

# Планеты других звёзд. История открытий

Олег Гончаров

## От автора:

Статья посвящена именно истории открытий, с минимальными экскурсами в теорию. Я более или менее придерживался хронологического порядка, но, разумеется, небольшие забеги вперёд по времени были неизбежны. Как это обычно бывает, много внимания уделено предыстории и первым открытиям, но я постарался достаточно полно охватить и важные события последних лет.

## Оглавление

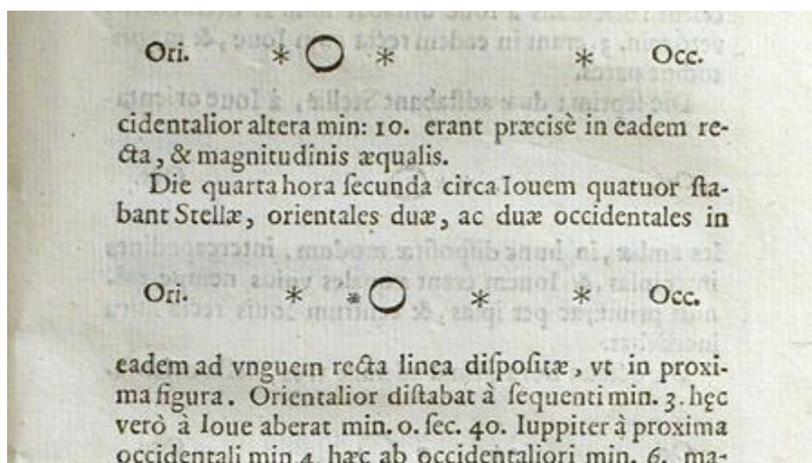
Предыстория.....	2
На пороге.....	4
Первые планеты... у звёзд?.....	7
Нобелевское открытие .....	8
Планеты-гиганты на любой вкус .....	10
Всё легче и легче.....	14
Прямое изображение .....	16
Интерлюдия .....	20
Запуск "Кеплера". CoRoT и MEarth .....	21
"Кеплер" приступает к работе .....	25
HARPS наносит ответный удар .....	28
Эра "Кеплера" .....	29
Наконец, жизнь? .....	35
Конец прекрасной эпохи .....	39
"Кеплер" умер... Да здравствует K2!.....	41
Ближайшие .....	46
Фантомы .....	49
TRAPPIST, TESS и другие .....	51
Атмосферы.....	57
Уникальны или типичны? .....	64
Экзолуны, планеты-бродяги и загадочные объекты у белого карлика.....	69
Перспективы.....	74
Несколько слов в заключение .....	78
Использованные источники: .....	79

## Предыстория

Принято обычно говорить, что над множественностью обитаемых миров задумывались ещё древние греки. Это верно только отчасти. Античному миру была незнакома идея планет у других звёзд. Общепринятой была модель геоцентрической вселенной, и под другими "мирами" могли подразумевать другие вселенные с другими "землями" в центрах своих небесных сфер. Аристарх Самосский в 3 веке до н.э. предложил новую, гелиоцентрическую систему мира, но, к сожалению, мы почти ничего о ней не знаем. Гелиоцентрическая система подразумевает параллакс звёзд, то есть их видимое смещение в небе вследствие движения Земли по орбите, но невооружённым глазом такое смещение заметить невозможно. Естественное объяснение – что звёзды удалены на огромные расстояния – влекло за собой почти неизбежный вывод, что звёзды должны быть очень яркими и, следовательно, похожими на Солнце. Неизвестно, однако, пришёл ли к такому выводу Аристарх и его последователи.

Только после переоткрытия гелиоцентризма Коперником в 16 веке появились первые достоверные рассуждения об иных планетных системах. Их автором был известный всем со школы монах-доминиканец, философ и мистик Джордано Бруно, утверждавший, что "существуют... неисчислимые солнца, бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца." До сих пор неизвестно, в какой мере его идеи о множественности миров и бесконечности вселенной вкупе с проповедуемой им гелиоцентрической моделью Солнечной системы повлияли на приговор инквизиции.

Через несколько лет после казни Бруно другой итальянец – Галилео Галилей – навёл самостоятельно изготовленный 30-кратный телескоп на Юпитер и увидел вблизи него три странные звёздочки, словно вытянутые вдоль одной линии и меняющие своё положение (вскоре он обнаружил и четвёртую). Так была доказана возможность вращения одних небесных тел вокруг других, помимо Земли и/или Солнца. Галилеевы спутники, так же, как и открытые позже крупные спутники трёх других планет-гигантов, по сути, представляли из себя планетные системы в миниатюре. Само их существование косвенно намекало на возможность формирования планетных систем у других звёзд.



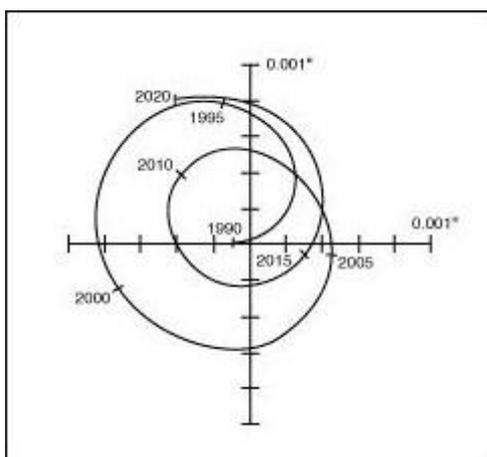
Зарисовки спутников Юпитера Галилео Галилеем в "Звёздном вестнике" [1]

Идея о множественности миров – и их возможной обитаемости – уже мало кем отрицалась к 19 веку. Но обнаружить планеты у других звёзд было задачей невероятно трудной. В 1844 году немецкий математик Фридрих Бессель, в то время директор Кёнигсбергской обсерватории, заметил небольшие отклонения в движении Сириуса и Прокциона – они как бы слегка покачивались относительно своего прямолинейного движения по небесной сфере. Такую аномалию можно было объяснить влиянием массивных темных спутников, причём по расчётам масса невидимых объектов была сравнима с солнечной. Их

обнаружили во второй половине 19 века – позже стало понятно, что это белые карлики, выгоревшие остатки звёзд.

Теоретически таким же – астрометрическим – способом можно было бы попробовать обнаружить и планеты, но для этого требовалась почти недостижимая точность. Тем не менее, уже в 19 веке астрономы попытались объяснить аномалии движения близкой двойной звёзды – 70 Змееносца – наличием "планетарного тела". Первым в 1855 году, вскоре после наблюдений Бесселя, это сделал английский астроном Уильям Джейкоб (William Stephen Jacob), а позже, в 1899 году – американец Томас Си (T. J. J. See). Орбита, предложенная последним, правда, не выдерживала проверку на устойчивость. Уже в XX веке, в 1943 году, новую попытку сделали Дирк Рейл (Dirk Reuy) и Эрик Холберг (Erik Holberg). Они оценили массу невидимого "планетарного объекта" в 1/100 солнечной, то есть в 10 масс Юпитера. Но в итоге после уточнения орбитального движения обеих звёзд отклонения исчезли сами собой (нечто подобное произошло с аномалиями в движении Нептуна, благодаря которым был открыт Плутон, ошибочно принятый за "планету X").

Точность наземных астрометрических измерений из-за влияния атмосферы долгое время составляла от силы 1/100 угловой секунды, или 10 миллисекунд дуги, обычно же была в разы хуже. Под влиянием Юпитера Солнце движется вокруг общего с ним центра масс с амплитудой примерно 740 тысяч километров, что немного больше солнечного радиуса. С ближайших звёзд такие колебания видны под углом не более нескольких миллисекунд дуги. Поэтому теоретически можно было обнаружить только очень тяжёлые планеты, в несколько раз превышающие массу Юпитера, и лишь у ближайших звёзд.



Видимое движение Солнца под влиянием Юпитера с расстояния в 10 парсек в секундах дуги [2]

Задача, правда, упрощалась для красных карликов – у них отношение масс планета/звезда меньше, чем у Солнца, и амплитуды движения звезды поэтому должны быть заметнее. Голландский астроном Питер Ван де Камп (Peter van de Kamp), двоюродный брат Дирка Рейла, работая в обсерватории Спроула, с 1938 года вёл наблюдения за звездой Барнарда. Этот очень тусклый красный карлик массой в семь раз легче солнечной – вторая по удалённости от Солнца звезда после альфы Центавра. В 1963 де Камп, проанализировав более 2000 снимков, объявил об открытии планеты-гиганта, вызывающей отклонения в движении звезды с амплитудой 0.04 угловых секунды и периодом 25 лет, а позже – двух планет с массами 1.1 и 0.8 Юпитера (Mj) и периодами обращения 26 и 12 лет. Впоследствии эти параметры неоднократно уточнялись.

Открытие широко освещалось в прессе, в New York Times 19 апреля 1963 вышла статья под названием "Найдена другая Солнечная система в 36 триллионах миль от Солнца". Но спустя десять лет появилась работа, авторы которой, объединив результаты наблюдений двух независимых обсерваторий, не нашли никаких отклонений в движении красного карлика. Позже высказали свои сомнения и коллеги де Кампа по Свартмортскому колледжу, в том числе новый директор обсерватории Спроула Вульф Хейнц (Wulff Heintz), сменивший в 1972 на этом посту де Кампа. Они пришли к выводу, что виной всему небольшие инструментальные артефакты, связанные, видимо, с периодическим обслуживанием наблюдавшего за звездой телескопа. Сейчас уже не вызывает сомнений, что планеты Барнарда являются результатом инструментальной ошибки.



Питер Ван де Камп (в центре) с коллегами в обсерватории Спроула [3]

История с системой Барнарда привлекла к себе всеобщее внимание; на её фоне менее известными остались кандидаты на внесолнечные планеты у двух других звёзд – красного карлика Лаланд 21185 в 8 световых годах от Земли и 61 Лебеда А – оранжевого карлика в двойной системе на расстоянии 11 световых лет. В 1942 году о наличии невидимого спутника массой 16  $M_j$  у 61 Лебеда А объявил датский астроном К. Странд (K. Strand), работавший в обсерватории Спроула под руководством де Кампа. Позже сам де Камп уточнил параметры объекта, снизив его массу до 8  $M_j$ . А в 70-е годы советские астрономы из Пулковской обсерватории А.Н. Дейч и О.Н. Орлова сообщили об открытии у этой звезды трёх массивных "тёмных спутников" массами 6, 7 и 11  $M_j$ . Увы, ни одно из этих открытий так и не было подтверждено. В 1945 году де Камп заподозрил наличие невидимого тела у Лаланд 21185, правда, слишком массивного для планеты (60 масс Юпитера). Позже его сотрудница С. Липпинкотт (S. Lippincott) уточнила параметры объекта, уменьшив массу до планетных 10  $M_j$ . В 1970-е Джордж Гейтвуд (George Gatewood) – один из "ниспровергателей" планет Барнарда – опроверг и заявленный спутник Лаланд 21185. Иронично, но через двадцать лет, в 1996, уже сам Гейтвуд объявил о существовании у этого красного карлика двух планет-гигантов с периодами 6 и 30 лет. Стоит ли говорить, что и его открытие не было в конечном итоге подтверждено.

## На пороге

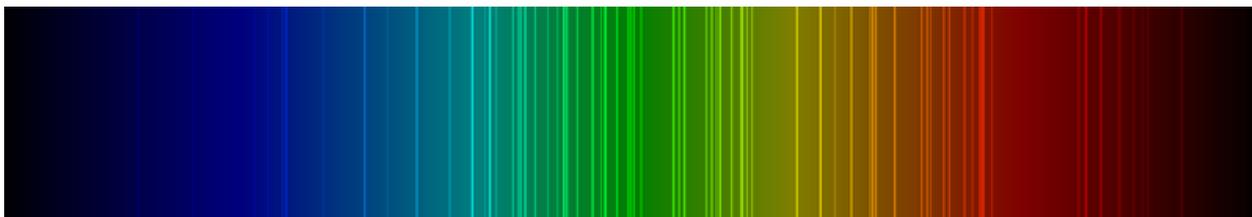
Наземная астрометрия оказалась слишком неточной для поиска планет даже у ближайших звёзд. К 80-м годам XX века в астрономическом сообществе сложился глубокий скептицизм к перспективам подобных исследований. всю область стали считать чуть ли не псевдонаукой. Как вспоминал Пол Батлер (R. Paul Butler), впоследствии один из пионеров направления и один из самых результативных исследователей, в 80-е лучше было вслух не заговаривать о том, что занимаешься поисками экзопланет – в ответ "вам могли рассмеяться в лицо или медленно отойти в сторону, как если бы вы проповедовали

религию нью-эйдж или инопланетную теорию заговора." По словам его коллеги Джеффри Марси (Geoffrey Marcy), "существовало буквально кладбище с множеством надгробий планет, по ошибке вызванных к жизни, а потом похороненных".

Нужны были новые методы. Получение прямых изображений исключалось, не столько из-за малой яркости планет – лучшие телескопы могли бы их засечь – сколько из-за огромного контраста с родительскими звёздами, которые попросту затмевали своим сиянием тусклый блеск планет. Альтернативой астрометрии мог послужить метод, тоже основанный на фиксации возмущений в движении звезды. Он отличался тем, что фиксировались не отклонения положения звезды на небесной сфере, а изменения ее скорости. Звезда вращается вокруг общего центра масс с планетой с орбитальной скоростью тем большей, чем больше орбитальная скорость самой планеты и чем меньше отношение масс звезды и планеты. Радиальную составляющую этой скорости можно зафиксировать, изучив колебания доплеровского смещения спектральных линий в спектре звезды. Поэтому способ назван методом Доплера, или методом радиальных (лучевых) скоростей, сокращённо RV, от "radial velocities".

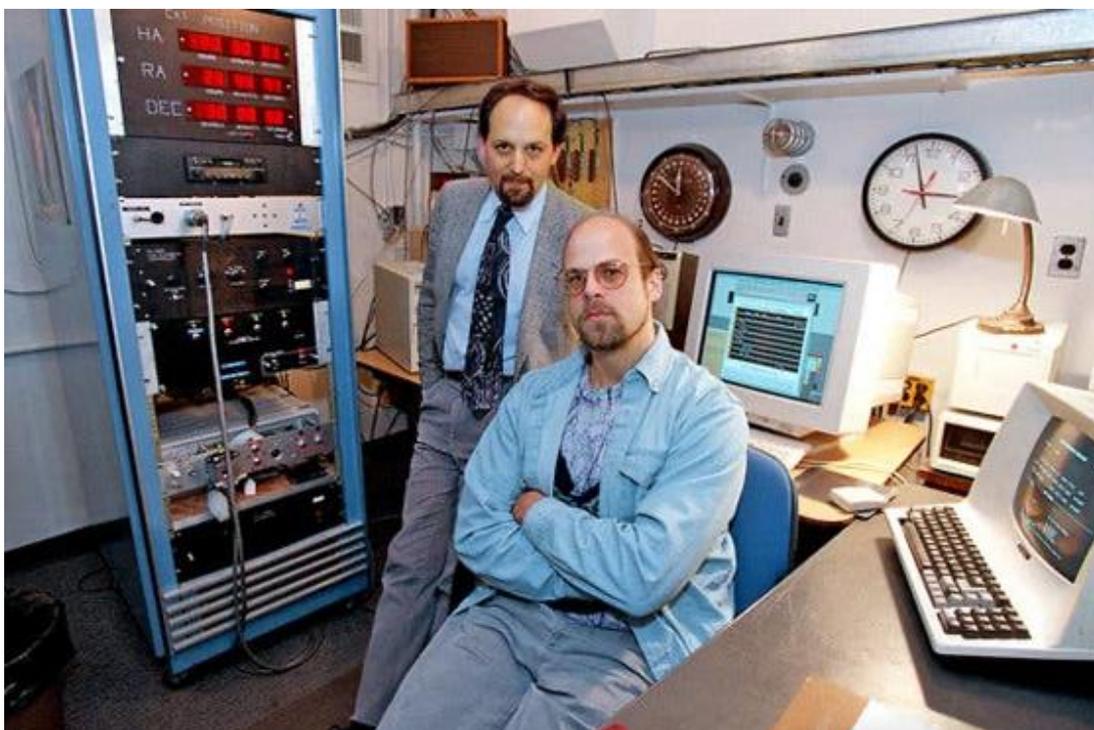
Юпитер, двигаясь по орбите со скоростью 13 км/с, вынуждает Солнце обращаться вокруг общего центра масс со скоростью 12.5 м/с. В 70-е годы XX века инструменты обеспечивали точность измерений в лучшем случае 300 м/с. Цель казалась недостижимой. Тем не менее в конце 70-х канадские астрономы Брюс Кэмпбелл (Bruce Campbell) и Гордон Уолкер (Gordon Walker) разработали принципиально новую методику, поместив ячейку, заполненную газом (в их случае – крайне опасным фтористым водородом HF) перед спектрометром. Смещённые эффектом Доплера спектральные линии поглощения звёздного света, собранного телескопом, накладывались на фиксированные линии поглощения газа, и их можно было сравнивать с высокой точностью. Кэмпбелл с Уолкером добились невероятной для своего времени точности 10-15 м/с. Ведя наблюдение за двумя десятками звёзд, к 1988 они обнаружили у двойной звезды Гамма Цефея колебания с амплитудой 25 м/с, которые могла вызывать планета-гигант массой около 2 М<sub>J</sub> и периодом 2.5 года. Но превышение сигнала над шумом оставалось невысоким. В 1992 исследователи отказались от своей интерпретации, посчитав более вероятной причиной периодические пульсации центральной звезды – оранжевого субгиганта, сходящего с главной последовательности. В том же году канадцы прекратили поиски планет. Десять лет спустя другой научный коллектив подтвердил планетную природу сигнала. Таким образом, [гамму Цефея Ab](#) можно считать первой обнаруженной экзопланетой – но, увы, подтверждённой только задним числом.

Поиски продолжались. Группа исследователей под руководством Дэвида Лэтема (David Latham) по предложению израильского астронома Цеви Мазеха (Tsevi Mazeh) занялась поиском планет-гигантов с короткими периодами обращения – идея по тем временам довольно безумная. Тем не менее в 1988 году им удалось обнаружить сильные доплеровские колебания солнцеподобной звезды *HD 114762* с периодом 84 суток и амплитудой примерно 600 м/с. Вызывать их могла крупная планета массой 11 М<sub>J</sub>. Это меньше предела термоядерного горения дейтерия в 13 М<sub>J</sub>, выше которого объекты классифицируют как коричневые карлики. Тем не менее исследователи были осторожны. Измеренная скорость была лишь радиальной составляющей полной скорости; в зависимости от угла наклона орбиты к лучу зрения истинная масса объекта могла быть заметно выше. К тому же у орбиты был огромный эксцентриситет – больше 0.5 – то есть она была сильно вытянута и больше похожа на орбиту двойной звезды, а не планеты. Поэтому в публикации говорилось лишь о "возможном коричневом карлике". Осторожность оправдалась спустя 30 лет: в 2019 орбитальная астрометрическая обсерватория [Gaia](#) смогла измерить наклон орбиты – всего лишь 6° – и истинную массу объекта: 107 М<sub>J</sub>. Таким образом, кандидат у звезды HD 114762 оказался даже не коричневым, а маломассивным красным карликом.



Спектральные линии йода [4]

В 1986 доцент Государственного университета Сан-Франциско Джеффри Марси и магистр Пол Батлер нашли новый способ, которым можно было повысить точность доплеровской спектроскопии. Они взяли за основу метод Кэмбелла и Уолкера, но Батлер, имеющий степень бакалавра по химии, решил отказаться от опасного фтороводорода. После долгого поиска вариантов он остановился на молекулярном йоде. Пары йода были безопаснее, проще в обращении и давали настоящий "частотный" линий поглощения в видимом диапазоне, что повышало точность наблюдений, но сильно затрудняло при этом анализ данных. В июне 1987 камера с йодом была установлена в Ликской обсерватории на спектрометре Гамильтона, разработанном научным руководителем Марси Стивом Вогтом (Steven S. Vogt), и поиски начались. Быстро удалось получить чувствительность в 5 м/с, но только в течение ночи наблюдений. Разброс между ночами доходил до 100 м/с. понадобилось пять лет, чтобы довести точность до 15-20 м/с. Но калифорнийцы хотели снизить погрешность ещё хотя бы втрое – ведь канадская команда с их средней точностью в 13 м/с не смогла за 12 лет найти ни одной планеты. Батлер продолжал совершенствовать программы обработки наблюдений, а Вогт в это время улучшил конструкцию своего спектрометра. Наконец, к 1995 году команда добилась беспрецедентного уровня в 3 м/с. Но возникала ещё одна проблема – для анализа накопленных данных нужны были годы программной обработки (5 минут наблюдений, по воспоминаниям Батлера, требовали 6 часов компьютерного времени, а компьютеров у них было всего два). Тем не менее исследователи не торопились. Ведь планеты-гиганты, судя по единственному на тот момент примеру Солнечной системы, движутся по своим орбитам годами.



Джеффри Марси и Пол Батлер в Ликской обсерватории [5]

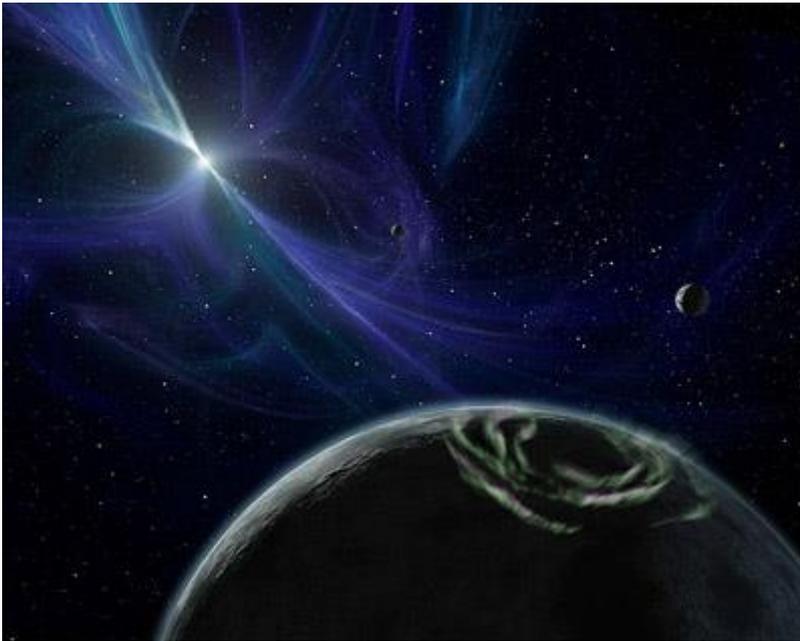
## Первые планеты... у звёзд?

В 1990 польско-американский астроном Александр Вольшчан ([Aleksander Wolszczan](#)) воспользовался временно освободившимся из-за ремонта радиотелескопом Аресибо, чтобы заняться поиском пульсаров. Как известно, эти нейтронные звёзды – компактные остатки сверхновых – испускают вдоль оси своего магнитного поля мощное электромагнитное излучение. Магнитная ось может не совпадать с осью вращения, и если конус излучения задевает Землю, мы видим периодические импульсы, в том числе в радиодиапазоне. Вольшчан обнаружил пульсар [PSR B1257+12](#) с периодом 6.2 миллисекунды (т.е. тот совершал 161 оборот в секунду). Сам по себе этот пульсар был ничем не примечателен, но его период почему-то немного колебался со временем. Вместе со своим коллегой Дейлом Фрейлом (Dale Frail), который независимо подтвердил аномалию, учёные пришли к заключению, что вокруг пульсара вращаются две планеты с периодами 67 и 98 суток и массами всего лишь в 3 земные ( $M_E$ ) каждая! Такой невероятный результат стал возможен, потому что возмущения в движении пульсара приводят к своего рода аналогу эффекта Доплера, влияющему не на длину волны, а на периодичность самого сигнала. Изменение временных промежутков между импульсами можно измерить с очень высокой точностью. Метод называют методом тайминга пульсаций.

Всё это было настолько необычно, что астрономы придержали публикацию открытия для перепроверки данных. И потеряли первенство: в июле 1991 в Nature вышла статья об открытии первой планеты у нейтронной звезды. Эндрю Лин ([Andrew G. Lyne](#)) с коллегами обнаружил 6-месячную периодичность в движении пульсара PSR 1829-10, которую можно было объяснить влиянием планеты массой 10 земных. Позже, готовясь к докладу на Американской астрономической конференции, Лин к своему ужасу обнаружил, что не учёл правильно влияние движения Земли. После пересчёта полугодовая аномалия "испарилась". На выступлении Лин признал свою ошибку и объяснил её причину, после чего зал под впечатлением от проявленной научной честности устроил учёному минутную стоячую овацию.

Лин спас свою научную репутацию, отрёкшись от собственного открытия, однако планеты Вольшчана и Фрейла не собирались никуда исчезать. В январе 1992 исследователи опубликовали статью об открытии в Nature. Спутники стали первыми надёжно обнаруженными экзопланетами. Тем не менее их обычно упоминают с оговорками: да, первые, но... Всё-таки нейтронную звезду, вокруг которой они вращаются, звездой как таковой едва ли можно назвать. Да и механизмы формирования этих планет непонятны. Они не могли пережить взрыв сверхновой и должны были образоваться позже из вторичного диска. Но почему только у одного известного пульсара? Систем, подобных *PSR B1257+12*, больше обнаружено не было. В 1994 удалось зафиксировать взаимные возмущения, которые оказывали друг на друга обе планеты, а также выявить сигнал от третьего, совсем маленького объекта массой немногим больше Луны! Он остаётся самой лёгкой из известных экзопланет.

В 2015 году Международный астрономический союз запустил проект NameExoWorlds, в котором все желающие могли предложить и проголосовать за названия выбранных экзопланет. Для загадочной системы *PSR B1257+12* были выбраны имена потусторонних существ: Лич (сам пульсар), Драуг, Полтергейст и Фобетор.



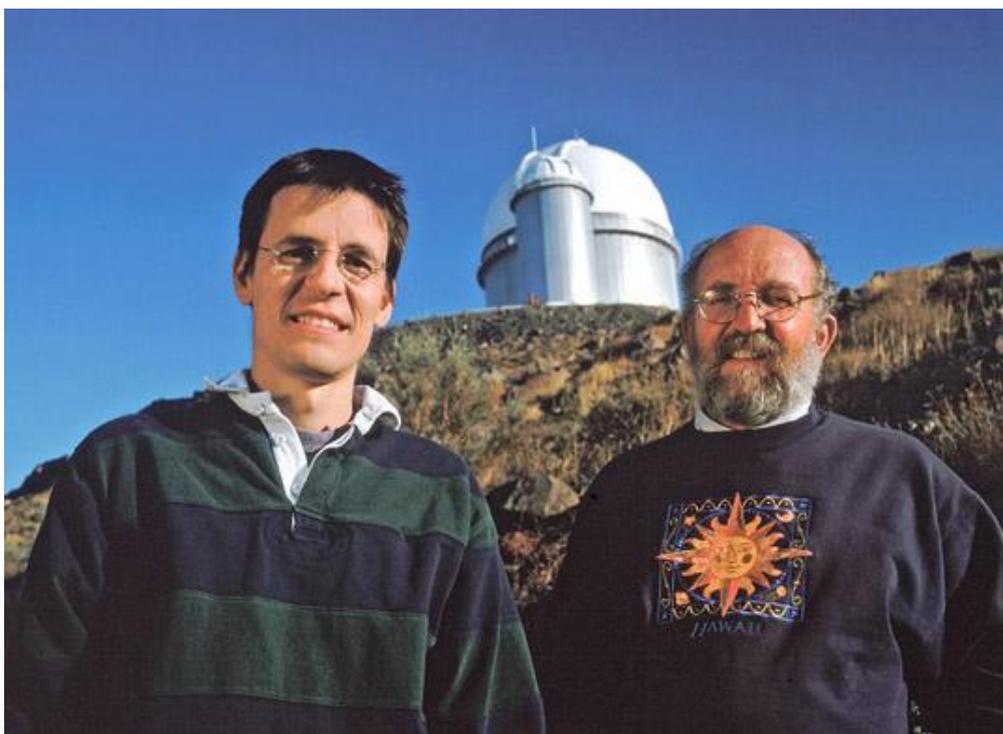
Планеты у пульсара PSR B1257+12 в представлении художника [6]

Планета продолжает обращаться вокруг обоих звёздных останков с периодом в  $\sim 100$  лет.

В 1993 несколько исследователей заподозрили наличие планеты-гиганта в системе [PSR B1620-26 AB](#), состоящей из пульсара и белого карлика. Подтверждена планета была только спустя десять лет. Из-за возраста системы, сравнимого с возрастом Вселенной – 12.2 миллиарда лет – планету неофициально назвали [Мафусаил](#). Считается, что изначально Мафусаил сформировался у обычной звезды типа Солнца, которую позже захватила двойная система пульсара, причём второй компонент из системы был выкинут. Родительская звезда через некоторое время, пройдя стадию красного гиганта, превратилась в белый карлик.

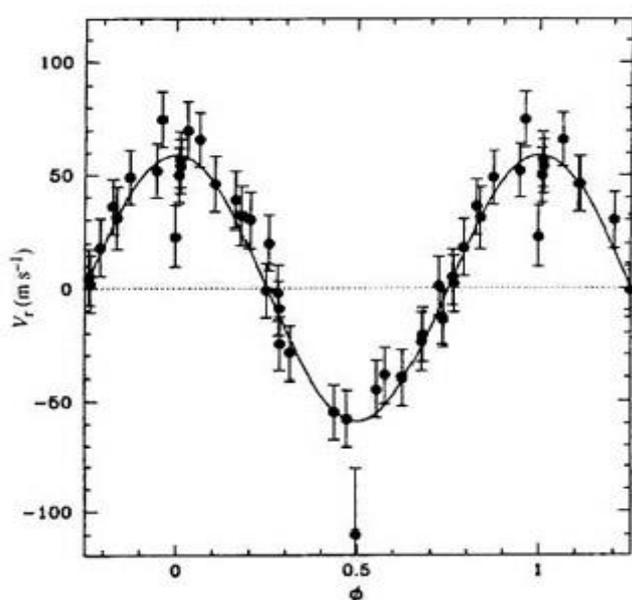
## Нобелевское открытие

Между тем доплеровская спектрография привлекала к себе всё больше внимания. К поискам подключился швейцарский астроном Мишель Майор ([Michel Mayor](#)). Он пользовался доплеровской спектрометрией для поиска коричневых карликов – правда, безуспешно. В конце 80-х к нему обратился Лэтем с просьбой подтвердить только что обнаруженную *HD 114762 b*, и Майор стал одним из соавторов статьи об открытии объекта. Это событие подтолкнуло его к мысли создать собственный спектрограф [ELODIE](#) в обсерватории Верхнего Прованса. К 1993 году Майору с коллегами удалось добиться точности в 13 м/с, то есть выйти на тот же уровень, что был в своё время у канадцев и которого смогла достичь к тому моменту калифорнийская группа. Но у Майора было преимущество – он воспользовался более простым методом. Вместо того, чтобы пропускать свет через ячейку, заполненную токсичным фтороводородом или трудными для анализа парами йода, он использовал отдельный оптоволоконный кабель, по которому на спектрометр поступал свет от торий-аргоновой лампы. Такой метод заметно упрощал работу и обработку результатов, хотя точность и не позволяла обнаруживать аналоги Юпитера. Но Майор к этому и не стремился.



Дидье Кело и Мишель Майор в обсерватории Ла Силья [7]

В начале 1994 года Майор вместе со своим аспирантом Дидье Келó (Didier Queloz) начал поиски субзвёздных компаньонов у 142 звёзд солнечного типа. Уже осенью Кело обратил внимание на жёлтый карлик [51 Пегаса](#), лучевая скорость которого колебалась с периодом 4.23 суток. Амплитуда составляла около 60 м/с, и в этом заключалась странность – по расчётам получалось, что отклонения с таким малым периодом вызывает объект массой в половину Юпитера! Чтобы исключить ошибку, Майор с Кело проверили и исключили все альтернативные возможности – пульсацию звезды, звёздные пятна, наконец, инструментальные ошибки. Весной Пегас восходит днём, и астрономам пришлось ждать до лета 1995 года, чтобы возобновить наблюдения. Скорость звезды продолжала меняться с тем же ритмом.



Измерения лучевой скорости 51 Пегаса, полученные на спектрометре ELODIE в 1995 году и свернутые с орбитальным периодом планеты, равным 4.23 суток [8]

Оставалось последнее альтернативное планетному объяснение – расположение орбиты объекта "плашмя" к лучу зрения. Но вероятность этого была очень мала – 1% на то, что реальная масса *51 Пегаса b*, как назвали компаньон, превышала 4  $M_j$ , и 1 к 40 000 на то, что это был красный карлик. В конце концов, убедившись, что планетная гипотеза – единственное объяснение, астрономы отправили статью в журнал *Nature* и в октябре 1995 года объявили о новой планете на конференции во Флоренции. В 2019 году Майору и Кело была присуждена Нобелевская премия по физике "за открытие экзопланеты на орбите солнцеподобной звезды".

## Планеты-гиганты на любой вкус

Для Марси с Батлером, уже несколько лет посвятивших поиску экзопланет, открытие *51 Пегаса b* стало ушатом холодной воды. Сразу после анонса планеты они пронаблюдали звезду на Ликской обсерватории четыре ночи подряд. RV-сигнал в точности совпал с данными швейцарцев. Батлер немедленно начал анализировать накопленные за восемь лет данные, благо теперь в его распоряжение выделили достаточно компьютерного времени. В январе 1996 калифорнийская команда объявила об открытии двух новых экзопланет – [70 Девы b](#) и [47 Большой Медведицы b](#).

*70 Девы b* немного напоминала *HD 114762 b* – очень массивный гигант (7.5 Mj) на короткой – всего 117 суток – и вытянутой орбите. В отличие от Лэтема, однако, Марси с Батлером не сомневались в планетной природе открытого ими объекта – *51 Пегаса b* перевернула все ожидания от внесолнечных планет, и теперь экзотические орбиты уже не смущали исследователей.

*47 Большой Медведицы b*, напротив, оказалась планетой-гигантом, которую вполне нормально восприняли бы, открой её кто-нибудь в 80-е годы. Несколько массивнее Юпитера, но на вполне "пристойной" трёхлетней и, главное, практически круговой орбите. Интересно, что первые три открытые экзопланеты представляли три типа, на которые и сейчас можно разделить известные планеты-гиганты – горячие юпитеры, "эксцентрические гиганты" и аналоги Юпитера.



Вид на 47 Большой Медведицы b со спутника в представлении художника [9]

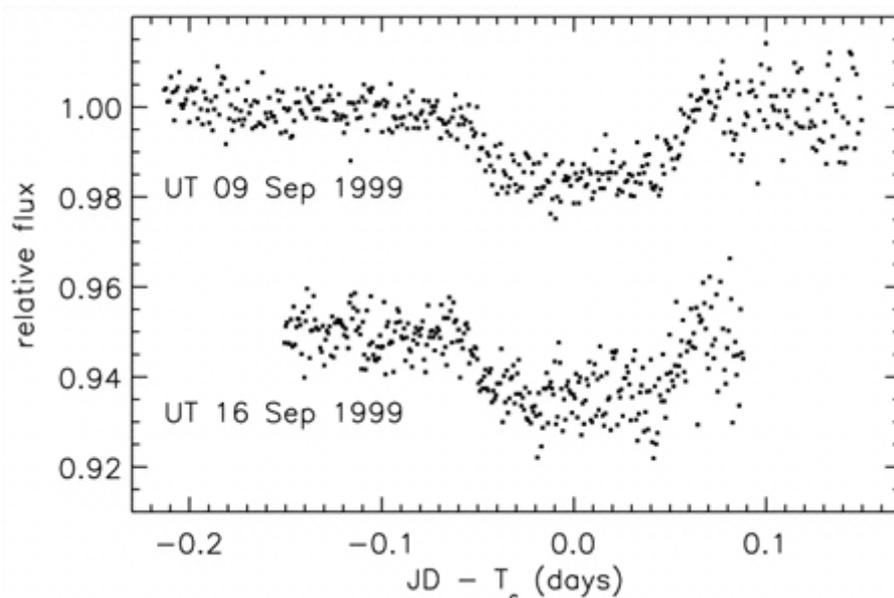
Калифорнийская команда навёрстывала упущенное. В их данных уже сидели экзопланеты, пропущенные из-за сложностей анализа и веры в типичность Солнечной системы. В 1996 было объявлено ещё о трёх новых планетах "типа 51 Пегаса": [55 Рака b](#), [Тай Волопаса b](#) и [Ипсилон Андромеды b](#). Кроме того, независимо в Ликской обсерватории и обсерватории Макдональда в Техасе был открыт второй "эксцентрический гигант": [16 Лебедя B b](#) с периодом 800 суток и массой 1.5Mj. Двойное "B b" в названии означает, что планета *b* вращается вокруг компонента двойной звезды. Таким образом, была доказана возможность существования планет у двойных звёзд (отвергнутую первооткрывателями *Гамму Цефея A b* подтвердят только через шесть лет).

В следующие несколько лет каталог экзопланет стремительно пополнялся, в основном за счёт горячих юпитеров и эксцентрических гигантов. В 1998 была обнаружена первая

планета у красного карлика – [Gliese 876 b](#). В 1999 объявлено об открытии у Ипсилон Андромеды многопланетной системы – помимо горячего юпитера, у неё нашли две планеты-гиганта на эксцентрических орбитах с периодами 8 месяцев и 3.5 года.

Несмотря на явный успех доплеровского метода, звучали и сомнения. Смещение спектральных линий *51 Пегаса b*, которую раньше ошибочно классифицировали как переменную, пытались объяснить пульсацией звезды. Хотя эти возражения довольно быстро опровергли, они намекали на слабое место в методе лучевых скоростей. Сигнал, вызываемый движением горячего юпитера, достаточно силён, чтобы однозначно утверждать о его планетной природе. Но более слабые сигналы от лёгких планет, с низким отношением сигнала к шуму, легко спутать с периодичностями, связанными с вращением самой звезды. В полной мере эта проблема проявится в последующие десятилетия.

Между тем окончательно любые сомнения развеяло открытие, совершённое осенью 1999. Две группы исследователей независимо друг от друга выявили периодические падения яркости у звезды HD 209458. Звезда была выбрана неслучайно – у неё обнаружили, хотя и не успели опубликовать к тому моменту, очередной горячий юпитер. Эпизоды падения яркости (на 1.7%) в точности соответствовали времени прохождения планеты между звездой и земным наблюдателем. Таким образом родился ещё один – и весьма перспективный – метод обнаружения планет: транзитный, или метод прохождений. Помимо независимого подтверждения реальности планеты, методика позволяла определить её радиус и, через известную массу, среднюю плотность. По плотности можно было делать уже и осторожные предположения о химическом составе. Например, у [HD 209458 b](#) масса составляла 0.7 Mj, а радиус – 1.35 Rj. Отсюда несложно было оценить плотность планеты – всего лишь 0.4 г/куб.см, то есть меньше плотности Сатурна! Таким образом, *HD 209458 b* (неофициально названная Озирисом) представляла собой типичный газовый гигант, раздутый нагревом близкой звезды.



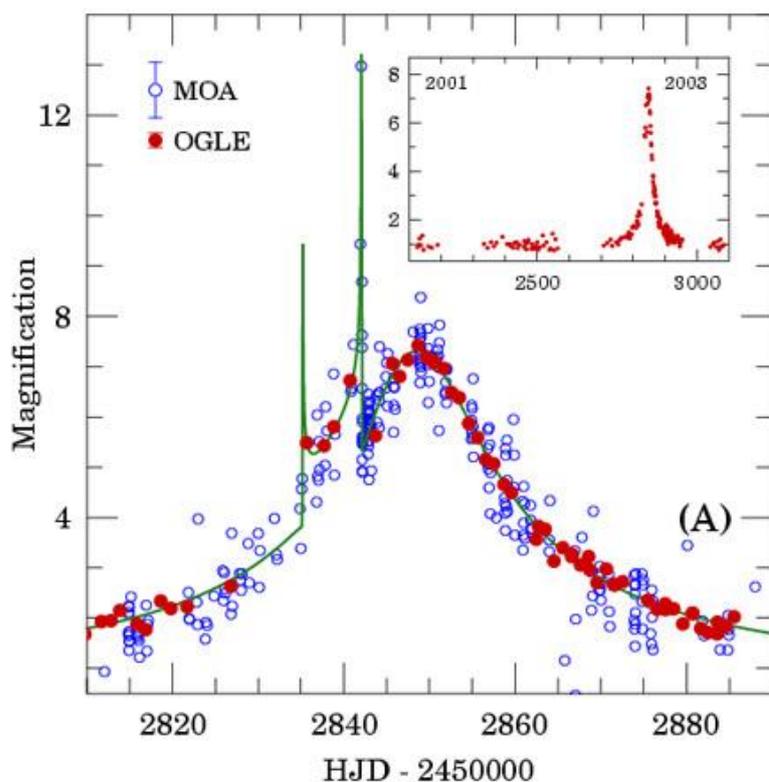
Кривые блеска звезды HD 209458 во время транзитов планеты в сентябре 1999 [[10](#)]

Транзитный метод быстро завоевал популярность. Горячие юпитеры были для него идеальной мишенью. Транзиты, разумеется, возможны не у каждой экзопланеты – для этого орбита должна быть расположена почти "ребром" к наблюдателю, что не слишком вероятно. Но для планеты с типичной для горячих юпитеров орбитой радиусом 0.05 а.е. у звезды, похожей на Солнце, вероятность нужной конфигурации около 10%. Не требовалось и дорогостоящее оборудование – группа под руководством Дэвида Шарбонно ([David Charbonneau](#)) вела наблюдения за Озирисом на самодельном телескопе, который установили на автомобильной парковке. В 2000-е годы заработали проекты [WASP](#) (Wide Angle Search for Planets), [HATNet](#) (Hungarian Automated Telescope Network), [TrES](#) (Trans-

Atlantic Exoplanet Survey). К поискам транзитов подключился запущенный в 1992 польско-американский [OGLE](#) (Optical Gravitational Lensing Experiment), специализировавшийся на поисках тёмной материи методом гравитационного линзирования.

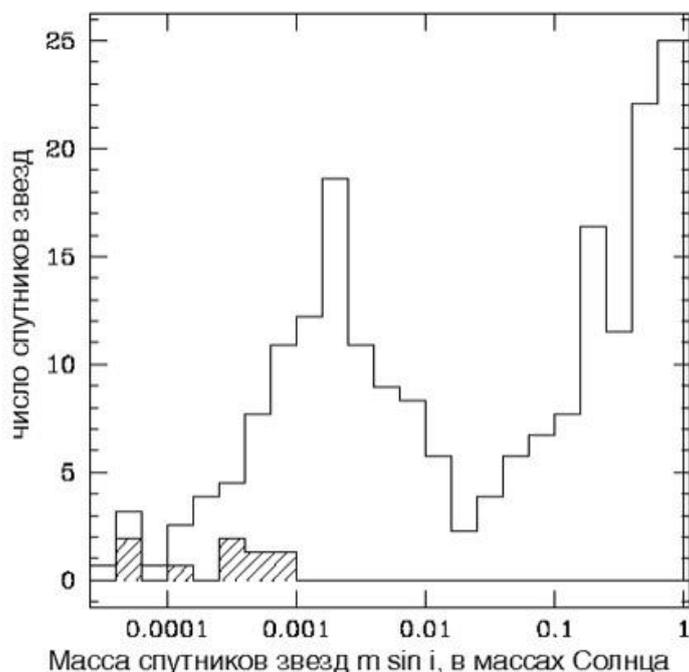
Помимо определения плотности планеты, транзитный метод таил в себе ещё две перспективные возможности. При транзите лучи звезды проходят через атмосферу планеты и избирательно поглощаются содержащимися в ней газами. Это приводит к изменению видимого радиуса планеты при наблюдениях в лучах с разной длиной волны, что можно измерить. В 2001 таким методом в атмосфере Озириса был обнаружен натрий – один из самых "заметных" своими линиями поглощения элемент. Вторая возможность заключалась в том, что планеты, как и затменные двойные, совершают вторичные затмения, проходя за диском родительской звезды. Их блеск, равный разнице между наблюдаемым блеском всей системы непосредственно перед и во время затмения, конечно, гораздо слабее звёздного, но его можно измерить, прежде всего, в ИК-диапазоне. Таким образом определяется температура дневного полушария планеты и её альbedo (отражательная способность). В 2005 вторичные затмения выявили сразу у двух горячих юпитеров - Озириса и недавно открытого [TrES-1 b](#). Температуры, как и ожидалось, были высокими - 1060 и 1130 К. Озирис, как показали наблюдения на "Хаббле", оказался окружён протяжённой газовой оболочкой, состоящей прежде всего из водорода, который тот теряет с темпом в несколько тысяч тонн в секунду. Правда, даже за миллиарды лет это может привести к потере лишь нескольких процентов массы планеты.

В 2004 упомянутый проект OGLE в соавторстве с японско-новозеландским [MOA](#) (Microlensing Observations in Astrophysics) обнаружил первую экзопланету методом микролинзирования. Гравитационной линзой послужила звезда с обозначением OGLE-2003-BLG-235L (или MOA-2003-BLG-53L). Эта звезда спектрального класса K расположена ни много ни мало в 19 000 световых годах от нас. Источником стала фоновая звезда на ещё большем удалении от Солнца. Её свет был сфокусирован звездой-линзой, но перед достижением пика дополнительно – и дважды – усилен, на этот раз кратковременно, каким-то лёгким объектом, расположенным неподалёку от OGLE-2003-BLG-235L. Расчёты показали, что эффект должна была вызвать планета массой 2.6 Mj на расстоянии (в проекции на небесную сферу) 4.3 а.е. от звезды, что сравнимо с расстоянием от Солнца до Юпитера. Надо сказать, что все оценки параметров планет, открытых методом микролинзирования, очень приблизительны, а последующие наблюдения практически исключены. Поэтому метод полезен в первую очередь для накопления статистики.



