом среднее число планет у звезд,

обладающих планетными системами, в данном диапазоне периодов составляет от 4 до более, чем 8. Некоторые авторы отмечают, что по сравнению с большинством других планетных систем Галактики наша Солнечная система выглядит весьма «пустынной», так как ближайшая к Солнцу планета слишком мала и расположена довольно далеко от звезды (на фоне планет «Кеплера»).

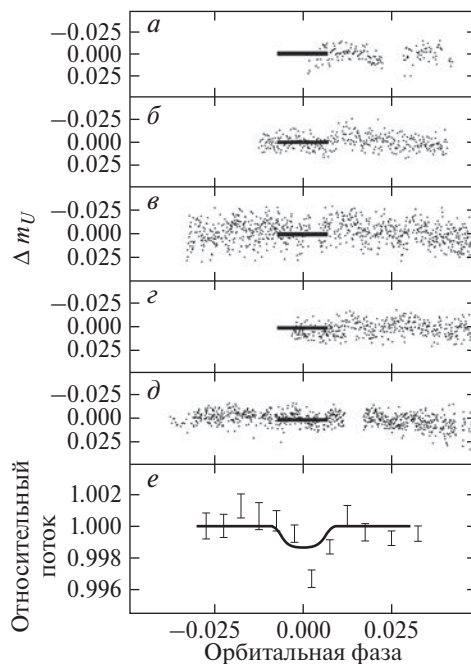
Распространенность горячих юпитеров оказалась сильно зависящей от металличности родительских звезд, но в среднем только около 1% F, G и K-звезд обладают такими планетами.

Частота встречаемости землеразмерных планет в зоне обитаемости солнцеподобных звезд составляет по разным оценкам от 5 до 10% или даже от 10 до 50%. Такое слабое ограничение распространенности связано с тем, что надежных аналогов Земли у аналогичных Солнцу звезд до сих пор не обнаружено.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОПЛАНЕТ В РОССИИ

К сожалению, в России по разным причинам данное направление сильно отстает от уровня мировой науки, особенно в части наблюдательной астрономии. Между тем за последние 10 лет сформировалось несколько отечественных рабочих групп по исследованию экзопланет из астрономов Коуровской, Пулковской, Специальной астрофизической обсерваторий Академии наук, Казанского федерального университета. Их усилиями совместно с группами из других стран открыто уже почти десять экзопланет. Также несколько научных групп из ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН и других известны сильными теоретическими исследованиями экзопланет. Хочется верить, что наметившийся тренд в нашей стране будет только крепнуть.

В Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) несколько лет назад сформировалась группа, изучающая экзопланеты и их атмосферы. К настоящему моменту нам удалось провести несколько исследований и получить интересные результаты. В частности, удалось адаптировать панорамный фотометр 1-метрового телескопа САО для проведения на нем многоцветных наблюдений экзопланет с характерными точностями регистрации связанных с ними транзитных событий



Сфазированные временные ряды блеска HD219134 в единицах остаточных звездных величин в фильтре U для пяти разных ночей наблюдений с августа 2015 (a) до ноября 2016 года (e). Сплошная горизонтальная линия на нулевом уровне на панелях (a)–(e) – ожидаемый транзит. На панели (f) представлены результаты усреднения данных и модель формы транзита (сплошная линия) в единицах относительного потока. Рисунок и пояснения к нему из статьи Valyavin et al. 2018



Комплекс роботизированных телескопов с диаметрами зеркальных объективов 0.5 метра. Предназначен для проведения массовых наблюдений с целью тайминга транзитов известных экзопланет, чтобы детектировать новые экзопланеты. Фотография из личного архива Г.Г. Валявина, руководителя группы изучения экзопланет САО РАН