Событие гравитационного микролинзирования OGLE-2003-BLG-235L/ MOA-2003-BLG-53L. Зелёным цветом показаны усиления блеска фоновой звезды, вызванные планетой-линзой [11]

К началу 21 века число опубликованных экзопланет-гигантов исчислялось уже десятками. Планеты находили не только у звёзд главной последовательности, но и у гигантов, таких как [Поллукс](#). Можно было подводить предварительные итоги. Прежде всего, планеты явно выделялись в отдельную популяцию, отличную от звёздных компаньонов в двойных или кратных системах. В промежуточном между звёздным и планетным диапазоне масс от 20 до 60 М<sub>J</sub> спутников у звёзд почти не было. Этот феномен назвали "пустыней коричневых карликов".



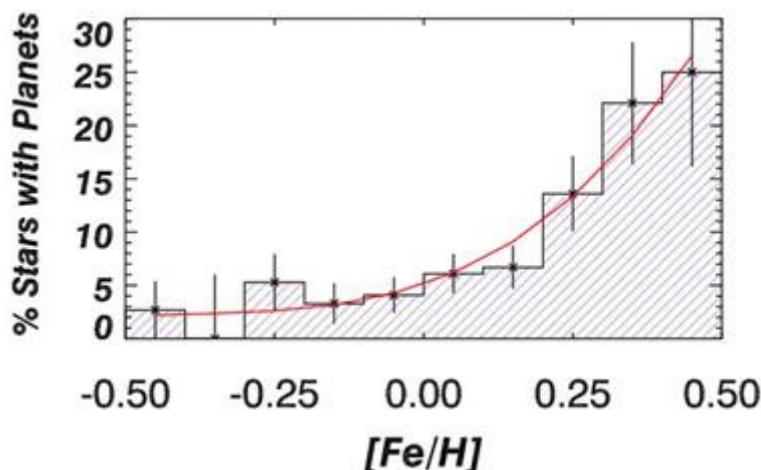
Распределение спутников звёзд по минимальным массам ( $m \sin i$ ) по данным 2005 года (шкала логарифмическая) [12]

Горячие юпитеры, как из рога изобилия посыпавшиеся на первооткрывателей, оказались на самом деле довольно редким типом планет. Они встречались лишь у примерно 1% звёзд типа Солнца, у красных же карликов на тот момент не удалось обнаружить ни одного. Их происхождение объясняли двумя конкурирующими теориями: миграцией новорожденной планеты из-за взаимодействия с протопланетным диском или взаимными возмущениями между молодыми планетами-гигантами. В последнем случае одна из планет могла переходить на сильно вытянутую орбиту с низким перигелием, апоцентр которой постепенно уменьшался из-за приливных взаимодействий, пока орбита не становилась полностью круговой. Внешние планеты в этом сценарии могли оставаться на возмущённых, сильно вытянутых орбитах, как в системе Иpsilon Андромеды, либо вообще выбрасывались за пределы планетной системы в межзвёздное пространство.

"Тёплые" юпитеры (с температурным режимом, соответствующим области нашей системы внутри Главного пояса астероидов) встречались чаще горячих — у нескольких процентов звёзд типа Солнца. Что касается более долгопериодичных и более "правильных" с точки зрения Солнечной системы гигантов, то их открывали мало в силу наблюдательных ограничений: для выявления таких планет требовались долгие годы наблюдений. При этом и у "тёплых", и у "холодных" гигантов орбиты были, как правило, заметно вытянуты (с эксцентриситетом  $e > 0.1$ ), что отличало их от почти круговой орбиты Юпитера ( $e = 0.05$ ). Это вызывало сомнения в типичности Солнечной системы. Впрочем, в некоторых случаях RV-сигнал, интерпретируемый как одна планета на вытянутой орбите, мог быть суперпозицией RV-сигналов двух планет на круговых орбитах.

Наконец, планеты-гиганты, особенно горячие юпитеры, находили чаще у звёзд с высоким содержанием тяжёлых элементов (металличностью). На первый взгляд, это противоречит здравому смыслу: ведь газовые гиганты состоят, по определению, в основном из газа! Но, согласно теории последовательной аккреции (ее еще называют теорией аккреции на ядро), сначала в богатом газом протопланетном диске формируется твёрдое ядро из пыли и льдов (планетный эмбрион). После достижения критической массы (около 10  $M_e$ ) это ядро начинает неудержимо аккрецировать водород и гелий, очень быстро превращаясь в газовый гигант. Поэтому противоречие на самом деле мнимое: чем больше тяжёлых элементов в протопланетном диске — тем быстрее растут ядра будущих гигантов, и тем больше газа они могут захватить впоследствии.

Горячие юпитеры, как из рога изобилия посыпавшиеся на первооткрывателей, оказались на самом деле довольно редким типом планет. Они встречались лишь у примерно 1% звёзд типа Солнца, у красных же карликов на тот момент не удалось обнаружить ни одного. Их происхождение объясняли двумя конкурирующими теориями: миграцией новорожденной планеты из-за взаимодействия с протопланетным диском или взаимными возмущениями между молодыми планетами-гигантами. В последнем случае одна из планет могла переходить на сильно вытянутую орбиту с низким перигелием, апоцентр которой постепенно уменьшался из-за приливных взаимодействий, пока орбита не становилась полностью круговой. Внешние планеты в этом сценарии могли оставаться на возмущённых, сильно вытянутых орбитах, как в системе Иpsilon Андромеды, либо вообще выбрасывались за пределы планетной системы в межзвёздное пространство.



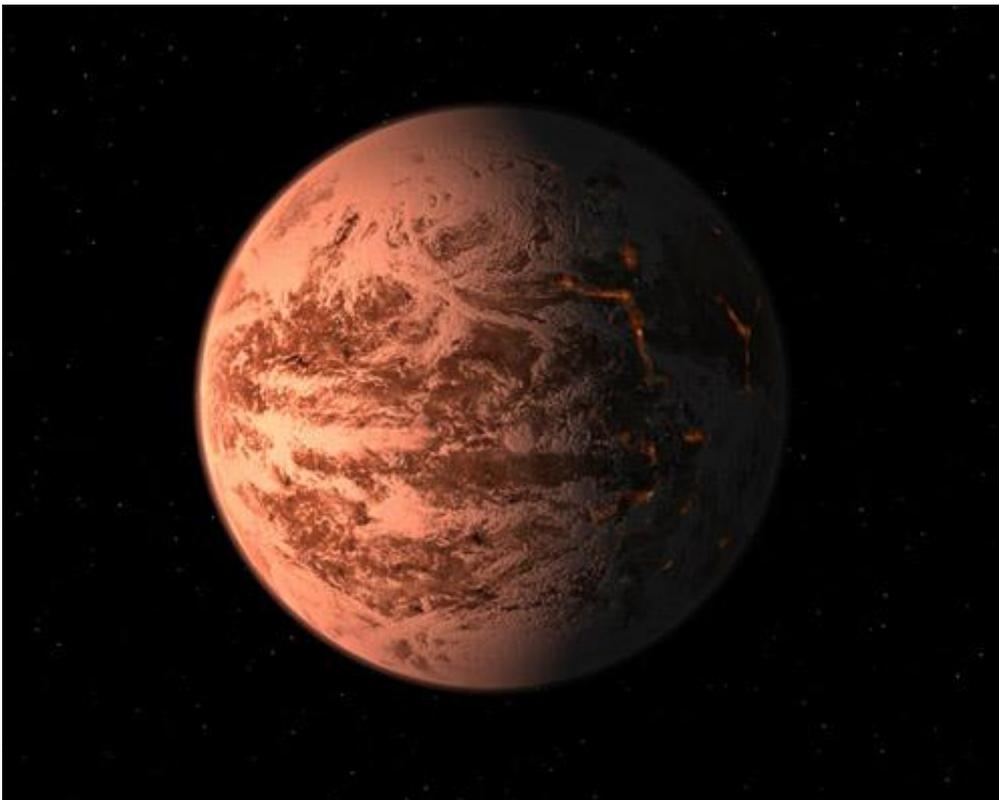
Зависимость количества планет-гигантов от металличности  $[Fe/H]$  (логарифма отношения количества железа к водороду относительно той же величины на Солнце) их родительских звезд. Данные 2005 года [13]

### Всё легче и легче

По мере того, как совершенствовались методы наблюдения, снижалась и планка доступных планетных масс. К 2000 году исследователи экзопланет добрались до "сатурнов", таких как [79 Кита b](#), а в 2002 открыли [HD 49674 b](#) с массой всего лишь 10% массы Юпитера. Однако настоящий прорыв произошёл в августе 2004 года, когда было объявлено об открытии сразу трёх планет с массами, близкими к массам Урана и Нептуна. Первыми это сделали европейские астрономы, анонсировавшие экзопланету с массой в 14 земных у жёлтого карлика [Мю Жертвенника](#). Планета обращалась с периодом 10 суток – несколько большим, чем у типичного горячего юпитера. Несмотря на высокую орбитальную скорость, амплитуда "раскачивания" самой звезды составляла всего 4 м/с. Такой слабый сигнал удалось поймать благодаря введённому в строй двумя годами ранее спектрометру [HARPS](#). Он был установлен на 3.6-метровом телескопе в европейской обсерватории Ла Силья в чилийских Андах и обеспечивал фантастическую на тот момент точность в 1 м/с.

Не обладая столь высокоточной аппаратурой, американские астрономы тем не менее тоже имели на примете две "лёгкие" планеты, о которых поспешили объявить вскоре после публикации европейских коллег. Вокруг красного карлика [Gliese 436](#) обращалась с периодом 2.6 суток планета массой 18 земных. Стоит отметить, что это был второй красный карлик, рядом с которым удалось обнаружить экзопланету, что косвенно свидетельствовало о редкости газовых гигантов у этого типа звезд. [55 Пака e](#) оказался ещё одним "горячим нептунном" со схожими параметрами, кроме того, он стал четвёртой известной планетой в системе жёлтого карлика 55 Пака.

В 2005 к списку добавилось ещё несколько новинок: [Gliese 581 b](#), [Gliese 777A c](#), [HD 4308 b](#). У красного карлика Gliese 876, в дополнение к двум известным газовым гигантам, захваченным во взаимный орбитальный резонанс 1:2 с периодами один и два месяца, нашли планету с массой всего лишь 6 земных и периодом обращения 2 суток. Естественно, возник вопрос о составе такой "суперземли": была ли она "землеподобной" в том смысле, что обладала твёрдой поверхностью, или всё же удерживала довольно плотную водородно-гелиевую атмосферу, как Уран и Нептун? Без информации о радиусе – транзитов обнаружено не было – что-либо определённое сказать было невозможно.



Gliese 876 d в представлении художника [14]

В начале 2006 об открытии "суперземли" совместно сообщили три проекта, занимающиеся поисками гравитационных линз: уже упоминавшиеся OGLE и MOA и международный [PLANET/Robonet](#). Как и в случае OGLE-2003-BLG-235L, усиление блеска звезды-источника сопровождалось более слабым пиком, вызванным планетой вблизи звезды-линзы [OGLE-2005-BLG-390L](#) – красного карлика, удалённого на 20 000 световых лет. Массу планеты оценили (приблизительно) в 5.5 земных, а радиус орбиты – в 2-4 а.е. И как и в случае с *Gliese 876 d*, невозможно было выяснить, действительно ли это "суперземля" или, учитывая очень низкие температуры вдали от тусклой родительской звезды, скорее лёгкий аналог Урана.

Немного прояснило ситуацию открытие транзита у *Gliese 436 b* весной 2007 года. Несмотря на тесную орбиту и высокую температуру, параметры планеты оказались очень близки к характеристикам Урана и Нептуна – масса 22, радиус 4.3 земных, плотность 1.5 г/куб.см. И всё же вопрос относительно состава планет, чьи массы принимали промежуточное значение между массами Урана и Земли, оставался открытым.

HARPS между тем продолжал расширять пределы возможностей. В мае 2006 года европейские астрономы объявили об открытии системы из трёх "нептунов" у оранжевого карлика [HD 69830](#). Минимальные массы ( $m \sin i$ ) планет составляли 10, 12 и 18 земных, а периоды – 9, 32 и 197 суток. Кроме того, космический ИК-телескоп "[Спитцер](#)" зафиксировал тепловое излучение, испускаемое пылью на расстоянии примерно в 1 а.е. от звезды, то есть за орбитой внешней планеты *d*. Проще всего его было объяснить наличием пояса астероидов, более массивного, чем в Солнечной системе. В 2007 году HARPS обнаружил две "суперземли" у близкого – 20 световых лет – красного карлика Gliese 581 (в дополнение к уже известному горячему нептуну). Одна из этих планет, массой 5 земных, обращалась с периодом 13 суток у внутренней кромки зоны обитаемости, то есть области, в которой вода на поверхности планеты могла оставаться жидкой. Это открытие вызвало немалый фурор, но по уточнённым оценкам температурный режим *Gliese 581* скорее соответствовал температурному режиму Венеры, а не Земли. Наконец, в 2008 году команда, работающая с HARPS, представила ещё одну трёхпланетку: [HD 40307](#), где

вокруг звезды класса К вращались планеты с минимальными массами 4, 7 и 10 масс Земли и орбитальными периодами 4, 10 и 20 суток.



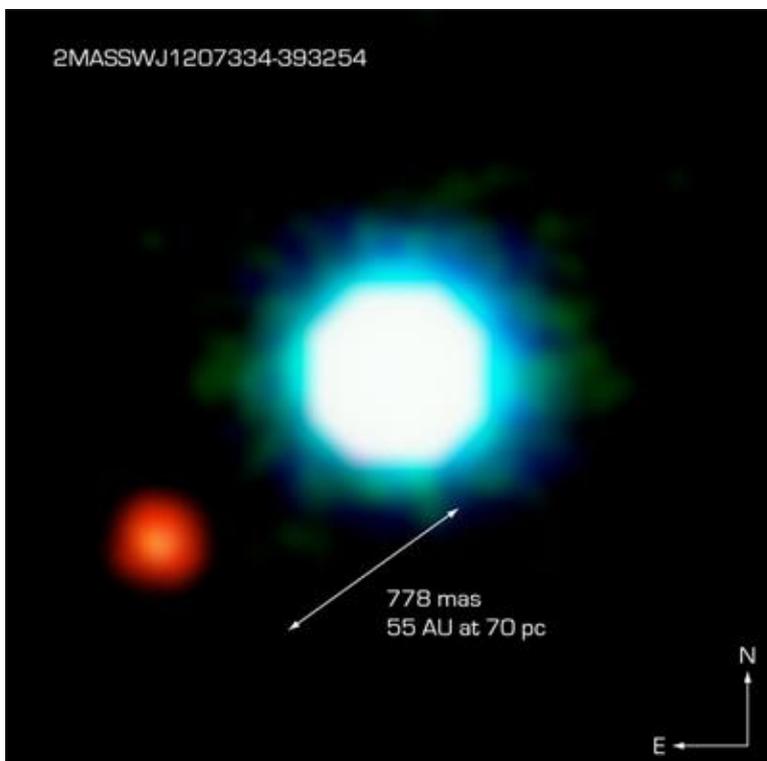
Система HD 69830 в представлении художника [15]

## Прямое изображение

2008 год стал прорывным для нового, хотя и самого очевидного из методов поиска экзопланет – прямого наблюдения. Выявить планеты по отражённому свету в видимом диапазоне – задача до сих пор непосильная, но оставался шанс увидеть новорожденные планеты. Недавно сформировавшиеся небесные тела возрастом в несколько миллионов лет нагреты достаточно, чтобы можно было зарегистрировать их тепловое излучение в инфракрасном диапазоне.

Первой обнаруженной таким способом экзопланетой считается *2M1207 b*, открытая в 2004 году. Остаётся, правда, серьёзное сомнение, можно ли считать этот объект планетой. Изображение было получено на [VLT](#) – Очень Большом Телескопе, состоящем из четырех 8,2-метровых рефлекторов и расположенном в европейской Паранальской обсерватории в чилийской пустыне Атакама. То, что Европейская Южная обсерватория, включающая и Паранальскую, и упомянутую Ла Силья, расположена в Чили, неслучайно – высокогорный и очень сухой климат обеспечивает идеальные условия для наблюдений. Угловое расстояние между планетой и звездой составляло 780 миллисекунд дуги. Учитывая, что система удалена на 53 парсека, это пересчитывалось в проективное расстояние (проекцию истинного расстояния на небесную сферу) ~40 а.е. Температура не успевшей остыть после рождения планеты была оценена в 1600 К. Исходя из температуры и возраста молодой системы – всего 5-10 млн. лет – можно было оценить массу планеты: около 3-10  $M_J$ . Казалось бы – несомненно планета, поскольку даже верхняя граница диапазона масс не превышала 13  $M_J$  – предел, при котором начинается горение дейтерия и субзвёздный объект считается коричневым карликом. Проблема заключалась в самой звезде 2M1207, которая при массе в 25  $M_J$  и представляла собой типичный, причём не очень массивный коричневый карлик. Даже нижняя оценка массы *2M1207 b* давала отношение масс около 1:10. Трудно представить механизм, по которому из протопланетного диска смог бы возникнуть настолько тяжёлый по отношению к центральному телу объект. В августе 2018 года Международный астрономический союз уточнил рабочее определение экзопланеты, по которому, во-первых, верхний предел масс не должен

превышать 13 Mj – этому требованию *2M1207 b* удовлетворяет – и, во-вторых, отношение масс с центральным объектом должно составлять не менее 1:25. А вот по этому условию *2M1207 b* планетой считать уже нельзя. Скорее, система представляет собой очень маломассивную двойную звезду, оба компонента которой образовались из протозвездного облака.



2M1207 b. Снимок сделан на VLT [16]

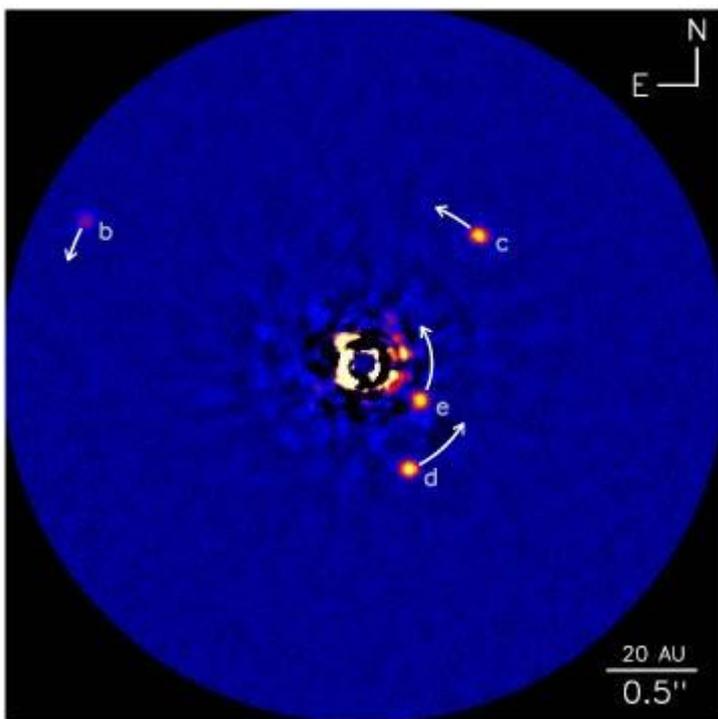
легами в сентябре статью об открытии объекта планетной массы у молодой (5 млн. лет) солнцеподобной звезды с непростым названием 1RXS J160929.1-210524. Объект был удалён от неё на 330 а.е. и нагрет до температуры 1800 К, из чего, учтя возраст звезды, авторы получили массу 6-12 Mj, то есть полностью попадающую в планетный диапазон. Правда, тот факт, что планета движется в одном со звездой направлении и действительно гравитационно связана с ней, удалось подтвердить только годом позже.

Группа из Калифорнийского университета под руководством Пола Каласа (Paul Kalas), исследуя с помощью телескопа "Хаббл" остаточные диски у молодых звезд, открыла яркий объект у внутренней кромки диска Фомальгаута – одной из самых ярких и близких звезд класса А возрастом около полумиллиарда лет. Остаточные диски, несмотря на своё название, не являются как правило остатками протопланетных дисков, их обнаруживают по излучению пыли, выбитой столкновениями малых тел в астероидных поясах. В случае Фомальгаута излучала в ИК-диапазоне пыль в местном поясе Койпера, удалённом от яркой звезды на 133 а.е. Планета же, позже названная Дагоном, располагалась в 119 а.е. от звезды. Напрашивалась аналогия, что Дагон, как Нептун в нашей системе, "пасёт" внутреннюю кромку пояса Койпера.

Открытие почти сразу затмила новая сенсация – трёхпланетная система у звезды класса А возрастом 30 млн. лет [HR 8799](#). Впечатляющие снимки трёх планет-гигантов массами 7-10 Mj были получены командой Кристиана Маруа (Christian Marois) в гавайских обсерваториях Джемани и Кека. От звезды планеты удалены на расстояния примерно в 25, 40 и 70 а.е. Исследователям даже удалось зафиксировать их орбитальное движение, подняв архивные снимки "Хаббла" за 1998 год.

Ещё одна спорная экзопланета *GQ Волка b* была открыта на том же VLT в 2005 году. Хотя соотношение масс со звездой – молодым (<2 млн. лет) оранжевым карликом в этот раз было достаточно велико, проблема заключалась в самом определении массы. Диапазон значений, которые предсказывали модели эволюции планет, оказался слишком широк: от 1 до 36 Mj. Поэтому весьма велика вероятность, что *GQ Волка b* на самом деле – коричневый карлик.

Наконец, осенью 2008 несколько научных команд практически одновременно объявили о прямом обнаружении планет сразу у четырёх звезд. Причём в одном случае речь шла о целой планетной системе! Канадский астроном Давид Лафреньер (David Lafreniere) опубликовал с кол-



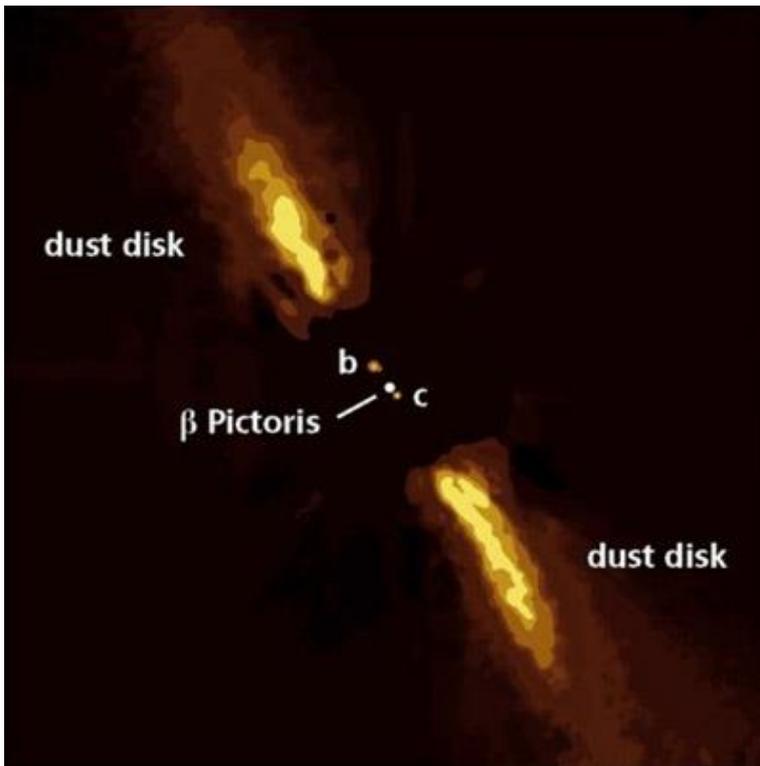
Планетная система HR 8799. Снимок получен в обсерватории Кека [17]

ной пыли на расстоянии 6.4, 16 и 30 а.е. от звезды, то есть частично совпадающее с результатами Кека. Астрономы предположили, что между двумя внутренними поясами астероидов - вероятными источниками этой пыли - обращается планета-гигант по орбите в 12 а.е. Самый внутренний пояс астероидов в этом случае становился полным аналогом пояса астероидов в нашей системе, удерживаемого гравитацией Юпитера в пределах орбитальных резонансов 1:2 и 1:4, а пояс в 16 а.е. оказался бы в резонансе 3:2 с планетой, как плутино в поясе Койпера - с Нептуном.

Наконец, французские исследователи под руководством Анн-Мари Лагранж (Anne-Marie Lagrange) получили изображение самой планеты. Для этого они проанализировали снимки, сделанные в 2003 году на VLT. Планету нашли на проективном расстоянии 8 а.е. от звезды. Учёные поспешили анонсировать своё открытие сразу после публикаций своих коллег, в ноябре 2008 года. Год спустя планету обнаружили уже с другой стороны от звезды. Поскольку система расположена почти "ребром" к земному наблюдателю, точно определить орбитальные параметры тогда не удалось. Позже стало ясно, что планета обращается на расстоянии 10 а.е., что несколько меньше предсказанного японскими астрономами.

Исследования продолжились, но других столь же впечатляющих открытий уже не последовало. В 2010 году обнаружили четвёртую, внутреннюю планету *HR 8799 e* с большой полуосью орбиты в 16 а.е., такую же массивную, как и три внешних компаньона. Интересно, что с учётом светимости родительской звезды (5 солнечных) конфигурация планет очень похожа на расположение планет-гигантов в Солнечной системе. Многолетние наблюдения позволили создать эффектную анимацию орбитального движения планет.

Завершающим штрихом стало подтверждение планеты у [Беты Живописца](#). Ещё одна молодая (23 млн. лет) и яркая звезда класса А давно привлекала внимание астрономов странной формой своего остаточного диска. К слову сказать, этот диск был первым, который удалось сфотографировать у другой звезды (на космическом ИК-телефоскопе IRAS ещё в 1984 году). В 1995 году снимки "Хаббла" показали, что внутренняя область вращается с небольшим наклоном к остальному диску. Подобное смещение могла вызывать планета-гигант. Более подробные наблюдения в обсерватории Кека на Гавайях, проведённые в 2003 году, позволили различить во внутреннем диске кольца радиусами 14, 28, 52 и 82 а.е. Год спустя команда японских исследователей зафиксировала на 8-метровом телескопе [Субару](#) инфракрасное излучение, соответствующее силикат-

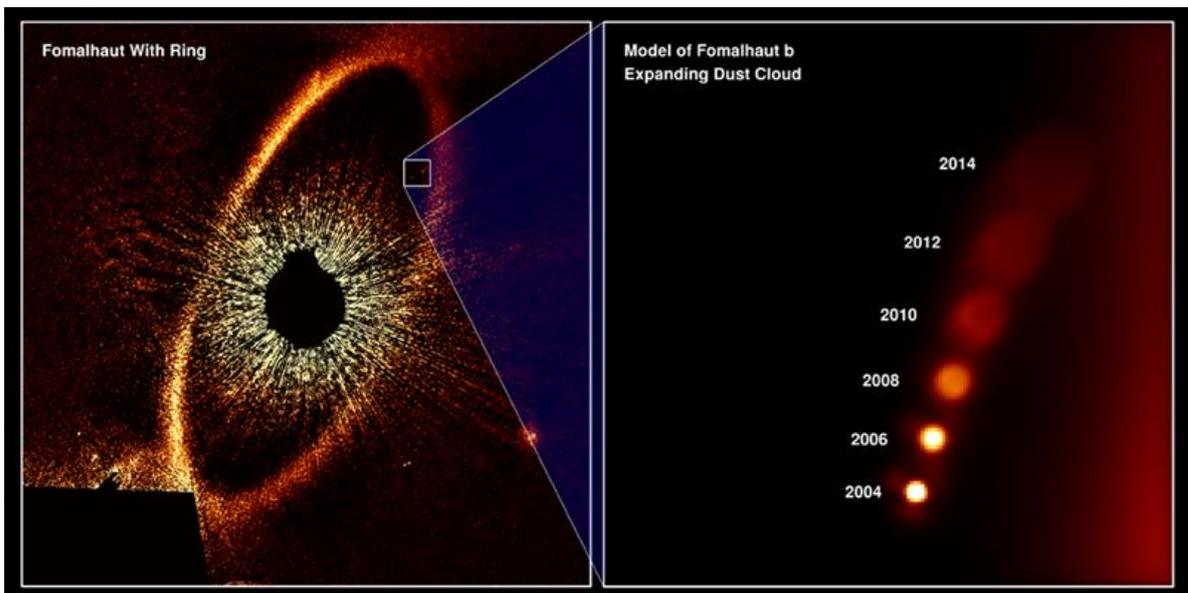


Планеты Беты Живописца и пылевой диск. Снимок VLTI [18]

сравнительно малая масса (не более 3 Мj), в то время как видимый блеск объяснялся светом, отражённым от пыли, окружающей молодую планету. Но наблюдения на "Спитцере" также ничего не выявили, и это ограничивало диапазон уже массой Юпитера. Дальнейшие наблюдения позволили определить орбиту, которая оказалась крайне вытянутой, кометоподобной ( $e = 0.8$ ). Наконец, начиная с 2013 года объект стал тускнеть и расплываться на снимках, пока не пропал полностью, слившись с местным поясом Койпера. Самое вероятное объяснение – Дагон представлял из себя облако пыли, которое возникло после столкновения двух астероидов поперечниками порядка 100 км. Расчёты показали, что в стабильных системах подобные столкновения должны происходить крайне редко, раз в сотни тысяч лет, поэтому либо нам повезло быть свидетелем одного из них (что, конечно, вряд ли), либо система Фомальгаута динамически возмущена невидимыми пока планетами.

В 2019 была открыта и дополнительная планета у Беты Живописца. Это самая близкая к звезде планета из всех обнаруженных напрямую, большая полуось её орбиты составляет всего 2.7 а.е., то есть она находится ближе местного внутреннего пояса астероидов. Масса её оценивается в 10 Мj, а масса внешней планеты – в 12 Мj, обе величины опасно близки к границе, разделяющей планеты-гиганты и коричневые карлики. Тем не менее, сомнений в планетной природе этой системы нет.

А вот Фомальгаут *b* по мере дальнейших наблюдений попросту... испарился. Планета вызывала вопросы с самого начала. Её обнаружили в лучах видимого диапазона, в ИК-диапазоне она оставалась невидимой. Причиной могла быть



Исчезновение Фомальгаута *b*. На основе снимков телескопа "Хаббл" [19]

## Интерлюдия

Между тем прочие, ставшие уже традиционными методы поиска продолжали приносить свои плоды. К 2008 году европейские астрономы, наблюдая на высокоточном спектрографе HARPS за несколькими сотнями слабо активных звёзд типа Солнца, накопили уже достаточно данных, чтобы подвести предварительные итоги. По их оценкам, сравнительно маломассивные планеты с массами от 4 до 30 земных и орбитальными периодами короче 50 суток должны были встречаться у ~30% звёзд.

В октябре 2009 года команда HARPS представила сразу 30 новых экзопланет самых разных типов – от "суперземель" до планет-гигантов с периодами обращения от нескольких суток до нескольких лет. Одним из примечательных открытий стала "суперземля" [Gliese 667 C b](#) у красного карлика, удаленного от Солнца на 22 световых года. Необычное обозначение – C b – означало, что родительская звезда входит в тройную систему. Красный карлик C обращался на расстоянии в несколько сотен а.е. от более тесной пары оранжевых звёзд AB. К тому моменту был известен горячий юпитер у главного компонента тройной системы HD 188753, но, в конечном итоге, он так и не был подтверждён. Поэтому *Gliese 667 C b* стала первой достоверной планетой, обнаруженной в системе тройной звезды. Но своя минута славы была у этой системы ещё впереди.



Gliese 667 C b на фоне пары звезд Gliese 667 AB в представлении художника [20]

Исследователи, занимающиеся гравитационным микролинзированием, тоже не сидели сложа руки. В июне 2008 года было объявлено об открытии планеты массой всего 3 земных у лёгкого красного (или даже коричневого) карлика [MOA-2007-BLG-192](#). К сожалению, как это обычно бывает при использовании метода микролинзирования, погрешности в определении параметров системы были велики, а их последующее уточнение – практически невозможно.

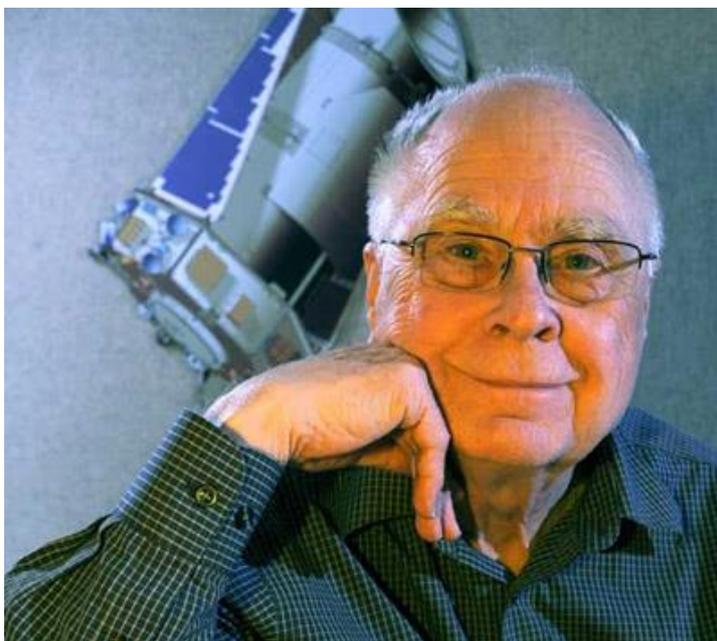
Наземные транзитные обзоры к концу нулевых годов уже в штатном режиме открывали горячие юпитеры. В отличие от Озириса, для подтверждения которого применили транзитный метод, в их случае, наоборот, для подтверждения кандидатов использовали доплеровскую спектроскопию. В январе 2009 года проект HATNet добавил в копилку к уже известному транзитному горячему нептуну [Gliese 436 b](#) ещё один – [HAT-P-11 b](#).

Параметры его были схожи: масса 23  $M_e$ , радиус чуть больше 4 земных и плотность примерно 1.4 г/куб.см.

Очередной горячий юпитер, обнаруженный коллаборацией SuperWASP – [WASP-17 b](#) – демонстрировал ряд необычных свойств. Прежде всего, его радиус оказался примерно вдвое большим, чем у Юпитера, при том, что масса была, наоборот, вдвое меньшей. Такие параметры приводили к средней плотности на порядок меньше плотности воды! Столь раздутая атмосфера гиганта была, видимо, следствием ненулевого эксцентриситета орбиты, необычного для такой близкой к звезде планеты. Приливные деформации, возникающие из-за периодического приближения и удаления от звезды, должны были дополнительно разогревать атмосферу. Этим, однако, странности *WASP-17 b* не ограничились. У двойных звезд уже давно был известен так называемый эффект Росситера-Маклафлина. Суть его в следующем. Когда звезда (или планета) проходит перед диском центральной звезды, вначале она затмевает ту часть диска, которая в своем вращении приближается к наблюдателю, а затем – ту часть, которая от него удаляется. Возникает характерное изменение средней лучевой скорости звезды, которое можно измерить методом Доплера. В случае же *WASP-17 b* оказалось, что планета, наоборот, вначале затмевает ту половину звездного диска, которая от нас удаляется. Другими словами, она обращается по орбите в направлении, противоположном вращению звезды! Такое движение называется ретроградным. В Солнечной Системе самым известным объектом с ретроградной орбитой является Тритон, спутник Нептуна.

Буквально через несколько дней после публикации *WASP-17 b* о находке ещё одной планеты на ретроградной орбите – [HAT-P-7 b](#) – объявила команда HATNet. Но в целом интерес к горячим юпитерам, открытия которых превратились к этому моменту в рутину, угасал. Тем более что начинали свою работу новые, более точные инструменты, способные дотянуться до объектов гораздо меньшего размера.

## Запуск "Кеплера". CoRoT и MEarth



Билл Боруцки [21]

Предыстория миссии "Кеплер" начинается в 80-е годы XX века. В 1984 году сотрудник Исследовательского центра Эймса Билл Боруцки (Bill Borucki) в соавторстве с коллегой Одри Саммерс (Audrey Summers) опубликовал статью "Фотометрический метод обнаружения планетных систем", в которой предлагал искать планеты, в том числе и землеподобные, наблюдая одновременно за десятком тысяч звезд. Столь большая выборка требовалась, поскольку геометрическая вероятность транзита Земли по диску Солнца для стороннего наблюдателя составляет всего ~0.5%.

Несмотря на всеобщий скептицизм, Боруцки сумел, заручившись поддержкой начальства,

подготовить к началу 90-х проект космического телескопа, который тогда назывался FRESIP – "Frequency of Earth-Sized Inner Planets". В 1994 была отправлена заявка на

участие в программе NASA Discovery, в рамках которой разрабатываются относительно недорогие проекты по изучению, преимущественно, Солнечной Системы. Эта заявка была отклонена. В NASA усомнились в том, что разработчики уложатся в предложенный бюджет. В 1996 Боруцки с коллегами подали новую заявку, с независимыми подтверждениями стоимости, а через два года – ещё одну. В этот раз причины отказов были чисто техническими: нужно было убедиться в том, что будущий телескоп (переименованный к тому моменту в "Кеплер"), оснащённый фотометром с ПЗС-матрицами, сможет обеспечить нужную для обнаружения аналогов Земли точность.

Земля при прохождении по диску Солнца уменьшает его видимую яркость примерно на 0.01%. Разработчики имитировали звёздное небо с помощью стальной плиты, в которой было просверлено полторы тысячи отверстий. Отверстия перекрывали тонкой проволокой, по которой пропускался ток. Из-за разогрева проволока расширялась, и таким образом удавалось имитировать падение блеска, аналогичное транзиту землеподобной планеты. Выяснилось, что ПЗС-матрицы отлично справляются с задачей, даже с учётом возможных вибраций самого аппарата.

Наконец, в 2001 году у NASA не нашлось возражений, и проект был утверждён. К тому времени уже были обнаружены транзиты Озириса, а, кроме того, к созданию аналогичной миссии – "Эддингтона" – начало готовиться Европейское космическое агентство. "Эддингтон" в конце концов был отменён из-за недостатка финансирования, но европейские коллеги Боруцки смогли создать более дешёвый аналог. [CoRoT](#) ("COncvection, ROTation et Transits planetaires", "Конвекция, вращение и планетные транзиты"), маленький 27-сантиметровый телескоп, оснащённый четырьмя ПЗС-матрицами, был выведен на полярную геоцентрическую орбиту 27 декабря 2006 года. Задумывался он изначально для астросейсмологии – изучения акустических колебаний звёзд. Астросейсмология, помимо прочего, позволяет определять размер звёзд, что весьма кстати для оценки размеров затмевающих их планет.



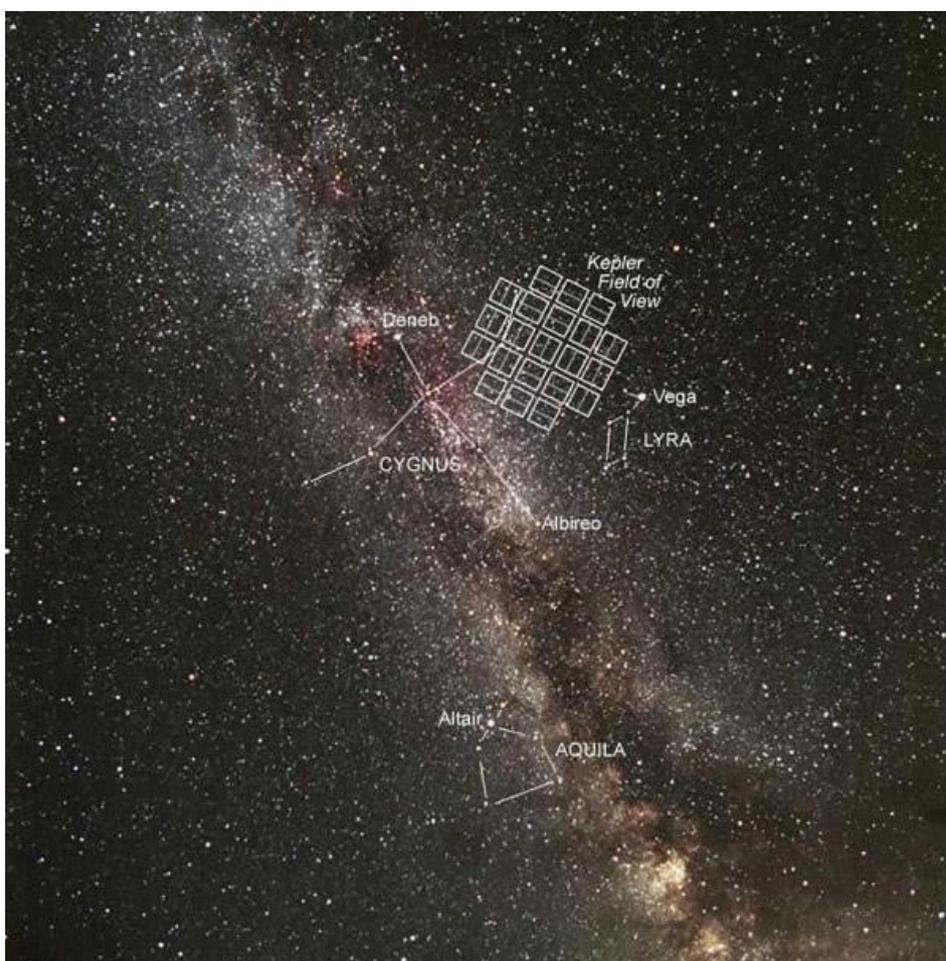
Спутник CoRoT в представлении художника [22]

CoRoT наблюдал за участками неба площадью около 8 квадратных градусов, что позволяло следить одновременно за ~10 тысячами звёзд. Поскольку его орбита была полярной, для того, чтобы избежать засветки Солнцем, телескоп должен был каждые полгода перенацеливаться на противоположный участок неба. Первыми его открытиями были обычные горячие юпитеры, но в феврале 2009 космическая обсерватория наконец раскрыла свой потенциал. На симпозиуме в Париже было объявлено об открытии [CoRoT-7 b](#) – планеты радиусом 1.7 земных и периодом обращения всего 20 часов! Кроме неё, в системе заподозрили наличие ещё одного, не транзитного, кандидата. Измерение лучевых скоростей родительской звезды на HARPS позволила уточнить массы обеих планет: 5  $M_{\oplus}$  у внутренней и 8  $M_{\oplus}$  –

у внешней. Из массы и радиуса *CoRoT-7 b* следовала почти земная средняя плотность, 5.6 г/куб.см. К сожалению, тусклый жёлтый карлик CoRoT-7 оказался активной звездой, и даже после сотни измерений на высокоточном HARPS сохранялась заметная

погрешность. Из-за этого состав новооткрытой "суперземли" оставался неясен: это могла быть и полностью железокаменная планета, и "океанида" с заметной долей летучих веществ в виде воды и плотной атмосферы. Последнее, правда, маловероятно, поскольку температуры на поверхности планеты по расчётам достигают 1800 К. Речь скорее может идти о лаве, чем о воде.

7 ноября 2009 года, после череды неизбежных переносов был, наконец, запущен "[Кеплер](#)". В отличие от CoRoT, он был выведен на гелиоцентрическую орбиту с периодом 372 дня. Таким образом, "Кеплер" в своем движении вокруг Солнца всё время немного отставал от Земли, постепенно удаляясь от неё. Не связанная с Землёй орбита позволяла ему нацеливаться на один и тот же участок неба – на стыке созвездий Лебеда, Лиры и Дракона. Телескоп системы Шмидта с зеркалом диаметром 1.4 метра обеспечивал поле зрения площадью 115 квадратных градусов и позволял наблюдать одновременно за 150 тысячами звёзд. Изначально миссия была рассчитана на 3.5 года – время, за которое аналог Земли у другой звезды с запасом успеет совершить три транзита, необходимые для его подтверждения. Но с самого начала возникла непредвиденная проблема.

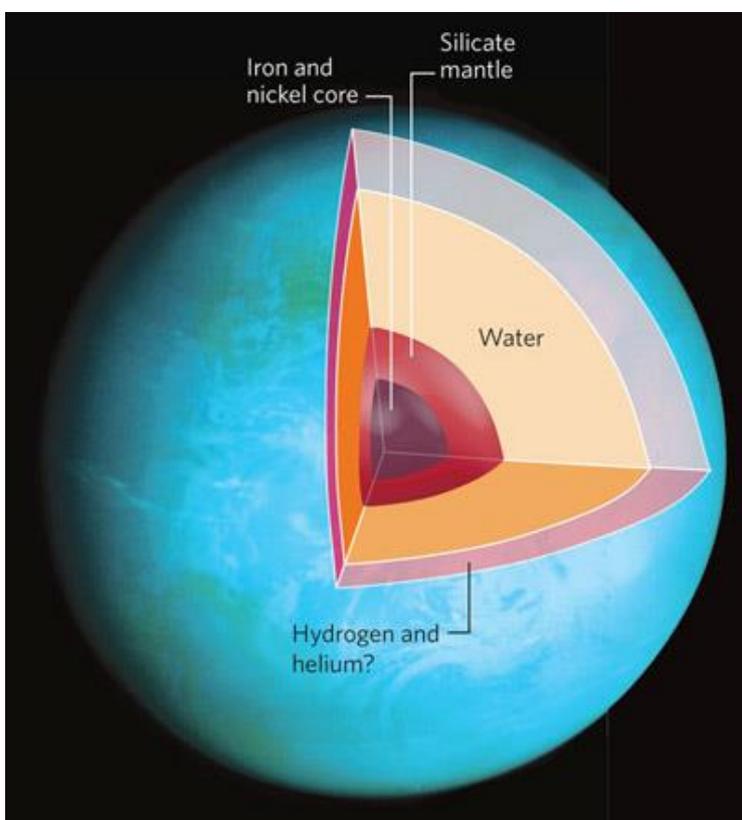


Поле зрения "Кеплера" на фоне "осенне-летнего треугольника" [23]

Предполагалось, что для звезды 12 величины (довольно яркой по меркам выборки "Кеплера") телескоп сможет обеспечить точность 20 ppm (частей на миллион). Эта величина складывалась примерно поровну из активности самой звезды (за основу было взято Солнце) и из инструментальной погрешности. Транзит Земли снижает блеск Солнца на 84 ppm, поэтому отношение сигнала к шуму у точного аналога нашей планеты должно было составить  $\sim 4:1$ . Дополнительные наблюдения повышают точность, и три транзита в течение основной миссии увеличили бы отношение до  $7:1$ . Такое превышение сигнала над шумом считалось достаточным для подтверждения планеты. Но первые же наблюдения "Кеплера" показали, что звёзды в среднем вдвое активнее Солнца. В результате

вклад звёздного шума повышался до двух третей от общей погрешности, которая теперь составляла 30 ppm. Для достижения порога в 7:1 теперь требовалось не менее семи транзитов иной Земли, другими словами, не менее семи лет наблюдений.

13 мая 2009 "Кеплер" приступил к поиску планет. В июне первые гигабайты данных были переданы на Землю. Пока команда "Кеплера" занималась обработкой и проверкой результатов первых месяцев наблюдений, неожиданно напомнили о себе наземные фотометрические обзоры. [Дэвид Шарбонно](#), один из первооткрывателей транзитов Озириса, в 2008 году запустил проект [MEarth](#). Восемь 40-сантиметровых телескопов, размещённых в обсерватории имени Уиппла в Аризоне, вели наблюдение за 2 тысячами близких красных карликов. Целью проекта был поиск планет малого диаметра, вплоть до 2 земных, поэтому отбирались те карлики, радиус которых не превышал одной трети солнечного – у них транзит даже небольшой планеты мог вызывать падение блеска, сравнимое с падением блеска при прохождении Юпитера по диску Солнца. В отличие от "Кеплера" с его фиксированным полем зрения, телескопы MEarth каждую ночь постоянно перенацеливались с одной звезды на другую.



Один из вариантов схемы внутреннего строения GJ 1214 b [24]

Удача улыбнулась исследователям почти сразу: уже к маю 2009 у одного из тусклых M-карликов под названием [GJ 1214](#), удалённого от Земли на 48 световых лет, обнаружили падения яркости на 1.3% с периодичностью 38 часов. Подключив HARPS, Шарбонно с коллегами в декабре 2009 объявили об открытии второй после *CoRoT-7 b* транзитной суперземли массой 8 Me и радиусом 2.7 Re. Впрочем, термин "суперземля" в данном случае едва ли годился, поскольку плотность *GJ 1214 b* составляла около 2.2 г/куб.см. Теоретики предложили три варианта состава планеты. Во-первых, это могла быть "океанида" с большим содержанием (не менее половины) воды в различных фазовых состояниях. Но жидкой поверхности она была бы лишена – атмосфера из водяного пара переходила в слой сверхкритического флюида под огромными давлениями и температу-

ратурами. Второй возможностью мог быть состав, аналогичный составу Нептуна или Урана: ядро из твёрдых пород и льдов, окружённое первичной водородно-гелиевой атмосферой, протяжённой, но сравнительно небольшой по массе (не более нескольких процентов от общей). Для таких планет позже был предложен термин "мининептуны". Неясным оставался вопрос, способна ли сравнительно лёгкая планета удержать подобную атмосферу вблизи от звезды, пусть даже и столь тусклой, как GJ 1214. Наконец, водородно-гелиевая атмосфера могла быть вторичной, высвободившейся из твёрдых пород мантии. Окончательную точку в этом вопросе могло поставить изучение атмосферы с помощью спектроскопии. Свежие данные, полученные в 2023 году космической обсерваторией имени Джеймса Вебба, говорят в пользу атмосферы с высокой средней молекулярной массой, то есть не водородной.

## "Кеплер" приступает к работе

Первые результаты миссии "Кеплер" были объявлены в августе 2009 года, через полгода после запуска, но это было всего лишь подтверждение, хоть и с беспрецедентно высокой точностью, трёх уже известных горячих юпитеров. "Собственные" планеты "Кеплера" представили публике на конференции Американского астрономического сообщества (ААС) в январе 2010 года. Среди находок выделялся уже довольно типичный для своего класса горячий нептун [Kepler-4 b](#) радиусом 3.9 и массой 24 земных, остальные представляли из себя ничем не примечательные горячие юпитеры (им присвоили номера с Kepler-5 по Kepler-8).

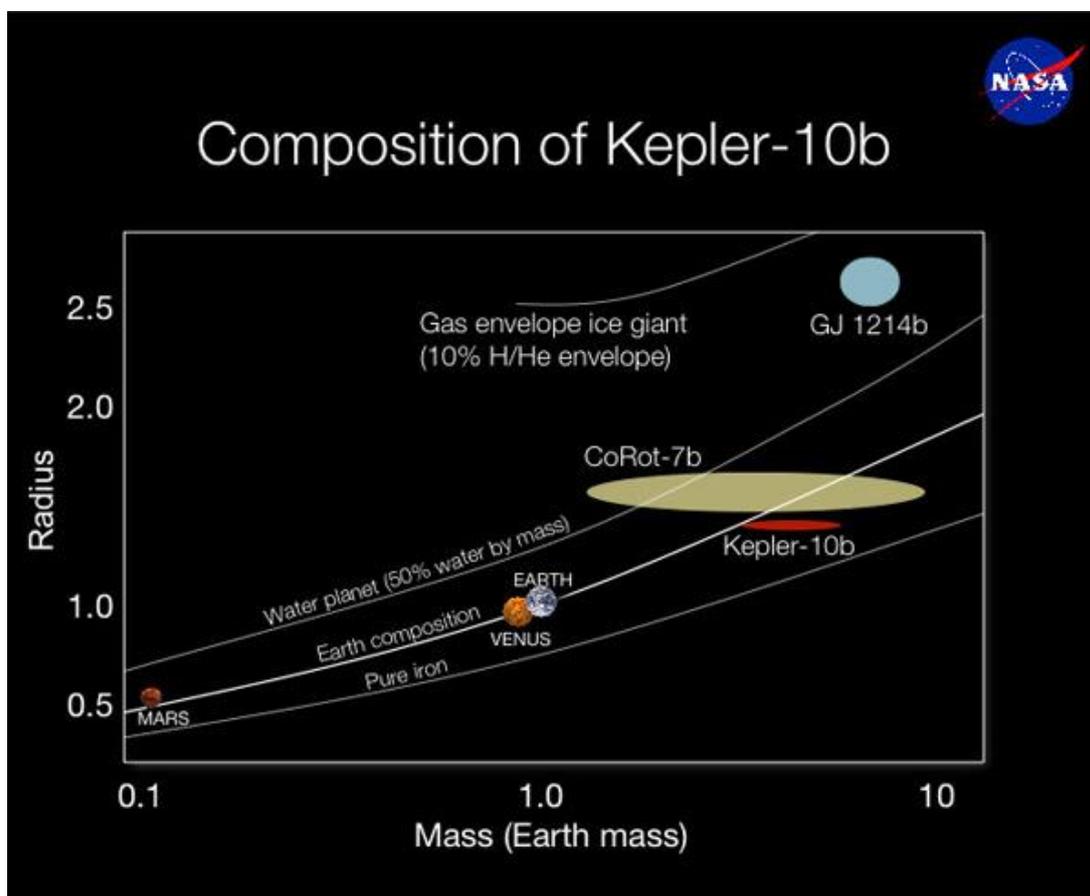
Все, конечно, понимали, что это только верхушка айсберга. Горячие юпитеры, да и нептуну можно быстро подтвердить доплеровской спектроскопией в наземных обсерваториях. *Kepler-4 b*, например, вызывал у своей звезды колебания лучевой скорости с амплитудой порядка 10 м/с. Подтвердить таким образом планету земной массы, пусть даже и с коротким периодом обращения – задача уже на пределе, а часто и за пределом возможностей даже лучших спектрометров того времени, таких как HARPS. Кроме того, время на телескопах ограничено, и "взвешивание" сотен кандидатов, ожидаемых от "Кеплера", растянулось бы на немислимо долгое время. Поэтому проверять традиционным методом планировали только наиболее интересные из кандидатов, в основном у ярких звёзд, для которых проще было получить высококачественный спектр. Для большинства же проверка ограничивалась несколькими измерениями, подтверждающими, что затмевает звезду объект неизвестной, но планетной массы, а не коричневый карлик и тем более не другая звезда. Проверка включала в себя также ряд тестов, которые исключали инструментальные эффекты, звёздную активность, влияние звёздных пятен и прочие помехи. Серьёзной проблемой были фоновые затменные переменные звезды. Тусклые переменные могли располагаться в проекции на небесную сферу так близко к наблюдаемой звезде, что их изображения попадали на один и тот же пиксель матрицы "Кеплера", и тот воспринимал их за одну звезду. Периодические колебания блеска далёкой затменной двойной легко было спутать с прохождением небольшой планеты по диску более близкой и яркой звезды-цели. Существовали способы отсеять и такие помехи, но самым надёжным оставалось изучение ближайших окрестностей звезды на больших телескопах, позволяющих разрешить фоновые переменные. Понятно, что все эти проверки требовали времени.

В июне 2010, через год после приёма первого массива данных, команда "Кеплера" объявила об открытии 706 кандидатов и выложила в открытый доступ данные по 306 из них. Остальные 400 придержали для дальнейшего изучения. Опубликованные же кандидаты провели через предварительную проверку, но подтверждать не планировали, потому что их родительские звёзды были слишком для этого тусклы. Уже эти второстепенные кандидаты показали, какую золотую жилу нащупал "Кеплер". С уменьшением радиусов количество кандидатов нарастало, и самыми многочисленными были кандидаты размером меньше Нептуна. Причём экстрополяция подсказывала, что и в этом диапазоне с уменьшением размера число планет быстро растёт.

Несколько кандидатов входили в состав многопланетных систем; в одном случае у звезды заподозрили сразу три кандидата. В августе 2010 астрономы сообщили об подтверждении первой транзитной многопланетной системы [Kepler 9](#). Два газовых гиганта, *Kepler-9 b* и *Kepler-9 c*, обращались вокруг звезды класса G2V с периодами 19 и 39 суток в резонансе 1:2. Кроме того, были признаки наличия короткопериодичной суперземли (позже её подтвердили). Что важнее, на этой системе был отработан новый метод валидации планет – через анализ вариаций времени наступления транзитов (transit timing variation, TTV). Планеты отставали или, наоборот, "спешили" относительно предсказанного времени очередного прохождения из-за взаимных гравитационных возмущений. По амплитуде вариаций можно было оценить их массы. В случае Kepler-9 они оказались промежуточными между массами Нептуна и Сатурна, 45 и 30 земных.

В январе 2011 объявили об очередном открытии: [Kepler-10 b](#), твёрдая суперземля радиусом около 1.5 земных, практически близнец *CoRoT-7 b*. Даже периоды их почти

совпадали – *Kepler-10 b* тоже обращалась вокруг родительской звезды за 20 часов. И, как и у *CoRoT-7 b*, были намёки на внешнюю планету. Меньше сомнений вызывала плотность – *Kepler-10 b* действительно оказалась планетой, сложенной из твёрдых пород. Между тем 2 февраля НАСА готовилось раскрыть данные по 400 отложенным кандидатам, а кроме того обещало сообщить о новых открытиях.

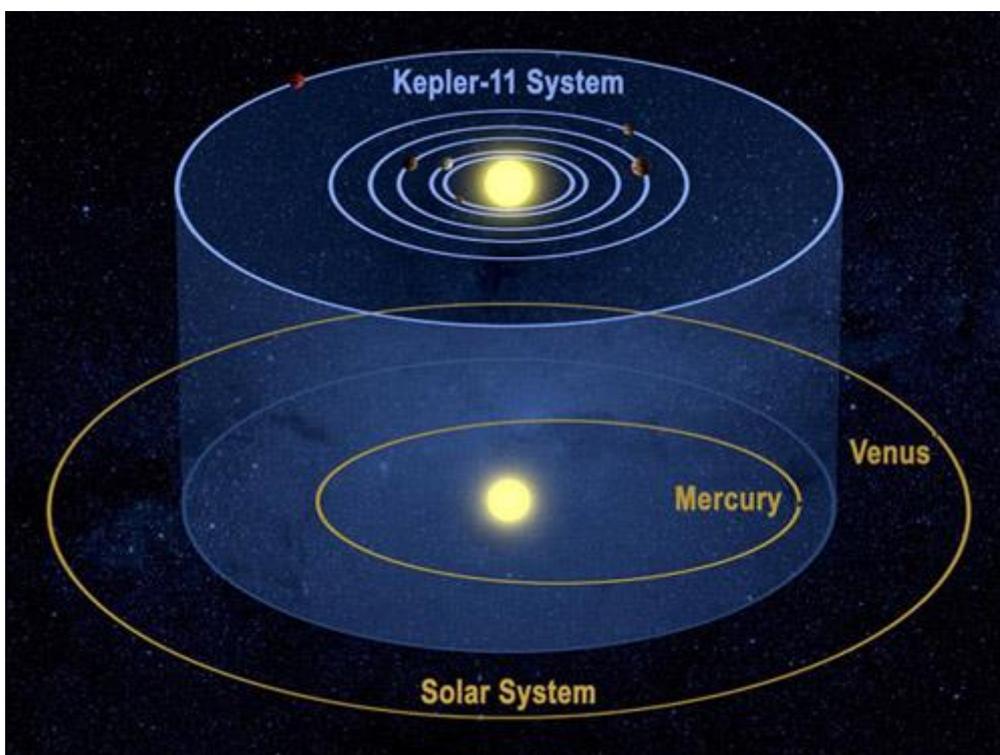


Сравнение средней плотности планет *Kepler-10 b*, *CoRoT-7 b*, *GJ 1214 b* с учётом погрешностей. Линиями показаны модельные соотношения масса-радиус трех вариантов состава: 50/50 воды и горных пород, земной состав, чистое железо [25]

Открытие, точнее, открытие превзошло самые смелые ожидания. У [Kepler-11](#), жёлтого карлика в 2000 световых лет от Солнца (довольно типичное расстояние до звёзд "Кеплера"), нашли систему из шести транзитных планет. Период внутренней составлял 10 суток, самой внешней – 4 месяца, радиусы варьировались от 2 до 4.5 радиусов Земли. Транзиты всех шести планет стали возможны благодаря тому, что система оказалась исключительно плоской – на брифинге НАСА её сравнили с виниловой пластинкой. В одном случае "Кеплер" смог запечатлеть прохождение одновременно трёх планет по диску *Kepler-11*. Благодаря измерениям TTV удалось определить массы пяти внутренних планет. Ни одна из них не превышала массу Урана, 14  $M_e$ , а самая лёгкая весила около 2  $M_e$ . Даже внутренняя планета *b* имела сравнительно низкую плотность, около 3 г/куб.см, а у планет *e* и *f* она оказалась меньше плотности воды. Это означало, что планеты окружены очень протяжёнными, хотя и небольшими по массе (не более нескольких процентов от полной массы планеты) атмосферами из водорода и гелия. Другими словами, была открыта целая система "мининептунов". Поскольку орбиты пяти внутренних планет легко умещались внутри орбиты Меркурия, такого рода системы стали называть "компактными" или "плотно упакованными".

Разумеется, подобные конфигурации не были полной неожиданностью (можно вспомнить HD 40307, открытую методом Доплера), но, наконец, удалось приподнять завесу над физическими параметрами таких не имеющих аналогов в Солнечной системе планет.

Происхождение их оставалось (да и остаётся) загадкой. Было предложено множество гипотез, от миграций из-за снеговой линии до формирования на месте в массивном протопланетном диске. Слабость большинства этих моделей в том, что они создаются уже после того, как наблюдения приносят очередное сенсационное открытие, и обладают низкой предсказательной силой.



Сравнение системы Kepler-11 с Солнечной [26]

Помимо "гвоздя программы", команда "Кеплера", как и планировалось, представила информацию по всем выявленным на тот момент кандидатам. Их оказалось уже 1235, что было вдвое больше числа известных к 2011 году экзопланет. Одной из неожиданностей стало большое количество многопланетных систем – помимо подтверждённой Kepler-11, имелась система с пятью кандидатами, 8 систем – с четырьмя, а трёх- и двухпланетных насчитывалось две сотни. Как и в предварительном релизе, преобладали "небольшие" планеты: более половины от общего числа составляли "нептуны" – кандидаты с радиусами от 2 до 6 радиусов Земли (Re). Количество суперземель (1.25 – 2.0 Re) превышало число планет-гигантов размером с Юпитер. Появилась наконец и новая категория – "земли", кандидаты с радиусами менее 1.25 Re. Несколько кандидатов было даже размером с Марс. Правда, об аналогах Земли речи пока не шло, все землеразмерные кандидаты отличались короткими орбитальными периодами.

Столь богатый улов позволял провести первые статистические оценки. Многие планеты избежали обнаружения из-за своих малых размеров, высокой активности родных звёзд или их слабого блеска. Учёные попытались учесть эту неполноту данных, чтобы получить истинную распространённость найденных типов планет. Они нашли, что, с учётом вероятности транзитной конфигурации, на 100 звёзд должно приходиться 30 планет в размерных классах "нептунов", "суперземель" и "земель" с орбитальными периодами меньше 50 суток. Другими словами, эти результаты были справедливы для достаточно "горячих" планет; кроме того, они не учитывали фактор многопланетности. Газовые гиганты с периодами меньше 50 суток встречались с частотой не более 3 на 100 звёзд. Все эти оценки не противоречили результатам, полученным на HARPS доплеровским методом.

Исследовалась и многопланетность. Моделирование показало, что компактными многопланетными системами типа Kepler-11 невозможно объяснить всё многообразие

обнаруженных систем. Многие из них должны были быть однопланетными, а компактные системы встречались только у нескольких процентов звёзд. Впрочем, "однопланетность" не следует воспринимать буквально. Во-первых, у одиночных кандидатов могли существовать внешние компаньоны за пределами изученного диапазона периодов с низкой вероятностью транзитной конфигурации, во-вторых, система могла быть "разболтанной" из-за взаимных возмущений, с высокими взаимными наклонениями орбит. Как ни странно, примером такой возмущенной системы может служить Солнечная: конфигурации, при которых хотя бы две внутренние планеты становятся транзитными для внешнего наблюдателя, крайне маловероятны, а одновременное транзитное расположение орбит Меркурия, Венеры и Земли просто невозможно.

## **HARPS наносит ответный удар**

Пока "Кеплер" совершал революцию в космосе, на Земле продолжался более спокойный эволюционный процесс накопления данных. Шестипланетная система Kepler-11 стала прорывом для транзитного метода, но рекорда в целом по области она не установила. К моменту запуска "Кеплера" уже были известны четырёхпланетные системы, в частности, Мю Жертвенника, и одна пятипланетная – 55 Рака. Помимо короткопериодичных "суперземель", по внешним орбитам в этих двух системах двигались планеты, похожие на Юпитер, при этом область, где в Солнечной системе расположены планеты земного типа, тоже была занята газовыми гигантами. В августе 2010 команда HARPS представила многопланетную систему другого типа. Пять непуноподобных планет с минимальными массами от 12 до 25 земных обращались с периодами 6, 16, 50, 123 и ~600 суток вокруг звезды класса G1V [HD 10180](#). Кроме них, заподозрили наличие ещё двух кандидатов – совсем "горячей" и маленькой *b* с массой чуть больше земной и с периодом чуть больше суток и внешней сатурноподобной *h* с периодом 6 лет. Позже *h* была подтверждена с уточнением минимальной массы: 46  $M_e$ . Учитывая большую полуось орбиты в 3.4 а.е., её можно считать лёгким и более тёплым аналогом Юпитера в этом массивном аналоге Солнечной системы. В 2012 было представлено ещё два кандидата с периодами 10 и 68 суток, но подтвердить их так и не удалось.

Помимо основной программы, HARPS провел плотные ряды наблюдений малой выборки из десяти звёзд. Они были выбраны из-за своих исключительно спокойных хромосфер, слабая активность которых снижала погрешности измерений лучевой скорости почти до инструментального уровня. В список входили такие близкие к Солнцу звёзды, как Альфа Центавра В и Тау Кита. У трёх из десяти звезд были обнаружены планеты, о чём европейские астрономы сообщили в августе 2011 года. В одном случае речь шла о трёхпланетной системе сравнительно лёгких "суперземель" массами от 2.4 до 4.8 земных у близкого жёлтого карлика [82 Эридана](#). Правда, в реальности самой маленькой из них в итоге усомнились – возможно, сигнал имитировала звёздная активность, связанная с вращением звезды. [HD 85512 b](#) представляла из себя ещё одну лёгкую (3.6  $M_e$ ) и довольно долгопериодичную (58 суток) "суперземлю" (в кавычках, поскольку плотность этих нетранзитных планет, естественно, оставалась неизвестной). Наконец, вокруг оранжевого карлика HD 192310 обращалось два довольно массивных "нептуна" с периодами 75 суток и 1.4 года.



Спектрограф HARPS в обсерватории Ла Силья, Чили [27]

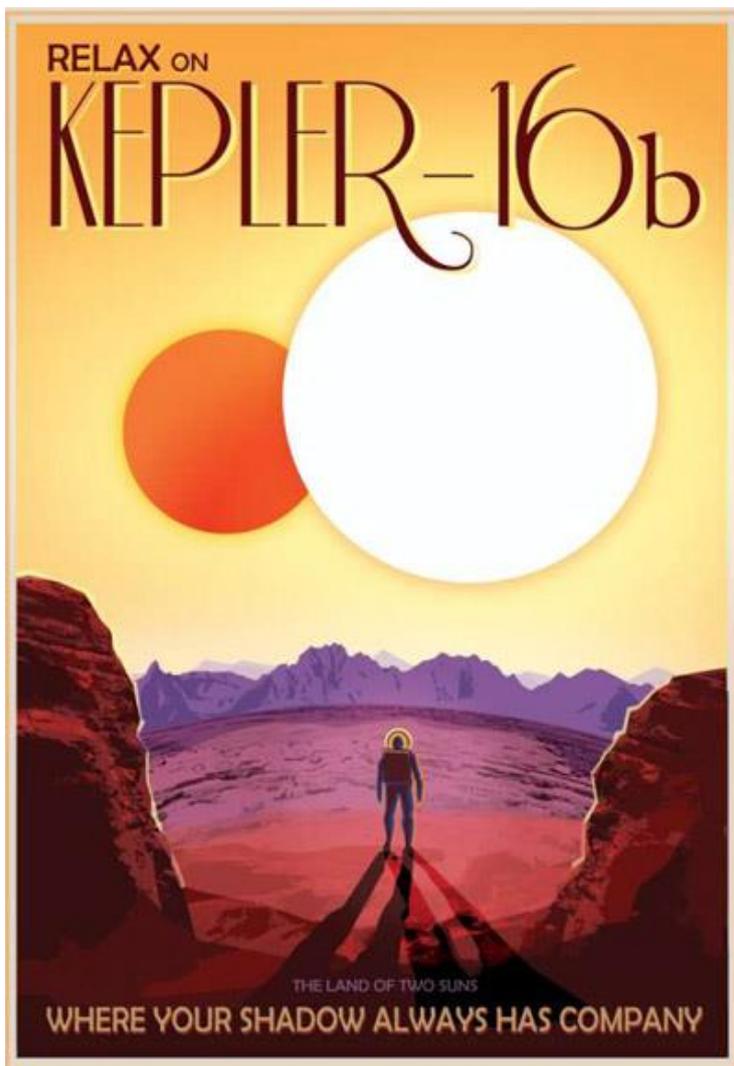
следовать до периодов  $\sim 100$  суток. Их частота встречаемости не росла с ростом периода, но увеличивалась с уменьшением массы, что, как и в случае "Кеплера", намекало на большое количество пока ещё недоступных наблюдению планет земной массы. При этом "суперземли" с "нептунами" должны были встречаться практически у каждой второй звезды типа Солнца (впрочем, позже эту оценку неоднократно пересматривали в сторону уменьшения). В отличие от планет-гигантов, тяготеющих к звёздам с высоким содержанием тяжёлых элементов, распространённость лёгких планет почти никак не зависела от металличности, даже немного увеличиваясь у звёзд с отношением Fe/H меньшим, чем у Солнца.

## Эра "Кеплера"

Основным источником новостей на ближайшие годы оставался, конечно, "Кеплер", открывший настоящий клондайк транзитных экзопланет. В сентябре 2011 команда "Кеплера" представила очередную новинку – транзитный "сатурн" [Kepler-16 b](#) массой в треть Юпитера и с необычно большим для транзитного метода периодом 229 суток. Причиной специально собранной конференции стал, однако, не период, а тот факт, что планета проходила транзитом по дискам сразу двух родительских звёзд тесной двойной системы! Звёзды классов K и M обращались друг вокруг друга за 41 день; период планеты превышал период центральной звёздной пары примерно в пять раз. Это практически минимум, при котором такая орбита, называемая циркумбинарной, может сохранять устойчивость. Планету неофициально называли Татуином в честь родной планеты Люка

Тот факт, что в выборке из десяти звёзд удалось обнаружить три планетные системы, означал очень широкую распространённость сравнительно "лёгких", хотя и более массивных, чем Земля, планет. В следующей публикации в сентябре 2011 года европейцы проанализировали результаты работы HARPS и менее точного, работающего ещё с 1998 года, спектрометра [CORALIE](#). У 822 наименее активных звёзд удалось к тому моменту найти 155 планет в 105 системах. Делая поправку на вероятность "вытащить" сигнал конкретной планеты из шума, авторы оценили распространённость (частоту встречаемости) планет разных типов. У 14% звёзд типа Солнца должна была существовать хотя бы одна планета-гигант ( $> 50 M_e$ ) с периодом менее 10 лет. При этом распространённость массивных планет возрастала с ростом орбитального периода. Интересно, что между популяциями гигантов и более лёгких планет существовал явный провал в распределении масс, замеченный и в более ранних исследованиях. Маломассивные планеты ( $< 30-40 M_e$ ) удалось достоверно ис-

Скайюкера с её двойными закатами. Спустя несколько месяцев команда "Кеплера" опубликовала статью об открытии ещё двух "татуинов" – [Kepler-34 b](#) и [Kepler-35 b](#). У них отношение периодов составляло примерно 10:1 и 6:1, массы – 70 и 40 земных.



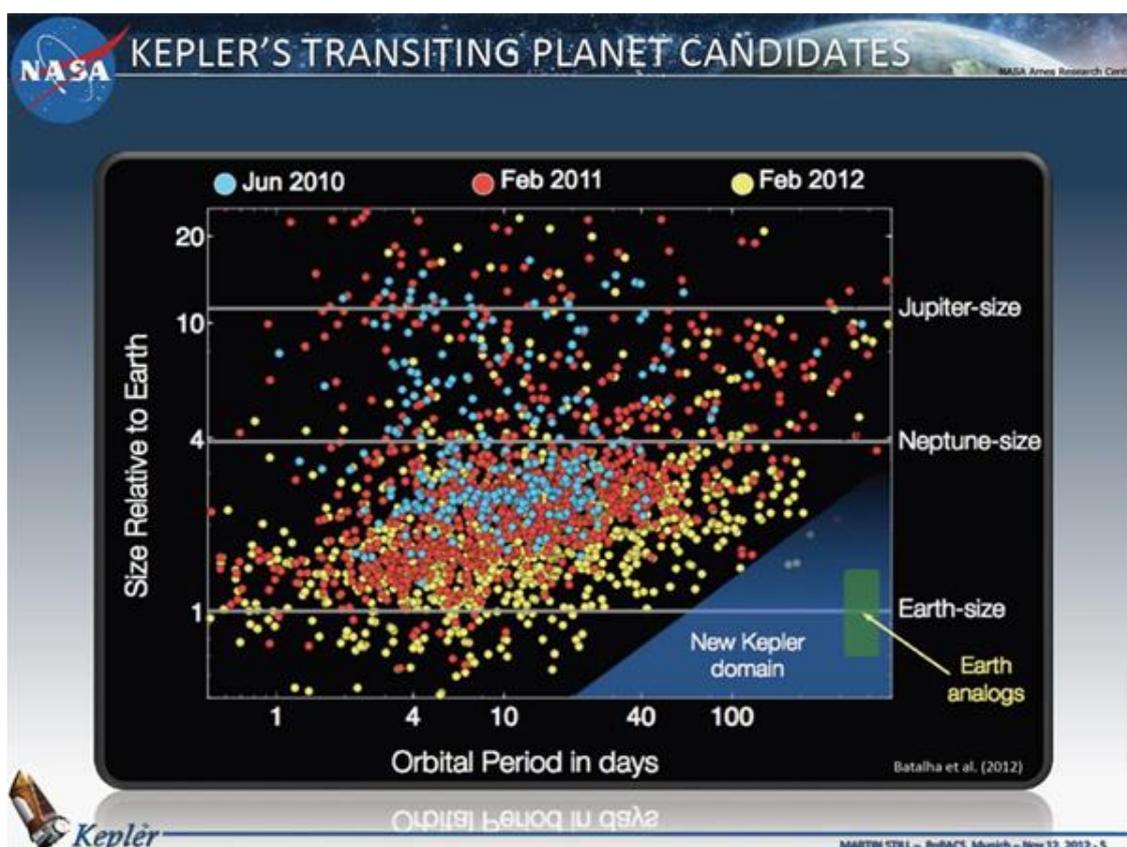
Постер НАСА: "Отдохните на Kepler-16 b, земле двух солнц, где у вашей тени всегда будет компания" [28]

Вообще говоря, кандидаты в циркумбинарные планеты были уже известны к тому времени. Их обнаружили у нескольких очень необычных затменных двойных – так называемых предкатаклизмических переменных. Более массивная звезда в них расширяется в красный гигант и "заглатывает" менее массивный компаньон, который теряет угловой момент в разреженной атмосфере раздутой главной звезды и постепенно "скатывается" к её ядру – будущему белому карлику. После сброса внешней оболочки звезда-компаньон остаётся на орбите белого карлика, обращаясь вокруг него с периодом всего несколько часов. У некоторых пар (HW Девы, NN Змеи) были обнаружены вариации времени затмений, говорящие о присутствии массивных планет-гигантов на долгопериодических орбитах. Но со временем возникли сомнения в реальности этих планет. Системы либо оказывались динамически неустойчивы, либо выдавали не соответствующие прогнозам вариации времени затмений. Истинная причина таких вариаций остаётся загадкой.

Ещё один кандидат в первую циркумбинарную систему – HD 202206. История её открытия довольно запутана. В 2000 году у звезды – жёлтого карлика – нашли методом Доплера коричневый карлик *b* с периодом 256 суток. В 2004 году в данных выявили дополнительный сигнал, наводимый планетой с минимальной массой 2.4  $M_j$  и периодом 3.5 года. Система была радикально пересмотрена в 2017 году – по астрометрическим

наблюдениям "Хаббла" выяснилось, что орбиты расположены почти "плашмя", компонент *b* на самом деле – красный карлик, то есть HD 202206 представляет из себя двойную звезду, а планета *c*, наоборот, оказалась коричневым карликом с массой 18  $M_j$ . Как из-за большой массы, так и из-за неясного происхождения (сверхмассивная планета или всё же третий звёздный компонент?) статус этого объекта остаётся неопределённым.

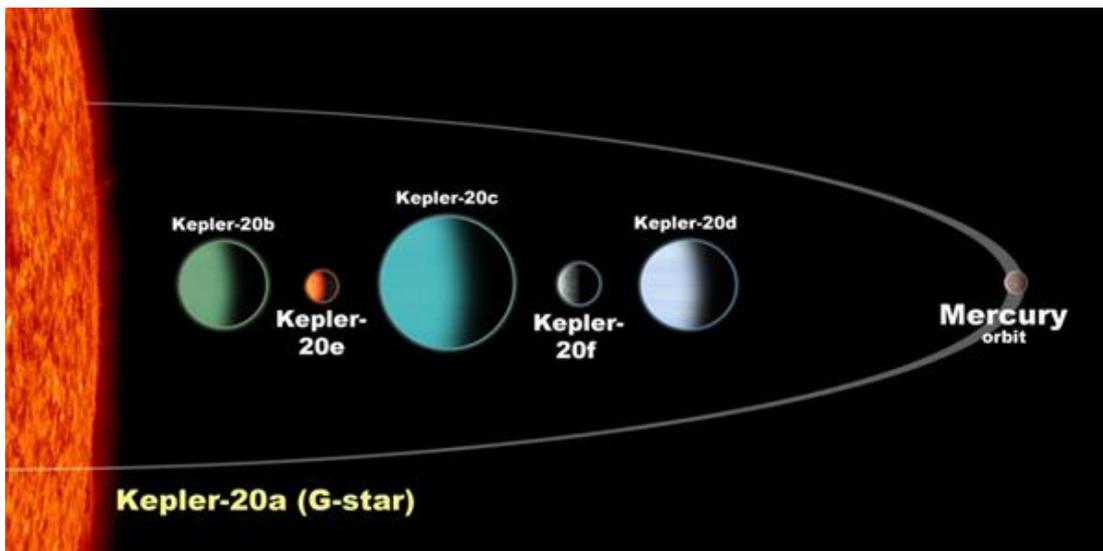
В декабре 2011 команда "Кеплера" опубликовала обновлённый список, в который вошло уже 2326 кандидатов, или KOI – Kepler Objects of Interest. Примерно половина из них приходилась на "нептуну", а большая часть прочих размерами не превышала двух радиусов Земли. И – сенсация: подтверждённая планета в зоне обитаемости жёлтого карлика, [Kepler-22 b](#). Правда, о Земле-2 речи пока не шло: радиус планеты равнялся 2.4 земных, вероятнее всего, она представляла из себя мининептун с протяженной водородно-гелиевой атмосферой. К сожалению, массу планеты до сих пор измерить не удалось.



Все известные кандидаты "Кеплера" на диаграмме "Орбитальный период – Радиус" на февраль 2012 года. Шкала периодов – логарифмическая. Зелёным отмечена область, соответствующая аналогам Земли [29]

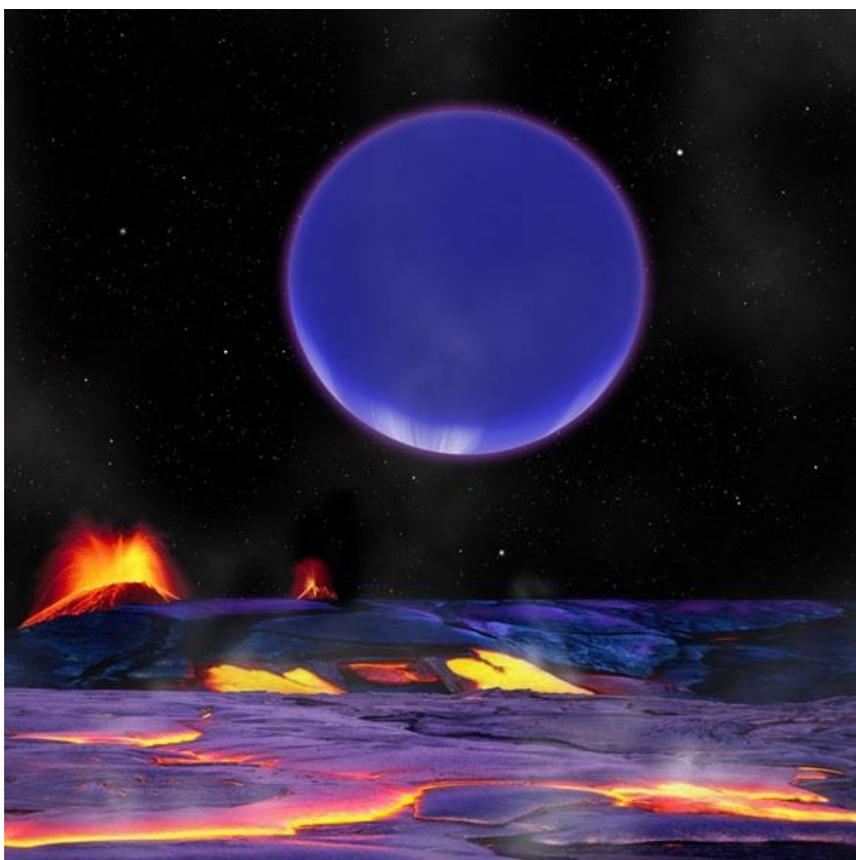
Подтверждённые системы от "Кеплера" вскоре стали исчисляться многими десятками. Наглядное представление об их разнообразии можно получить, посмотрев анимированную "[Перепись планет "Кеплера"](#)" ("Kepler's Tally of Planets") на сайте New York Times (лучше всего отсортировать по дате открытия). Стоит упомянуть самые "резонансные" открытия.

[Kepler-20](#). Система, немного напоминающая Kepler-11, в которой массивные суперземли и мининептуны *b*, *c* и *d* с периодами обращения 3.7, 11 и 78 суток странным образом чередуются с землеразмерными планетами *e* и *f*, периоды которых составляют 6 и 20 суток. *Kepler-20 e* стала первой подтверждённой транзитной планетой с радиусом менее земного (0.87  $R_e$ ).



Сравнение параметров планет системы Kepler-20 с параметрами Меркурия. Масштаб радиусов не соответствует масштабу орбит [30]

[Kepler-42](#). Три планеты с размерами, заполняющими диапазон между радиусами Марса и Венеры, у сравнительно близкого (130 световых лет) красного карлика на орбитах настолько тесных, что их можно сравнивать с орбитами галилеевских спутников Юпитера. Сам красный карлик при этом так мал, что едва превосходит радиусом Юпитер (но более чем в сотню раз массивнее).



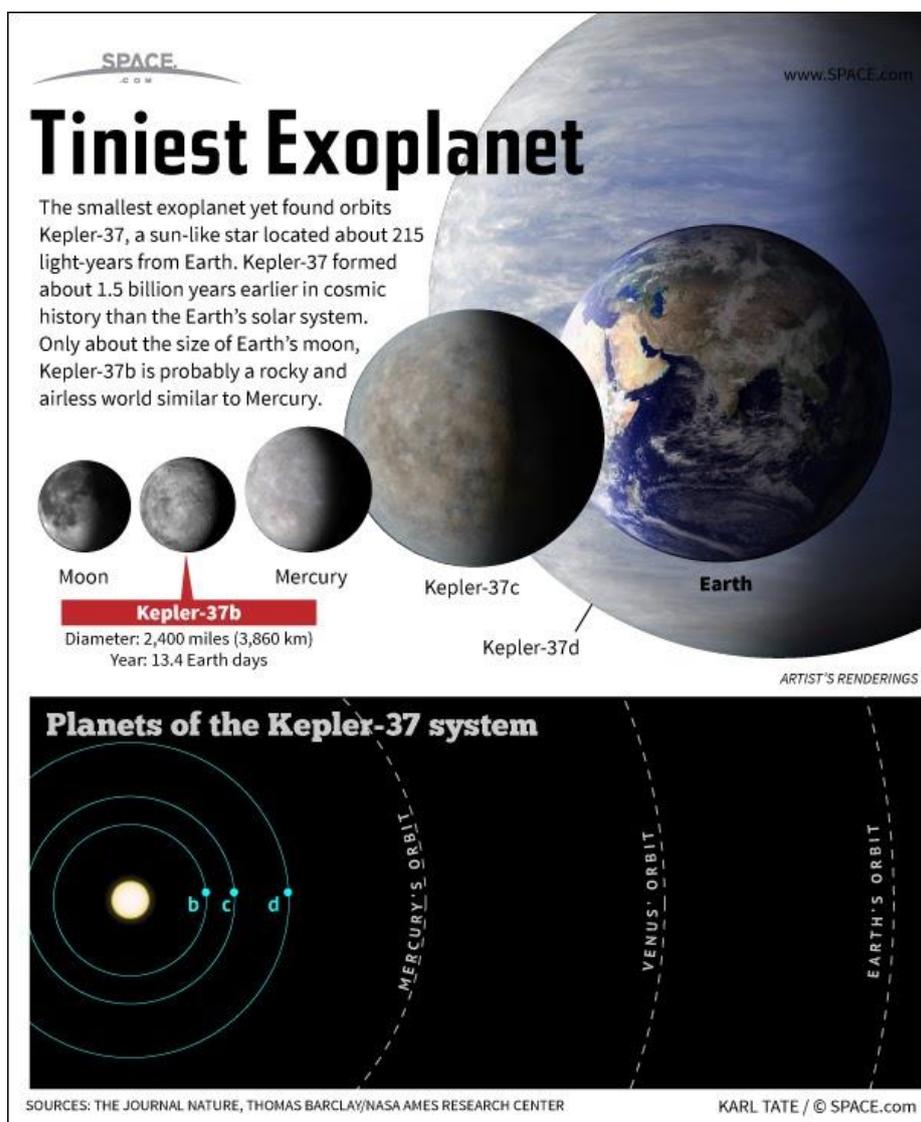
Планета Kepler-36 c, видимая с поверхности Kepler-36 b, в представлении художника [31]

[Kepler-36](#). Суперземля и мининептун, обращающиеся вокруг жёлтого субгиганта в резонансе 6:7. Внутренняя планета совершает оборот за 13.9 суток, внешняя – за 16.2 суток, она примерно вдвое массивнее (7.1 против 3.8  $M_E$ ). А вот объёмы и плотности планет различаются радикально – *Kepler-36 b* при радиусе 1.5 земных имеет среднюю плотность 6.8 г/куб.см, что означает железокремнистый, землеподобный состав, а *Kepler-36 c* с радиусом 3.7 земных – всего лишь 0.8 г/куб.см! Почему две соседние планеты так сильно отличаются друг от друга? Близость орбит должна вызывать сильные приливные возмущения и внутренний разогрев, из-за чего лёгкая *b* могла утратить весь свой

водород и гелий из атмосферы, а более массивная с – сохранила. Это косвенно говорит о том, что по крайней мере часть из мининептунов может скрывать под водородно-гелиевой оболочкой скалистое ядро.

[Kepler-47](#). Два "татуина" размерами немного меньше и немного больше Нептуна с периодами 50 и 303 суток в двойной системе жёлтого и красного карликов, совершающих оборот вокруг общего центра масс за 7.5 суток. Позже была обнаружена и третья планета с периодом 187 суток и радиусом 7 земных. Её не удалось выявить сразу из-за того, что так называемый прицельный параметр был близок к единице. Это значит, что планета проходила очень близко к краю диска центральной звезды, затмевая его только частично, из-за чего транзиты были сравнительно неглубокими. Интересно, что со временем, из-за вызванной гравитационными возмущениями прецессии орбит планеты с и d вообще на долгое время перестанут затмевать звёздную пару.

[PH1 \(Kepler-64\)](#). Объем данных, передаваемых "Кеплером", был так велик, что исследователи подключили к поискам астрономов-любителей. В 2010 был запущен проект [Planet Hunters](#), в котором любой желающий мог поучаствовать в анализе кривых блеска, собранных телескопом. Первым открытием, объявленным в октябре 2012, стала довольно экзотическая система – планета у четырёхкратной звезды. Планета *PH1 b* (от "Planet Hunters") радиусом 6.2 Re обращается с периодом 139 суток вокруг тесной пары звёзд классов F и M, а на удалении в 1000 а.е. от них расположена ещё одна пара звёзд классов G и M.



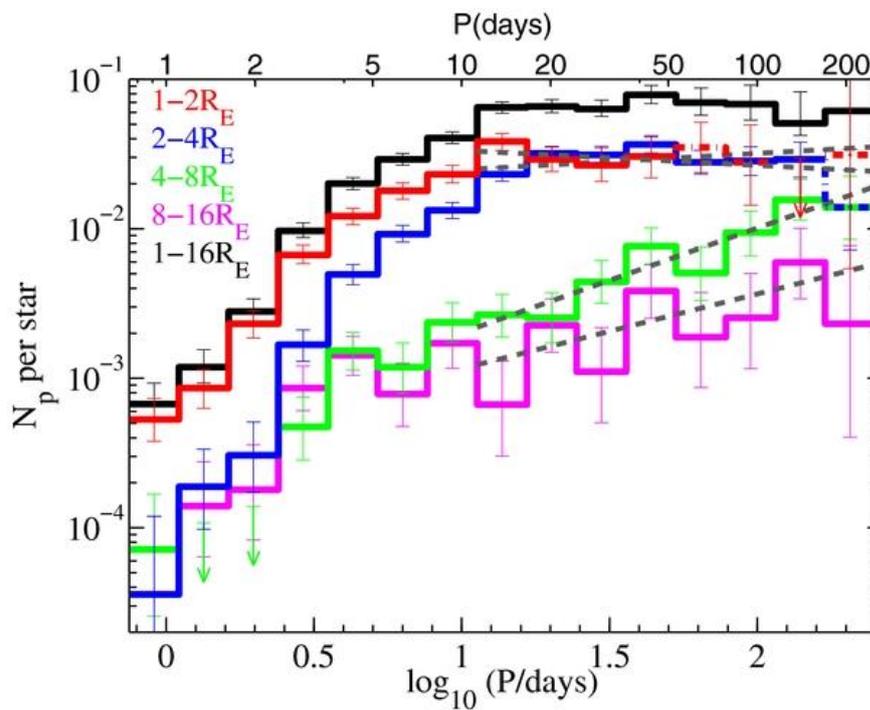
Сравнение планет Kepler-37 с внутренними планетами Солнечной системы и Луной [32]

[Kepler-37](#). Очень близкий по меркам "Кеплера" (209 световых лет) жёлтый карлик, у которого – во многом благодаря сравнительно высокой видимой яркости – удалось открыть самую маленькую на сегодняшний день планету у звезды главной последовательности – *Kepler-37 b* радиусом меньше Меркурия (0.35  $R_e$ ). Кроме него, в системе присутствует ещё одна "субземля" радиусом 0.74 и мининептун радиусом 2 земных.