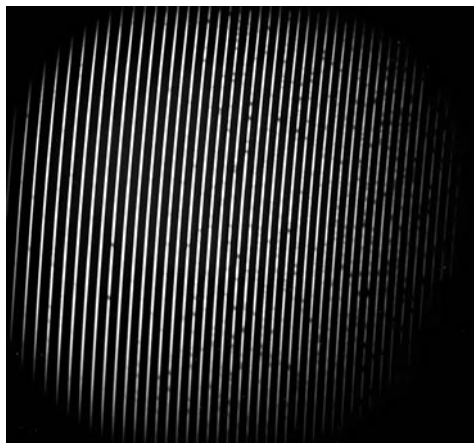


Диспергирующая оптика спектрографа высокого спектрального разрешения САО РАН для исследования экзопланет. Слева – кросс-дисперсионная призма с крупногабаритной дифракционной решеткой эшелле. Справа – кросс-дисперсионная призма с другого ракурса. Фотография из личного архива Г.Г. Валявина

около 0.05% и даже выше. Таких точностей вполне хватает для регулярных наблюдений транзитных планет с размерами от размера Юпитера до Нептуна, и в ряде случаев планет меньшего размера – мининептунов с радиусами 2–3 радиуса Земли.

С этим инструментом начаты регулярные наблюдения транзитов уже от-

крытых экзопланет с целью детального исследования их физических характеристик и поиска новых многопланетных систем методом тайминга. Первыми наиболее успешными результатами мы считаем построение трансмиссионного спектра и обнаружение свидетельств существования протяженной газовой оболочки у горячего юпитера WASP-32 b.



Образец спектра высокого разрешения, полученный с помощью нового спектрографа БТА САО РАН

Из анализа трансмиссионного спектра экзопланеты WASP-43 b получена прямая оценка температуры ее ночной стороны (935 ± 37 K).

Удалось также зарегистрировать и исследовать транзит недавно открытой суперземли HD219134 b. Признаки существования этой планеты ранее были обнаружены европейской группой при анализе лучевых скоростей звезды и по наблюдению транзитов космическим телескопом «Спитцер» в инфракрасном диапазоне. В расчетное время мы несколько раз зарегистрировали транзит в ближнем ультрафиолетовом диапазоне. Этот результат проиллюстрировал возможность исследования наземными наблюдательными средствами небольших экзопланет.

При поддержке Российского научного фонда (РНФ) нами построен и уже введен в эксплуатацию комплекс роботизированных малых телескопов с диаметром зеркал 0.5 метра. Комплекс предназначен для работы в традиционных программах САО и для проведения регулярных многоцветных наблюдений транзитов экзопланет по

программе поиска многопланетных систем. С 2020 г. комплекс начал наблюдения в режиме опытной эксплуатации.

Наконец, большие надежды для развития экзопланетного направления России возлагаются на новый спектрограф, построенный при финансовой поддержке РНФ и недавно установленный на 6-метровом телескопе БТА САО РАН. Ожидается, что с его помощью станет возможным проводить высокопрецизионные исследования, в частности, измерять массы разнообразных экзопланет, в том числе и некоторых некрупных скалистых планет, обращающихся вокруг карликовых звезд на тесных орбитах. Первые пробные наблюдения со спектрографом состоялись осенью 2019 г. Первые научные результаты с инструментом ожидаются в 2020 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Search for Substellar Companions to Solar-type Stars // Campbell, B., Walker, G. A. H., Yang, S. 1988, The Astrophysical Journal, v. **331**, p. 902.
2. A Jupiter-mass companion to a solar-type star // Mayor, M., Queloz, D. 1995, Nature, v. **378**, p. 355.
3. Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere // Charbonneau, D. et al. 2002, The Astrophysical Journal, v. **568**, p. 377.
4. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11 // Lissauer, J. J. et al. 2011, Nature, v. **470**, p. 53.
5. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri // Anglada-Escudé, G. et al. 2016, Nature, v. **536**, p. 437.
6. The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets // Fulton, B. J. et al. 2017, The Astronomical Journal, v. **154**, id. 109.
7. The Interior and Atmosphere of the Habitable-zone Exoplanet K2-18b // Madhusudhan, N. et al. 2020, The Astrophysical Journal Letters, v. **891**, id. 7.