[Kepler-132](#). Изначально у солнцеподобной звезды обнаружили три планеты с периодами 6.2, 6.4 и 18 суток и радиусами от 1.5 до 2 земных. Орбиты первых двух были удивительно близки друг к другу, почти коорбитальны. В Солнечной системе примером коорбитального движения служат спутники Сатурна Эпиметей и Янус, расстояние между орбитами которых составляет всего 50 км. Из-за гравитационного взаимодействия они периодически "меняются" орбитами, избегая столкновения. Ещё один вариант – очень близкий орбитальный резонанс. Например, спутник того же Сатурна Прометей обращается в резонансе 121:118 с Пандорой и в резонансе 53:54 – с Атласом. Наконец, коорбитальное движение возможно в так называемых точках Лагранжа L4 и L5, расположенных на орбите более массивного тела в 60° перед ним и за ним. Самый известный пример – троянские астероиды, постоянно "догоняющие" Юпитер и "убегающие" от него. Для того, чтобы такая система была устойчива, масса троянской планеты должна быть в десятки раз меньше массивного компаньона.

Kepler-132 не была первой системой с почти коорбитальными планетами. Ещё в феврале 2011 года среди опубликованных кандидатов привлекла внимание система KOI-730 (после подтверждения получившая название [Kepler-223](#)). Две планеты обращались вокруг неё с практически одинаковыми (отношение 1.001) периодами в 9.8 суток. Но позже период одной из планет пересмотрели – он оказался вдвое большим, 19.7 суток, что означало резонанс 2:1. В системе Kepler-132 периоды планет не совсем совпадали, но были близки к резонансу 26:27. В отличие от лёгких спутников Сатурна, планетные массы делали конфигурацию динамически неустойчивой. Чтобы решить загадку, звезду наблюдали в обсерватории Кека и нашли, что Kepler-132 является на самом деле широкой парой из почти одинаковых G-звёзд. Напрашивалось объяснение, что две короткопериодические планеты обращаются вокруг разных компонентов системы! Остаётся, правда, неясным, вокруг каких именно, и какой звезде принадлежит третья планета с периодом 18 суток.

Основной целью "Кеплера" с самого начала был сбор статистики. Как и в случае с доплеровскими наблюдениями, выявлялись огромные различия в распределении планет-гигантов (в том числе и непуноподобных с  $R > 4 R_e$ ) и небольших планет с  $R < 4 R_e$ . Если распространенность первых возрастала с увеличением периода, то вторые этой закономерности не подчинялись. Любую шкалу, в том числе и шкалу периодов, можно представить как в линейном, так и в логарифмическом виде. Во втором случае каждое следующее значение будет *во сколько-то* раз больше предыдущего. Орбиты планет удобно рассматривать именно в логарифмическом масштабе. Выяснилось, что малоразмерные планеты распределяются по такой шкале равномерно, в отличие от планет-гигантов. Редко встречались только небольшие планеты с периодами меньше 10 суток, по крайней мере у звёзд типа Солнца. Поскольку транзитный метод наиболее чувствителен к короткопериодическим планетам, область орбитальных периодов за пределами 100-200 суток оставалась плохо изученной.



Распределение планет "Кеплера" по орбитальным периодам (в логарифмической шкале) в зависимости от радиуса [33]

Часть исследователей сосредоточилась на красных карликах. В выборке "Кеплера" их было совсем немного – около 4–5 тысяч на 150 тысяч, но они обладали двумя преимуществами. Во-первых, из-за относительно большей глубины транзита у них было проще найти планеты земных размеров, и, во-вторых, даже короткопериодические планеты могли попадать в зону обитаемости этих тусклых звёзд. Изучив данные около сотни планетных кандидатов, две научные группы независимо пришли к схожим выводам. На каждый M-карлик должно приходиться примерно по 1 планете в диапазоне радиусов от 0.5 до 4 земных и с периодами до 50 суток. Но это, так сказать, только "среднее по больнице" значение, в котором не учтён фактор многопланетности. На каждый второй M-карлик должно приходиться в среднем по две планеты такого типа, у остальных же их не должно быть вовсе (что, разумеется, не означает отсутствия планет с другими характеристиками). Планеты-гиганты встречаются крайне редко. У примерно 15% красных карликов в зоны обитаемости должны попадать землеразмерные планеты (с радиусами 0.5 – 1.4 земных). Из этого следовало, что ближайшую систему с потенциально обитаемой планетой с вероятностью более чем 95% можно встретить у M-карлика в пределах 5 парсек. Причём эта оценка была довольно консервативной. Ещё одна работа оценивала долю красных карликов с потенциально обитаемыми планетами в ~50%.

### Наконец, жизнь?

Незаметно поиск планет, пригодных для жизни, превратился чуть ли не в важнейшую цель экзопланетных исследований. В начале нулевых, и тем более в девяностые годы XX века об этом не могло быть и речи – не хватало технических возможностей. Но постепенно планка доступного повышалась. Как вспоминал планетолог Грег Лофлин ([Greg Laughlin](#)), в аспирантуре в начале 90-х он много времени уделял изучению коричневых карликов. Его друг, тоже занимавшийся поиском этих тогда ещё гипотетических объектов, как-то сказал ему: "Посмотри правде в глаза, Грег. Ты интересуешься коричневыми карликами не потому, что они тебе интересны сами по себе. Ты ими интересуешься, потому что тебе на самом деле интересны планеты, а коричневые карлики всего в одной остановке на пути к ним". По этой же логике, писал Лофлин в своём блоге в 2006 году,

я занимаюсь теперь экзопланетами-гигантами не потому, что они мне так уж интересны, а потому, что они находятся всего в одной остановке на пути к обитаемым землеподобным планетам.

29 сентября 2010 года Пол Батлер и Стив Вогт из калифорнийской исследовательской группы организовали пресс-конференцию, на которой должно было прозвучать "важное заявление" об открытии в области экзопланетологии. В системе красного карлика [Gliese 581](#), где на тот момент было известно уже четыре планеты, астрономы, объединив данные наблюдений собственного спектрометра [HIRES](#), установленного в обсерватории Кека, и европейского HARPS, обнаружили свидетельства существования ещё двух планет, *g* и *f*. Последняя обращалась с периодом 430 суток и получала меньше тепла, чем Юпитер в нашей системе, а вот *g* с периодом 37 суток и большой полуосью орбиты 0.15 а.е. попадала точно в обитаемую зону красного карлика. Это значило, что при наличии не слишком плотной, сравнимой с земной атмосферы планета способна поддерживать на поверхности воду в жидкой фазе. Помимо прочего, *Gliese 581 g* была лёгкой – всего 3 земных массы, и поэтому вполне могла иметь землеподобный состав. Исследователи старались избегать громких заявлений, но под конец конференции на очередной вопрос журналистов Вогт ответил: "Лично я бы сказал, что, учитывая повсеместность и способность жизни процветать везде, где это возможно, моё личное ощущение – шансы на жизнь на этой планете равны 100%". Естественно, новости тут же запестрели заголовками об открытии планеты со 100% вероятностью жизни.

То, что Батлер и Вогт участвовали на конференции без своего давнего коллеги Джеффри Марси, не было случайностью. Успешная команда экзопланетологов-первопроходцев, открывших многие десятки планет, распалась в 2007 году. К сожалению, этот раскол не пошёл на пользу качеству работы новой группы. Многие специалисты отмечали слабые места в теоретической части статьи Батлера и Вогта. Вскоре последовали работы с опровержением результатов калифорнийцев. Европейские астрономы на основе новых данных с HARPS смогли подтвердить только четыре уже известные планеты, не найдя никаких следов планет *f* и *g*. В январе 2011 вышла статья Филипа Грегори (Philip Gregory) из университета Британской Колумбии, который проанализировал все известные на тот момент данные HARPS и HIRES и не нашёл в них следов пятой планеты. В июле 2012 года Вогт опубликовал новые результаты, на этот раз без планеты *f*, и с серьёзно пересмотренными параметрами для *g*. Теперь масса планеты составила 2 земных, а период уменьшился до 32 суток. Последующие работы, в том числе статья российского астронома Романа Балужева, не только исключили возможность существования *Gliese 581 g*, но и поставили под вопрос реальность планеты *d*. *Gliese 581 d* с большой полуосью орбиты 0.22 а.е. попадала во внешнюю область зоны обитаемости звезды и при достаточно плотной атмосфере, обеспечивающей сильный парниковый эффект (что было вполне реально, учитывая минимальную массу планеты 7 земных), тоже могла бы быть потенциально обитаемой. Сейчас периодичность, ошибочно приписанную влиянию планеты, связывают с активностью красного карлика, а подтверждёнными остаются лишь три планеты – *e*, *b* и *c*.

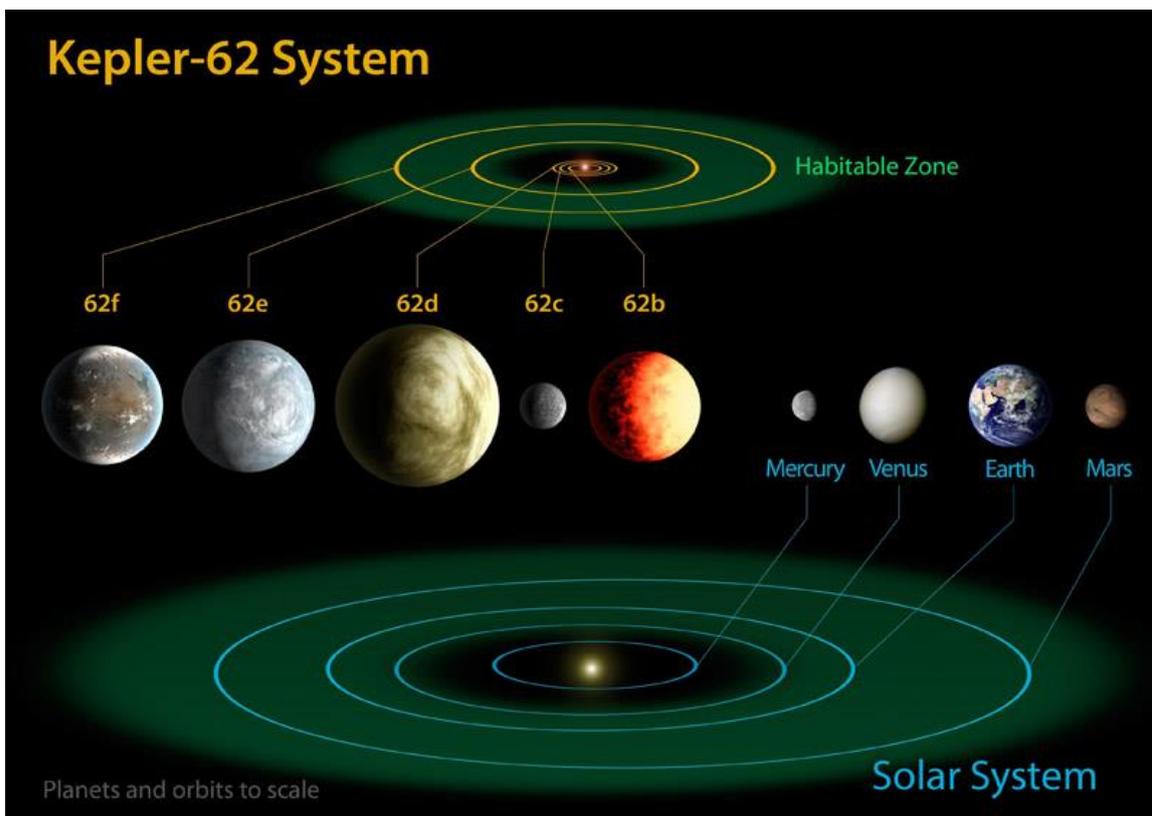
В ноябре 2011 года европейская команда, работающая с HARPS, сообщила об открытии второй планеты у [Gliese 667 C](#) (близкого красного карлика из тройной системы). Масса её составляла 4 земных, период – 28 суток. Орбита с большой полуосью 0.125 а.е. попадала в зону жизни звезды. В феврале 2012 года вышла ещё одна статья в соавторстве Гиллема Англада-Эскуде (Guillem Anglada-Escude) из Гёттинггенского университета и команды Батлера и Вогта, где исследователи подтверждали существование планеты, основываясь, как и в случае *Gliese 581 g*, на комбинированных данных от HARPS и собственных инструментов. Между двумя научными коллективами возник спор о приоритете открытия, переросший во взаимные обвинения в желании присвоить первенство. Накал эмоций вполне можно понять, если учесть, что *Gliese 667 C c* стала в итоге первой подтверждённой планетой в зоне жизни, состав которой, исходя из массы, мог оказаться землеподобным. Хотя, как видно по некоторым транзитным планетам с известной плотностью, небольшая масса сама по себе гарантией землеподобности служить не может.



Небо Gliese 667 C c в представлении художника [34]

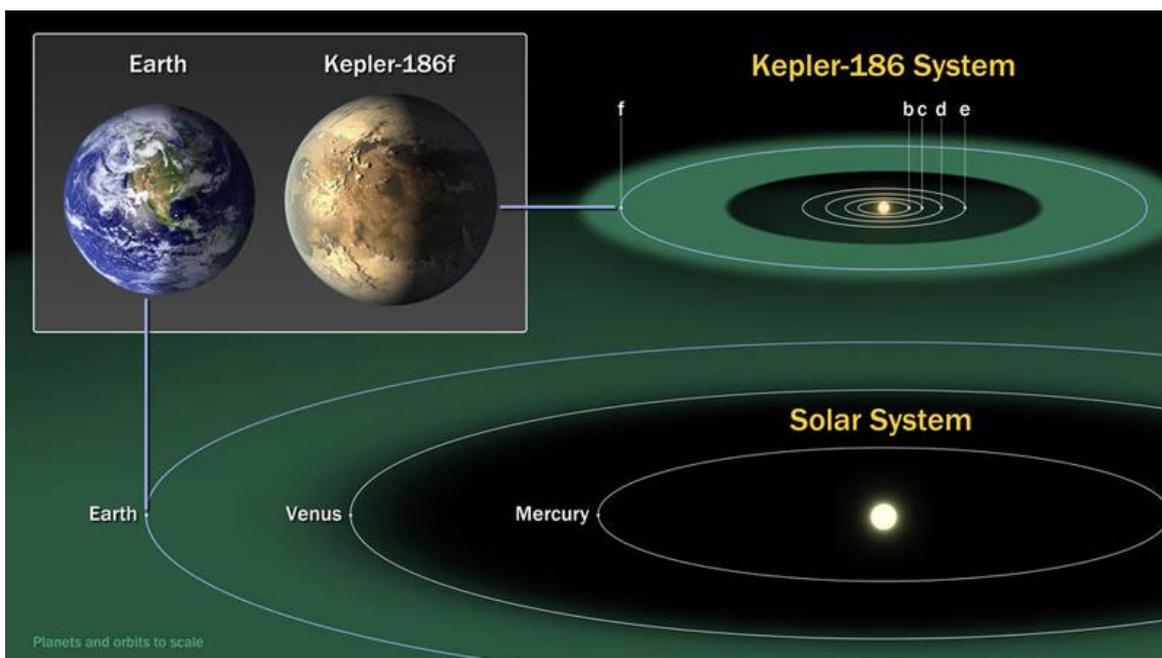
В апреле 2013 года список потенциально обитаемых экзопланет пополнил "Кеплер". У жёлтого карлика [Kepler-69](#) обнаружили две транзитные планеты – уже типичный мини-нептун *b* с радиусом более 2 земных и периодом обращения 14 суток и гораздо более долгопериодичную *c* с большой полуосью орбиты 0.64 а.е. С учётом светимости звезды в 80% солнечной планета обращалась у внутренней кромки обитаемой зоны. Впрочем, позже уточнённые оценки поместили её орбиту за пределы этой зоны, в область, где расположена в нашей системе Венера. При радиусе 1.7 земных *Kepler-69 c* почти наверняка обладает мощной атмосферой с сильным парниковым эффектом и является поэтому скорее аналогом Венеры, чем Земли.

Более многообещающей выглядела система оранжевого карлика [Kepler-62](#). В дополнение к трём "плотноупакованным" планетам с периодами в пределах 20 суток (включая марсоразмерную *Kepler-62 c*) у него обнаружили две внешние планеты *e* и *f*, совершающие оборот за 122 и 267 суток. *Kepler-62 e* напоминала *Kepler-69 c*: она получала на 20% больше тепла, чем Земля, и имела радиус 1.6 Re. *Kepler-62 f* на её фоне выглядела более перспективной: большой полуосью 0.72 а.е. орбита напоминала венерианскую, но из-за низкой светимости звезды – всего 20% солнечной – температурный режим скорее соответствовал температурному режиму Марса. В отличие от Марса, однако, *Kepler-62 f*, чей радиус на 40% превышал земной, должна была обладать плотной атмосферой, создающей достаточный для поддержания плюсовых температур парниковый эффект. С другой стороны, относительно небольшие размеры повышали шансы на то, что планета окажется землеподобной, а не представляет из себя мининептун.



Система Kepler-62 в сравнении с Солнечной системой. Зелёным показана зона обитаемости [35]

Годом спустя, в апреле 2014, была опубликована ещё одна потенциально жизнепригодная планета. В пятипланетной системе яркого красного карлика [Kepler-186](#) самая внешняя, *f*, с большой полуосью 0.43 а.е., попадала в зону обитаемости звезды недалеко от ее внешнего края. При наличии плотной углекислотной атмосферы (с парциальным давлением  $\text{CO}_2$  не менее 0.5 атмосфер) на поверхности могла бы существовать жидкая вода. Небольшой диаметр планеты – всего 1.17 земного – повышал шансы на твёрдый, скалистый состав.



Система Kepler-186 в сравнении с Солнечной системой. Зелёным показана зона обитаемости [36]

В январе 2015 года на конференции Американского астрономического сообщества было представлено ещё несколько планет в зонах жизни. Наиболее перспективной выглядела [Kepler-442 b](#), суперземля радиусом 1.34 Re у тусклого К-карлика. Несмотря на дистанцию в 0.4 а.е. от звезды, планета получала несколько меньше энергии, чем Земля. Орбита, сравнимая с орбитой Меркурия, означала, что планета, вероятнее всего, не захвачена приливно в орбитально-вращательный резонанс 1:1, то есть не обращена все время к звезде одним полушарием, как Луна к Земле.

В июле 2015 была, наконец, объявлена и первая потенциально обитаемая планета у похожего на Солнце жёлтого карлика класса G2V Kepler-452. При периоде обращения 385 суток инсоляция *Kepler-452 b* составляла примерно 110% земной, что помещало её опасно близко к внутренней границе зоны обитаемости. Главным отличием, однако, был размер – при радиусе 1.6 Re планета имела все шансы оказаться мининептуном с сомнительными условиями для поддержания жизни. Увы, но анализ формы транзитов, проведённый в 2018 году, поставил большой знак вопроса над реальностью "второй Земли". С вероятностью 99% транзиты *Kepler-452 b* на самом деле являются инструментальным артефактом.

### Конец прекрасной эпохи

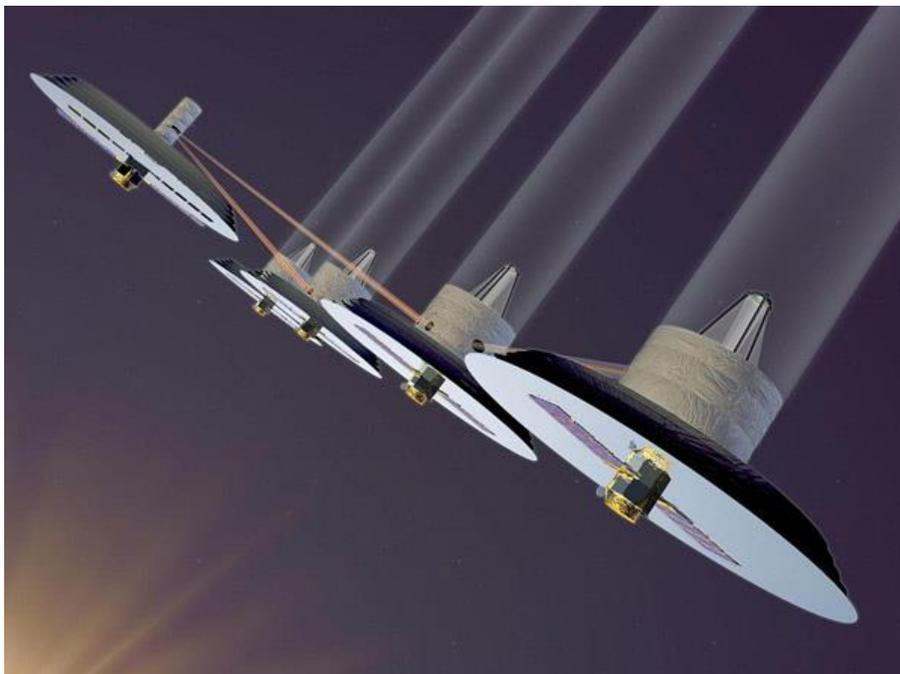
Всего через месяц после публикации Kepler-62 и Kepler-69 и ровно через четыре года после начала основной научной миссии у "Кеплера" отказал второй из четырёх двигателей-маховиков, поддерживающих точную ориентацию аппарата в пространстве. Первая поломка случилась в 2012 году, но "Кеплер" смог тогда продолжить работу (для поддержания ориентации достаточно трёх маховиков). Отказ второго маховика означал конец основной миссии. Это было неутешительной новостью, даже несмотря на тот факт, что телескоп отработал на полгода дольше, чем рассчитывалось изначально. Но избыточная шумность звёзд не позволила "Кеплеру" достичь своей основной цели – собрать статистику по аналогам Земли. Именно ради этой задачи задумывал миссию Билл Боруцки, все прочие результаты, по его мнению, были бы лишь "подливкой, глазурью на торте". К сожалению, времени на достижение этой цели не хватило.

Разумеется, у исследователей на руках оставались данные, требующие ещё не одного года анализа. Именно так, например, были открыты *Kepler-186 f* и *Kepler-442 b*. Проблема заключалась в том, что в обозримой перспективе не планировалось ни одной миссии, сравнимой по возможностям с "Кеплером". В экзопланетном научном сообществе в это время воцарилось глубокое разочарование. Десятилетием раньше будущее выглядело совсем иначе. Экзопланетология становилась одним из основных направлений астрофизики, а поиск жизни и планет, способных её поддерживать, из маргинальной области превращался в одну из главных целей исследований. В конце 90-х начали прорабатываться такие проекты, как [SIM](#) – Space Interferometry Mission и [TPF](#) – Terrestrial Planet Finder.

Оба проекта изначально были основаны на использовании интерферометрии, хотя применялись разные подходы. Основной задачей SIM должна была стать астрометрия ближайших звёзд с точностью до одной микросекунды дуги. Это позволяло обнаруживать суперземли, а при благоприятном стечении параметров – и планеты вплоть до земной массы. Проект предполагал использование двух полуметровых зеркальных телескопов, разделённых шестиметровой апертурой, и нескольких вспомогательных телескопов меньшего диаметра, установленных на единой платформе.

Концепция TPF основывалась на так называемой обнуляющей интерферометрии. В простейшем варианте два зеркальных телескопа принимают свет от одной и той же звезды, который затем подводится к общему приёмнику с задержкой по фазе, так, чтобы свет звезды полностью гасился волновой интерференцией, в то время как тусклый свет планеты оставался нетронутым (либо даже мог быть усилен). Это требовало очень высокой

точности приборов, ни разу не опробованных в космосе. В одной из ранних проработок (получившей обозначение TPF-I, от "интерферометрии") проект представлял из себя четыре охлаждаемых полуметровых зеркала, разделённых базой в 75 м и выведенных во избежание засветки зодиакальной пылью за орбиту Юпитера. Поскольку жёсткая конструкция была бы подвержена вибрациям, рассматривался вариант со свободноплавающими зеркалами, удерживаемыми позиционной системой друг относительно друга с исключительно высокой точностью. Аналогичный проект "Дарвин" с четырёхметровыми телескопами на стометровой апертуре и с размещением в точке Лагранжа L2 проработывало Европейское космическое агентство.



Один из вариантов TPF-I [37]

Со временем был предложен более дешёвый и реалистичный вариант под названием TPF-C, предполагавший одно 8-метровое монолитное зеркало с коронографом (отсюда буква C в названии), блокирующим свет звезды. Специально подобранная форма коронографа позволяла гасить звёздный свет до миллиардной доли процента, но требовала беспрецедентной точности в изготовлении зеркала. Наконец, третий вариант, TPF-O, допускал использование обычного космического телескопа с маской-зонтом диаметром до 100 м, размещаемой на расстоянии порядка 100 тысяч км перед телескопом. Форма маски, напоминающая подсолнух, позволяла эффективно обнулять свет исследуемой звезды. Понятно, что в этом случае возникали серьёзные трудности с перенацеливанием маски, поскольку требовалось её перемещение на десятки тысяч километров.

Несмотря на техническую сложность и потенциально огромную стоимость, проекты поначалу получили поддержку. В 2004 НАСА запланировало запуск TPF-C на 2014 год, а TPF-I – при возможном сотрудничестве с ЕКА – на период до 2020 г. Увы, все эти смелые планы быстро рассеялись как дым. Научные программы НАСА постепенно урезались в пользу новой пилотируемой программы Constellation. Однако едва ли не большей угрозой стала космическая обсерватория нового поколения имени Джеймса Вебба, создаваемая на замену "Хаббл". Первоначальная смета в 1 млрд. долларов успела к 2006 раздуться до 9 млрд. Фактически "Вебб" пожирал все сколько-нибудь дорогостоящие родственные проекты, поскольку иных источников средств в сокращающемся научном бюджете не было. Финансирование TPF приостановили на неопределённый срок в 2007 году, а в 2011 проект был полностью отменён. Та же судьба годом ранее постигла SIM, даже несмотря на то, что все требуемые для осуществления миссии технологии были представлены НАСА ещё в 2006 году. ЕКА не смогло потянуть в одиночку "Дарвин". В итоге к середине

второго десятилетия XXI века новое и наиболее перспективное направление астрофизики оказалось у разбитого корыта.

## "Кеплер" умер... Да здравствует K2!

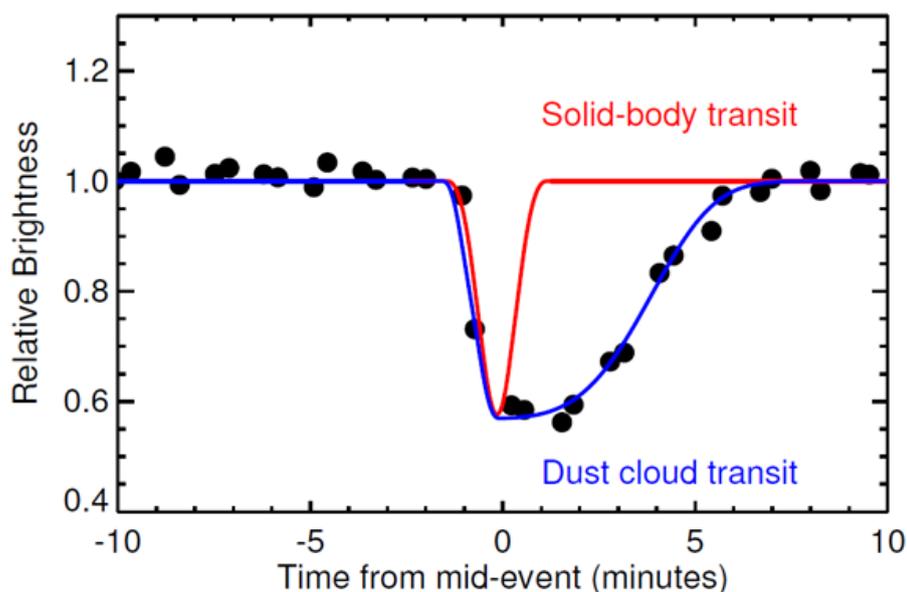
Исследователям-экзопланетологам приходилось довольствоваться малым. Прежде всего, рано было списывать со счетов сам "Кеплер". Потеря стабилизации не позволяла продолжать наблюдение за основным полем, но инженеры тут же стали искать альтернативные возможности. В конце концов в качестве дополнительной стабилизирующей силы было предложено использовать... давление солнечного света. Правда, аппарат приходилось перенацеливать каждые 83 дня, чтобы не произошло засветки ПЗС-матрицы. Но в этом были и свои плюсы – область поисков значительно расширилась, хотя и за счёт сокращения времени наблюдений. Поскольку поиск вёлся в плоскости эклиптики, поля наблюдения попадали в основном на зодиакальные созвездия. В общей сложности с марта 2014 по октябрь 2018, до полного исчерпания топлива, удалось провести двадцать наблюдательных кампаний, включая тестовую нулевую. Точность наблюдений, поначалу весьма посредственную, довольно быстро удалось довести почти до показателей основной миссии.

В декабре 2014 года команда "Кеплера" сообщила об открытии первой планеты в рамках продлённой миссии: мининептуна [K2-2 b](#) радиусом 2.5 земных у звезды HIP 116454 (номер K2-1 b был закреплён за уже известным горячим юпитером [WASP-28 b](#)). Следующая система была опубликована в январе 2015: сразу три планеты у яркого красного карлика [K2-3](#). Внешняя, K2-3 d, с радиусом 1.5 Re, совершала оборот за 45 суток и лишь немного не дотягивала до внутренней зоны обитаемости звезды. Счёт открытий быстро пошёл на десятки, а со временем и на сотни (по состоянию на август 2023 года известны 548 подтверждённых в рамках K2 планет и 977 кандидатов). Одно из преимуществ продлённой миссии заключалось в том, что планеты чаще обнаруживали у сравнительно ярких звёзд, за которыми проще было вести наблюдения на наземных обсерваториях, что, в свою очередь, упрощало их подтверждение и уточнение характеристик.

Расширение области наблюдений позволяло искать новые планеты в уже известных системах. В июле 2015 участник проекта Planet Hunters, просматривая кривые блеска, полученные в ходе K2, обнаружил дополнительные транзиты у звезды [WASP-47](#), у которой уже был известен к тому времени горячий юпитер и внешний гигант с периодами 4.16 суток и 1.6 года. Специалисты проанализировали находки и подтвердили наличие двух новых планет: суперземли e с периодом всего 19 часов и нептуноподобной d, период которой составлял 9 суток. Система с лёгкими планетами по обе стороны от орбиты горячего юпитера была большой редкостью: горячие юпитеры обычно оставляют пустой всю внутреннюю область системы.

Транзиты фиксировали не только у обычных звёзд главной последовательности. В октябре 2015 года группа исследователей опубликовала статью об открытии планеты у белого карлика WD 1145+017. Эти выгоревшие остатки звёзд солнечной массы, но земных размеров давно привлекали внимание экзопланетологов. Дело в том, что ещё с начала XX века в спектрах некоторых из них стали находить следы тяжёлых элементов, таких как кальций, кислород и железо. Это противоречило расчетам, согласно которым любые элементы тяжелее водорода должны были тонуть в мощном гравитационном поле белых карликов, оставляя чисто водородную атмосферу. Следовательно, что-то её загрязняло. Как известно, белые карлики "вызревают" в недрах красных гигантов и становятся видимыми, когда гигант сбрасывает свою внешнюю оболочку в виде планетарной туманности. Планеты при этом могут удержаться, но из-за уменьшения массы системы меняют орбиты и гравитационно возмущают сохранившиеся пояса астероидов или другие малые тела. Те из астероидов, что пролетают рядом с белым карликом, могут разрушаться приливными силами и образуют обломочный диск, похожий на кольца Сатурна. Пыль из таких дисков, падающая на звезду, и становится причиной загрязнения. И

действительно, у некоторых белых карликов удалось обнаружить инфракрасное излучение, испускаемое нагретой пылью. WD 1145+017 наблюдался в рамках миссии K2 в апреле 2015. В кривой блеска было обнаружено несколько периодических транзитоподобных сигналов. Исследователи интерпретировали их как транзиты небольших объектов с периодами от 4.5 до 5 часов. Самый крупный, с периодом 4.5 часа, размерами должен был быть сопоставим с карликовыми планетами Солнечной системы. Форма его транзитов оказалась несимметричной – яркость звезды быстро падала, но возвращалась обратно к норме гораздо медленнее и более плавно. Проще всего это было объяснить тем, что планетоид окружает облако испаряющихся пород, вытянувшееся "хвостом" вдоль его орбиты.



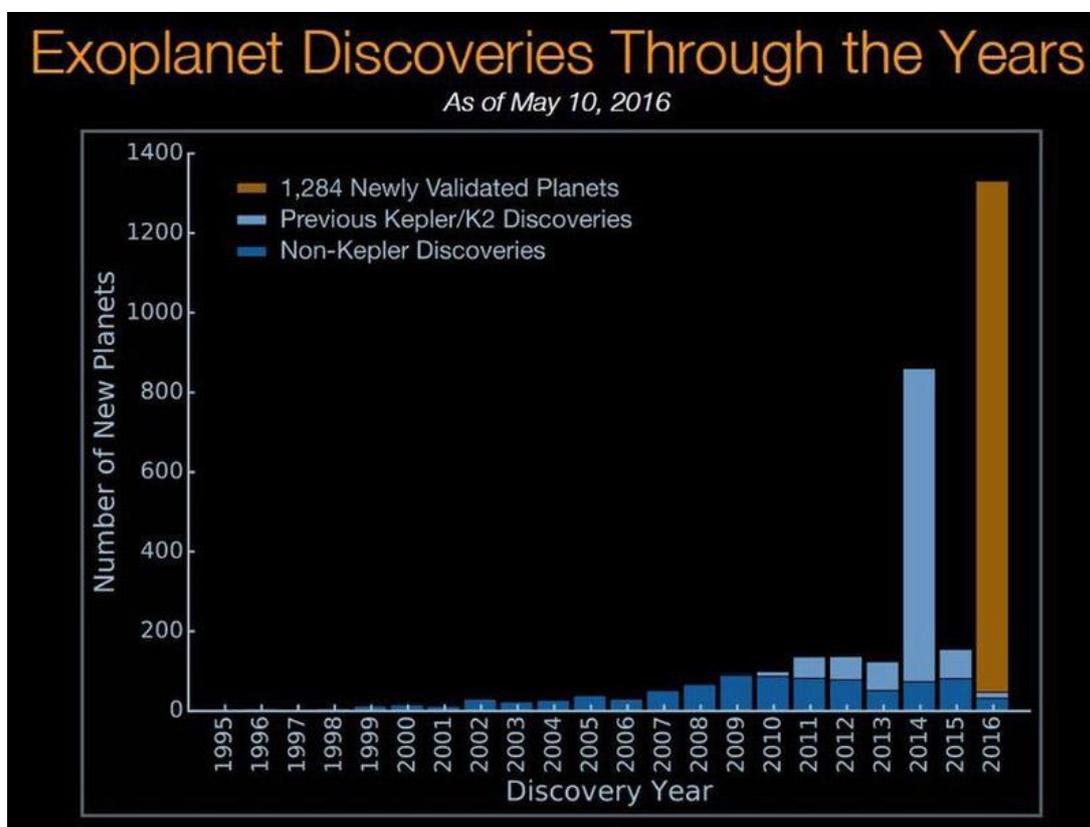
Кривая блеска WD 1145-017 во время транзита испаряющегося планетоида. Красным показана форма транзита твёрдого объекта [38]

В рамках продлённой миссии были открыты и системы с большим числом транзитных планет. У красного карлика [K2-72](#) в 2016 году обнаружили сразу четыре землеразмерные планеты, причём внешняя с большой полуосью орбиты 0.11 а.е. попадала в зону обитаемости звезды. В апреле 2017 участники Exoplanet Explorers – проекта, аналогичного Planet Hunters – выявили в данных 12-й кампании достоверные транзитные сигналы, вызванные четырьмя планетами у оранжевого карлика [K2-138](#). Научная команда K2 добавила к ним пятую планету и шестой, внешний кандидат *g* с периодом 42 суток, который был подтверждён телескопом "Спитцер" в 2021 году. С помощью HARPS удалось измерить массы системы. Пять внешних планет оказались мининептунами, внутренняя же *b* при радиусе 1.6  $R_E$  и массе 3  $M_E$  имела плотность около 5 г/куб.см. Несмотря на инсоляцию, в 500 раз превышающую земную, она, вероятно, сохраняет заметную долю летучих веществ в своём составе.

В 2016-17 годах у звезды [HD 3167](#) обнаружили три планеты: суперземлю *b* на ультракороткой орбите с периодом всего 23 часа, а также мининептун *c* и нетранзитную *d* с периодами 30 и 8.5 суток. Используя высокоточные спектрометры, исследователи смогли в 2021 измерить эффект Росситера-Маклафлина и определить наклон орбит. *HD 3167 b* обращалась в плоскости, близкой к плоскости экватора звезды, в то время как орбита *HD 3167 c* была к этой плоскости перпендикулярна! Орбиты были наклонены друг к другу под углом 102°. Третья планета, *d*, тоже должна находиться на перпендикулярной орбите, иначе система стала бы неустойчивой. Что могло вызвать такую странную орбитальную конфигурацию? Авторы исследования предположили влияние внешнего, пока не обнаруженного гиганта. В 2022 была открыта четвертая, нетранзитная планета *e* с периодом 78 суток. Скорее всего, её орбита тоже расположена по нормали к звёздному экватору.

Между тем данные, накопленные в течение основной миссии, продолжали приносить свои результаты. Сюрпризом стали средние плотности некоторых планет. В октябре 2013 вышла статья об измерении масс в системе [KOI-152](#) (позже получившей название Kepler-79) методом анализа вариаций времени транзитов (TTV). Третья планета, *d*, при радиусе 7 земных "весила" всего 6  $M_e$ , что означало среднюю плотность в десять раз меньшую плотности воды. Рекорд, впрочем, продержался недолго. Уже в январе 2014 года были опубликованы результаты взвешивания планет системы [Kepler-51](#). При радиусах 7, 9 и 10 земных массы планет *b*, *c* и *d* составляли 2, 4 и 8 земных. Гигантские, сатурноподобные планеты весили всего в несколько раз больше Земли! Их средние плотности лежали в диапазоне 0.03 – 0.05 г/куб.см. Одним из возможных объяснений служит молодой возраст звезды – около полумиллиарда лет. Вероятно, планеты не успели остыть после формирования и продолжают сжиматься. Но возможен и вариант, что подобные "рыхлые" планеты на самом деле обладают нормальной плотностью, а иллюзию большого радиуса создают окружающие их кольца.

Почти одновременно с Kepler-51 на конференции Американского астрономического сообщества сообщили об измерении масс в двухпланетной системе [KOI-314](#), позже получившей название Kepler-138. Радиусы обеих планет были близки – 1.6 земных, но масса внутренней равнялась четырём, а внешней – всего лишь одной земной. Другими словами, внутренняя планета представляла из себя суперземлю, а внешняя – мининептун земной массы! Для такого необычного класса планет был даже предложен термин "газовый карлик". К сожалению, метод TTV, применённый в данном случае для оценки масс, грешит большими неточностями. В 2022 вышла статья с уточнёнными данными по этой системе, с использованием как метода TTV, так и доплеровской спектроскопии. Массы обеих планет оказались в итоге почти одинаковыми, немногим более двух земных, что соответствовало средней плотности 3.6 г/куб.см. Вероятнее всего, планеты являются "водными мирами" (океанидами) с большой долей воды в различных фазовых состояниях. Была обнаружена также и третья, самая внутренняя планета, получившая индекс *b*, радиусом 0.64  $R_e$  и массой всего 7% земной. Плотность *Kepler-138 b* оценивается всего в 1.7 г/куб.см.



Зависимость количества новых экзопланет по годам. Подтверждение кандидатов "Кеплера" в 2014 и 2016 годах привело к резкому росту числа известных экзопланет [\[39\]](#)

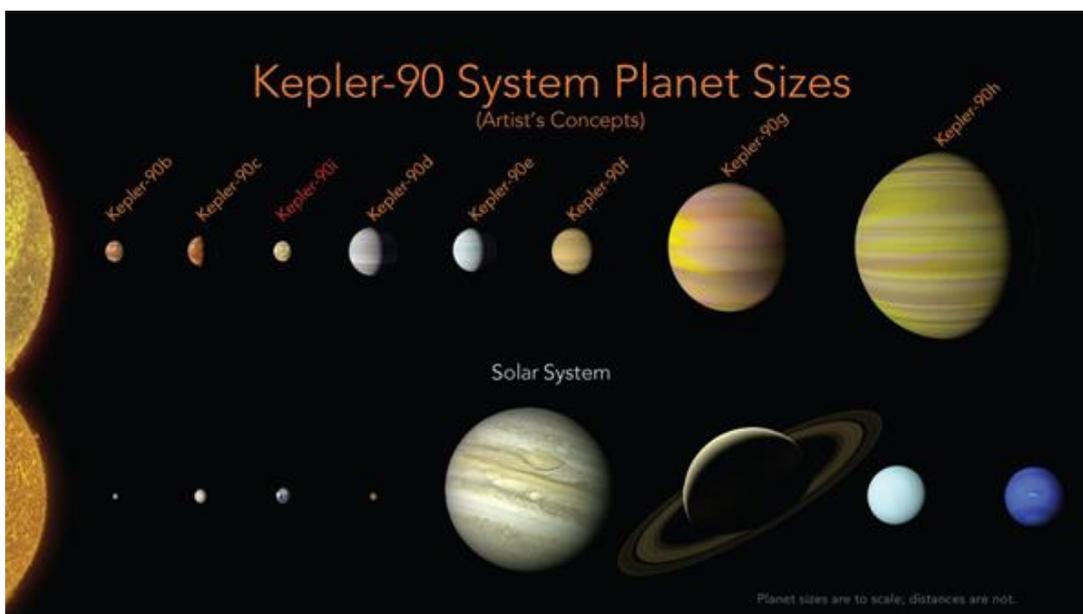
Поскольку подтверждение кеплеровских планет шло медленно, и большая их часть оставалась в статусе кандидатов, специалисты, работающие с данными "Кеплера", решили упростить процедуру проверки. В феврале 2014 года статус планет получили сразу 715 кандидатов; тем самым число известных экзопланет выросло почти до 1700. Все подтвержденные кандидаты входили в состав многопланетных систем. Вероятность ошибки в таких случаях считалась пренебрежимо малой. Не останавливаясь на достигнутом, в мае 2016 года команда "Кеплера" присвоила планетный статус сразу 1284 кандидатам. Упрощенная процедура проверки включала анализ формы транзита – у фоновых затменных он отличался – и оценку вероятности ложного подтверждения. Вероятность менее 1% считалась достаточной для валидации. Общее количество подтвержденных планет "Кеплера" составило к тому времени уже 2325 – львиную долю от всех известных экзопланет.

Из примечательных систем, открытых командой "Кеплера" в посткеплеровскую эпоху, стоит упомянуть многопланетные [Kepler-444](#) и [Kepler-90](#). Kepler-444 – тройная звезда, компоненты В и С которой, два красных карлика, представляют собой тесную пару, совершающую оборот по вытянутой орбите вокруг центральной звезды спектрального класса K0V. Система принадлежит к т.н. толстому диску Галактики и отличается низкой металличностью (содержание железа оценивается всего в 30% от солнечного) и древним возрастом (около 11 млрд. лет). Звезда расположена всего в 119 световых годах от Земли и обладает очень высокой по меркам выборки "Кеплера" относительной яркостью – её видимая величина составляет +8.9. Это позволило обнаружить у Kepler-444A пять транзитных планет с исключительно малыми радиусами от 0.4 до 0.77 земных. Система оказалась очень компактной, с периодами от 3.6 до 9.7 суток. Все соседние планеты захвачены во взаимные резонансы либо 5:4, либо 4:3. В 2017 был проведен анализ вариаций времени транзитов, и у двух планет, *d* и *e*, удалось определить массы – около 3.5% земной каждая. Учитывая сходный с Марсом размер планет, их средняя плотность должна составлять всего около 1.3 г/куб.см (не более 3.5 г/куб.см с учётом погрешностей), что сравнимо скорее с плотностью ледяных спутников планет-гигантов, чем планет земной группы.

Система [Kepler-90](#) с самого начала была рекордсменом по количеству планет. В статье, вышедшей в октябре 2013 года, говорилось об открытии семипланетной системы у тогда ещё безымянной звезды класса F9, имеющей только номер в KIC – Kepler Input Catalog. В декабре 2017 была подтверждена восьмая планета с индексом *i*, и таким образом Kepler-90 уравнилась по числу планет с Солнечной системой. Интересна структура системы. В отличие от расположенных вперемешку небольших и среднеразмерных планет у [Kepler-20](#), планеты Kepler-90 выстроены упорядоченно в соответствии со своими размерами. Внутренние *b*, *c* и *i* с периодами 7, 9 и 14 суток имеют радиусы 1.3, 1.2 и 1.3 Re. Дальше начинается область мининептунов *d*, *e* и *f* с периодами 60, 92 и 125 суток и радиусами 2.9, 2.7 и 2.9 Re. Наконец, замыкают перечень известных планет два гиганта *g* и *h* с периодами 211 и 332 суток и радиусами 8 и 11 земных. Их удалось "взвесить" при помощи метода TTV. *Kepler-90 g* оказалась раздутым "нептуном" с массой 15 Me, а вот *Kepler-90 h* – действительно планета-гигант с промежуточной между Сатурном и Юпитером массой в 200 земных.

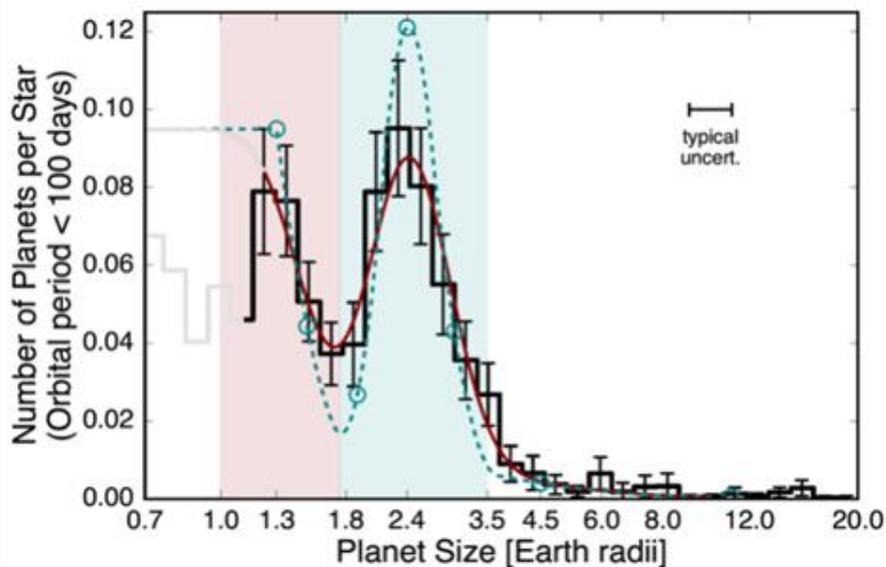
В июне 2017 года был опубликован финальный каталог "Кеплера" по результатам всех четырёх лет основной миссии. В него вошли 4034 подтвержденные планеты и кандидата. Впрочем, анализ данных не прекращается до сих пор (по состоянию на август 2023 года на сайте [NASA Exoplanet Archive](#) числятся 2778 подтвержденных планет "Кеплера" и 1984 кандидата). Продолжали выявляться закономерности в распределении планет. Как правило, отношение орбитальных периодов между соседними планетами в системе сохраняется примерно постоянным, то есть периоды планет (и, соответственно, большие полуоси орбит) по мере удаления от звезды растут примерно в геометрической прогрессии. В эту закономерность достаточно неплохо вписывается эмпирическое правило Тициуса-Боде, выведенное для планет Солнечной системы. В распределении планет по радиусам был выявлен глубокий "провал" в диапазоне от 1.5 до 2 Re. Он был назван долиной радиусов (radius valley) или зазором Фултона (Fulton gap), в честь ведущего автора статьи, опубликованной в марте 2017, хотя свидетельства такого разрыва появлялись и раньше.

## Орбиты планет Kepler-90 близ своей звезды



Система Kepler-90. Сравнение орбит (вверху) и размеров планет (внизу) с планетами Солнечной системы [40] [41]

Планеты с радиусами более 1.7-1.8  $R_E$ , по-видимому, обладают протяжёнными водородно-гелиевыми атмосферами, то есть представляют из себя мининептуны, в то время как у планет меньшего размера водородных атмосфер нет либо изначально (как у планет земной группы в Солнечной системе), либо вследствие потери (у короткопериодических, горячих планет). Позже была обнаружена зависимость положения зазора Фултона от спектрального класса звезды: у звёзд класса F он смещён к 2  $R_E$ , в то время как у M-карликов может приходиться на радиусы менее 1.5  $R_E$ .



Зазор Фултона: зависимость количества открытых планет от их радиуса [42]

## Ближайшие

Конечно, наибольший интерес всегда вызывали ближайшие звёзды. Ведь если межзвёздный полёт технически реализуем, именно им предстоит стать целями первых межзвёздных экспедиций. Астрометрический поиск, погрешности в котором пропорциональны расстоянию, был направлен именно на ближайших соседей Солнца, но доплеровский, и особенно транзитный методы от расстояния зависели слабо, и долгое время солнечные окрестности оставались "в тени" исследований.

За первые пятнадцать лет экзопланетной эпохи, с 1995 по 2010, у сотни звёзд в пределах 5 парсек было открыто всего четыре экзопланетные системы: долгопериодичные планеты-гиганты у [Эпсилон Эридана](#) и [GJ 832](#), четырехпланетная система у [Gliese 876](#) и горячий нептун [GJ 674 b](#). В 2010-е ситуация начала постепенно меняться. К 2016 году число известных систем в окрестностях Солнца удвоилось.

24 августа 2016 года на специально организованной конференции европейские астрономы объявили об открытии планеты у ближайшей к Солнцу звезды – [Проксимы Центавра](#). Этот тусклый красный карлик уже давно наблюдался в рамках различных экзопланетных обзоров, в том числе на HARPS, но безрезультатно. В 2013 году в архивных данных удалось выявить слабый сигнал с периодичностью 11 суток. Но погрешность и вероятность ошибки были слишком высоки. Одной из проблем стала разрозненность наблюдений, которые велись с перерывами в месяцы и даже годы. Чтобы окончательно прояснить ситуацию, европейские астрономы под руководством Гиллема Англада-Эскуде запустили кампанию под названием [Pale Red Dot](#) – "Бледная красная точка" (по аналогии с известным снимком "Вояджера-1" Pale Blue Dot, на котором с расстояния 6 млрд. км была запечатлена Земля). В течении двух месяцев почти непрерывных наблюдений, проведенных с января по март 2016 года, на HARPS было получено 54 спектра Проксимы Центавра. Объединив их со старыми данными, исследователи получили совершенно четкий сигнал с периодом 11.2 суток и с вероятностью ошибки не более одной к десяти миллионам.

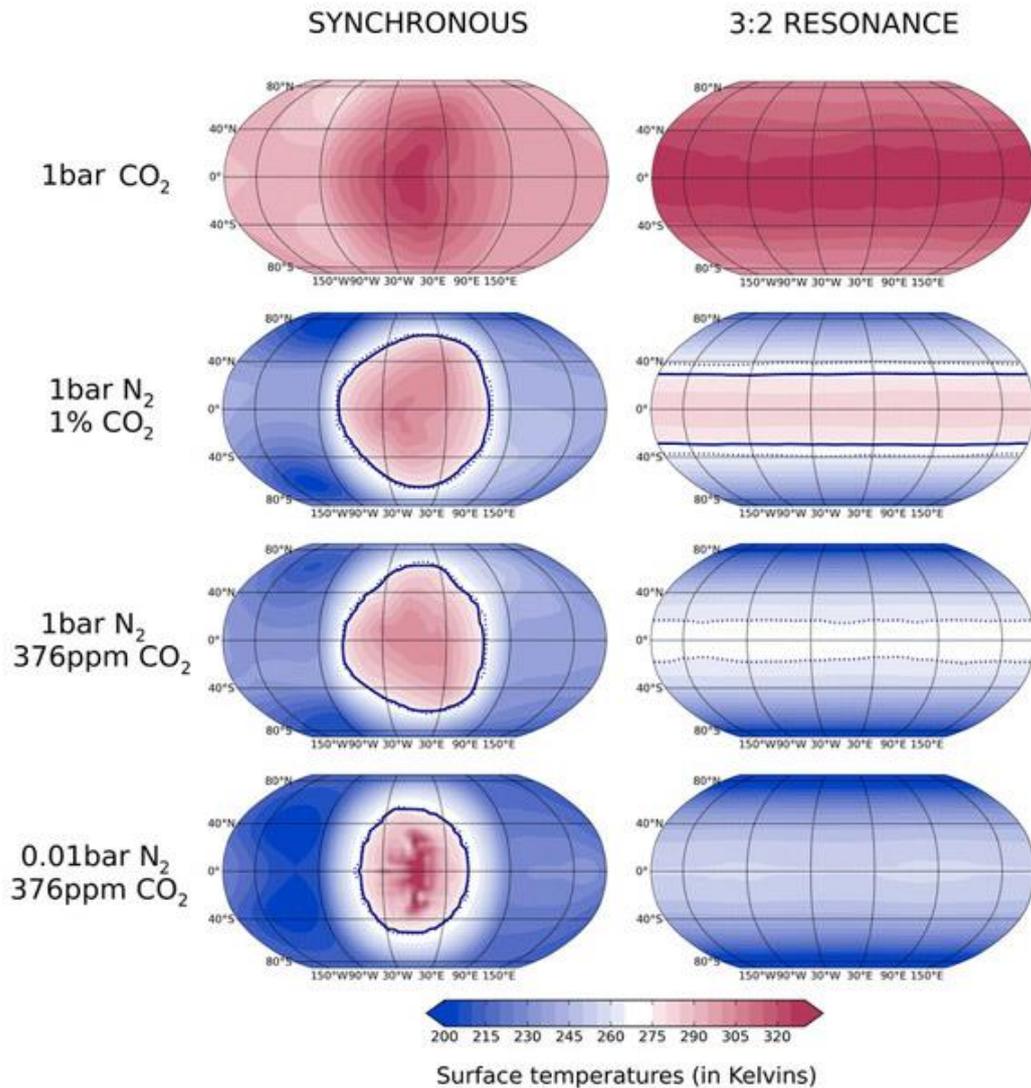
Планета оказалась совсем маленькой – минимальная масса 1.3 земных, и обращалась она на расстоянии 0.05 а.е. от звезды. Болومترическая, то есть полная светимость Проксимы, включающая инфракрасный диапазон, на который приходится большая часть

спектра этого тусклого красного карлика, составляет всего 0.16% солнечной. Энергия, получаемая небесным телом, обратно пропорциональна квадрату расстояния до звезды, поэтому инсоляция *Проксимы b* оценивается примерно в 2/3 солнечной. Для планеты красного карлика это совсем неплохой показатель, потому что альbedo (отражательная способность) в инфракрасном свете этих звёзд ниже – атмосфера и поверхность поглощают больше тепла при прочих равных условиях. Поэтому освещённость *Проксимы b* весьма благоприятна для поддержания жидкой воды на поверхности, и, соответственно, для развития жизни. Но принадлежность Проксимы Центавра к поздним (то есть холодным) красным карликам класса M5.5Ve вносит серьёзные поправки в эту оптимистичную картину.



Небо Проксимы Центавра b в представлении художника [43]

Прежде всего, из-за близости планеты к звезде практически неизбежен приливной захват в орбитально-вращательный резонанс 1:1, при котором одно полушарие планеты всё время повёрнуто к Проксиме, как видимая половина Луны – к Земле. Логично предположить, что в таком случае на ночном полушарии будет скапливаться огромный ледник, а температуры опустятся так низко, что начнёт вымерзать атмосфера. Полуденная же сторона будет представлять из себя высушенную и почти безвоздушную пустыню. В лучшем случае жизнь сможет теплиться только в зоне терминатора, где царит вечный закат. Однако результаты моделирования климата показали, что это не так. В "соларе", то есть подзвёздной точке приливно захваченной планеты, должны постоянно действовать восходящие атмосферные потоки, поднимающие влажный тёплый воздух в холодные слои тропосферы, где влага конденсируется в облака. Таким образом, солар представляет из себя аналог земной экваториальной зоны с жарким климатом и постоянной циркуляцией воды через испарение и осадки. Нисходящие потоки на противозвёздном полушарии будут слишком сухими, чтобы образовать ледник. Оказалось, что фактор приливного захвата вполне благоприятен для потенциальной жизни. С другими факторами дела обстояли не столь оптимистично.



Средняя температура атмосферы Проксима Центавра b в зависимости от содержания азота и углекислого газа при синхронном вращении (слева) и при резонансе 3:2 (как у Меркурия, справа). Тёмной линией показана зона жидкой воды [44]

Красные карлики, и поздние красные карлики – особенно, нередко являются активными звёздами. Конвекция в верхних слоях атмосфер этих звёзд приводит к частым вспышкам, иногда превышающим по мощности вспышки на Солнце. Проксима Центавра – не исключение. Например, в марте 2016 года яркость звезды в видимом диапазоне подскочила за 10 минут в 68 раз, после чего вернулась к норме. Вспышка 1 мая 2019 усилила яркость звезды в 1000 раз в миллиметровом диапазоне и в 14000 раз – в ультрафиолетовом. Проблемой являются также постоянное сравнительно сильное излучение в ультрафиолетовой и рентгеновской области и звёздный ветер, даже в спокойном состоянии превышающий солнечный на орбите Земли в десятки раз. Плотная атмосфера, хотя бы такая же, как на Земле, послужит достаточной защитой для жизни от ультрафиолета и радиации, но её верхние слои будут подвергаться постоянному обстрелу высокочастотным излучением и заряженными частицами. Это может привести к "эрозии" атмосферы и потере жизненно необходимых газов, прежде всего водяного пара, составляющие которого – ионы водорода и кислорода – будут выметаться в космос. К сожалению, *Проксима b* не является транзитной, поэтому провести анализ атмосферы и проверить верность тех или иных моделей в обозримом будущем вряд ли удастся.

Позже у Проксимы удалось найти ещё две планеты, точнее, пока что кандидата: мини-нептун *c* с периодом обращения 5 лет и массой 7 земных и субземлю *d* с периодом 5 суток и массой всего в четверть земной.

В последующие за открытием *Проксимы Центавра b* годы экзопланеты были обнаружены у десятка ближайших звёзд. Исследователи использовали данные как старых инструментов, таких как HARPS и HIRES, так и новых, введённых в строй в 2010-е годы, таких как [APF](#) – Automated Planet Finder, первый телескоп, построенный исключительно для поиска экзопланет методом лучевых скоростей, [HARPS-N](#) – высокоточный аналог чилийского HARPS, установленный в испанской обсерватории на Канарских островах и способный обзирать всю северную небесную полусферу, и [CARMENES](#), предназначенный для поиска экзоземель у красных карликов (80 из 103 ближайших звёзд главной последовательности – именно красные карлики). К настоящему времени общее число планет, известных в пределах 5 парсек, превысило 40.

Но все ли из найденных планет реальны?

## Фантомы

В октябре 2012, за четыре года до открытия *Проксимы Центавра b*, в журнале Nature появилась статья об открытии планеты земной массы у другого компонента тройной системы, частью которой является Проксима – оранжевого карлика Альфа Центавра В. Альфа Центавра А и В представляют из себя довольно тесную пару звёзд, среднее орбитальное расстояние между ними меняется от 35.6 а.е. в апоцентре до 11.2 а.е. в перигеентре. Зоны стабильных планетных орбит при этом, как показывают расчёты, ограничены 2.8 а.е. у звезды А и 2.4 а.е. у звезды В, то есть способны вместить всю внутреннюю часть Солнечной системы по Марс включительно. Группа европейских экзопланетологов под руководством Ксавье Дюмюска (Xavier Dumusque) в течение 4 лет, начиная с 2008 года, наблюдала на HARPS за менее массивным компаньоном В, сделав в общей сложности 459 измерений его лучевой скорости. После долгого и изощрённого анализа данных, исключив влияние периода вращения звезды, её магнитной активности и движения вокруг общего центра масс с Альфой Центавра А, исследователи выявили достоверный (с вероятностью ошибки 0.02%) сигнал с периодичностью 3.24 суток и амплитудой 0.5 м/с, что было сравнимо с инструментальной погрешностью самого HARPS. Вызывать сигнал могла планета минимальной массой 1.1 земной. Новость, естественно, быстро разлетелась по СМИ, несмотря на отдельные скептические голоса со стороны коллег. Американский астроном Арти Хатцес, открывший планеты у Эпсилон Эридана и Поллукса, писал в комментарии к статье, что существование планеты – "всё ещё повод для обсуждения".

В апреле 2014 года к числу скептиков присоединилась Дебра Фишер (Debra Fischer) из калифорнийской научной команды. С 2012 года её группа наблюдала за Альфой Центавра на новом высокоточном спектрометре, установленном в американской обсерватории в Чили, и не смогла обнаружить никаких следов 3.24-суточного сигнала. В 2013 году работы пришлось приостановить, поскольку обе центральные звезды А и В сблизилась на слишком малое угловое расстояние, и должны были вновь занять удобную для наблюдений конфигурацию только через несколько лет. Но так долго ждать не пришлось. В октябре 2015 года вышла статья исследователей из Оксфордского университета, озаглавленная "Призрак во временных сериях". Они заново проанализировали имеющиеся данные и пришли к выводу, что сигнал, приписываемый планете, на самом деле является математическим артефактом, связанным с прерывистостью наблюдений. Сигнал с той же периодичностью выдавал бы даже случайный шум в исходных данных. Доводы были убедительны, и сам Дюмюск после выхода статьи признал, что "вероятно, планеты там нет".

"Закрытие" *Альфы Центавра В b* подняло серьёзную проблему: насколько достоверны результаты, полученные на пределе точности наблюдений? В экзопланетологии сложилась конкурентная научная среда, что, как обычно бывает в таких случаях, имело свои

плюсы и минусы. Учёные старались побыстрее застолбить свой приоритет, особенно когда речь шла о потенциально обитаемой планете или планете у ближайшей звезды, и часто это происходило в ущерб качеству работы. С другой стороны, их коллеги тут же принимались проверять результат на прочность. Это, впрочем, не всегда удавалось, потому что, например, такие инструменты как HARPS не имели аналогов по точности измерений. Кроме того, звезда с открытой планетой могла располагаться довольно высоко относительно небесного экватора и оставаться недоступной для телескопов, расположенных в южном либо, наоборот, северном полушарии. Иногда, как в случае с *Альфой Центавра B b* или *Gliese 581 g*, можно было ограничиться уже полученными данными и попытаться найти слабые места в теоретической части исследования.

В декабре 2012 года вышла статья международной группы исследователей под руководством финского астронома Микко Туоми (Mikko Tuomi), в которой анализировались данные наблюдений [Тау Кита](#), ближайшего одиночного жёлтого карлика. Были изучены результаты, полученные HARPS, HIRES и AAPS ("Англо-австралийским поиском планет"). В результате удалось выявить периодичности, не связанные со звёздной активностью, которые "могли быть интерпретированы как относящиеся к планетам". Периоды планет в такой интерпретации составляли 14, 35, 94, 168 и 640 суток, а массы возрастали от 2 земных у внутренней планеты до 6.6 у внешней. Амплитуды сигналов были очень малы – в пределах 0.5 – 0.8 м/с, сравнимы, как и в случае с *Альфой Центавра B b*, с инструментальной погрешностью, хотя авторы отмечали, что их метод обработки данных позволяет вытащить сигнал вплоть до 0.3 м/с.

В августе 2017 вышла новая статья с участием тех же исследователей, в которой параметры системы существенно пересматривались. Они подтверждали существование двух внешних кандидатов *e* и *f*, но периодичности трёх внутренних либо исчезли в новых данных, либо оказались связаны с вращением самой звезды. Вместо них были предложены два новых кандидата *g* и *h* с периодами 20 и 49 суток и массами по ~1.8 земных. Их амплитуды доходили до 0.3 м/с! Статус планетной системы Тау Кита остаётся неопределённым. Хотя сами авторы во второй статье писали именно о "кандидатах", на многих ресурсах, в том числе в европейской [Энциклопедии внесолнечных планет](#) и в [Экзопланетном архиве НАСА](#) они отмечены как подтвержденные. Но без подтверждения от независимых исследовательских групп система, найденная на пределе технических возможностей, остаётся в своего рода серой зоне; реальность её всё ещё под вопросом.

Математические методы, опробованные на Тау Кита, применялись и к другим системам, и результаты были, мягко говоря, неоднозначны. В том же 2012 году анализ данных о лучевой скорости HD 40307 позволил выявить, в дополнение к трём уже известным планетам, три новые периодичности в 35, 52 и 200 суток. Их могли вызывать планеты с массами 3.5, 5 и 7 земных. Европейская группа на основе обновлённых к 2015 году данных HARPS смогла подтвердить только среднюю из новых планет, *f*. У Gliese 667 C вдобавок к горячей *b* и потенциально обитаемой *c* обнаружили четыре дополнительных сигнала планетной природы на 39, 62, 92 и 260 сутках, и, кроме того, признаки планеты земной массы на 17-дневной орбите, между орбитами планет *b* и *c*. Практически сразу же вышла статья с опровержением, авторы которой смогли подтвердить только две уже известные планеты и увидели некоторые намёки на планету с периодом 91 суток, остальные же периодичности посчитали результатом неверной обработки данных. Окончательную точку в вопросе поставила статья 2014 года, в которой 90-дневную периодичность связали со звёздным вращением, и подтвердить смогли всё те же планеты *b* и *c*.

Фантомы возникали и у ближайших красных карликов. В июне 2014 года было объявлено об открытии двух "суперземель" массами 5 и 7 земных у звезды Каптейна. Планета *b*, отстоящая от звезды на 0.17 а.е., попадала в зону обитаемости. Неудивительно, что новость заполнила заголовки в СМИ. Помимо прочего, примечательной была и сама звезда: она являлась частью толстого диска Галактики, содержала мало тяжёлых элементов (обогатённость железом примерно 1/7 солнечной) и была очень древней – возраст её оценивался в 11.5 млрд. лет. Британский писатель-фантаст Аластер Рейнольдс даже написал короткий рассказ, "Печальный Каптейн", в котором межзвёздный зонд, оснащённый искусственным интеллектом, находит на планетах Каптейна руины погибшей в глубокой

древности цивилизации, одновременно безуспешно пытаюсь получить ответ от направившей его сотни лет назад Земли. Увы, уже в 2015 году существование потенциально обитаемой  $b$  было поставлено под сомнение. Окончательный гвоздь в крышку гроба всей системы забила статья 2021 года, авторы которой выяснили, что периодичности, приписываемые планетам, объясняются артефактами звёздного вращения.

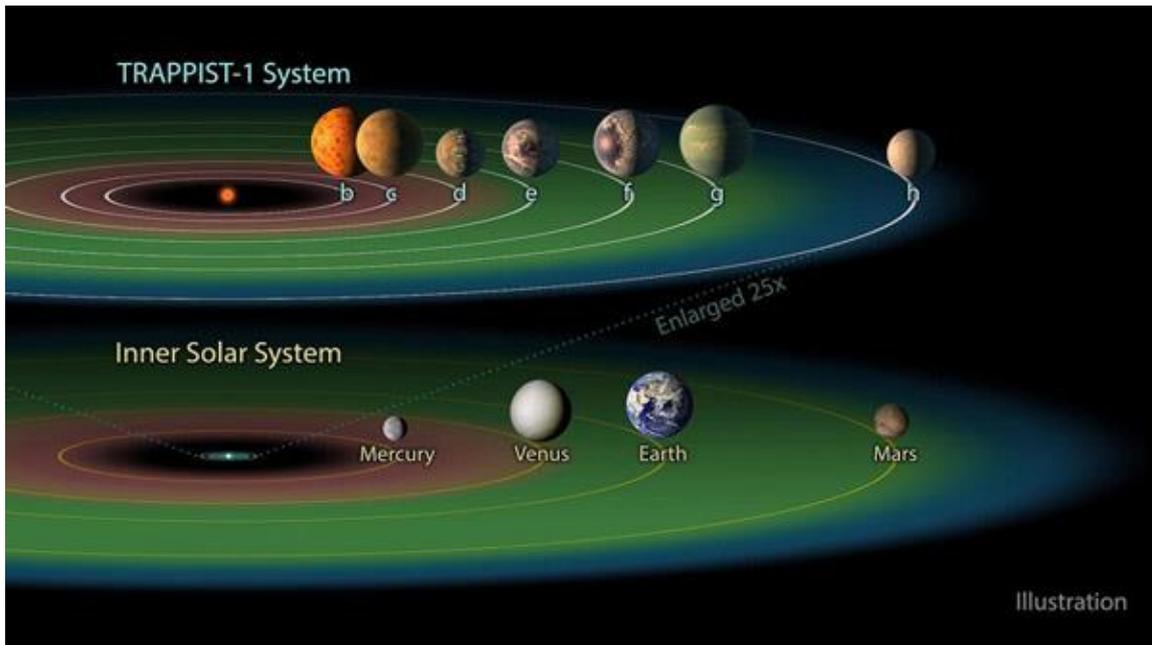
В ноябре 2018 года было заявлено об открытии планеты-кандидата у звезды Барнарда. Планету обнаружили, наблюдая за звездой на CARMENES, HARPS и HARPS-N. В отличие от планет-гигантов Питера Ван де Кампа, новый кандидат был небольшим, массой всего 3.2  $M_e$ , хотя и на довольно долгопериодичной орбите – 233 сут. С учётом малой массы звезды Барнарда это соответствовало большой полуоси орбиты, равной 0.4 а.е., что помещало планету довольно близко к снеговой линии – расстоянию, на котором кристаллизуется вода (в Солнечной системе снеговая линия проходит примерно в 3 а.е.) Увы, планету ожидала та же судьба, что и планеты де Кампа – она оказалась фантомом, связанным с периодичностью вращения звезды.

Немного ранее, в 2017, вышла статья за авторством Батлера и Вогта об открытии кандидата ещё у одной близкой звезды с несостоявшимися астрометрическими газовыми гигантами – Лаланд 21185. Планета имела массу 3.8 земных и период 9.9 суток. Применение осторожного термина "кандидат" довольно скоро оправдалось: спустя два года европейцы на основе данных своего спектрометра SOPHIE опровергли его существование, вместо этого предложив собственный, с периодом 12.95 суток. Новый кандидат в итоге был подтверждён на других инструментах, в том числе американских HIRES и APF, так же как и вторая заподозренная европейцами планета с массой Нептуна и периодом около 8 лет. Но новые данные несли с собой очередную неопределённость: планетный кандидат массой 4 земных и периодом 7 месяцев, требующий дальнейших подтверждений.

По-видимому, "серая зона" с периодически возникающими и исчезающими фантомами будет всегда сопровождать экзопланетные исследования, сдвигаясь по мере роста точности наблюдений в сторону все меньших масс и радиусов.

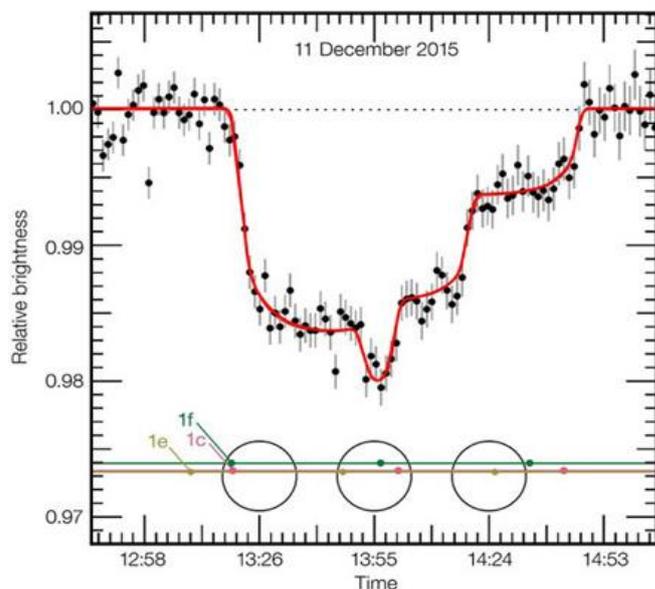
## TRAPPIST, TESS и другие

21 февраля 2017 НАСА заинтриговало любителей астрономии, анонсировав на следующий день пресс-конференцию, на которой должны были прозвучать "новые факты о планетах, которые обращаются вокруг звёзд, отличных от нашего Солнца, известных как экзопланеты". Факты оказались действительно стоящими внимания. У тусклого красного карлика, расположенного на расстоянии 40 световых лет от Солнца, обнаружили систему из семи землеразмерных транзитных планет, как минимум три из которых попадали в зону обитаемости звезды. Система была очень компактной: период внешней планеты,  $h$ , составлял 18.8 суток, большая полуось орбиты – 0.062 а.е., орбита же внутренней была сравнима с орбитой спутника Юпитера Каллисто. Три ближайших к звезде планеты,  $b$ ,  $c$  и  $d$ , обнаружили годом ранее на 0.6-метровом телескопе [TRAPPIST](#) ("Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope", "Маленький телескоп для поиска транзитных планет и планетезималей"), установленном в чилийской Ла Силья. Телескоп был построен для поиска планет у красных карликов, но, в отличие от похожего проекта MEarth, сосредотачивался исключительно на "ультрахолодных" карликах, имеющих радиус порядка радиуса Юпитера. Это позволяло с Земли искать планеты земных размеров. [TRAPPIST-1](#), как назвали первую находку проекта, по своей массе (9% солнечной) едва превышал предел Кумара, при котором запускаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий – основной источник энергии звёзд. После открытия первых трёх планет к изучению системы подключили несколько крупных телескопов, в том числе "Спитцер", который наблюдал за звездой почти непрерывно в течении 20 дней осенью 2016 года. В наблюдениях участвовал и "Кеплер", изучавший TRAPPIST-1 в рамках 12-й кампании продлённой миссии K2.



Сравнение системы TRAPPIST-1 с Солнечной системой. Орбиты планет TRAPPIST-1 приведены в масштабе 1:25. Зелёным показана зона обитаемости [45]

Все планеты в компактной системе TRAPPIST-1 были захвачены во взаимные орбитальные резонансы, и это позволило сравнительно легко определить их массы через анализ вариаций времени транзитов (TTV). По последним данным, средние плотности планет немного уступают земной, что означает либо меньшую долю железа в их составе, либо довольно большую – до нескольких процентов – долю воды. Что касается потенциальной обитаемости планет, попадающих в зону жизни, а именно *e*, *f* и *g*, то их атмосферы будут сталкиваться с теми же проблемами, что и атмосферы всех прочих планет на тесных орбитах у поздних красных карликов, таких как *Проксима Центавра b*: сильное излучение в жёстком УФ и рентгене, мощный звёздный ветер, частые вспышки звезды. Близкие орбиты планет должны приводить к сильным приливным взаимодействиям, поэтому не исключено, что по крайней мере ближайшие к звезде планеты представляют из себя массивные аналоги Ио с непрекращающейся вулканической активностью.

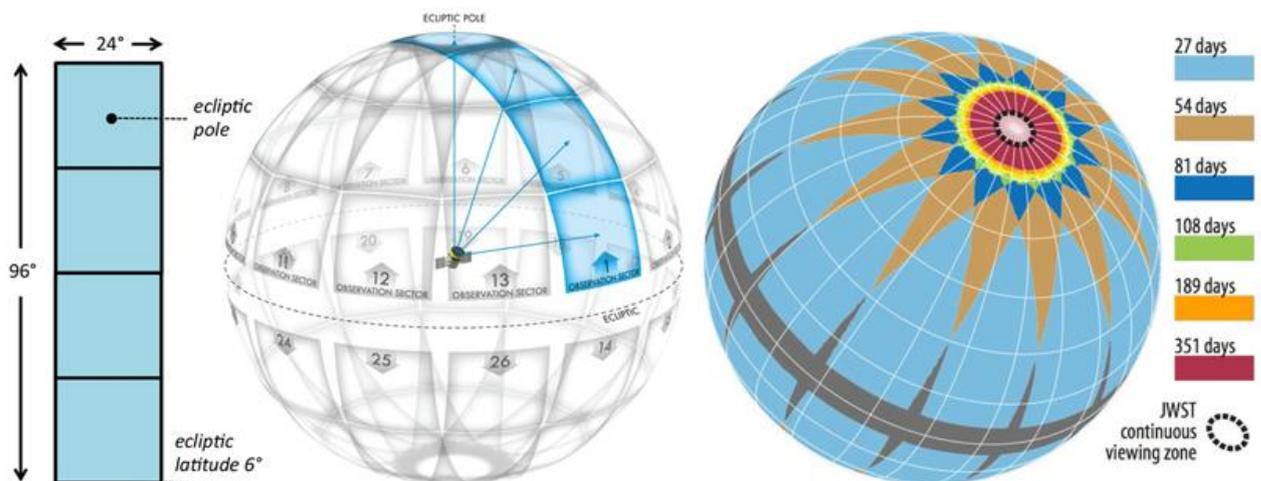


Одновременный транзит трёх планет системы TRAPPIST-1 19 декабря 2015 года [46]

TRAPPIST показал, что наземная фотометрия может дотягиваться до планет земных размеров, хоть и у очень маленьких звёзд. Развитием проекта стал [SPECULOOS](#) ("Search for habitable Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars", "Поиск обитаемых планет, затмевающих ультрахолодные звёзды"). Он включает в себя четыре метровых телескопа, установленных в Паранальской обсерватории и ведущих наблюдение сразу за тысячей красных карликов (TRAPPIST наблюдал за пятьюдесятью). Сейчас строится аналогичная северная обсерватория на Канарских островах. Хотя создатели проекта и рассчитывали обнаружить с десятков систем, подобных TRAPPIST-1, та остаётся до сих пор единственной в своём роде.

Незаурядные открытия не всегда требуют принципиально новых подходов или инструментов. В июле 2015 группа европейских астрономов опубликовала статью об открытии планетной системы у близкого (21 св. год) оранжевого карлика [HD 219134](#). В данных HARPS-N выявили четыре сигнала, соответствующие планетам средней массы с периодами 3.1, 6.8, 47 суток и гиганту класса Сатурна с периодом 3 года. Звезду наблюдали на "Спитцере" и в момент возможного прохождения внутренней планеты *b* зафиксировали падение яркости на 0.036%. Так была обнаружена ближайшая к Земле транзитная планета. В 2016 удалось пронаблюдать транзит и второй планеты, *c*. Обе оказались суперземлями с радиусами 1.6 и 1.5  $R_e$  и массами 4.7 и 4.4  $M_e$ . Американские экзопланетологи во главе со Стивеном Воггом, проанализировав данные HIRES и APF, нашли ещё две планеты средней массы с периодами 23 и 94 сут. Кроме того, они пересмотрели период внешнего гиганта, оказавшийся вдвое большим – шесть лет вместо трёх. Учитывая, что светимость звезды составляет четверть солнечной, на орбите с большой полуосью 3.1 а.е. тот получает почти такую же освещённость, как и Юпитер, являясь, таким образом, его лёгким аналогом в этой шестипланетной системе.

Наибольший потенциал, разумеется, оставался у космических обсерваторий. Своего рода компенсацией за вышедший из строя "Кеплер" стал [TESS](#) – "Transiting Exoplanet Survey Satellite", "Спутник для обзора транзитных экзопланет", задуманный ещё в 2005 и запущенный на высокую околоземную орбиту в апреле 2018 года. В отличие от изначально узконацеленного "Кеплера", TESS ведёт наблюдения почти по всему небу. Четыре ПЗС-матрицы могут собирать данные с сегмента площадью 5% небесной сферы; каждые 27.4 суток аппарат перенацеливается на следующий сегмент (всего их по 13 в южном и северном полушарии). Как и в случае с продлённой миссией "Кеплера", это позволяет искать планеты у ярких и близких звёзд, хотя и в ущерб точности и длительности наблюдений.

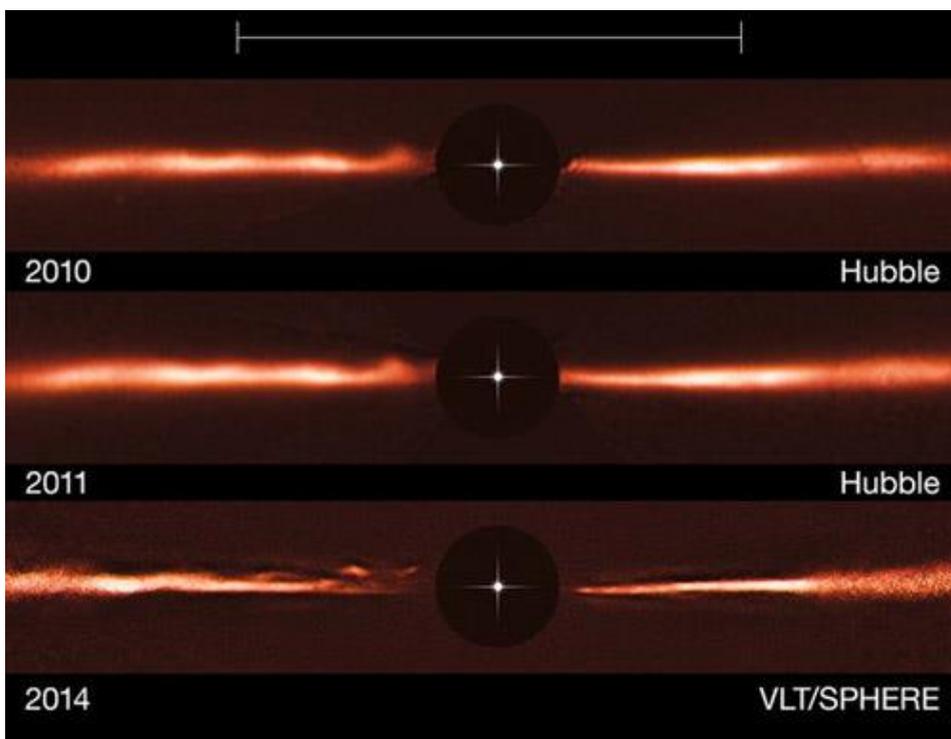


Секторы обзора TESS [47]

И действительно, первым же открытием стала планета у близкой (60 световых лет), видимой невооружённым глазом (блеск 5.7) жёлтой звезды [Пи Столовой Горы](#). С 2001 года у неё был известен массивный гигант или даже коричневый карлик массой около 13  $M_j$  на сильно вытянутой орбите с периодом около 6 лет. Новая планета оказалась транзитным мининептуном с периодом 6 суток, радиусом 2.1 и массой  $\sim 4$  земных. Вскоре была открыта первая многопланетная система: у красного карлика [L 98-59](#), расположенного всего в 35 св. годах от Земли, обнаружили три планеты с периодами в пределах 7.5 суток и радиусами 0.85, 1.4 и 1.5  $R_e$ . Измерения масс показали сравнительно низкую плотность внешней планеты, которая может содержать до 30% воды в своём составе, и позволили выявить две нетранзитные суперземли за пределами её орбиты.

В июне 2019 TESS открыл планету радиусом 1.3 земных в системе тройного красного карлика [LTT 1445](#) на расстоянии всего лишь 22 световых года от Солнца. Транзиты наблюдались у центрального компонента системы A; позже у него нашли ещё две планеты, причём внешняя, нетранзитная *LTT 1445 A d* попадала в зону обитаемости. Массы всех трёх планет лежат в диапазоне 1.5 – 3 земных, а средняя плотность, вычисленная для *LTT 1445 A b*, предполагает твёрдый состав. Плотность самой внутренней, *c*, долгое время не удавалось точно определить из-за того, что её транзит выглядел "скользящим", то есть планета затмевала звезду только частью своего диска. К изучению системы подключили «Хаббл»; в июне 2023 вышла статья, посвящённая результатам его наблюдений. Выяснилось, что хотя *LTT 1445 A c* и проходит у самого края звёздного диска, но всё же затмевает его всей своей площадью. Радиус планеты оказался равным 1.1  $R_E$ , а её средняя плотность также предполагает железокремнистый состав. Система остаётся второй ближайшей транзитной после HD 219134.

Стоит упомянуть ещё две близкие системы, обнаруженные TESS в пределах 10 парсек. У довольно яркого красного карлика [GJ 367](#) удалось подтвердить планету радиусом 0.7 земных с периодом обращения всего 7.7 часов! Измеренная масса 0.55 земных соответствовала средней плотности около 8 г/куб.см. Такое высокое значение могло обеспечить железное ядро с радиусом в 85% планетного, относительно большее, чем у Меркурия. Впрочем, погрешности в определении массы допускали и более низкую плотность, сравнимую с земной. В июле 2023 массу планеты уточнили, получив почти 300 новых измерений на спектрометре HARPS. В результате масса выросла до 0.63 земных, а плотность - до 10.2 г/куб.см. Чтобы объяснить такое аномально высокое значение, на долю железа должно приходиться в среднем около 90% массы планеты. Возможно, как и у Меркурия, часть мантии была сорвана катастрофическим импактом на последних стадиях зарождения планеты. В данных HARPS удалось также найти сигналы от двух нетранзитных планет.

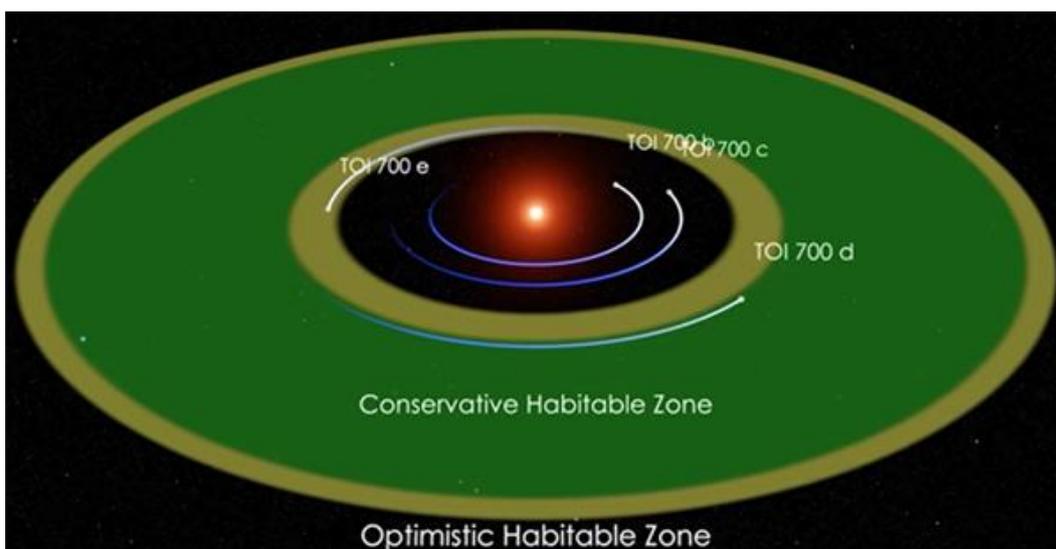


Остаточный диск AU Микроскопа. Снимки "Хаббла" и VLT. Отрезок сверху показывает диаметр орбиты Нептуна [\[48\]](#)

AU Микроскопа – ещё один крупный близкий M-карлик – давно вызывал интерес астрономов. Он принадлежит к так называемой движущейся группе Беты Живописца и имеет сходный с ней возраст – 22 млн. лет. Как и Бета Живописца, AU Микроскопа обладает остаточным протопланетным диском, и, как и у Беты Живописца, внутренняя часть этого

диска несимметрична и имеет структуру, на которую могли повлиять невидимые планеты. И действительно, в 2020 году TESS обнаружил два "нептуна" с периодами обращения 8.5 и 19 суток. Вариации времени транзитов указали на наличие третьей планеты земной массы с наиболее вероятным периодом 12.7 суток. Что необычно, планета эта, зажата между двумя транзитными нептунами, сама звезду не затмевает.

Счёт кандидатов TESS, как и у "Кеплера" в своё время, быстро пошёл на тысячи. Подтверждение их идёт медленно: на август 2023 года известно 4476 кандидатов, ожидающих проверки, и только 379 подтверждённых. Конечно, не обошлось и без потенциально обитаемых планет. Сектора, наблюдаемые TESS каждые четыре недели, пересекаются у небесных полюсов и образуют там зону непрерывного покрытия. У красного карлика [TOI-700](#), попадающего в такую зону в южном полушарии, за год наблюдений обнаружили мининептун и три землеразмерные планеты. Самая внешняя, *d*, с большой полуосью орбиты 0.16 а.е., получает 86% земной инсоляции. При этом из-за характерного для планет красных карликов пониженного альbedo в ИК-диапазоне *TOI-700 d* находится близко к внутренней кромке зоны жизни. К положительным факторам можно отнести низкую активность родительской звезды, принадлежащей к раннему классу M2V. Ещё у одного, на этот раз позднего, ультрахолодного M-карлика [LP 890-9](#) TESS открыл планету радиусом 1.32 земных с периодом 2.7 суток. К исследованию системы подключился SPECULOOS. С его помощью удалось подтвердить планету *b* и открыть вторую, *c*, радиусом 1.37 земных с периодом 8.5 суток, попадающую в зону обитаемости звезды. Системе присвоили одновременно обозначения TOI-4306 (от "TESS Object of Interest") и SPECULOOS-2 (SPECULOOS-1 закреплено за TRAPPIST-1). Таким образом космическая и наземная системы фотометрического поиска дополнили друг друга.

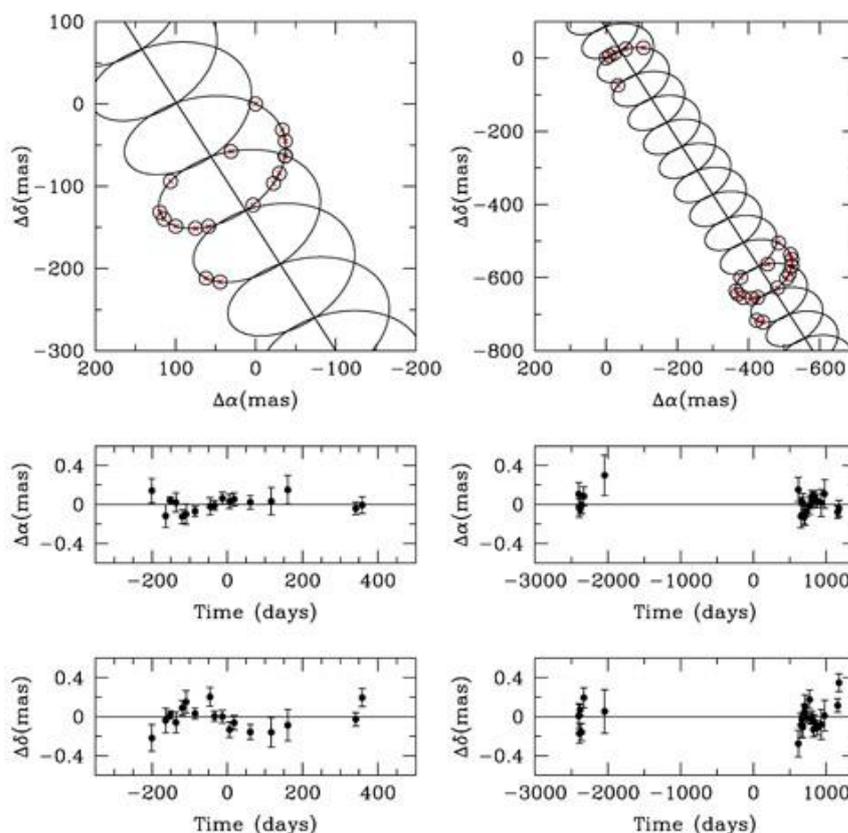


Система TOI-700 [49]

Как и у "Кеплера", улов TESS не ограничился звёздами главной последовательности. У белого карлика WD 1856+534 обнаружили затмения периодичностью 34 часа. Вызывать их должна была планета-гигант радиусом 10.4 земных. Массу определить не удалось, потому что спектр белого карлика "стерил": он практически не содержит линий поглощения каких-либо элементов. Но спутник не удалось засечь в ИК-диапазоне, и это с высокой вероятностью ограничило его массу планетным диапазоном (не более 14 Mj). Система оказалась весьма своеобразной – горячий юпитер в семь раз превосходил размерами затмеваемую им звезду! Происхождение его не очень ясно – он не мог пережить на такой тесной орбите стадию красного гиганта, и должен был мигрировать уже после сброса звездой внешних оболочек. Возможно, орбита планеты изменялась под влиянием двойного красного карлика, удалённого на 1000 а.е. и составляющего единую тройную систему с WD 1856+534.

Многие планеты TESS подтверждались при помощи нового спектрометра [ESPRESSO](#), установленного на Очень Большом Телескопе в Паранальской обсерватории. ESPRESSO считается спектрометром третьего поколения, хотя его скорее можно отнести к четвёртому. Первые инструменты, созданные в 80-е и начале 90-х годов прошлого века, в том числе ELODIE, на котором была открыта *51 Persei b*, обеспечивали точность единичного измерения порядка 10-15 м/с. Следующий уровень в 3 м/с был достигнут к середине 90-х; многие современные спектрометры, такие как [SOPHIE](#), HIRES и CARMENES, до сих пор поддерживают подобную точность. Третье поколение связано с HARPS, преодолевшим в начале нулевых порог в 1 м/с. ESPRESSO вывел точность на новый уровень, 0.2 – 0.3 м/с. Этого всё ещё недостаточно для обнаружения копии Земли у аналогов Солнца, но позволяет искать более крупные землеподобные планеты в зонах жизни оранжевых и даже жёлтых карликов и способно вывести многие маломассивные планеты из "серой зоны" неопределённости. Именно ESPRESSO обнаружил у Проксимы Центавра планетный кандидат массой в четверть земной. В декабре 2022 года с помощью ESPRESSO была открыта система из двух планет земной массы в зоне обитаемости близкого (16 св. лет) красного карлика [GJ 1002](#). *GJ 1002 b* по своим характеристикам очень близка к *Проксиме Центавра b*.

В последнее время появились и довольно экзотические методы поиска планет. В 2018-2019 годах международная научная группа проводила наблюдения на [VLBA](#) – американском радиоинтерферометре, состоящем из десяти 25-метровых радиотелескопов – за красным карликом TVLM 513-46546 (или просто TVLM 513). Эта удалённая на 35 световых лет ультрахолодная звезда массой всего 8% солнечной, то есть на самой границе с



Траектория движения звезды TVLM 513 под влиянием планеты [50]

коричневыми карликами, отличается повышенной строго периодичностью в радиодиапазоне. Благодаря широкой базе в 8600 км на VLBA удалось с высокой точностью измерить параллакс карлика и отследить его движение. Выяснилось, что движется он по винтовой траектории, чего следует ожидать при влиянии невидимого спутника. Масса спутника оценивается в  $\sim 0.4$  Мж, а период – в 221 сутки. *TVLM 513 b* – пока ещё редкий, если не уникальный, пример экзопланеты, надёжно открытой астрометрическим методом. К сожалению, для метода радиастрометрии подходят в основном активные звёзды, сильно излучающие в радиодиапазоне.

В феврале 2020 года вышла статья о возможном открытии планеты у близкого красного карлика. Авторы использовали нидерландский интерферометр [LOFAR](#), состоящий из 20 тысяч небольших антенн с апертурой около 1000 км, чтобы регистрировать низкочастотные источники радиоизлучения, которые затем попытались привязать к звёздной карте. Один из источников совпал с красным карликом [GJ 1151](#), удалённым на 26 св. лет. При

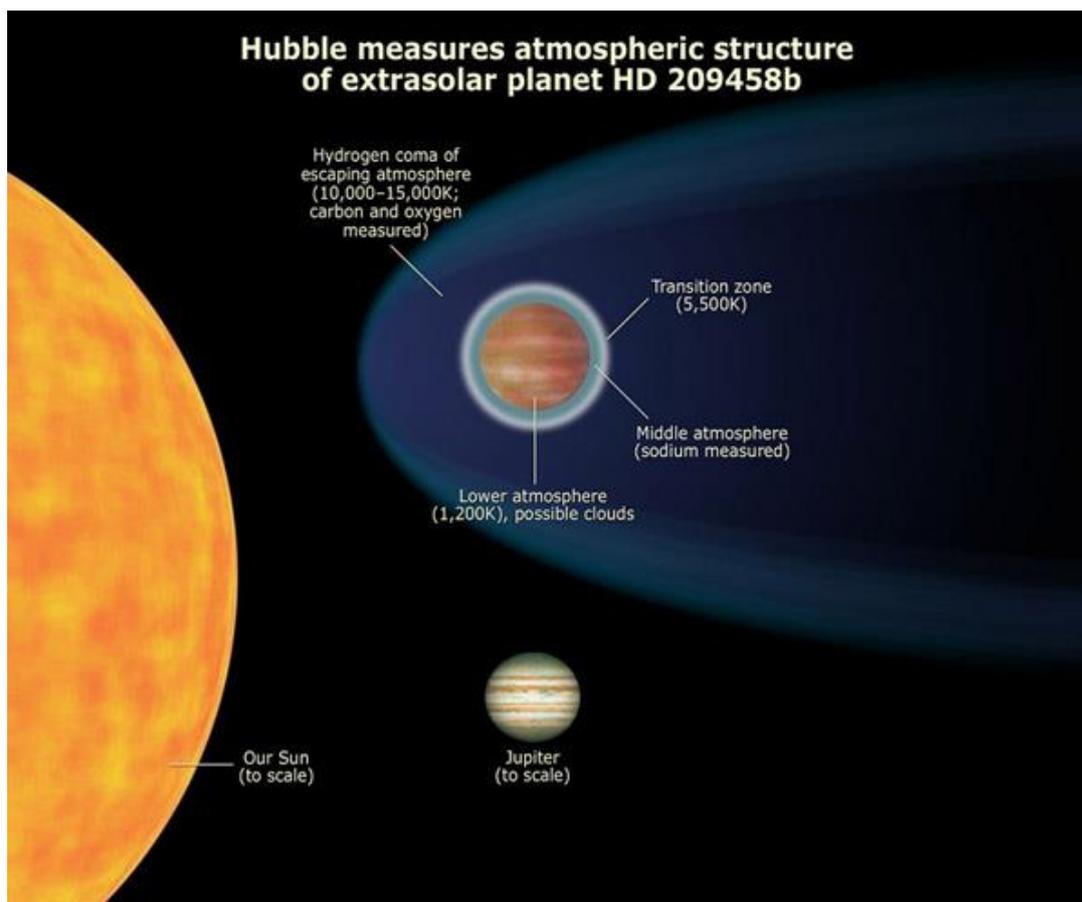
этом сам характер излучения напоминал всплески, возникающие в магнитосфере Юпитера под влиянием его спутника Ио. В данном случае роль Юпитера играл сам GJ 1151, а роль Ио могла играть планета массой до нескольких земных с периодом обращения от 1 до 5 суток. Годом спустя почти одновременно вышли две статьи, одна из которых на основе данных HARPS-N и спектрометра, установленного на 10-метровом [телескопе Хобби-Эберли](#) в Макдональдской обсерватории, подтверждала существование планеты массой 2.5 Ме с периодом 2 суток, а вторая по результатам наблюдений CARMENES исключала наличие в предсказанном диапазоне периодов планет массой более 1.2 Ме. Наконец, в 2023 году в данных того же CARMENES обнаружили планету массой 11 земных с периодом чуть больше земного года. Хотя внутренняя планета, вызывающая радиовсплески, так и не была подтверждена, новому открытию присвоили обозначение *GJ 1151 c*. В 2023 аналогичное излучение нашли у близкого (12 св. лет) красного карлика [YZ Кита](#). В отличие от GJ 1151, у YZ Кита известно три планеты земной массы, внутренняя из которых, *b*, скорее всего и вызывает замеченные радиовсплески. Учёным даже удалось оценить напряжённость магнитного поля планеты, которое оказалось не ниже земного, вероятно – в несколько раз сильнее.

Из новых инструментов, введённых в строй в посткеплеровскую эпоху, стоит упомянуть [CHEOPS](#). Спутник, характеризующий экзопланеты, (CHaracterising ExOPlanets Satellite) был запущен ЕКА в декабре 2019 года и приступил к работе в апреле 2020 года. Основной его целью является подтверждение транзитным методом уже известных планет, открытых методом Доплера. Пока что CHEOPS смог подтвердить некоторые из уже известных транзитных систем, в частности, шестипланетную [TOI-178](#). Благодаря наблюдению вторичных затмений CHEOPS способен определять температуру экзопланетных атмосфер и альбедо их дневного полушария.

## Атмосферы

В 1835 году французский философ, основоположник социологии [Огюст Конт](#) писал о небесных телах: *"Мы представляем себе возможность определения их форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими средствами мы не сможем изучить их химический состав, их минералогическое строение, природу органических существ, живущих на их поверхности..."*. Всего лишь четверть века спустя Кирхгоф и Бунзен выяснили, что каждый химический элемент имеет собственные спектральные линии поглощения/излучения. По линиям в спектре можно судить о химическом составе звёздных атмосфер. Так появился спектральный анализ.

Как уже говорилось выше, атмосферы экзопланет можно изучать двумя способами: трансмиссионной, или просвечивающей, и эмиссионной, или отражательной, спектроскопией. В первом случае анализируется зависимость глубины транзита планеты от длины волны, на которой ведутся наблюдения, во втором – отражённый планетой звёздный свет. Проще всего его получить вычитанием чистого спектра звезды при вторичном минимуме (заходе планеты за звезду) из суммарного спектра звезды и планеты непосредственно перед этим событием. Разница и будет спектром самой планеты. Впервые спектры планет – в инфракрасном диапазоне, где контраст со звёздным светом минимален – удалось получить с помощью "Спитцера" в 2007 году для горячих юпитеров [HD 209458 b](#) (Озириса) и [HD 189733 b](#). В спектрах не оказалось следов ожидаемого, несмотря на высокие температуры, водяного пара, что можно было объяснить высотным экранирующим слоем. И действительно, атмосфера Озириса показывала пик на длине волны 9.65 микрон, который исследователи связали с облаками из... силикатной пыли. В 2010 году на VLT в атмосфере Озириса наблюдали СО (угарный газ). Выяснилось, что его линия смещена в синюю часть спектра относительно скорости самой планеты. Поскольку измерения проводились во время транзита, это значило, что газ в верхних слоях атмосферы проносится с огромной скоростью – 2 км/с – через просвечиваемый звездой терминатор с нагретой дневной стороны на относительно более холодную ночную.



Сравнение Озириса и Юпитера. Показана газовая кома, образуемая убегающей атмосферой [51]

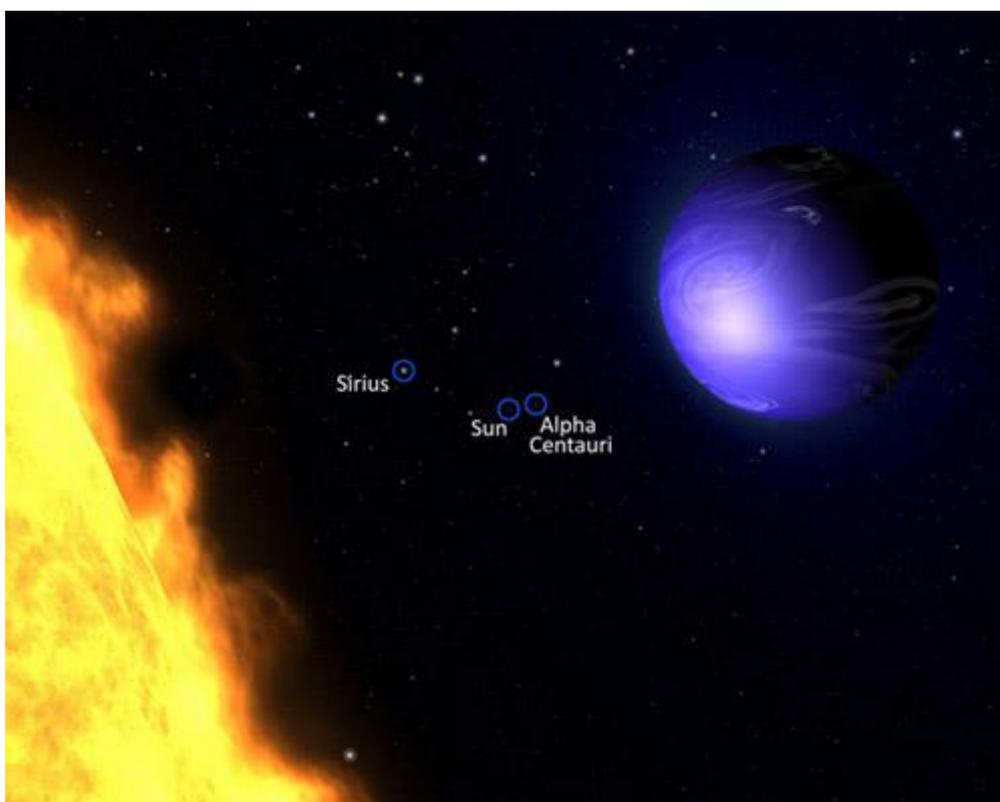
Угарный газ оказался очень хорошим маркером, его линии поглощения использовали в числе прочего для выяснения истинной массы некоторых нетранзитных планет. В 2012 году на VLT измерили среднее значение доплеровского сдвига линий CO в атмосфере [Тай Волопаса b](#) в разных её орбитальных конфигурациях. Так астрономы смогли рассчитать радиальную составляющую орбитальной скорости планеты. На первый взгляд, эти данные сами по себе бесполезны – ведь и минимальная масса планеты была определена через колебания радиальной скорости, правда, не самой планеты, а её звезды. Но отношение радиальных орбитальных скоростей звезды и планеты, движущихся вокруг общего центра масс, позволяет определить истинное отношение их масс. А поскольку масса звезды известна через модели звёздной эволюции, через это отношение несложно вычислить реальную массу планеты. В случае *Тай Волопаса b* отношение составило 466 м/с к 110 км/с, истинная масса планеты – 5.95 M<sub>J</sub>, а угол наклона оси орбиты к наблюдателю – 45 градусов.

Линии CO также использовали, чтобы определить период вращения газового гиганта. При вращении часть газа движется по направлению к наблюдателю, часть – удаляется от него, причём с разной радиальной составляющей скорости в зависимости от широты и меридиана, и линии поглощения расширяются, смещаясь одновременно к красным и синим областям спектра. Именно такое расширение было обнаружено в 2014 году на VLT у линий CO в спектре *Беты Живописца b*. По степени расширения линий удалось вычислить экваториальную скорость вращения – около 100 тысяч км/ч, а через неё и период, составивший 8.1 часов, несколько меньше юпитерианских десятичасовых суток.

Одним из самых хорошо изученных горячих юпитеров, наряду с Озирисом, стал [HD 189733 b](#). В 2007 году "Спитцер" в течение 33 часов, дольше половины периода обращения, наблюдал за изменением инфракрасной яркости планеты, составив её температурную "карту". Выяснилось, что разница между температурами дневного и ночного

полушарий невелика – 1212 и 973 К, соответственно, что означало довольно эффективный перенос тепла. Горячие юпитеры в этом отношении сильно разнятся между собой. Немного раньше, в 2006 году, разницу температур удалось измерить у нетранзитной [Ипсилон Андромеды b](#) – она оказалась равной 1400 К. А вот *51 Пегаса b* и Озирис не показали никаких заметных температурных перепадов. Что отличало полученные для *HD 189733 b* данные, так это смещение самой горячей области относительно подзвездной точки – на 30 градусов к востоку, причиной чему могли быть сильные ветры.

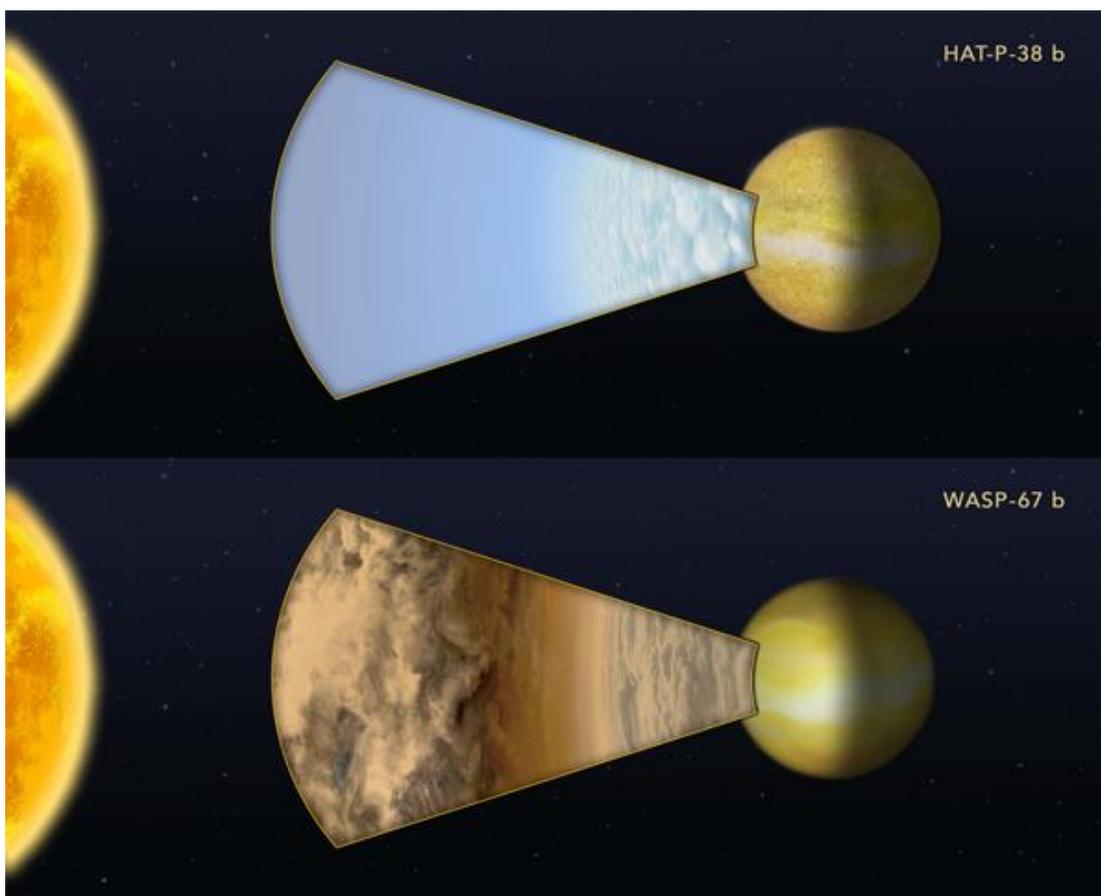
Спектрометрия в видимом диапазоне позволяет помимо прочего выяснить цвет планеты. *HD 189733 b* оказалась гораздо более яркой в лучах с длиной волны, соответствующих синему свету, в сравнении с зелёными лучами. Её глубокий синий цвет, более насыщенный, чем у Нептуна, может быть связан с рэлеевским рассеянием в атмосфере, ответственным за голубой цвет земного неба, но скорее вызван высотной дымкой из частиц силиката магния. На дымку с таким необычным составом указывает и "плоский" трансмиссионный спектр планеты, лишённый характерных линий поглощения некоторых элементов, таких как щелочные металлы натрия и калия, обнаруженных у ряда других горячих юпитеров. Облака из расплавленного стекла и высокая, как и на Озирисе, скорость ветров превращают *HD 189733 b* в не слишком гостеприимное место; на сайте НАСА даже появилась заметка с заголовком про "дожди ужаса", способные порезать любого неосторожно оказавшегося в атмосфере этого горячего юпитера туриста.



HD 189733 b на фоне Сириуса, Альфы Центавра и Солнца в представлении художника [52]

Одной из интересных особенностей некоторых горячих юпитеров оказалась их очень низкая отражательная способность. Например, альbedo [WASP-104 b](#), измеренный во время вторичного минимума, оценивался менее чем в 3%, то есть планета оказалась буквально чернее сажи. Реальный цвет таких газовых гигантов, скорее всего, глубокий синий, и вызван рэлеевским рассеянием в безоблачных небесах. При этом сходные по параметрам (массе, радиусу, расстоянию от звезды, нагреву) горячие юпитеры могут очень сильно отличаться внешне. В 2017 году "Хаббл" провёл трансмиссионную спектрометрию [HAT-P-38 b](#) и [WASP-67 b](#). Несмотря на почти совпадающие размеры орбит и температуру, спектры имели мало общего. Атмосфера *HAT-P-38 b* оказалась безоблачной, с явными следами водяного пара, в то время как *WASP-67 b* показала плоский спектр с

едва заметной полосой  $H_2O$ , что говорило о плотном облачном слое. Причины таких различий остаются неясными.

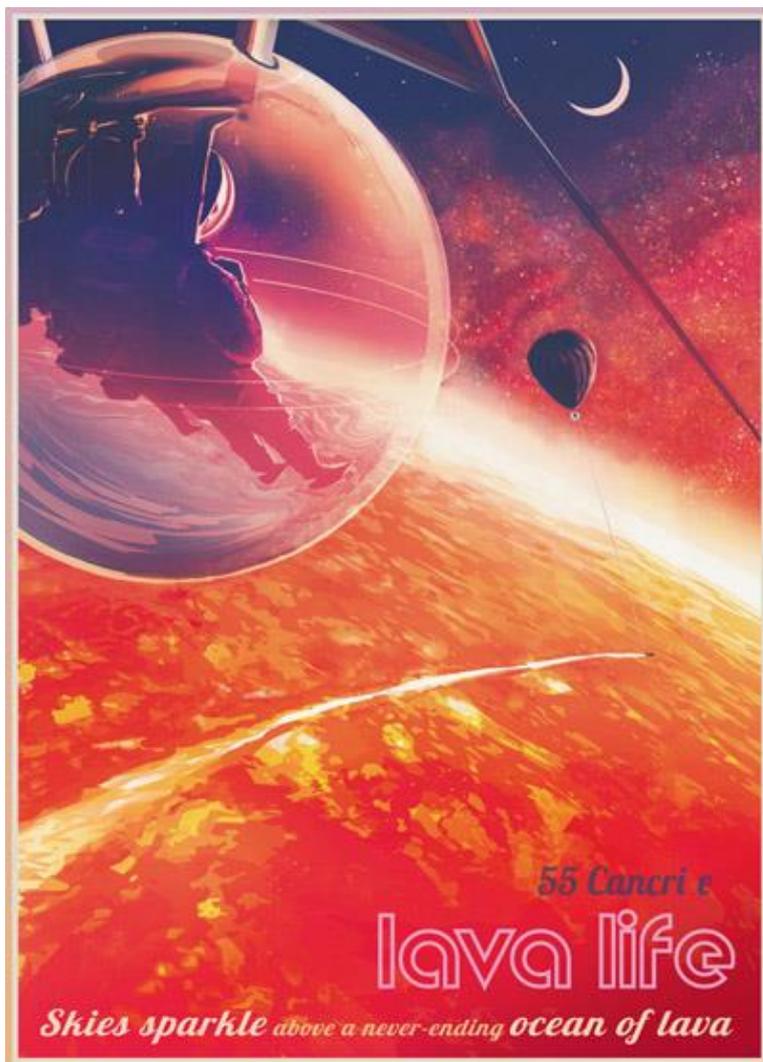


Сравнение атмосфер HAT-P-38 b и WASP-67 b [53]

Разумеется, мимо внимания исследователей не прошли и открытые на рубеже нулевых и десятых годов транзитные суперземли и мининептуны. Вторичные транзиты [Kepler-10 b](#) позволили определить альbedo дневного полушария этой горячей суперземли – 60%, что было сравнимо с альbedo Венеры. Напрашивалось два объяснения – либо планета была затянута, как и Венера, облаками, правда, не сернокислыми, а силикатными, либо атмосфера у неё вовсе отсутствовала, а поверхность покрывал лавовый океан. Учитывая нагрев почти до 2000 K на расстоянии в 2.5 млн км от родительского жёлтого карлика, второй вариант выглядит более реалистичным.

Одной из наиболее изученных суперземель стала *55 Пака e*, транзиты которой были обнаружены в начале 2011 года. Тогда выяснилось, что 2.8-суточный период, выявленный по измерениям лучевой скорости звезды, был артефактом реального периода, составляющего всего 17.7 часов. Инфракрасные наблюдения на "Спитцере" позволили уточнить радиус планеты – 2.13 земных. Это было на 30% больше радиуса, измеренного в видимом диапазоне. Объяснить такую огромную разницу могла атмосфера из газов, имеющих сильные линии поглощения в ИК-диапазоне, но прозрачных в видимом свете, таких как углекислый и угарный газ. Правда, высота атмосферы из таких тяжёлых газов получалась неправдоподобно большой. В мае 2012 года удалось измерить вторичные транзиты планеты и определить температуру дневного полушария, которая оказалась выше теоретического равновесного значения, причиной чему мог быть слабый теплообмен с ночной стороной. Наблюдения на "Спитцере" показали, что температура дневного полушария варьирует в огромных пределах, от 1400 до 2700 K, причём остыть и нагреться планета успевала за очень короткое время, от нескольких недель до нескольких дней. Переменами погоды такую разницу объяснить сложно; исследователи предположили, что поверхность может быть покрыта океаном лавы, который время от времени закрывают

более холодные облака пыли или газа, выброшенные активными вулканами на высоту до несколько сотен километров. Течениями в лавовом океане можно объяснить и смещение к востоку относительно солара самой горячей области дневного полушария.



Лавовый мир 55 Рака е. Постер НАСА [54]

типичными и для многих других транзитных экзопланет в размерном классе от земель до нептунув, в том числе для планет *b*, *c* и *h* системы TRAPPIST-1.

Встречались и исключения, иногда спорные. Суперземля [GJ 1132 b](#), открытая у сравнительно близкого (40 световых лет) красного карлика тем же проектом MEarth, что и *GJ 1214 b*, показала достоверно больший радиус в двух полосах ИК-спектра в сравнении с другими, в том числе и в видимом диапазоне. Разница достигала тысячи километров, что могло означать только водородную атмосферу с примесями, вероятно, метана и водяного пара. Впрочем, однозначно интерпретировать спектр не удавалось. В 2021 году наблюдения на "Хаббле", не подверженные искажениям земной атмосферы, подтвердили водородную версию. Если учесть малую массу планеты (всего 1.6 земных) и близкое расстояние до звезды (0.015 а.е.), первичную атмосферу она удержать не смогла бы, поэтому авторы исследования предположили её вторичное происхождение, через дегазацию мантии. К сожалению, даже такой на первый взгляд надёжный результат был подвергнут сомнению в двух статьях, вышедших сразу вслед за первой работой. Их авторы не нашли в тех же данных "Хаббла" никаких признаков водородной атмосферы, вместо этого подтвердив привычный плоский спектр.

Частой особенностью атмосфер горячих мининептунов и суперземель оказался плоский трансмиссионный спектр. В 2011 году "Спитцер" измерил радиус мининептуна [GJ 1214 b](#) на длинах волн 3.6 и 4.5 микрон и не обнаружил значимой разницы. Такой результат можно было интерпретировать двумя способами: либо атмосфера состояла из водяного пара, либо была затянута высотными облаками. Чистая водородно-гелиевая атмосфера исключалась. Это подтверждали и измерения в видимом диапазоне, проведённые на нескольких телескопах в 2013 году. Размер *GJ 1214 b* оказался одинаковым в красных и синих лучах, а значит, рэлеевское рассеяние было пренебрежимо мало, что исключало вариант с прозрачной протяжённой атмосферой. Наблюдения на "Хаббле" в диапазоне ближнего ИК-излучения между 1 и 2 микронами в 2014 году показали абсолютно плоский спектр без каких-либо следов водяного пара, азота, углекислого газа или метана. Простейшим объяснением была высотная дымка, состоящая, по видимому, как на спутнике Сатурна Титане, из углеводородов. Такие спектры оказались

В сентябре 2019 года вышли сразу две статьи об открытии "Хабблом" водяного пара у мининептуна [K2-18 b](#). Планета радиусом 2.6 и массой 8.6 земных была открыта в 2015 году в рамках продлённой миссии "Кеплера" у массивного и яркого красного карлика. Большая полуось её орбиты составляет 0.16 а.е., и она находится в зоне обитаемости звезды. Впрочем, условия на поверхности едва ли оставляют шансы на жизнь – даже при маловероятном составе ядра из 10% скальных пород и 90% воды для объяснения средней плотности планеты 2.7 г/куб.см нужна сравнительно тонкая водородно-гелиевая атмосфера с давлением у поверхности более 100 атмосфер и температурой в сотни градусов по Цельсию; более реалистичные сценарии состава, например, 50% содержание воды, требуют доли лёгких газов, при которой вода на поверхности (если в этом случае можно говорить о поверхности) будет находиться в сверхкритическом состоянии. Но всё же открытие воды в атмосфере планеты в зоне жизни было в чём-то символично, поскольку продемонстрировало реальную возможность поиска землеподобных атмосфер. Увы, как и в случае с *GJ 1132 b*, через какое-то время зазвучали голоса сомнения – что спектр, например, может быть объяснён присутствием не водяного пара, а метана, или вовсе вызван звёздной активностью и пятнами, которые имитируют изменение радиуса планеты при измерениях на разных длинах волн.

Одним из первых открытий TESS осенью 2018 года стала планета радиусом 1.3 земных, совершающая обороты с ультракоротким периодом в 11 часов вокруг тусклого М-карлика [LHS 3844](#). В 2019 году *LHS 3844 b* наблюдал "Спитцер", зарегистрировавший фазовую кривую, то есть изменение фазы планеты при её движении по орбите, и вторичный минимум. Контраст температур оказался очень высоким – при нагретой до 1040 К дневной стороне возможный диапазон ночной температуры не исключал нуля по Кельвину (хотя верхний предел составлял 710 К). С учётом симметричной формы фазовой кривой это означало отсутствие атмосферы. Разрежённая атмосфера тоже могла объяснить наблюдаемую картину, но планета не удержала бы её из-за мощного звёздного ветра. Авторы исследования на основе собранных данных даже попытались определить состав поверхности и выяснили, что он похож на реголит Меркурия и Луны.



Супермеркурий LHS 3844 b в представлении художника [\[55\]](#)

В 2016 году в рамках продлённой миссии K2 "Кеплер" открыл горячий нептун у красного карлика [K2-33](#). Звезда отличалась молодым возрастом – всего 9 млн лет, и даже не успела выйти на главную последовательность – её радиус до сих пор равен солнечному, несмотря на вдвое меньшую массу. Планету наблюдали на многих инструментах, как наземных, так и космических, и выяснили, что глубина её транзита в оптическом диапазоне почти в два раза больше, чем в инфракрасном. Такую огромную разницу объяснить

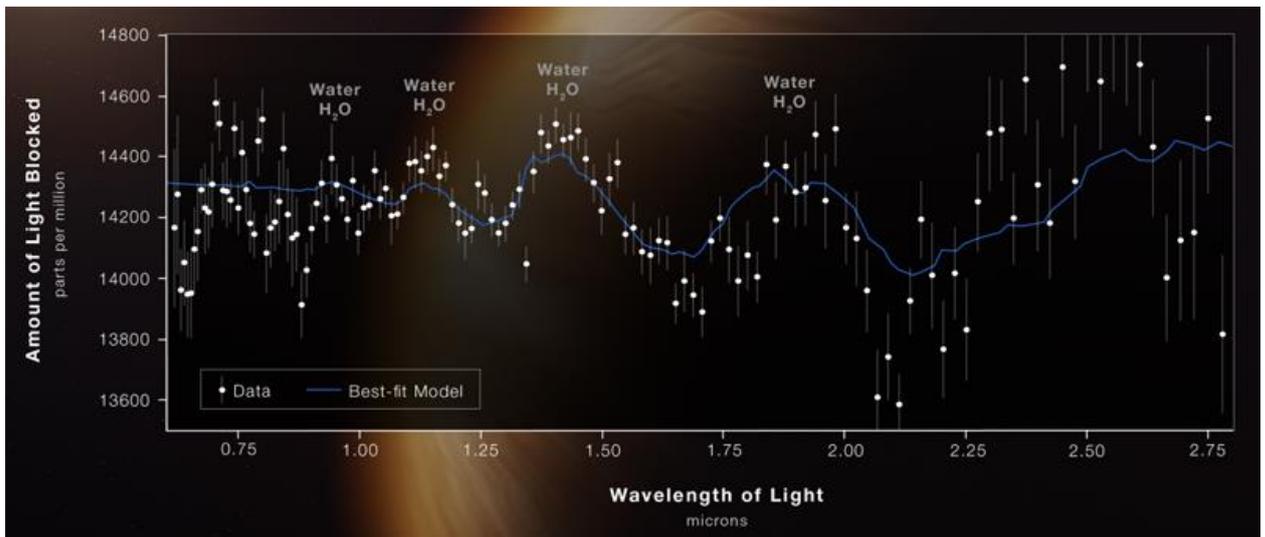
непросто. Планета может обладать раздутой атмосферой с углеводородной дымкой в верхних её слоях, прозрачной для ИК-излучения. Но более простым объяснением могут служить кольца, окружающие планету. Как и в случае дымки, составляющие их частицы настолько малы, что должны пропускать свет с длиной волны в несколько микрон. Разрешить дилемму помогут наблюдения на новых инструментах, прежде всего телескопе Джеймса Вебба ([James Webb Space Telescope, JWST](#)).

Запуска этой 6.5-метровой космической обсерватории нового поколения, состоявшегося 25 декабря 2021 года, ждали уже давно. Изучение экзопланет, или, точнее, "планетных систем и происхождения жизни", заявлено одной из четырёх главных целей проекта, наряду с исследованиями ранней Вселенной, галактик и зарождающихся звёзд с протопланетными дисками, причём экзопланетам уделена значительная доля наблюдательного времени. Основные задачи – получение спектров транзитных планет и планет-гигантов на широких орбитах, а также поиск таких гигантов у молодых и/или близких звёзд путем прямого наблюдения.



Зеркало JWST во время постройки [56]

Летом 2022 года, сразу же после начала научной работы, "Веббу" удалось получить беспрецедентно точные ИК-спектры горячих юпитеров [WASP-96 b](#) и [WASP-39 b](#) с явно различимыми следами водяного пара и углекислого газа. В начале 2023 года JWST подтвердил реальность обнаруженной TESS горячей земли *LHS 475 b*, выявив у неё уже привычный плоский спектр, а позже наблюдал вторичные транзиты планет *TRAPPIST-1 b* и *TRAPPIST-1 c*. Выяснилось, что планета *b* обладает низким альбедо, а температура дневного полушария составляет 500 К, из чего был сделан вывод, что теплоперенос на ночную сторону отсутствует, следовательно, отсутствует и атмосфера. *TRAPPIST-1 b* оказался супермеркурием с радиусом, на 12% превосходящим земной. У *c* полностью исключить наличие атмосферы не удалось, но она не может быть слишком плотной, то есть *TRAPPIST-1 c*, несмотря на близость к звезде и радиус в 110% земного, аналогом Венеры не является. Вероятно, атмосферы обеих планет были прорезаны жёстким звёздным ветром красного карлика. JWST продолжает наблюдение и за прочими телами в системе TRAPPIST-1, накапливая данные для подтверждения в числе прочего потенциальных биомаркеров, то есть спектральных меток молекул, связанных с жизнью, таких как кислород и метан. Поиск следов жизни постепенно превращается в одно из магистральных направлений экзопланетологии.

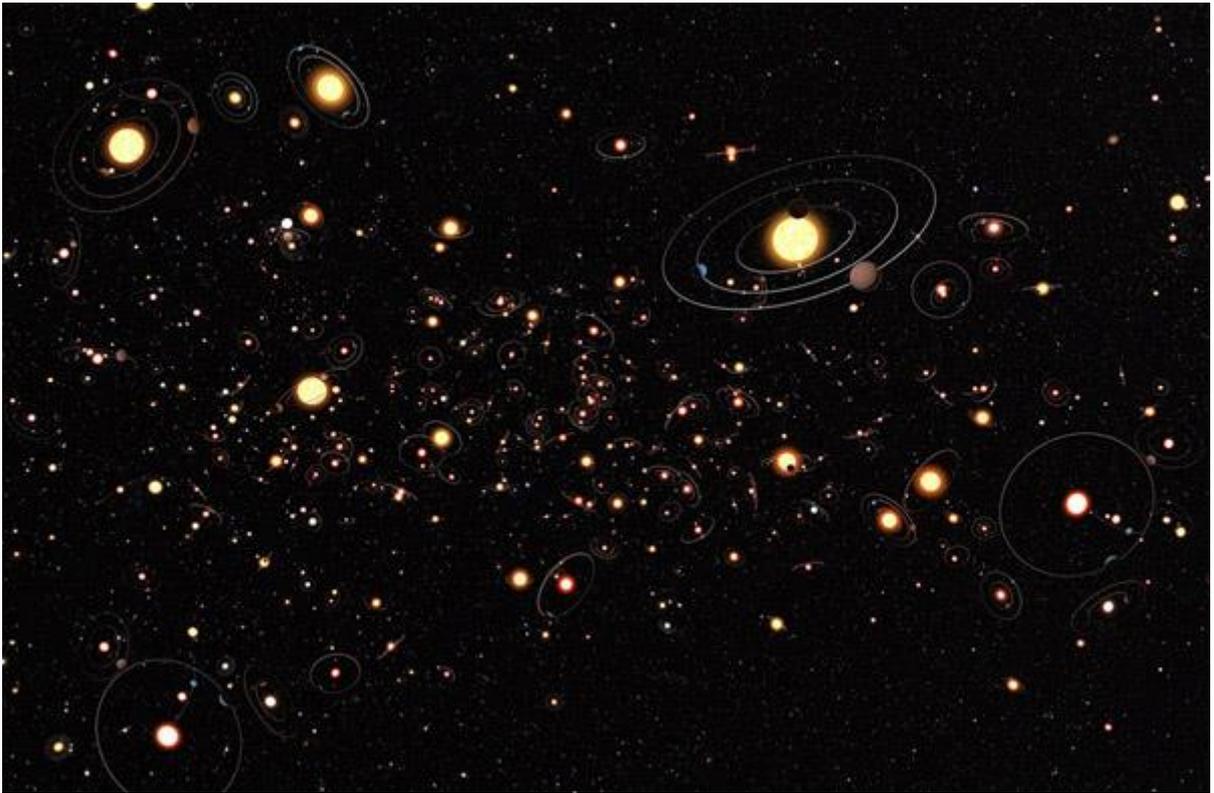


Трансмиссионный спектр WASP-96 b, полученный JWST [57]

### Уникальны или типичны?

Несмотря на три десятилетия поисков и тысячи открытых планет, вопрос, насколько Солнечная система типична, до сих пор остаётся открытым. Аналоги Земли у звёзд солнечного типа оказались практически неуловимы для существующих методик поиска. Ближе всего к обнаружению "Земли-2" подошёл "Кеплер". Что, если попытаться проэкстраполировать тенденции в распределении планет до зоны обитаемости? Одним из первых в ноябре 2013 года это сделал Эрик Петигура (Erik Petigura), аспирант Джеффри Марси. В зависимости от определения зоны жизни он получил частоту встречаемости землеразмерных (1-2 Re) планет в ней в 5.8%, 8.6% и даже 26% (впрочем, последнее значение соответствует слишком оптимистичной ширине зоны обитаемости). Сходные результаты были получены в статье, вышедшей годом позже – 6.4% для диапазонов 1-2 Re и 0.99-1.7 а.е. В 2019-2021 годах было опубликовано ещё несколько оценок: не более 18% для того же диапазона орбит, но меньших радиусов (0.75-1.5 Re), не более 27% для радиусов 0.75-1.5 Re и периодов 237-500 сут., и более оптимистичные 37-88% для 0.5-1.5 Re в зависимости от типа звезды.

Но правомерно ли просто экстраполировать полученные данные в область потенциальной жизнепригодности? Что, если Солнечная система представляет из себя отдельный тип планетных систем, не похожих на "кеплеровские"? По некоторым оценкам те встречаются примерно у 30% FGK звезд, по ряду других – у большей их части. Характерная особенность таких систем – наличие "плотно упакованных" орбит с периодами порядка нескольких недель или даже суток. Меркурий обращается вокруг Солнца за 88 суток и обладает таким маленьким радиусом, что "Кеплер" его не смог бы обнаружить (известны планеты и меньших размеров, например [Kepler-37 b](#), но с гораздо меньшими периодами и у звёзд с очень спокойной в сравнении с солнечной фотосферой). Самая близкая по своим параметрам к Земле из подтверждённых экзопланет – [Kepler-62 f](#) – тоже входит в состав "плотно упакованной" системы, периоды трёх внутренних планет в ней не превышают 20 суток. Что может служить причиной такой дихотомии (если, конечно, она реальна, и наша система действительно стоит особняком)?

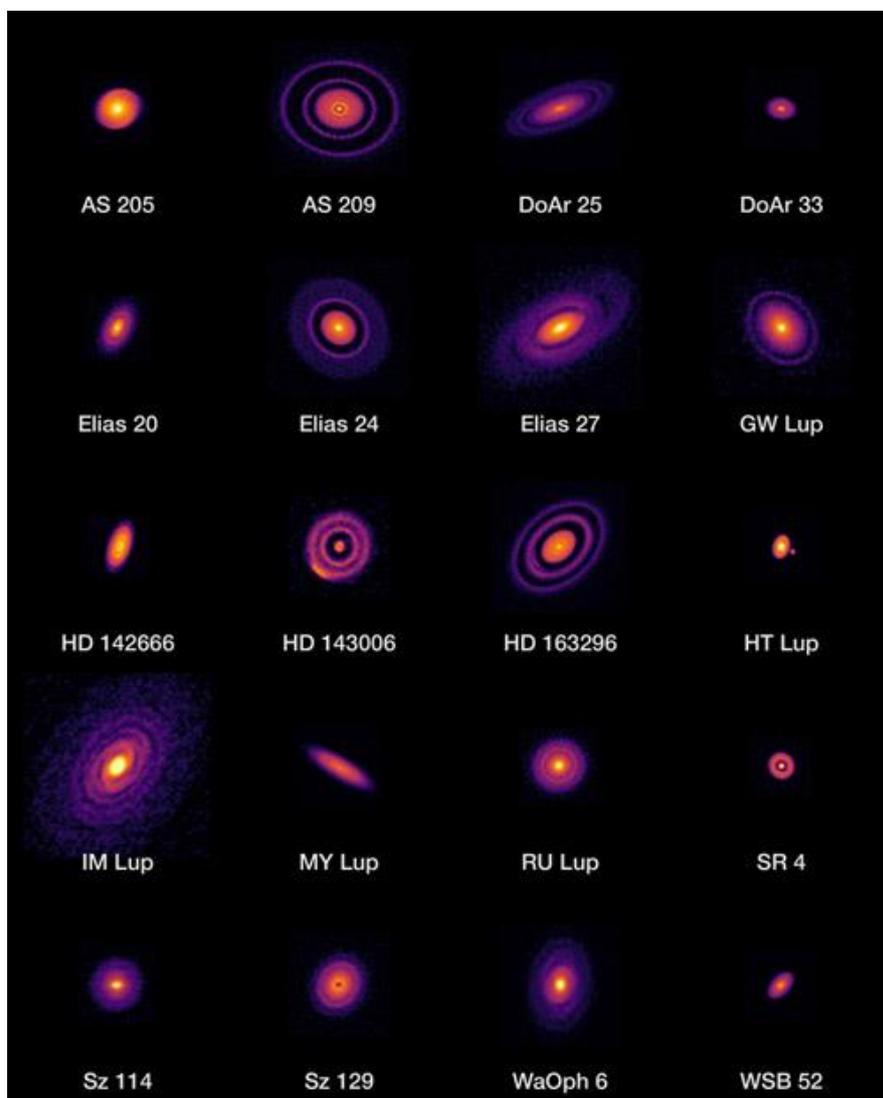


Системы, открытые "Кеплером", в представлении художника [58]

Ещё в 70-е годы при изучении метеорита Аьенде из Мексики учёные обнаружили странную аномалию – избыток одного из изотопов магния,  $^{26}\text{Mg}$ . Изотоп этот может образоваться в результате распада нестабильного изотопа алюминия,  $^{26}\text{Al}$ , период полураспада которого составляет  $\sim 700$  тыс. лет. В молодой Солнечной системе его должно было быть аномально много. Это могло привести к сильному разогреву и "выпариванию" планетезималей, в результате чего сформировались твёрдые, железокремниевые планеты земной группы, и мы не наблюдаем в нашей системе ни мининептунов, ни океанид. Откуда мог взяться избыток  $^{26}\text{Al}$ ? Одно из объяснений – взрыв близкой сверхновой, обогатившей протопланетный диск редкими изотопами. Само по себе это событие не является таким уж невероятным, ведь звёзды обычно зарождаются в скоплениях, и их соседями могут оказаться сверхмассивные и короткоживущие гиганты – прародители сверхновых. Впрочем, могло обойтись и без взрыва – некоторые сверхгиганты, истратившие свой запас водорода (так называемые звёзды Вольфа-Райе), выбрасывают в окружающее пространство огромное количество вещества мощным звёздным ветром. Изучение областей образования массивных звёзд показало, что содержание  $^{26}\text{Al}$  в них выше среднего по Галактике и действительно близко к тому, что было в ранней Солнечной системе.

Но остаётся вопрос с пустой областью внутри орбиты Меркурия. В 2014 году [интерферометр ALMA](#) (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), состоящий из 66 радиотелескопов, работающих в миллиметровом диапазоне, сделал потрясающий по детализации снимок протопланетного диска у HL Тельца – молодой звезды типа Т Тельца (то есть ещё не вышедшей на главную последовательность). Явно различимые концентрические щели, разбивающие диск на отдельные кольца, объяснили гравитационным влиянием одной или двух растущих планет-гигантов. В последующие годы ALMA получил изображения десятков дисков с кольцевыми структурами. Согласно ряду исследований, не все из них могут быть связаны с невидимыми планетами. Результаты моделирования показывают, что в протопланетном газовом диске молодого Солнца могли существовать скачки давления, которые сдерживали стремящееся к центру твёрдое вещество, из-за чего то образовало несколько разделённых промежутками колец. Один из таких скачков хорошо известен и связан с испарением водяного льда (т.н. "снеговая линия" примерно в 3 а.е. от Солнца). Не менее важную роль могли сыграть линии сублимации силикатов и угарного газа CO. Последняя, расположенная в 20 а.е., могла нести ответственность за

появление Урана и Нептуна, а первая – за формирование планет земной группы. Интересно, что для сложившейся архитектуры внутренней системы (маленький Меркурий и сравнительно крупные Венера и Земля) необходимо, чтобы силикаты испарялись на расстоянии 0.7 а.е. от Солнца. На первый взгляд, это не слишком правдоподобно, ведь даже в парниковой атмосфере Венеры температуры достигают "всего лишь" 500° С, а равновесная температура на её орбите ещё меньше. Однако протопланетный диск был неоднороден по своей структуре, и внутренняя область у самой плоскости диска подвергалась дополнительному нагреву за счёт постоянной аккреции вещества, тем большему, чем выше были темпы этой аккреции.

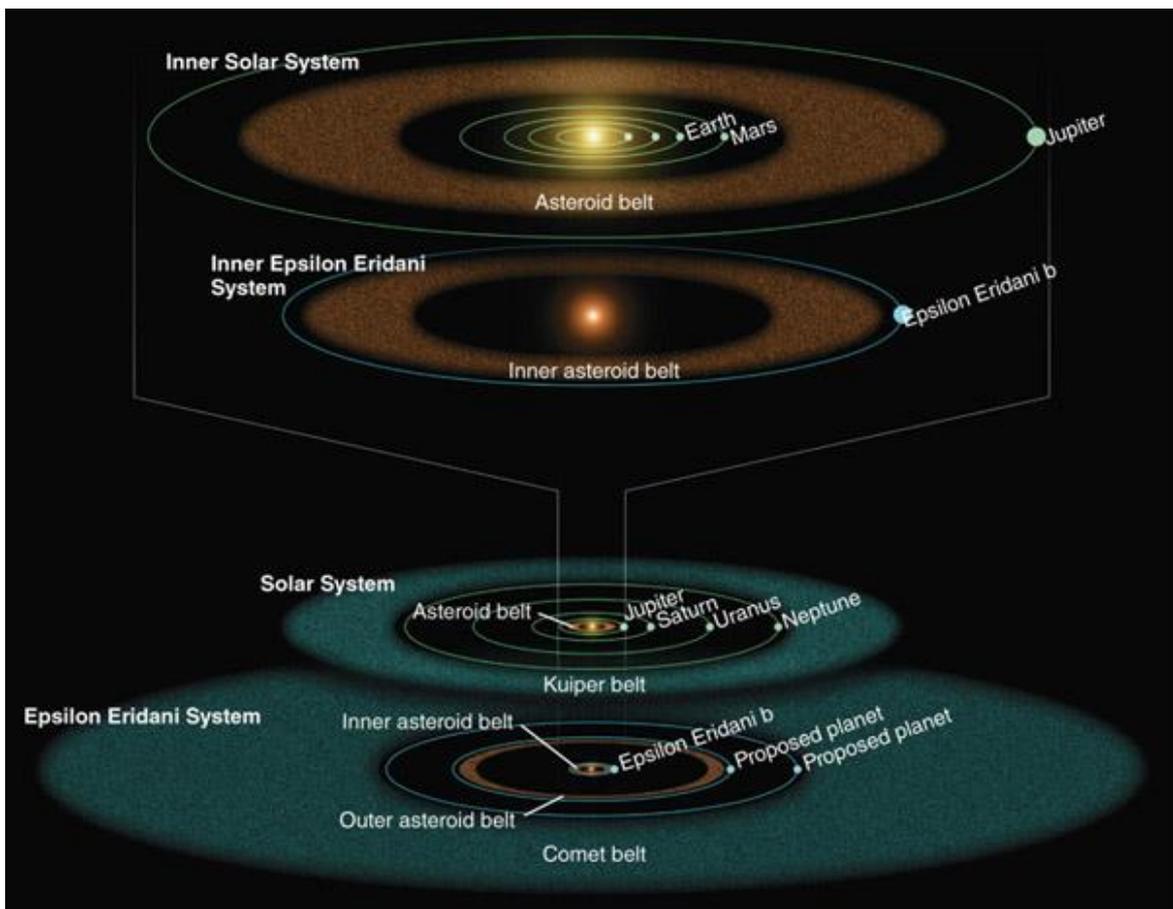


Изображения протопланетных дисков, полученные на ALMA [59]

Если по каким-то причинам барьеры в виде скачков давления газа не возникают или они недостаточно сильны, десятки или даже сотни земных масс вещества скатываются по спиральным орбитам из внешних областей системы внутрь снеговой линии, что приводит к быстрому росту планет и их так называемой миграции I типа из-за взаимодействия с газом диска. Так могут возникать "плотно упакованные" системы. Модель с кольцами также хорошо объясняет малую массу Марса и существование пояса астероидов. Ряд других теорий, например, хорошо известная модель Ниццы (Nice model), видит причину в миграциях Юпитера, рассеявшего вещество внутри снеговой линии. Но возможно, что никакого вещества там не было изначально. Исследования остаточной намагниченности метеоритов из внутренней и внешней областей пояса астероидов подтвердили наличие щели в диске раннего Солнца в районе снеговой линии, блокирующей миграцию насыщенного водяным льдом вещества во внутреннюю область Солнечной системы.

Влияние Юпитера на жизнепригодность Земли – одна из самых спорных тем в планетологии. С одной стороны, достаточно давно принято считать, что Юпитер своей гравитацией отклоняет опасные для Земли кометы, препятствуя массовым вымираниям, с другой, некоторые новые модели нивелируют роль Юпитера как "защитника" Земли и даже наоборот, оценивают его роль в этом вопросе в негативном ключе. Еще одним важным фактором является обогащённость (хоть и очень небольшая) по крайней мере двух внутренних планет (Земли и Марса) водой. На Земле вода в мантии, по-видимому, способствует тектонике плит, важной для поддержания атмосферного баланса, а уровень мирового океана при этом позволяет существовать суше, на которой происходит эволюция сложных форм жизни, в том числе разумной (если бы объём океана был всего вдвое больше, над водой возвышались бы лишь отдельные горные районы). Откуда взялось такое благоприятное для жизни количество воды (0.05% общей массы планеты) и может ли оно повториться на других землеподобных планетах? Изначальные планетезимали, из которых формировалась Земля, были обезвожены. Одним из объяснений служит влияние всё того же Юпитера, который своими гравитационными возмущениями перебросил во внутреннюю часть Солнечной системы обогащённое водой вещество из внешней области пояса астероидов. Впрочем, окончательной ясности нет и в этом вопросе. Согласно по крайней мере одной из моделей, вода всё же могла сохраняться в веществе протопланетного диска в районе орбиты Земли в форме гидратов.

Если Юпитер повлиял на развитие жизни на Земле, то наше появление в системе с такой планетой-гигантом может оказаться не случайностью, а проявлением своего рода локального антропного принципа. В любом случае, поиск аналогов Юпитера интересен хотя бы тем, что это единственная планета в Солнечной системе, доступная современным методам поиска для внешнего наблюдателя. Правда, времени для её подтверждения требуется немало. При амплитуде радиальной скорости порядка 10 м/с отношение сигнала к шуму невелико, тем более если сама звезда достаточно активна. Показательна в этом плане история открытия планеты-гиганта у одной из ближайших звёзд, [Эпсилон Эридана](#). Наличие планеты было заподозрено ещё в 2000 году, тогда колебания лучевых скоростей звезды объяснили влиянием газового гиганта на очень вытянутой ( $e = 0.6$ ) семилетней орбите. Но вскоре появились сомнения. Кто-то считал слабые сигналы проявлением активности молодой звезды (возраст Эпсилон Эридана меньше миллиарда лет). Масла в огонь подлило открытие в 2008 году инфракрасного излучения от пояса астероидов, расположенного внутри предполагаемой орбиты планеты. При эксцентриситете 0.6 та рассеяла бы астероиды за очень короткое время. При этом астрометрические измерения, проведённые "Хабблом" к 2006 году, казалось, подтверждали существование гиганта – объединив их с накопленными доплеровскими наблюдениями, европейские астрономы уточнили параметры планеты, в частности, эксцентриситет – тот оказался равен 0.7. Калифорнская команда получила совершенно другое орбитальное решение: при том же периоде эксцентриситет равнялся 0.25. Наконец, в результатах наблюдений HARPS, опубликованных в 2013 году, вообще не удалось найти следов планеты. Только в 2018 году, объединив и проанализировав все накопленные за 30 лет данные, астрономы смогли подтвердить реальность *Эпсилон Эридана b*, уточнив ещё раз эксцентриситет, который в итоге оказался близок к нулю. Таким образом, у ближайшего одиночного оранжевого карлика удалось обнаружить аналог Юпитера, внутри орбиты которого расположен местный аналог пояса астероидов.



Структура системы Эпсилон Эридана в сравнении с Солнечной системой. Показаны внутренний и внешний астероидные пояса, кометный пояс (аналог пояса Койпера), планета b, а также две внешние гипотетические планеты [60]

Даже для более спокойных звёзд важны непрерывные ряды наблюдений, накопленные в обсерваториях начиная с 90-х годов прошлого века. К таким обсерваториям относятся, например, [Ликская](#), на которой начинали работу Марси с Батлером, и Англо-Австралийская обсерватория в Сиднее, ведущая наблюдения в рамках проекта AAPS с 1998 года. В 2015 и 2016 годах оба проекта опубликовали предварительные результаты поисков. Калифорнская команда определила аналоги Юпитера как планеты с периодами от 5 до 15 лет, большой полуось орбит от 3 до 6 а.е., эксцентриситетом не более 0.3 и массой от 0.3 до 3 М<sub>J</sub>. Такие планеты, по их оценкам, могут встречаться всего лишь у 3% звёзд солнечного типа. Австралийцы получили более оптимистичные 6%, но для более широкого диапазона параметров: масс 0.15-13 М<sub>J</sub> и больших полуосей 3-7 а.е. Таким образом, Юпитер оказался в классе не слишком распространённых, хотя и не совсем редких планет. Похоже, гораздо более типичными являются "ледяные гиганты", то есть планеты типа Урана и Нептуна – в одной из работ их распространённость оценили по результатам 20-летних наблюдений гравитационного линзирования в 1.4 на звезду для орбит от 5 до 15 а.е.

Ещё одно интересное исследование, вышедшее в 2018 году, продемонстрировало, что аналоги Юпитера тяготеют к звёздам с примерно солнечным содержанием тяжёлых элементов. Авторы исследовали звёзды с горячими юпитерами, аналогами Юпитера и "эксцентрическими холодными юпитерами", то есть газовыми гигантами с теми же орбитальными расстояниями, что и у обычных "юпитеров", но с высокими эксцентриситетами ( $e > 0.25$ ). Выяснилось, что эксцентрические гиганты встречаются у звёзд примерно такой же повышенной металличности, что и горячие юпитеры (~175% солнечной в среднем), в то время как средняя металличность звёзд с аналогами Юпитера составляет лишь ~85% солнечной. Таким образом, околосолнечное содержание "металлов" (то есть элементов тяжелее гелия) может быть благоприятно для зарождения систем типа Солнечной: у

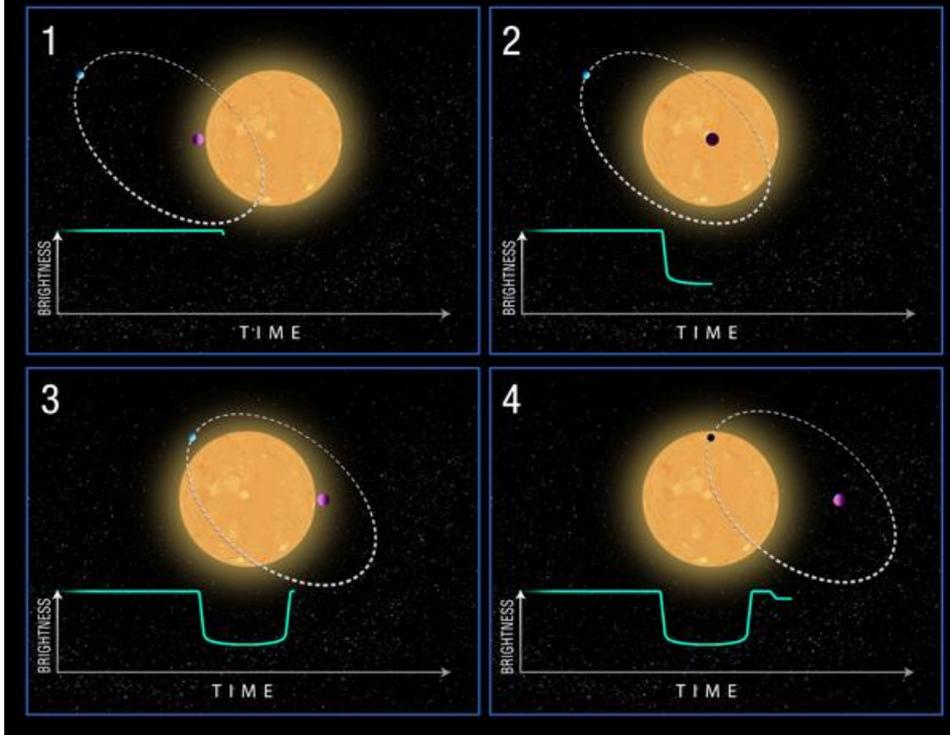
звёзд с высоким значением  $[Fe/H]$  возникает слишком много планет-гигантов, взаимно возмущающих орбиты соседей, а у слабometаллических звёзд, как уже известно, планеты-гиганты любых типов встречаются редко.

### Экзолуны, планеты-бродяги и загадочные объекты у белого карлика

В октябре 2018 года НАСА опубликовало на своём сайте пресс-релиз под заголовком "Астрономы обнаружили первое свидетельство возможной луны за пределами нашей Солнечной системы". Спутники экзопланет начали искать ещё в первых релизах данных "Кеплера". Для этого отбирали наиболее долгопериодичные из кандидатов. Планета способна удержать спутник внутри так называемой сферы Хилла, радиус которой прямо пропорционален большой полуоси орбиты планеты. Причём долговременные стабильные орбиты возможны в пределах лишь трети радиуса Хилла. У горячих юпитеров зона стабильности часто не превышает радиуса самой планеты. Планеты с достаточно широкой сферой Хилла редко становятся транзитными, да и промежутки между транзитами могут быть сравнимы со всем временем наблюдения. Тем не менее исследователи – Дэвид Киппинг (David Kipping) и Алекс Тичи (Alex Teachey) из Колумбийского университета, проанализировав кривые блеска 284 звёзд с планетами, чьи периоды превышали 30 суток, смогли обнаружить один перспективный кандидат. Это был газовый гигант *Kepler-1625 b* с периодом обращения 287 суток. В кривых блеска всех трёх зафиксированных транзитов удалось выявить слабые дополнительные падения яркости, частично накладывающиеся на вызванные прохождением планеты. Их причиной могла быть "экзолуна", причём довольно необычная. Глубина транзита соответствовала объекту размером с Нептун!

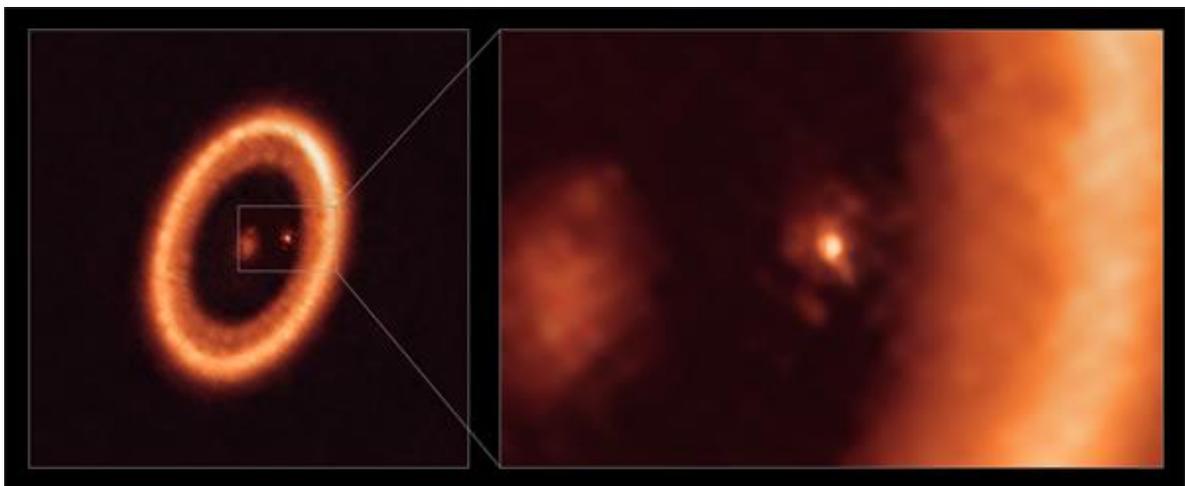
Чтобы подтвердить находку, астрономы подключили телескоп "Хаббл", используя 40 часов его времени для наблюдения очередного транзита в октябре 2017 года. И "экзолунная" гипотеза получила весомые подтверждения. Сразу после прохождения планеты было зафиксировано слабое транзитоподобное событие. К сожалению, "Хаббл" не успел отследить его до конца. Ещё одним аргументом стала вариация времени транзита (TTV) – тот начался на 78 минут раньше ожидаемого. Вызвать такое отклонение мог бы спутник массой в 1.5% планетной, что вполне соответствовало нептуноподобным размерам *Kepler-1625 b I*. Тем не менее Тичи с Киппингом посчитали результаты недостаточно убедительными для окончательного подтверждения. Экзолуна оставалась кандидатом. Неопределённость внесли и две независимые работы, опубликованные в 2019 году. Одна из них в целом подтверждала результаты первооткрывателей, но предлагала альтернативное объяснение TTV – на движение *Kepler-1625 b* мог влиять невидимый горячий юпитер. Авторы второй работы не смогли обнаружить падения блеска звезды, приписываемые спутнику. Вопрос с первой экзолуной, таким образом, остаётся открытым. В январе 2022 Киппинг с соавторами представил ещё один кандидат – *Kepler-1708 b I*, спутник размером с мининептун у планеты-гиганта с довольно долгопериодичной двухлетней орбитой.

## Transit of Kepler-1625b and Suspected Moon



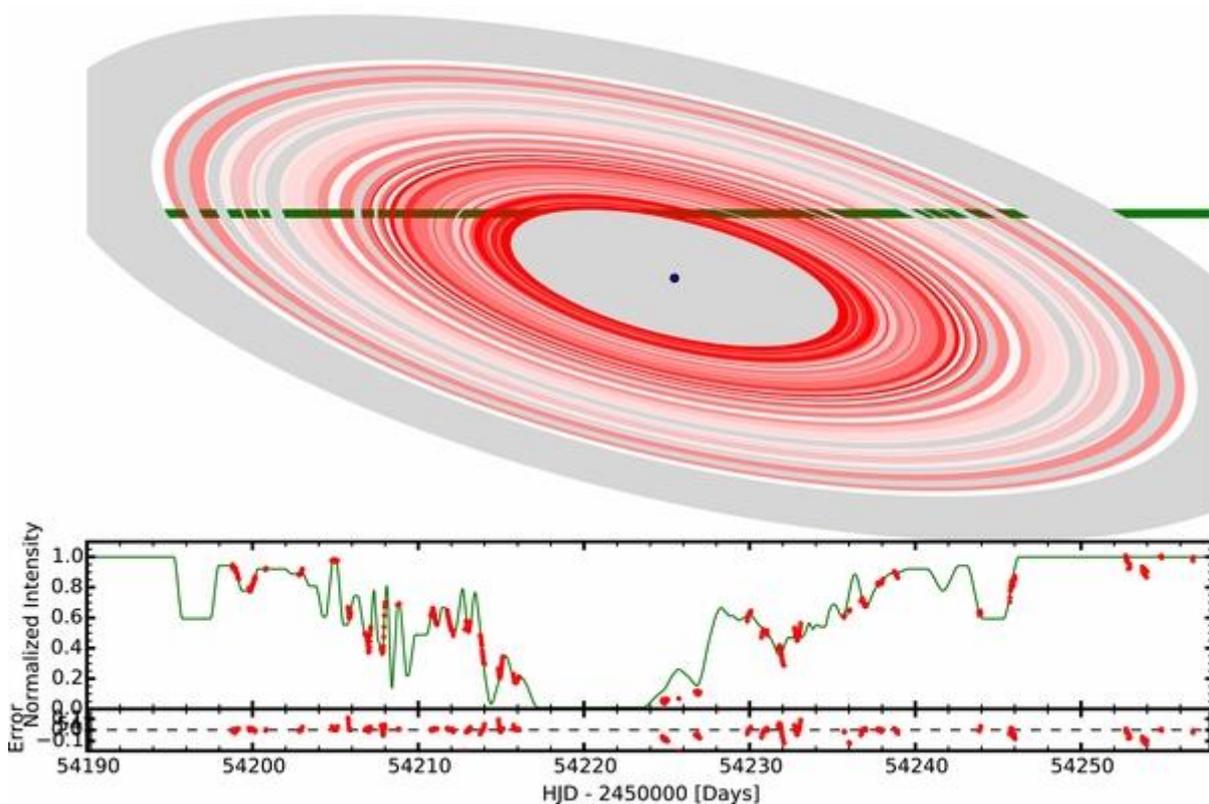
Возможное влияние предполагаемого спутника на форму транзита Kepler-1625 b. По данным "Хаббла" [\[61\]](#)

Конечно, никто не сомневается в том, что у внесолнечных планет есть спутники. Но обнаружить экзолуны, подобные галилеевским спутникам Юпитера или Титану – задача пока что недостижимая для современных инструментов. Но косвенное свидетельство того, что такие планетные системы в миниатюре существуют и у экзопланет, получить удалось. В 2018-2019 годах на VLT сделали снимки двух планет-гигантов у молодой звезды, ещё не вышедшей на главную последовательность, PDS 70. В том же 2019 систему наблюдали в субмиллиметровом диапазоне на ALMA. Сами планеты в этом диапазоне не видны, но в точности на месте PDS 70 c, расположенной в 30 а.е. от звезды, хорошо различим размытый источник излучения. Светить может пыль размером  $\sim 0.1$  мм, образующая вокруг PDS 70 с околоранетный аккреционный диск. В таких миниатюрных аналогах протопланетных дисков должны формироваться спутники газовых гигантов.



Протоспутниковый диск у PDS 70. Изображение ALMA [\[62\]](#)

По-видимому, похожий "протолунный" диск был обнаружен ещё раньше, в 2011 году, причём транзитным методом. В апреле-мае 2007 года проект SuperWASP зафиксировал странные, продолжавшиеся почти два месяца колебания блеска молодой звезды V140 Центавра. Подробное изучение выявило их симметрию по времени и глубине относительно центрального, исключительно сильного падения блеска звезды. Как если бы её затмевала огромная, концентрическая структура поперечником в 180 млн. км. Самым простым объяснением была система колец, окружающих центральное тело (сверхмассивную планету или скорее коричневый карлик), гораздо более массивная и протяжённая, чем кольца Сатурна. Вряд ли такая структура могла бы оставаться стабильной долгое время. Скорее, тем более учитывая возраст звезды (всего 16 млн. лет), речь шла об аккреционном диске. Судя по форме транзитов, в кольцах присутствовали щели, образованные, вероятно, растущими протоспутниками. Впрочем, найти подходящую орбитальную конфигурацию, объясняющую геометрию колец с учётом возможных резонансов, так и не удалось. Не удалось пронаблюдать и повторный транзит объекта, названного, в честь первооткрывателя, объектом Мамаека (Mamajek's object). Судя по скорости прохождения, он должен был находиться на расстоянии  $\sim 1.7$  а.е. от звезды и иметь период, в зависимости от степени вытянутости орбиты, не менее 2.3 лет. Но за прошедшие с открытия годы объект так и не вернулся. Более того, похожих – весьма сильных – падений яркости не было обнаружено и в архивных данных за почти вековой период. В результате возникла версия, что объект Мамаека может быть вообще не связан с V140 Центавра, а является свободно плавающим телом, чья траектория случайно совпала с линией, соединяющей звезду с земными наблюдателями.

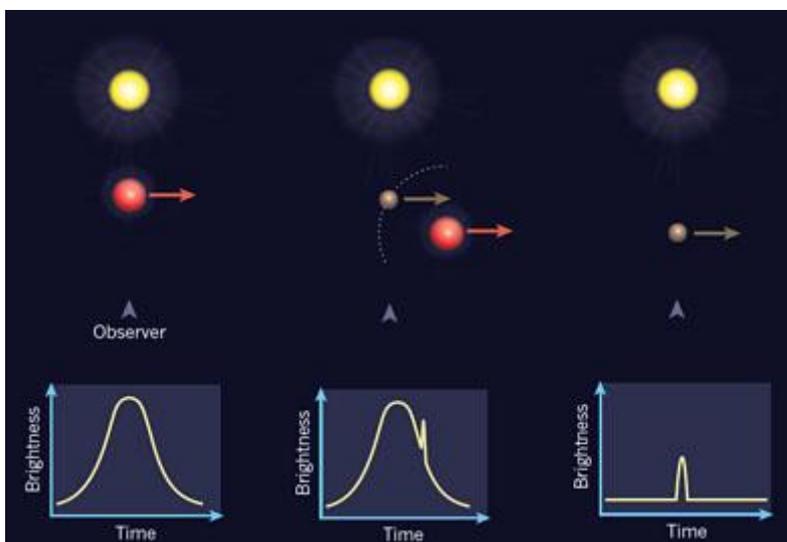


Моделирование формы объекта Мамаека по кривой блеска [63]

Существуют ли планеты, свободно плавающие в космосе, не привязанные к звёздам? Как минимум в межзвёздное пространство могут попасть планеты, которым не повезло родиться в сильно возмущённых, динамически "горячих" планетных системах с гигантами на эксцентрических орбитах. Но это не единственная возможность. Газовые гиганты с массой ниже 13  $M_J$ , при которой начинается термоядерное горение дейтерия, могут зарождаться по тому же сценарию, что и звёзды с коричневыми карликами – при фрагментации межзвёздных облаков. Для такого рода объектов предложен термин "субкоричневые карлики" (sub-brown dwarfs; пожалуй, более удачный вариант перевода –

коричневые субкарлики). К ним можно отнести, например, маломассивный спутник 2M1207, а также один из ближайших к Солнцу субзвёздных объектов, обнаруженный в 2014 году – WISE 0855–0714. Расстояние до последнего составляет всего 7.4 световых года, ближе расположены только Альфа Центавра, звезда Барнарда и Луман 16, двойной коричневый карлик, открытый годом ранее. Масса WISE 0855–0714 оценивается в диапазоне от 3 до 10 М<sub>j</sub>, а температура поверхности – от 225 до 260 К, то есть ниже нуля по Цельсию! Обнаруживать такие холодные объекты невероятно сложно. Проще, как и в случае с "нормальными" планетами-гигантами, искать новорожденные объекты возрастом в несколько миллионов лет. Несколько кандидатов в "планеты-бродяги" обнаружено, например, в скоплении Сигма Ориона возрастом 3 млн. лет, масса одного из них, S Ori 70, оценена всего в 3 М<sub>j</sub>. Избыток ИК-излучения у некоторых подобных объектов может быть вызван пылью в протопланетных (или протоспутниковых, в зависимости от определения) дисках.

Один из лучших способов оценить распространённость "планет-бродяг" или, по-другому, "планет-сирот" – искать их в обзорах событий гравитационного микролинзирования. Как и экзопланеты, они на короткое время фокусируют своим гравитационным полем свет фоновых звёзд, усиливая их блеск, но это не сопровождается более длительным и сильным линзированием со стороны родительской звезды. В 2011 году вышла статья, авторы которой на основе двухлетних наблюдений проектов MOA и OGLE пришли к выводу, что на каждую звезду в Галактике может приходиться по две одиночные планеты массами от 3 до 15 М<sub>j</sub>. Учтя, что число небесных тел растёт с уменьшением массы, другой научный коллектив оценил количество планет, выброшенных из своих систем в свободное плавание, в буквально астрономические 100 тысяч на одну звезду. Правда, они экстраполировали "вниз" вплоть до массы Плутона, который уже не считается "большой" планетой. В 2017 году вышла статья польских астрономов из проекта OGLE, которые не смогли подтвердить оптимистичные выводы коллег, хотя и использовали данные гораздо более длительных наблюдений. Они ограничили распространённость свободно плавающих планет-гигантов в менее чем 0.25 на одну звезду.



Гравитационное линзирование звездой, звездой с планетой и блуждающей планетой [64]

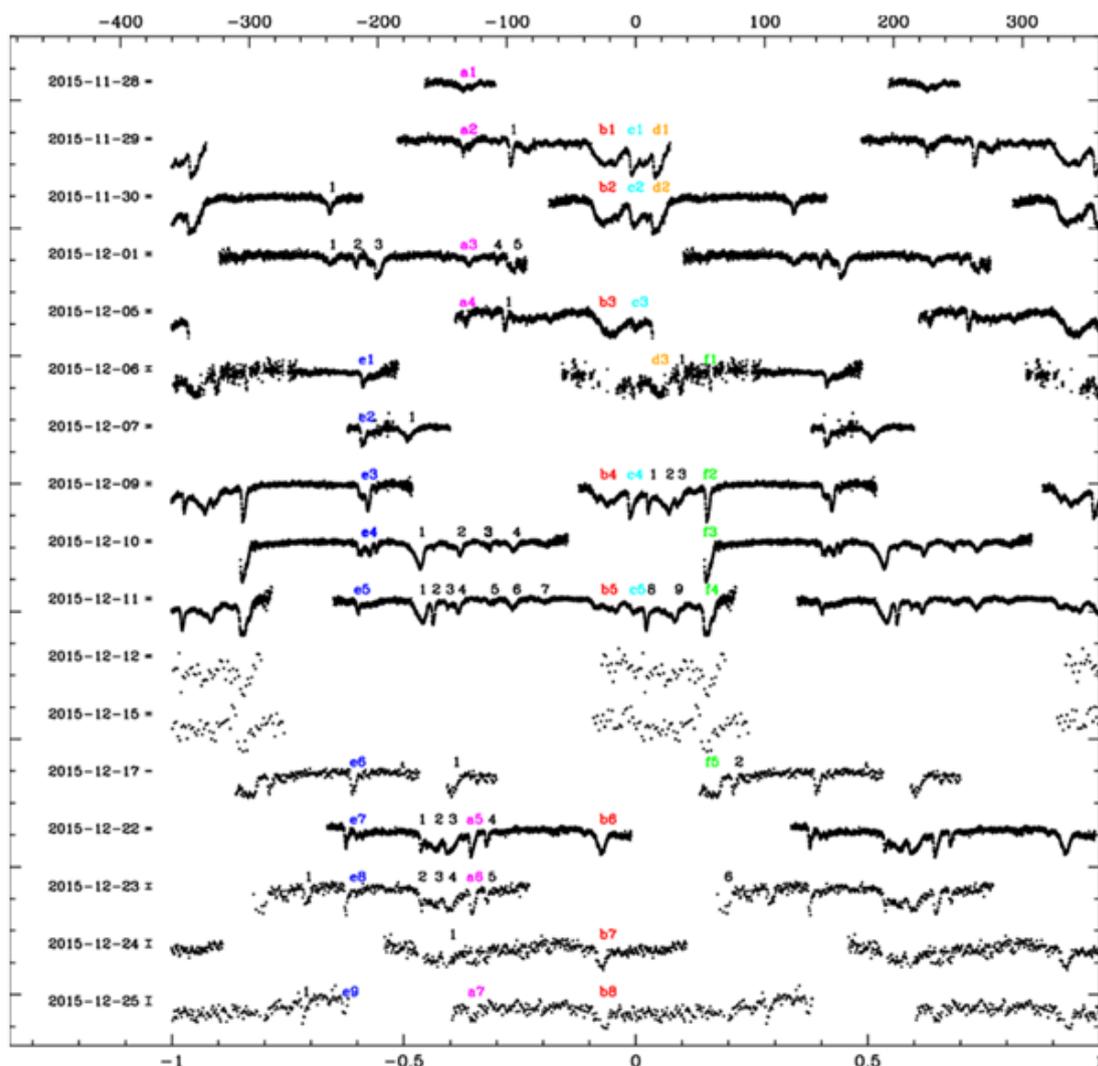
Микролинзирование позволяет выявлять и тела гораздо меньших размеров, в том числе земной массы. В 2011 году на MOA зафиксировали двойное событие, которое проще всего было объяснить прохождением перед фоновой звездой объекта на расстоянии 1800 световых лет от Земли с массой около 3 М<sub>j</sub> и спутником массой всего 0.5 земных. Этот спутник вполне мог оказаться первой открытой "экзолуной", хотя и у не совсем обычной экзопланеты. К сожалению, существовало и альтернативное объяснение: с той же вероятностью расстояние до обоих линз могло ока-

заться на порядок большим, 23 000 световых лет; их массы при этом возрастали до 12% солнечной и 18 земных, то есть речь могла идти уже об "обычном" нептуне, обращающемся вокруг столь же обычного красного карлика. В 2020 была опубликована статья участников проекта OGLE, в которой объявлялось об открытии одиночной планеты OGLE-2016-BLG-1928 с массой, в зависимости от расстояния, от 0.3 до 2 земных. Ещё пару кандидатов с массами как у Нептуна и Земли опубликовали в марте 2023 года. Авторы на основе 9-летних наблюдений в рамках проекта MOA оценили долю свободно плавающих планет в диапазоне масс от 0.33 М<sub>e</sub> до 20 М<sub>j</sub> как ~20 на одну звезду.

Раз уж речь зашла о довольно экзотических объектах, нельзя пройти мимо ещё пары необычных открытий, пусть даже и не имеющих прямого отношения к экзопланетам.

Сравнительно незамеченной на фоне фурора, вызванного "Кеплером", прошла в сентябре 2011 новость об открытии планеты у пульсара PSR J1719–1438. Как и в случае с PSR B1257+12 и PSR 1829-10, планету удалось обнаружить методом тайминга пульсаций. Необычной была уже её орбита: период обращения составлял 2 часа 10 минут, а большая полуось – всего 600 тысяч километров! Если бы планета обращалась вокруг Солнца, её орбита оказалась бы под фотосферой. При таком тесном соседстве внешние слои объекта должны срываться под действием мощной гравитации нейтронной звезды и падать на неё. Сохраниться может вещество только внутри так называемой полости Роша. Расчёты показали, что радиус этой полости в случае PSR J1719–1438 составляет всего 28 тысяч км, или 40% радиуса Юпитера. Масса же планеты примерно равнялась массе Юпитера. Из этого следовал вывод, что средняя плотность этого странного небесного тела должна составлять как минимум 23 г/куб.см. Объекты с такой плотностью существуют, но с гораздо большими массами, в диапазоне уже коричневых карликов. Например, средняя плотность транзитного "горячего" коричневого карлика *CoRoT-3 b* равна 26 г/куб.см при массе 22 М<sub>ж</sub>. При росте массы радиус газовых гигантов и коричневых карликов почти не меняется за счёт всё большего сжатия вещества возрастающей гравитацией вплоть до предела Кумара (около 80 М<sub>ж</sub>, или 8% массы Солнца), при котором начинается термоядерная реакция «горения» водорода, энергия которой способна расширить звезду. Но у самых лёгких красных карликов, таких как TRAPPIST-1, размеры всё ещё сопоставимы с размерами Юпитера. Однако плотность *PSR J1719–1438 b* невозможно объяснить сжатием – его масса для этого недостаточно велика. В отличие от газовых гигантов, он должен состоять из вещества более плотного, чем водород и гелий с небольшой примесью более тяжёлых элементов. Астрономы, открывшие объект, пришли к выводу, что *PSR J1719–1438 b* по своему происхождению – вовсе не планета, а бывшая звезда. Изначально она могла быть солнцеподобным спутником массивной звезды, ставшей сверхновой. Позже сам жёлтый карлик перешёл в стадию красного гиганта, и его раздутые внешние оболочки были поглощены пульсаром. Звезда продолжала терять внешние слои, пока не осталось тело планетной массы, состоящее из углерода и кислорода – продуктов термоядерного «горения» гелия – в кристаллической форме.

В феврале 2022 года появилась статья международной группы исследователей, в которой описывались странные колебания яркости белого карлика WD 1054-226. Это не были транзиты в строгом смысле этого слова, скорее просто падения блеска разной глубины и формы. Необычность их заключалась в периодичности: рисунок кривой блеска повторялся каждые 25 часов, а сами "транзиты" были разделены интервалами в 23 минуты, так, что в 25-часовой период укладывалось ровно 65 потемнений. При этом рисунок не повторялся в точности, и со временем менялся до неузнаваемости; сохранялась только строгая периодичность. В среднем яркость падала на 3%; учитывая, что радиус самого белого карлика лишь на 30% превышает земной, размер затмевающих тел должен примерно соответствовать лунному. Но, учитывая довольно хаотическую форму транзитов и их изменчивость, твёрдыми телами они быть вызваны не могут. Скорее, это сгустки пыли или обломков. Что может вызывать такую странную периодичность? Исследователи провели параллели с кольцами Сатурна, в которых под влиянием близких спутников возникают резонансные структуры. Возможно, белый карлик окружён обломочным диском, видимым нам с ребра, в котором скрывается небольшая планета массой с Луну, под действием гравитации которой вещество сбивается в сгустки, разделённые равными промежутками. Интересно, что инфракрасного избытка, который могла бы излучать пыль, у WD 1054-226 не обнаружено. При этом сами затмевающие объекты, находясь на орбите радиусом ~2.5 млн км, должны быть нагреты до ~50° С, то есть расположены в зоне обитаемости белого карлика.



Кривые блеска WD 1054-226 с повторяющимися паттернами [65]

Конечно, самой известной и широко освещённой в СМИ аномалией, обнаруженной при поиске экзопланет, остаётся объект KIC 8462852, или, по-простому, звезда Табби, названная так по имени первооткрывательницы Табеты Бояджян (Tabetha Boyajian). Но этот загадочный объект уже явно выходит за рамки статьи, а история его исследований, возможно, когда-нибудь станет достойной отдельного обзора.

## Перспективы

19 декабря 2013 года с космодрома Куру во Французской Гвиане стартовала ракета-носитель "Союз", выведя в космос орбитальную обсерваторию Европейского космического агентства [Gaia](#). 8 января обсерватория достигла точки Лагранжа L2, где, после полугода тестирования и калибровки, 25 июля 2014 года приступила к работе. Основная задача миссии – астрометрия; Gaia должна измерить положение и движение более миллиарда звёзд нашей Галактики. Погрешность наблюдений достигает беспрецедентных 10 микро-секунд дуги (для звёзд ярче 13 величины), что в десятки раз точнее всех прочих обзоров, в том числе предыдущей европейской космической обсерватории Hipparcos. Такая точность позволит наконец зафиксировать колебания звёздных траекторий, вызываемые притяжением планет-гигантов, которые так долго ускользали от астрономов XX века. Ожидается, что Gaia сможет обнаружить десятки тысяч экзопланет. Что важно, астрометрия, в отличие от двух современных ведущих методов поиска – доплеровского и транзитного – чувствительнее к долгопериодическим планетам, что позволит заполнить

белые пятна в пока ещё плохо изученной внешней области планетных систем. Первый каталог экзопланет по результатам 66 месяцев основной миссии должен быть опубликован не ранее 2025 года, и будет пополняться по мере продления работы аппарата. Впрочем, пара планет, [Gaia-1 b](#) и [Gaia-2 b](#), уже была анонсирована в 2022, но открыты они не астрометрическим, а транзитным методом — это типичные горячие юпитеры.



Телескоп Gaia в процессе постройки [66]

У Gaia, как и у телескопа Джеймса Вебба, экзопланеты – лишь одна из целей наблюдений. В ближайшие годы должны появиться новые миссии, созданные специально для экзопланетных исследований. Прежде всего, это [PLATO](#) (PLANetary Transits and Oscillations of stars), проект ЕКА, планируемый к запуску в 2026 году. Задуманный ещё в 2007 и выбранный в 2014 среди пятёрки кандидатов в категории космических миссий среднего класса МЗ, PLATO является прямым наследником CoRoT, "Кеплера" и TESS. Оснащённый 26 камерами, он будет наблюдать за областью неба в 2250 кв. градусов,



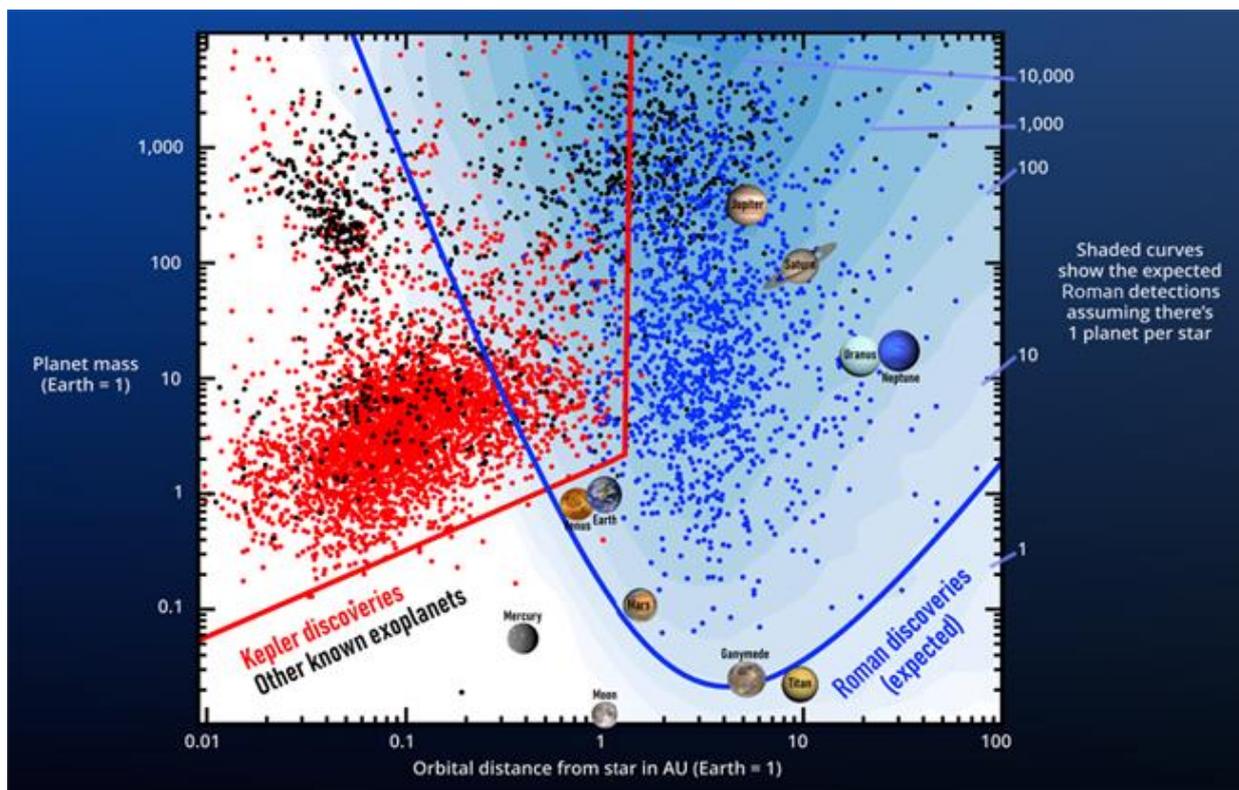
PLATO в представлении художника [67]

что в 20 раз превышает поле зрения "Кеплера". Изначально предполагалось изучение двух участков неба по два года каждый в течение основной четырёхлетней миссии, но возможны и другие варианты, например, трёхлетнее непрерывное наблюдение с последующим быстрым сканированием значительной части неба. Разумеется, срок службы может быть и продлён, как минимум вдвое. Большой охват позволит наблюдать за большим числом ярких звёзд типа Солнца, причём

длительное время наблюдения даст возможность искать планеты с широкими орбитами, вплоть до зоны обитаемости.

Среди конкурентов PLATO, не сумевших пройти конкурс в 2014 году, был проект EChO, обсерватория для изучения экзопланетных атмосфер. В 2018 году был проведён отбор четвёртой миссии среднего класса M4 в рамках программы Cosmic Vision 2015-2025. Победителем стал [ARIEL](#) (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey), фактически – модифицированная EChO. Планируется, что обсерватория будет выведена в точку L2 (где к тому моменту уже будет работать PLATO) в 2029 году. ARIEL будет изучать спектры около 1000 транзитных планет, анализируя состав их атмосфер.

Ещё один метод поиска – гравитационное микролинзирование – получит серьёзное подспорье в 2026-2027 годах, с запуском обсерватории Нэнси Грейс Роман ([RST, Roman Space Telescope](#)). Изначально известный под аббревиатурой WFIRST (Wide-Field InfraRed Survey Telescope), этот телескоп был в 2012 подарен НАСА Национальным управлением военно-космической разведки США, которое признало его дизайн устаревшим для задач слежки за поверхностью Земли. Основной целью широкоугольной (с полем зрения в сто раз большим, чем у "Хаббла") обсерватории станет изучение тёмной материи, но она сможет также наблюдать микролинзовые события, вызванные экзопланетами. Высокая точность позволит собрать статистику по объектам вплоть до нескольких лунных масс на оптимальном для метода удалении от звезды (~2-10 а.е.) и вплоть до земных масс в районе земной орбиты. Будет изучена и распространённость планет-бродяг.



Ожидаемое распределение планет, открытых RST (синим цветом). Красным отмечены планеты "Кеплера", чёрным – прочие открытия [68]

Разработчики ещё одного любопытного проекта планируют снизить погрешность астрономии сразу на порядок в сравнении с характеристиками Gaia, и довести точность единичного измерения до 1 микросекунды дуги, что позволит искать землеподобные планеты у ближайших звёзд. Необычность задумки в том, что использоваться будет сравнительно дешёвый микроспутник с телескопом диаметром всего 30 см. Проект называется TOLIMAN – Telescope for Orbit Locus Interferometric Monitoring of our Astronomical Neighborhood – и наблюдать будет, собственно, за Толиманом, то есть Альфой Центавра. Миссия финансируется Breakthrough Initiatives, программой, основанной российско-

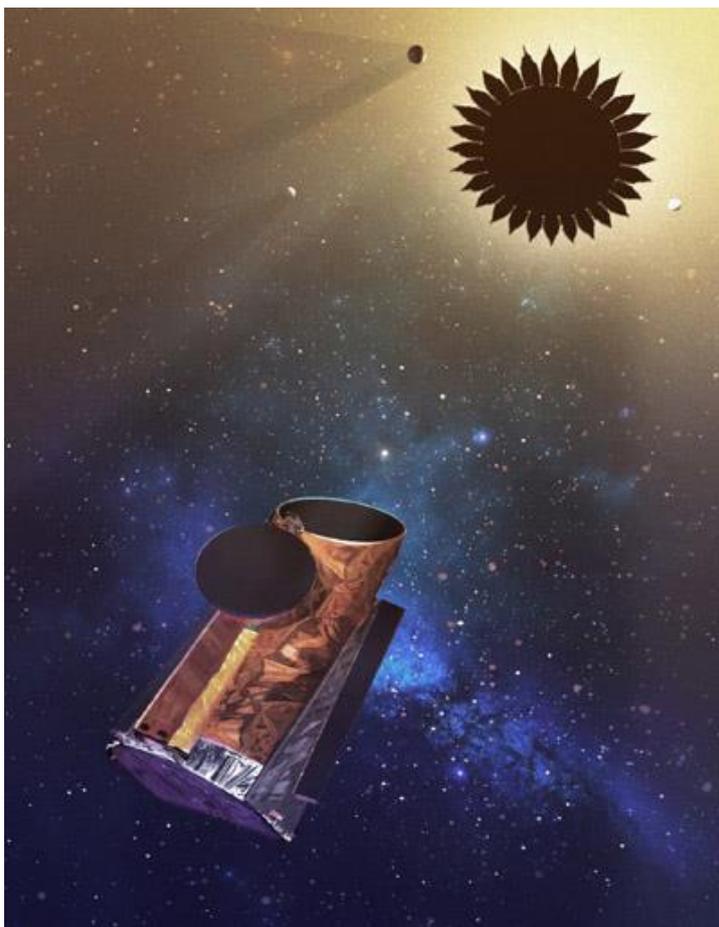
израильским бизнесменом Юрием Миллером и известной благодаря разработке концепции межзвёздного зонда Breakthrough Starshot. Беспрецедентная чувствительность астрометрии должна обеспечиваться технологией дифракционного зрачка, благодаря которой можно с высокой точностью, невзирая на несовершенства самой оптической системы, измерять расстояние до опорной звезды, в роли которой в случае Альфы Центавра будет выступать второй компонент системы. Но в этом заключается и ограничение метода, который можно применять только к достаточно тесным двойным звёздам. В случае успеха проекта планируется создать более крупный телескоп TOLIMAN+ для наблюдения за 61 Лебедя и 70 Змееносца.

Прорывов в наблюдательной технике стоит ждать не только от космических проектов. Во второй половине 2020-х должны вступить в строй несколько обсерваторий нового поколения, так называемые "экстремально большие телескопы". Самый крупный из них, носящий именно такое название – [ELT](#), Extremely Large Telescope, строится на территории Европейской южной обсерватории в Атакаме. 39-метровый телескоп-рефлектор должен увидеть первый свет в 2027 году. Как и все современные гигантские телескопы, такие как европейский VLT и американские Keck I и Keck II, он будет иметь сегментированное зеркало с системой адаптивной оптики, благодаря которой можно подстраивать оптическую поверхность под вызываемые атмосферой деформации волнового фронта за счёт работающих в режиме реального времени актуаторов. Такая система позволяет компенсировать большую часть атмосферных искажений. Потенциальные возможности для исследования экзопланет у телескопа огромны. Спектрометры, установленные в обсерватории, должны довести погрешность измерений радиальных скоростей звёзд до 1 см/с, что на порядок меньше амплитуды, которую вызывает у Солнца орбитальное движение Земли. Фактически это позволит убрать инструментальную составляющую из общей погрешности наблюдений, оставив только вызываемый самими звёздами шум, и искать у наиболее хромосферно спокойных из них аналоги нашей планеты. Прямое наблюдение сможет разрешать у ближайших звёзд не только газовые гиганты, но и планеты класса Нептуна и даже меньшие, вплоть до суперземель/мининептунов. Несколько меньший Тридцатиметровый телескоп строится на Гавайях на вулкане Мауна-Кеа. К сожалению, строительство приостановлено на неопределённый срок из-за протестов местных жителей. 25-метровый Гигантский Магелланов телескоп планируется запустить в 2029 году в обсерватории Института Карнеги Лас-Кампанас в Чили.



Будущий вид ELT [69]

Раз в десятилетие НАСА выбирает проект большой стратегической, или, как её называли раньше, флагманской научной миссии. В области астрофизики к ним относятся, в частности, "Хаббл", JWST и планируемый телескоп Роман. В 2016 году было предложено четыре новых проекта космических обсерваторий с планируемым запуском в 2030-е годы: рентгеновская Lynx, Origins с диапазоном в дальнем ИК и всеволновые LUVOIR и HabEx. LUVOIR (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor), изначально известный под аббревиатурой ATLAST (Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope), считался заменой "Хаббл". Несмотря на общий астрофизический характер обсерватории, изучение экзопланет должно было стать одной из основных, если не главной целью. Предлагалось два варианта конструкции, с 8- и 15-метровым сегментированным зеркалом. Встроенный коронограф позволил бы разрешать землеподобные планеты у близких звёзд и получать их спектры, в том числе для поисков биомаркеров. HabEx, как следует из названия (The Habitable Exoplanet Observatory), предназначался почти исключительно для поиска и изучения потенциально обитаемых экзопланет. Диаметр зеркала предполагался меньшим, чем у LUVOIR – 4 м, но это должно было компенсироваться применением внешнего складного зонта-коронографа диаметром 52 м, раскрываемого на расстоянии в десятки тысяч км перед телескопом, и способного полностью блокировать свет центральной звезды. Концепция, таким образом, напоминала отменённый в своё время TPF-O.



HabEx с коронографом в представлении художника [70]

В 2021 году национальные академии наук, инженерии и медицины США выпустили 624-страничный отчёт на будущее десятилетие, в котором рекомендовали НАСА компромиссный вариант: 6-метровый телескоп, работающий в УФ, видимом и ИК-диапазонах, с коронографом для получения спектров экзопланет. Пока неясно, будет ли коронограф внешним или внутренним. Запуск обсерватории планируется на начало 2040-х годов.

В 2021 году национальные академии наук, инженерии и медицины США выпустили 624-страничный отчёт на будущее десятилетие, в котором рекомендовали НАСА компромиссный вариант: 6-метровый телескоп, работающий в УФ, видимом и ИК-диапазонах, с коронографом для получения спектров экзопланет. Пока неясно, будет ли коронограф внешним или внутренним. Запуск обсерватории планируется на начало 2040-х годов.

## Несколько слов в заключение

Статья, которую я задумал ещё в начале 2022, в процессе разрослась и заняла, даже с учётом перерывов, без малого год на написание. За это время произошло немало новых интересных открытий, связанных, в первую очередь, с телескопом Джеймса Вебба, которые я постарался в статье отразить. Некоторые разделы могут показаться слишком перегруженными деталями, но – таков уж авторский выбор. Из-за взрывного роста экзопланетологии её история постепенно обезличивается: если в начале я старался упоминать имена всех сколько-нибудь заметных первооткрывателей, то сейчас над исследованиями работают огромные научные коллективы, и выделять отдельных авторов всё сложнее. Время идёт, и статья начнёт стремительно устаревать на фоне новых неизбежных сенсаций, поэтому, наверное, заключительную точку в ней ставить рано.

## Использованные источники:

### Опубликованные:

Michael D. Lemonick, "Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin", Walker Books, 2012, Kindle Edition

Ray Jayawardhana, "Strange New Worlds: The Search for Alien Planets and Life beyond Our Solar System", Princeton University Press, 2013, Kindle Edition

Ли Биллингс, "5 000 000 000 лет одиночества. Поиск жизни среди звезд", Издательский дом "Питер", 2016 г.

### Интернет-источники:

Естественно, Wikipedia

Архив электронных препринтов <https://arxiv.org/>

Сайт "Планетные системы" <http://allplanets.ru/index.htm>

Астрофорум <https://astronomy.ru/forum/>

Экзопланетный архив НАСА (NASA Exoplanets

Archive) <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

Энциклопедия внесолнечных планет (The Extrasolar Planets Encyclopaedia) <http://exoplanet.eu/>

Более подробно – по разделам. В случаях, если удавалось найти подробные русскоязычные источники со ссылками на оригинальные статьи, приводил именно их (в первую очередь, конечно, с [allplanets.ru/novosti](http://allplanets.ru/novosti)). Кроме того, я не стал, за несколькими исключениями, приводить ссылки на статьи об отдельных открытиях, чтобы не раздувать чрезмерно объем; при желании читатель сможет без труда найти ссылки на такие статьи на сайте [allplanets.ru](http://allplanets.ru) или в Википедии.

### Предыстория:

The Search for the Extrasolar Planets: A Brief History of the Search, the Findings and the Future Implications <https://www.public.asu.edu/~sciref/exoplnt.htm>

Планетные системы звезд <https://www.nkj.ru/archive/articles/8039/>

Peter van de Kamp: the astronomer who was wrong in all the right ways <https://www.sciencefocus.com/space/peter-van-de-kamp-the-astronomer-who-was-wrong-in-all-the-right-ways/>

50 Years Ago an Astronomer Discovered the First Unambiguous Exoplanet (or So He Thought) <https://blogs.scientificamerican.com/observations/50-years-ago-an-astronomer-discovered-the-first-unambiguous-exoplanet-or-so-he-thought/>

Invisible companions of the binary star 61 Cygni <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1977SvA....21..182D/abstract>

### На пороге:

Exoplanet Detection Methods <https://arxiv.org/abs/1210.2471>

Gamma Cephei - Rotation or planetary companion? <https://legacy.adsabs.harvard.edu/full/1992ApJ...396L..91W>

The unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf <https://www.nature.com/articles/339038a0>

A Brief Personal History of Exoplanets <https://epl.carnegiescience.edu/news/brief-personal-history-exoplanets>

Finder of New Worlds <https://www.nytimes.com/2014/05/13/science/finder-of-new-worlds.html>

### Первые планеты... но не у звезд:

No planet orbiting PSR1829–10 <https://www.nature.com/articles/355213b0>

Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257 + 12 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.264.5158.538>

### **Нобелевское открытие:**

A Jupiter-mass companion to a solar-type star <https://www.nature.com/articles/Art1>  
Нобелевская премия по физике — 2019  
[https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433548/Nobelevskaya\\_premiya\\_po\\_fizike\\_2019](https://elementy.ru/novosti_nauki/433548/Nobelevskaya_premiya_po_fizike_2019)

### **Планеты-гиганты на любой вкус:**

«Планеты вокруг звёзд», журнал "Знание - Сила", июнь 1996  
Absence of a planetary signature in the spectra of the star 51 Pegasi <https://www.nature.com/articles/385795a0>  
Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/312457>  
Infrared radiation from an extrasolar planet <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503554>  
Detection of Thermal Emission from an Extrasolar Planet <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503457>  
Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities <https://academic.oup.com/ptps/article/doi/10.1143/PTPS.158.24/1856181>  
Обзор итогов первого десятилетия исследования экзопланет <http://allplanets.ru/10let.htm>  
The Planet-Metallicity Correlation <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/428383/fulltext/>

### **Всё легче и легче:**

High Accuracy Radial velocity Planet Searcher <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/36/harps/>  
Astronomers Announce the Most Earth-Like Planet Yet Found Outside the Solar System [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=104243&org=NSF&from=news](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=104243&org=NSF&from=news)  
An Excess Due to Small Grains Around The Nearby K0V Star HD69830: Asteroid or Cometary Debris? <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504491>

### **Прямое изображение:**

MACсовское рабочее определение экзопланет <https://sergepolar.livejournal.com/3848034.html>  
Warped Disk May Indicate Presence of Planet Around the Star Beta Pictoris <https://hubble-site.org/contents/media/images/1996/02/391-Image.html?news=true>  
The Inner Rings of Beta Pictoris <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0212081>  
An early extrasolar planetary system revealed by planetesimal belts in  $\beta$  Pictoris <https://www.nature.com/articles/nature02948>  
Exoplanet Caught on the Move <https://www.eso.org/public/news/eso1024/>  
Астрономы показали таймлапс вращения экзогигантов вокруг звезды за 12 лет <https://nplus1.ru/news/2023/01/31/hr-8799>  
Infrared Non-detection of Fomalhaut b – Implications for the Planet Interpretation <https://arxiv.org/abs/1201.4388>  
Разжалованный Дагон [https://elementy.ru/kartinka\\_dnya/1211/Razzhalovannyj\\_Dagon](https://elementy.ru/kartinka_dnya/1211/Razzhalovannyj_Dagon)  
Планеты Фомальгаут b не существует [http://allplanets.ru/novosti\\_2020\\_1.htm#1013](http://allplanets.ru/novosti_2020_1.htm#1013)

### **Интерлюдия:**

Worlds Worlds Worlds <https://oklo.org/2008/05/25/worlds-worlds-worlds/>  
32 New Exoplanets Found <https://www.eso.org/public/news/eso0939/>

### **Запуск "Кеплера". CoRoT и MEarth:**

COROT <https://corot.cnes.fr/en/COROT/index.htm>  
Запуск "Кеплера" <http://www.astronet.ru/db/msg/1233805>  
Kepler's Dilemma: Not Enough Time <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/keplers-dilemma-notenough-time/>  
The MEarth Project: Discoveries <https://lweb.cfa.harvard.edu/MEarth/Discoveries.html>  
"Место, где много воды" [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/431224/Mesto\\_gde\\_mnogo\\_vody](https://elementy.ru/novosti_nauki/431224/Mesto_gde_mnogo_vody)  
Three Possible Origins for the Gas Layer on GJ 1214b <https://arxiv.org/abs/0912.3243>

Яркие облака и атмосфера из тяжелых газов у мининептуна GJ 1214 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2023\\_1.htm#1260](http://allplanets.ru/novosti_2023_1.htm#1260)

### **"Кеплер" приступает к работе:**

Первые пять планет Кеплера [http://allplanets.ru/novosti\\_2010.htm#157](http://allplanets.ru/novosti_2010.htm#157)

Characteristics of Kepler Planetary Candidates Based on the First Data Set: The Majority are Found to be Neptune-Size and Smaller <https://arxiv.org/abs/1006.2799v1>

Две новые транзитные планеты в одной системе: Kepler-9 [http://allplanets.ru/novosti\\_2010.htm#192](http://allplanets.ru/novosti_2010.htm#192)

Уникальная система Kepler-11 – шесть транзитных планет в плотной упаковке [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#221](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#221)

Characteristics of planetary candidates observed by Kepler, II: Analysis of the first four months of data <https://arxiv.org/abs/1102.0541>

Architecture and Dynamics of Kepler's Candidate Multiple Transiting Planet Systems <https://arxiv.org/abs/1102.0543>

Экзопланеты: прорыв, еще прорыв!..

[https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/431304/Ekzoplanety\\_proryv\\_eshche\\_proryv](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431304/Ekzoplanety_proryv_eshche_proryv)

### **HARPS наносит ответный удар:**

Многoplanетная система HD 10180: ожерелье из непутонов и холодный сатурн [http://allplanets.ru/novosti\\_2010.htm#189](http://allplanets.ru/novosti_2010.htm#189)

Четыре новых суперземли и экзонептун в солнечных окрестностях [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#260](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#260)

Fifty New Exoplanets Discovered by HARPS <https://www.eso.org/public/news/eso1134/>

### **Эра "Кеплера":**

A Planet With Two Suns (видео) <https://www.jpl.nasa.gov/videos/a-planet-with-two-suns>

Wobbling Ancient Binaries - Here Be Planets? <https://arxiv.org/abs/1401.6742>

HD 202206: A Circumbinary Brown Dwarf System <https://arxiv.org/abs/1705.00659>

NASA's Kepler Mission Confirms Its First Planet in Habitable Zone of Sun-like Star [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/news/kepscicon-briefing.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepscicon-briefing.html)

Kepler's Tally of

Planets <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/interactive/science/space/keplers-tally-of-planets.html>

Выяснены условия на двух планетах, расположенных рядом с солнцеподобной звездой <https://naked-science.ru/article/sci/vyyasneny-usloviya-na-dvukh-pl>

Система Kepler-132: три планеты, две звезды [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_1.htm#543](http://allplanets.ru/novosti_2014_1.htm#543)

Кеплер: резкий рост числа непутонов по мере увеличения орбитального периода [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_2.htm#414](http://allplanets.ru/novosti_2012_2.htm#414)

Система Kepler-32 как прототип наиболее распространенных планетных систем Галактики [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_1.htm#417](http://allplanets.ru/novosti_2013_1.htm#417)

Пересмотрена оценка количества потенциально обитаемых планет [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_1.htm#430](http://allplanets.ru/novosti_2013_1.htm#430)

A revised estimate of the occurrence rate of terrestrial planets in the habitable zones around kepler m-dwarfs <https://arxiv.org/abs/1303.2649>

Третья планета в циркумбинарной системе Kepler-47 [http://allplanets.ru/novosti\\_2019\\_1.htm#950](http://allplanets.ru/novosti_2019_1.htm#950)

### **Наконец, жизнь?**

extraterrestrial (из блога Грега Лофлина) [https://oklo.org/2006/07/16/extraterrestrial/Odds\\_of\\_Life\\_on\\_Newfound\\_Earth-Size\\_Planet\\_'100\\_Percent,'\\_Astronomer](https://oklo.org/2006/07/16/extraterrestrial/Odds_of_Life_on_Newfound_Earth-Size_Planet_'100_Percent,'_Astronomer)

Says <https://www.space.com/9225-odds-life-newfound-earth-size-planet-100-percent-astronomer.html>

Загадочная история с планетами Gliese 581 g и f [http://allplanets.ru/novosti\\_2010.htm#201a](http://allplanets.ru/novosti_2010.htm#201a)

В системе Gliese 581 - только 4 планеты [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_1.htm#315](http://allplanets.ru/novosti_2012_1.htm#315)

The planet that is no more <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/planet-that-is-no>

[more/](#)

«Закрывается» потенциально обитаемая суперземля Gliese 581 d [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_2.htm#561](http://allplanets.ru/novosti_2014_2.htm#561)

GJ 667C c - потенциально обитаемая земля в 7 пк от

Солнца [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#287](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#287)

The Ugly Battle Over Who Really Discovered the First Earth-Like

Planet <https://www.wired.com/2014/11/exoplanets/>

NASA's Kepler Marks 1,000th Exoplanet Discovery, Uncovers More Small Worlds in Habitable

Zones <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-kepler-marks-1000th-exoplanet-discovery-uncovers-more-small-worlds-in-habitable-zones>

Kepler's Earth-like Planets Should Not Be Confirmed Without Independent Detection: The

Case of Kepler-452b <https://arxiv.org/abs/1803.11307>

A Potential Super-Venus in the Kepler-69 System <https://arxiv.org/abs/1305.2933>

### **Конец прекрасной эпохи:**

NASA Retires Kepler Space Telescope, Passes Planet-Hunting

Torch <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-retires-kepler-space-telescope-passes-planet-hunting-torch/>

SIM Lite Astrometric Observatory <https://web.archive.org/web/20100409140747/http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/keyPubPapers/sim-Book2009/>

Rage Against the Dying of the Light <https://web.archive.org/web/20110604121537/http://www.astrobio.net/exclusive/4005/rage-against-the-dying-of-the-light>

Rage Against the Dying of the Light <https://web.archive.org/web/20110604121537/http://www.astrobio.net/exclusive/4005/rage-against-the-dying-of-the-light>

Rage Against the Dying of the Light <https://web.archive.org/web/20110604121537/http://www.astrobio.net/exclusive/4005/rage-against-the-dying-of-the-light>

### **"Кеплер" умер... Да здравствует K2!**

NASA's K2 mission: The Kepler Space Telescope's Second Chance to

Shine <https://www.nasa.gov/feature/ames/nasas-k2-mission-the-kepler-space-telescopes-second-chance-to-shine/>

Exoplanet and Candidate

Statistics [https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

Планетные системы белых карликов

<https://postnauka.ru/video/51364>

Астрономы нашли доедающего планету белого карлика

<https://nplus1.ru/news/2015/10/22/death-star>

В системе HD 3167 две планеты находятся на взаимно перпендикулярных орбитах

[http://allplanets.ru/novosti\\_2021\\_2.htm#1131](http://allplanets.ru/novosti_2021_2.htm#1131)

Удивительно низкая плотность планет в системе Kepler-

51 [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_1.htm#513](http://allplanets.ru/novosti_2014_1.htm#513)

Exploring Whether Super-Puffs Can Be Explained as Ringed

Exoplanets <https://arxiv.org/abs/1911.09673>

KOI-314 c: «воздушная» планета земной

массы [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_1.htm#511](http://allplanets.ru/novosti_2014_1.htm#511)

Определены массы планет в системе Kepler-

138 [http://allplanets.ru/novosti\\_2022\\_2.htm#1224](http://allplanets.ru/novosti_2022_2.htm#1224)

NASA's Kepler Mission Announces a Planet Bonanza, 715 New

Worlds <https://www.nasa.gov/ames/kepler/nasas-kepler-mission-announces-a-planet-bonanza>

NASA's Kepler Mission Announces Largest Collection of Planets Ever

Discovered <https://www.nasa.gov/press-release/nasas-kepler-mission-announces-largest-collection-of-planets-ever-discovered>

Горячие суперганимеды системы Kepler-

444 [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_1.htm#767](http://allplanets.ru/novosti_2017_1.htm#767)

Нейронные сети обнаружили дополнительные планеты в системах Kepler-80 и Kepler-

90 [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_2.htm#831](http://allplanets.ru/novosti_2017_2.htm#831)

NASA Releases Kepler Survey Catalog with Hundreds of New Planet

Candidates <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-releases-kepler-survey-catalog-with-hundreds-of-new-planet-candidates/>

Планетные системы оказались упорядочены по размеру планет и интервалам между

ними <https://nplus1.ru/news/2018/01/11/similar-planets>

В распределении по радиусам небольших планет обнаружен резкий провал [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_1.htm#777](http://allplanets.ru/novosti_2017_1.htm#777)

Exoplanet Radius Gap Dependence on Host Star Type <https://arxiv.org/abs/1712.05458>

#### **Ближайшие:**

Planet Found in Habitable Zone Around Nearest Star <https://www.eso.org/public/news/eso1629/>

У звезды Проксима Центавра обнаружена потенциально обитаемая планета [http://allplanets.ru/novosti\\_2016\\_2.htm#719](http://allplanets.ru/novosti_2016_2.htm#719)

Обитаемость Проксимы Центавра b I: Эволюционные сценарии [http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci\\_rev/340.html#arxiv/1608.08211](http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/340.html#arxiv/1608.08211)

Atmospheric dynamics of Earth-like tidally locked aquaplanets <https://arxiv.org/abs/1001.5117>

Water Trapping on Tidally Locked Terrestrial Planets Requires Special Conditions <https://arxiv.org/abs/1411.0540>

A New Look at Habitability around Red Dwarf Stars <https://www.centauri-dreams.org/2017/02/09/a-new-look-at-habitability-around-red-dwarf-stars/>

Is Proxima Centauri b Habitable? A Study of Atmospheric Loss <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aa6438/meta>

Ученые снова обвинили проксиму Центавра в невозможности жизни на ее планете <https://naked-science.ru/article/sci/uchenye-snova-obvinili-proksimu>

Проксима Центавра произвела экстремально мощную вспышку <https://nplus1.ru/news/2021/04/26/flare-proxima>

Астрономы рассказали о судьбе Земли на орбите Проксимы Центавра <https://nplus1.ru/news/2017/08/01/eart-proxima>

Проксиму b проверили на устойчивость к радиации <https://nplus1.ru/news/2016/12/14/proxima-b>

УФ-излучение не снижает жизнепригодность экзопланет в системах красных карликов [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433465/UF\\_izluchenie\\_ne\\_snizhaet\\_zhizneprigodnost\\_ekzoplanet\\_v\\_sistemakh\\_krasnykh\\_karlikov](https://elementy.ru/novosti_nauki/433465/UF_izluchenie_ne_snizhaet_zhizneprigodnost_ekzoplanet_v_sistemakh_krasnykh_karlikov)

Numerical simulation of possible surface temperatures on Proxima b (synchronous rotation) (видео) <https://www.eso.org/public/videos/eso1629g/>

Habitable Climate Scenarios for Proxima Centauri b With a Dynamic Ocean <https://arxiv.org/abs/1709.02051>

Automated Planet Finder (APF) <https://www.lickobservatory.org/explore/research-telescopes/automated-planet-finder/>

CARMENES <https://carmenes.caha.es/ext/instrument/index.html>

#### **Фантомы:**

How dusty is  $\alpha$  Centauri? [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2014/03/aa21887-13/aa21887-13.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2014/03/aa21887-13/aa21887-13.html)

Открыта планета земного типа у звезды альфа Центавра B! [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_2.htm#386](http://allplanets.ru/novosti_2012_2.htm#386)

Update on the search for planets in the Alpha Centauri system <https://www.planetary.org/articles/20140401-update-on-the-search-for-planets>

Горячей земли у звезды альфа Центавра B не существует [http://allplanets.ru/novosti\\_2015\\_2.htm#649](http://allplanets.ru/novosti_2015_2.htm#649)

У звезды тау Кита, возможно, есть пять планет [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_2.htm#412](http://allplanets.ru/novosti_2012_2.htm#412)

«В далеком созвездии Тау Кита...»

[https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/434072/V\\_dalekom\\_sozvezdii\\_Tau\\_Kita](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434072/V_dalekom_sozvezdii_Tau_Kita)

В системе HD 40307 – шесть планет? [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_2.htm#394](http://allplanets.ru/novosti_2012_2.htm#394)

The HARPS search for southern extra-solar planets. XXXVIII. Bayesian re-analysis of three systems. New super-Earths, unconfirmed signals, and magnetic cycles <https://arxiv.org/abs/1510.06446>

У близкого красного карлика Gliese 667C – только две планеты [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_2.htm#576](http://allplanets.ru/novosti_2014_2.htm#576)

Stellar activity mimics a habitable-zone planet around Kapteyn's

star <https://arxiv.org/abs/1505.02778>

A Gaussian Process Regression Reveals No Evidence for Planets Orbiting Kapteyn's

Star <https://arxiv.org/abs/2103.02709>

Сверхземля у звезды Барнарда <https://nplus1.ru/blog/2018/11/17/solongawaited>

Stellar Activity Manifesting at a One Year Alias Explains Barnard b as a False Posi-

tive <https://arxiv.org/abs/2105.07005>

Confirmation of the Long-Period Planet Orbiting Gliese 411 and the Detection of a New

Planet Candidate <https://arxiv.org/abs/2107.09087>

### **TRAPPIST, TESS и другие:**

TRAPPIST-1: семь землеразмерных планет в одной си-

стеме [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_1.htm#764](http://allplanets.ru/novosti_2017_1.htm#764)

Ultracool Dwarf and the Seven Planets <https://www.eso.org/public/news/eso1706/>

Пивное братство в созвездии Водолея. О чем рассказало открытие новых экзопланет в

системе TRAPPIST-1 <https://nplus1.ru/material/2017/02/24/trappist>

Надежда... на экзопланетную жизнь [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/433512/Nadezhda\\_na\\_ekzoplanetnuyu\\_zhizn](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/433512/Nadezhda_na_ekzoplanetnuyu_zhizn)

Refining the transit timing and photometric analysis of TRAPPIST-1: Masses, radii, densities, dynamics, and ephemerides <https://arxiv.org/abs/2010.01074>

Океаны лавы и вулканы сделали планеты TRAPPIST-1 непригодными для

жизни <https://nplus1.ru/news/2017/10/23/volcanoes-trappist-1>

SPECULOOS [https://www.speculoos.uliege.be/cms/c\\_4259452/en/speculoos](https://www.speculoos.uliege.be/cms/c_4259452/en/speculoos)

HD 219134 b, c: две транзитные планеты земного типа в 6.5 пк от

Земли [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_1.htm#766](http://allplanets.ru/novosti_2017_1.htm#766)

Поверх барьеров [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/434111/Poverkh\\_barerov](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434111/Poverkh_barerov)

Астрономы нашли у звезды AU Микроскопа нептуноподобную пла-

нету <https://nplus1.ru/news/2020/06/26/au-mic-b>

Телескоп TESS добился первого серьезного успеха

[https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433596/Teleskop\\_TESS\\_dobilsya\\_pervogo\\_sereznogo\\_u\\_spekha](https://elementy.ru/novosti_nauki/433596/Teleskop_TESS_dobilsya_pervogo_sereznogo_u_spekha)

Две землеразмерные планеты у красного карлика LP 890-9, одна из них в обитаемой зоне

[http://allplanets.ru/novosti\\_2022\\_2.htm#1188](http://allplanets.ru/novosti_2022_2.htm#1188)

Обнаружены прямые свидетельства наличия планеты у белого кар-

лика [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433702/Obnaruzheny\\_pryamy\\_e\\_svidetelstva\\_nalichiya\\_planety\\_u\\_belogo\\_karlika](https://elementy.ru/novosti_nauki/433702/Obnaruzheny_pryamy_e_svidetelstva_nalichiya_planety_u_belogo_karlika)

ESPRESSO <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/espesso.html>

### **Атмосферы:**

NASA' Spitzer First to Crack Open Light of Faraway Worlds [https://www.nasa.gov/mision\\_pages/spitzer/news/spitzer-20070221.html](https://www.nasa.gov/mision_pages/spitzer/news/spitzer-20070221.html)

Измерена скорость ветров на Осирисе! [http://allplanets.ru/novosti\\_2010.htm#182](http://allplanets.ru/novosti_2010.htm#182)

Измерена масса и наклонение орбиты горячего гиганта тау Волопаса

b [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_2.htm#341](http://allplanets.ru/novosti_2012_2.htm#341)

Ученые определили скорость вращения экзопланеты Бета Живописца

b <https://www.nkj.ru/news/24247/>

Обнаружен температурный контраст между дневным и ночным полушариями горячего юпитера [http://allplanets.ru/novosti\\_2007.htm#51](http://allplanets.ru/novosti_2007.htm#51)

Измерена разница температур дневного и ночного полушарий планеты Upsilon

Andromedae b [http://allplanets.ru/novosti\\_2006.htm#31](http://allplanets.ru/novosti_2006.htm#31)

Три горячих гиганта оказались равномерно раскален-

ными [http://allplanets.ru/novosti\\_2007.htm#36](http://allplanets.ru/novosti_2007.htm#36)

Горячий гигант HD 189733 b глубокого синего

цвета [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_2.htm#465](http://allplanets.ru/novosti_2013_2.htm#465)

Rains of Terror on Exoplanet HD 189733b <https://www.nasa.gov/image-feature/rains-of-terror-on-exoplanet-hd-189733b/>

Новости из планетной системы

HD 189733 [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/432070/Novosti\\_iz\\_planetnoy\\_sistemy\\_HD\\_189733](https://elementy.ru/novosti_nauki/432070/Novosti_iz_planetnoy_sistemy_HD_189733)

Планета WASP-104 b чернее угля [http://allplanets.ru/novosti\\_2018\\_1.htm#861](http://allplanets.ru/novosti_2018_1.htm#861)

Сходство и различие планет WASP-67 b и HAT-P-38 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_1.htm#790](http://allplanets.ru/novosti_2017_1.htm#790)

Суперземля Kepler-10 b – горячая, яркая, загадочная [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_2.htm#480](http://allplanets.ru/novosti_2013_2.htm#480)

Транзит планеты 55 Рака e в инфракрасных лучах: атмосфера из угарного газа? [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#235](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#235)

Обнаружено тепловое излучение от транзитной суперземли 55 Рака e [http://allplanets.ru/novosti\\_2012\\_1.htm#323](http://allplanets.ru/novosti_2012_1.htm#323)

Транзитная суперземля 55 Канкри e меняет свою яркость [http://allplanets.ru/novosti\\_2015\\_1.htm#621](http://allplanets.ru/novosti_2015_1.htm#621)

Построена грубая температурная карта горячей суперземли 55 Канкри e [http://allplanets.ru/novosti\\_2016\\_1.htm#678](http://allplanets.ru/novosti_2016_1.htm#678)

GJ 1214 b: атмосфера из водяного пара? [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#228](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#228)

Атмосфера GJ 1214 b: все-таки из водяного пара? [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_1.htm#452](http://allplanets.ru/novosti_2013_1.htm#452)

Планета GJ 1214 b окутана густыми облаками [http://allplanets.ru/novosti\\_2014\\_1.htm#509](http://allplanets.ru/novosti_2014_1.htm#509)

У планеты GJ 1132 b обнаружена атмосфера [http://allplanets.ru/novosti\\_2016\\_2.htm#749](http://allplanets.ru/novosti_2016_2.htm#749)

С открытием атмосферы у экзопланеты, похоже, поторопились [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/433593/S\\_otkrytiem\\_atmosfery\\_u\\_ekzoplanety\\_pokhozhe\\_potoropilis](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/433593/S_otkrytiem_atmosfery_u_ekzoplanety_pokhozhe_potoropilis)

Вторичная атмосфера суперземли GJ 1132 b состоит преимущественно из водорода [http://allplanets.ru/novosti\\_2021\\_1.htm#1076](http://allplanets.ru/novosti_2021_1.htm#1076)

No Evidence for Molecular Absorption in the HST WFC3 Spectrum of GJ 1132 b <https://arxiv.org/abs/2104.01873>

The Featureless HST/WFC3 Transmission Spectrum of the Rocky Exoplanet GJ 1132b: No Evidence for a Cloud-free Primordial Atmosphere and Constraints on Starspot Contamination <https://arxiv.org/abs/2105.10487>

Водяной пар в атмосфере мининептуна K2-18 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2019\\_2.htm#978](http://allplanets.ru/novosti_2019_2.htm#978)

K2-18 b: вода — вероятно, жизнь — едва ли [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/434958/K2\\_18\\_b\\_voda\\_veroyatno\\_zhizn\\_edva\\_li#b1](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434958/K2_18_b_voda_veroyatno_zhizn_edva_li#b1)

(He)обитаемая планета K2-18 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2020\\_1.htm#1004](http://allplanets.ru/novosti_2020_1.htm#1004)

Stellar surface inhomogeneities as a potential source of the atmospheric signal detected in the K2-18 b transmission spectrum <https://arxiv.org/abs/2109.14608>

Methane as a dominant absorber in the habitable-zone sub-Neptune K2-18 b <https://arxiv.org/abs/2011.10424>

У планеты LHS 3844 b нет атмосферы [http://allplanets.ru/novosti\\_2019\\_2.htm#974](http://allplanets.ru/novosti_2019_2.htm#974)

K2-33 b: высотная дымка или пылевые кольца? [http://allplanets.ru/novosti\\_2022\\_2.htm#1212](http://allplanets.ru/novosti_2022_2.htm#1212)

James Webb Space Telescope  
Science [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/webb/science/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/webb/science/index.html)

JWST наблюдает горячий сатурн WASP-39 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2022\\_2.htm#1216](http://allplanets.ru/novosti_2022_2.htm#1216)

Безоблачные небеса горячего гиганта WASP-96 b [http://allplanets.ru/novosti\\_2022\\_2.htm#1175](http://allplanets.ru/novosti_2022_2.htm#1175)

NASA's Webb Confirms Its First Exoplanet <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/nasa-s-webb-confirms-its-first-exoplanet/>

Планета TRAPPIST-1 b почти черная и лишена существенной атмосферы [http://allplanets.ru/novosti\\_2023\\_1.htm#1249](http://allplanets.ru/novosti_2023_1.htm#1249)

TRAPPIST-1 c: у аналога Венеры нет венерианской атмосферы [http://allplanets.ru/novosti\\_2023\\_1.htm#1274](http://allplanets.ru/novosti_2023_1.htm#1274)

### **Уникальны или типичны?**

Planet Occurrence Rate Papers [https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/occurrence\\_rate\\_papers.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/occurrence_rate_papers.html)

Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars <https://arxiv.org/abs/1311.6806>

A Statistical Reconstruction of the Planet Population Around Kepler Solar-Type Stars <https://arxiv.org/abs/1406.6048>

Searching the Entirety of Kepler Data. II. Occurrence Rate Estimates for FGK Stars <https://arxiv.org/abs/2004.05296>

Occurrence Rates of Planets orbiting FGK Stars: Combining Kepler DR25, Gaia DR2 and Bayesian Inference <https://arxiv.org/abs/1902.01417>

The Occurrence of Rocky Habitable-zone Planets around Solar-like Stars from Kepler Data <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AJ....161...36B/abstract>

About 30% of Sun-like Stars Have Kepler-like Planetary Systems: A Study of their Intrinsic Architecture <https://arxiv.org/abs/1802.09526>

Exoplanets in the Galactic context: Planet occurrence rates in the thin disk, thick disk and stellar halo of Kepler stars <https://arxiv.org/abs/2112.03927>

Occurrence and Architecture of Kepler Planetary Systems as Functions of Stellar Mass and Effective Temperature <https://arxiv.org/abs/2002.02840>

Астрохимия от Дмитрия Вибе: Алюминий и Солнечная система <https://mendeleev.info/astrohimiya-ot-dmitriya-vibe-alyuminij-i-solnechnaya-sistema/>

A Mysterious Gap Within the Solar System's Protoplanetary Disk <https://scitechdaily.com/a-mysterious-gap-within-the-solar-systems-protoplanetary-disk/>

Three rings to bind them: Cosmic history can explain the properties of Mercury, Venus, Earth and Mars [https://www.mpia.de/5793300/news\\_publication\\_18027576\\_transferred](https://www.mpia.de/5793300/news_publication_18027576_transferred)

Fossilized condensation lines in the Solar System protoplanetary disk <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103515005448>

Jupiter: friend or foe? <https://academic.oup.com/astrogeo/article/49/1/1.22/306978>

Objects Destabilized by Jupiter or Saturn May Have First Brought Water to Earth <https://www.seeker.com/space/planets/asteroids-destabilized-by-jupiter-or-saturn-may-have-first-brought-water-to-earth>

Ученые выяснили, откуда на Земле взялась вода, изучив метеориты <https://hightech.fm/2020/08/28/earth-water>

Closest Planetary System Hosts Two Asteroid Belts [https://www.nasa.gov/mision\\_pages/spitzer/news/spitzer-20081027.html](https://www.nasa.gov/mision_pages/spitzer/news/spitzer-20081027.html)

Пересмотрены параметры системы эпсилон Эрида [http://allplanets.ru/novosti\\_2018\\_2.htm#902](http://allplanets.ru/novosti_2018_2.htm#902)

HD 32963 b: аналог Юпитера у солнцеподобной звезды [http://allplanets.ru/novosti\\_2016\\_1.htm#660](http://allplanets.ru/novosti_2016_1.htm#660)

The Anglo-Australian Planet Search XXIV: The Frequency of Jupiter Analogs <https://iop-science.iop.org/article/10.3847/0004-637X/819/1/28/meta>

Wide-orbit exoplanets are common. Analysis of nearly 20 years of OGLE microlensing survey data <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AcA....71....1P/abstract>

Jupiter Analogs Orbit Stars with an Average Metallicity Close to That of the Sun <https://iop-science.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aaafca>

### **Экзолуны, планеты-бродяги и загадочные объекты у белого карлика:**

Astronomers Find First Evidence of Possible Moon Outside Our Solar System <https://www.nasa.gov/press-release/astronomers-find-first-evidence-of-possible-moon-outside-our-solar-system/>

An alternative interpretation of the exomoon candidate signal in the combined Kepler and Hubble data of Kepler-1625 <https://arxiv.org/abs/1902.06018>

Астрономы усомнились в существовании первой потенциальной экзолуны <https://nplus1.ru/news/2019/04/30/there-is-no-moon>

Loose Ends for the Exomoon Candidate Host Kepler-1625b <https://arxiv.org/abs/1904.11896>

Astronomers make first clear detection of a moon-forming disc around an exoplanet <https://www.eso.org/public/news/eso2111/>

Космическая мистерия. Гигантский мотылек-сирота пролетел мимо свечи

[https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/434557/Kosmicheskaya\\_misteriya\\_Gigantskiy\\_motylek\\_sirota\\_proletel\\_mimo\\_svechi](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434557/Kosmicheskaya_misteriya_Gigantskiy_motylek_sirota_proletel_mimo_svechi)

"Бесхозных" планет в два раза больше, чем звезд [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#239](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#239)

Астрономы открыли самую крупную группу кандидатов в планеты-сироты в Млечном Пути <https://nplus1.ru/news/2021/12/22/rogue-planets>

Researchers Say Galaxy May Swarm with "Nomad Planets" <https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-02-23-researchers-say-galaxy-may-swarm-nomad-planets>

Число свободно плавающих планет-гигантов не превышает 0.25 на одну звезду [http://allplanets.ru/novosti\\_2017\\_2.htm#806](http://allplanets.ru/novosti_2017_2.htm#806)

MOA-2011-BLG-262L b: спутник земной массы у свободно плавающей планеты-гиганта? [http://allplanets.ru/novosti\\_2013\\_2.htm#505](http://allplanets.ru/novosti_2013_2.htm#505)

Terrestrial and Neptune mass free-floating planet candidates from the MOA-II 9-year Galactic Bulge survey <https://arxiv.org/abs/2303.08279>

Free-Floating planet Mass Function from MOA-II 9-year survey towards the Galactic Bulge <https://arxiv.org/abs/2303.08280>

Алмазная планета у нейтронной звезды? [http://allplanets.ru/novosti\\_2011.htm#263](http://allplanets.ru/novosti_2011.htm#263)

Астрономы впервые отыскивали кольцо из планетарных обломков в обитаемой зоне белого карлика <https://nplus1.ru/news/2022/02/14/wd-habitable-zone>

### **Перспективы:**

Gaia: ESA's Billion Stars

Surveyor [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Gaia](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia)

Европейское космическое агентство одобрило постройку космической обсерватории PLATO <https://nplus1.ru/news/2022/01/15/plato>

ESA построит космический телескоп для изучения атмосфер экзопланет <https://nplus1.ru/news/2018/03/21/space-telescope-esa>

Что такое космический телескоп имени Нэнси Грейс Роман? <https://22century.ru/popular-science-publications/roman>

Breakthrough Initiatives создаст космический телескоп для поиска экзопланет у Альфы Центавра <https://nplus1.ru/news/2021/11/20/toliman>

Science with ELT: Exoplanets <https://elt.eso.org/science/exoplanets/>

NASA представило концепт нового космического телескопа HabEx <https://nplus1.ru/news/2019/12/19/HabEx>

Одобен новый космический телескоп LUVOIR по поиску Земли 2.0 <https://ab-news.ru/luvoir/>

Astrophysics decadal survey recommends a program of flagship space telescopes <https://spacenews.com/astrophysics-decadal-survey-recommends-a-program-of-flagship-space-telescopes/>