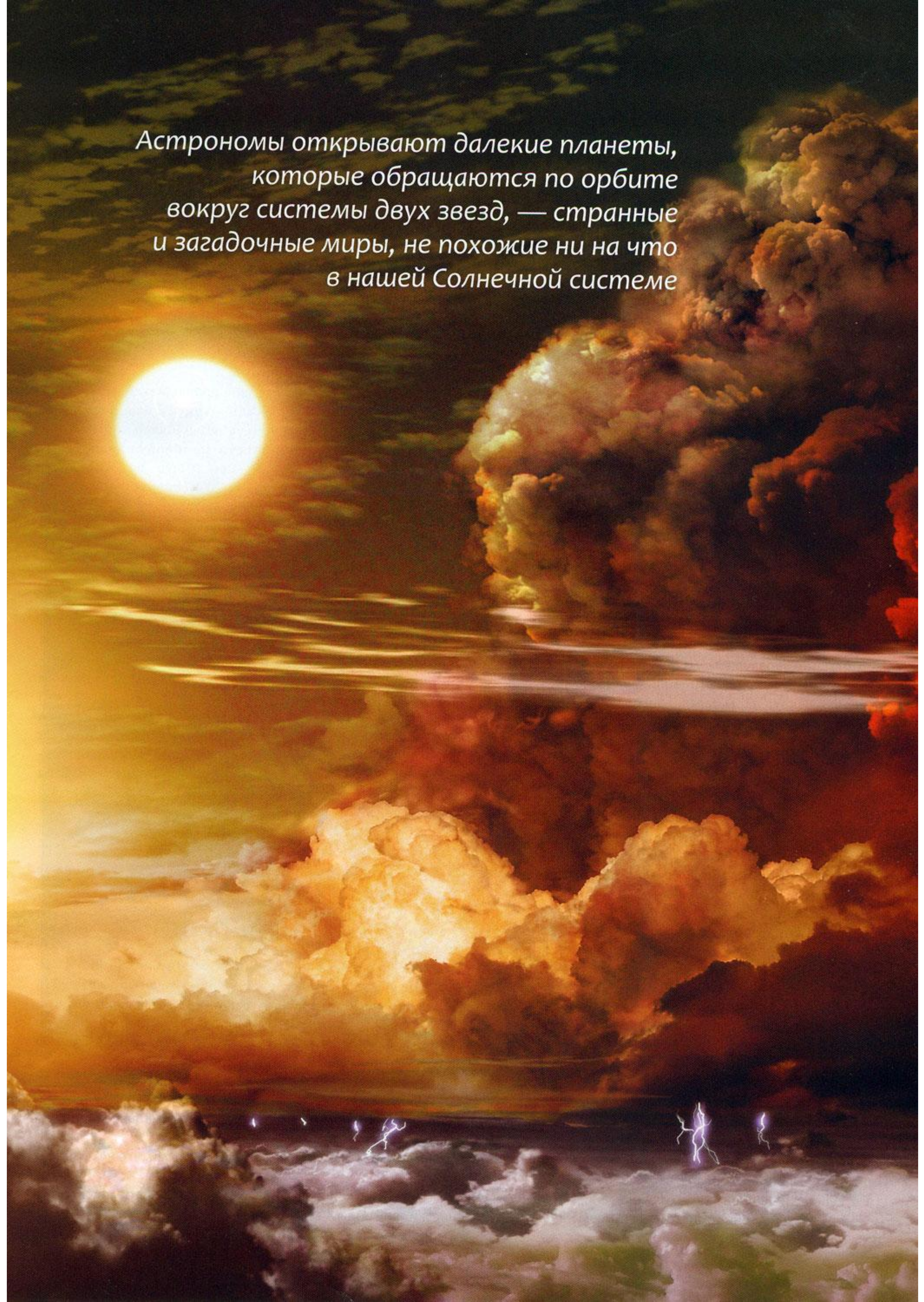


МИРЫ С ДВУМЯ СОЛНЦАМИ

Лоренс Дойл и Уильям Уэлш

Астрономы открывают далекие планеты,
которые обращаются по орбите
вокруг системы двух звезд, — странные
и загадочные миры, не похожие ни на что
в нашей Солнечной системе



ОБ АВТОРАХ

Лоренс Дойл (Laurance R. Doyle) — астрофизик Института SETI в Маунтин-Вью, штат Калифорния.



Уильям Уэлш (William F. Welsh) — профессор астрономии Калифорнийского университета в Сан-Диего.



Как ни прекрасны закаты на Земле, но представьте, насколько изумительно выглядит двойной закат разноцветных солнц, отбрасывающих движущиеся красные и оранжевые тени. В течение многих лет нас обоих интересовало, действительно ли в окрестности двойных звезд могут существовать планеты. И правда ли, что на самом деле существуют миры вроде фантастической планеты Татуин из «Звездных войн», на которой небосвод залит сиянием двух различных солнц?

У астрономов были причины полагать, что такие системы действительно есть, однако некоторые теоретики были с этим не согласны. Условия в окрестности пары звезд, убеждали они, слишком хаотичны для того, чтобы там могли образоваться планеты. В отличие от тел, обращающихся вокруг одиночной звезды, планета, движущаяся вокруг пары звезд, вынуждена иметь дело с двумя гравитационными полями. А поскольку сами звезды обращаются друг вокруг друга, величина результирующей гравитационной силы будет постоянно изменяться. Даже если бы планете и удалось сформироваться в таких нестационарных условиях, ее долговременная стабильность не была бы гарантирована: планета, вероятно, оказалась бы выброшенной далеко в космос или врезалась бы в одну из звезд. Наблюдения двойных звезд порой намекали на присутствие рядом с ними планет, но прямых доказательств получить не удавалось.

В марте 2009 г. двадцатилетние усилия Уильяма Боруцки (William Borucki) и его сотрудников заполучить космический телескоп, способный охотиться за экзопланетами, наконец увенчались успехом. Работа космической обсерватории NASA «Кеплер» дала прекрасные результаты, позволив за короткое время открыть сотни, а затем и тысячи возможных планет методом прохождения, или транзита, состоящим в том, что телескоп

ищет мини-затмение, которое наблюдается, когда планета проходит на фоне звездного диска, блокируя часть его света. Однако после двух лет наблюдений ни у одной двойной звезды планета не обнаружилась. Нам было от чего приуныть. Весной 2011 г., в который раз обсуждая по телефону данные с «Кеплера», один из нас попытался мрачно пошутить: «Может быть, нам следует написать статью о том, почему они не существуют?». Ответом было молчание.

Но наши страхи оказались напрасными. Не прошло и шести месяцев после этого разговора, как мы устроили пресс-конференцию, на которой объявили о первом обнаружении прохода планеты через двойную звездную систему. Эту планету назвали *Kepler-16b*. В течение нескольких месяцев рабочая группа «Кеплера» по изучению затменных двойных звезд открыла еще две планеты в таких системах (*Kepler-34b* и *Kepler-35b*), показав, что хотя это и экзотика, но не такая уж редкая. Так родился новый класс планетных систем. Сейчас число открытых «Кеплером» планет у двойных звезд равно семи, и оно, вероятно, удвоится в ближайшее время. Кстати, расчеты указывают, что в нашей галактике их, по всей видимости, десятки миллионов.

Стратегия поисков

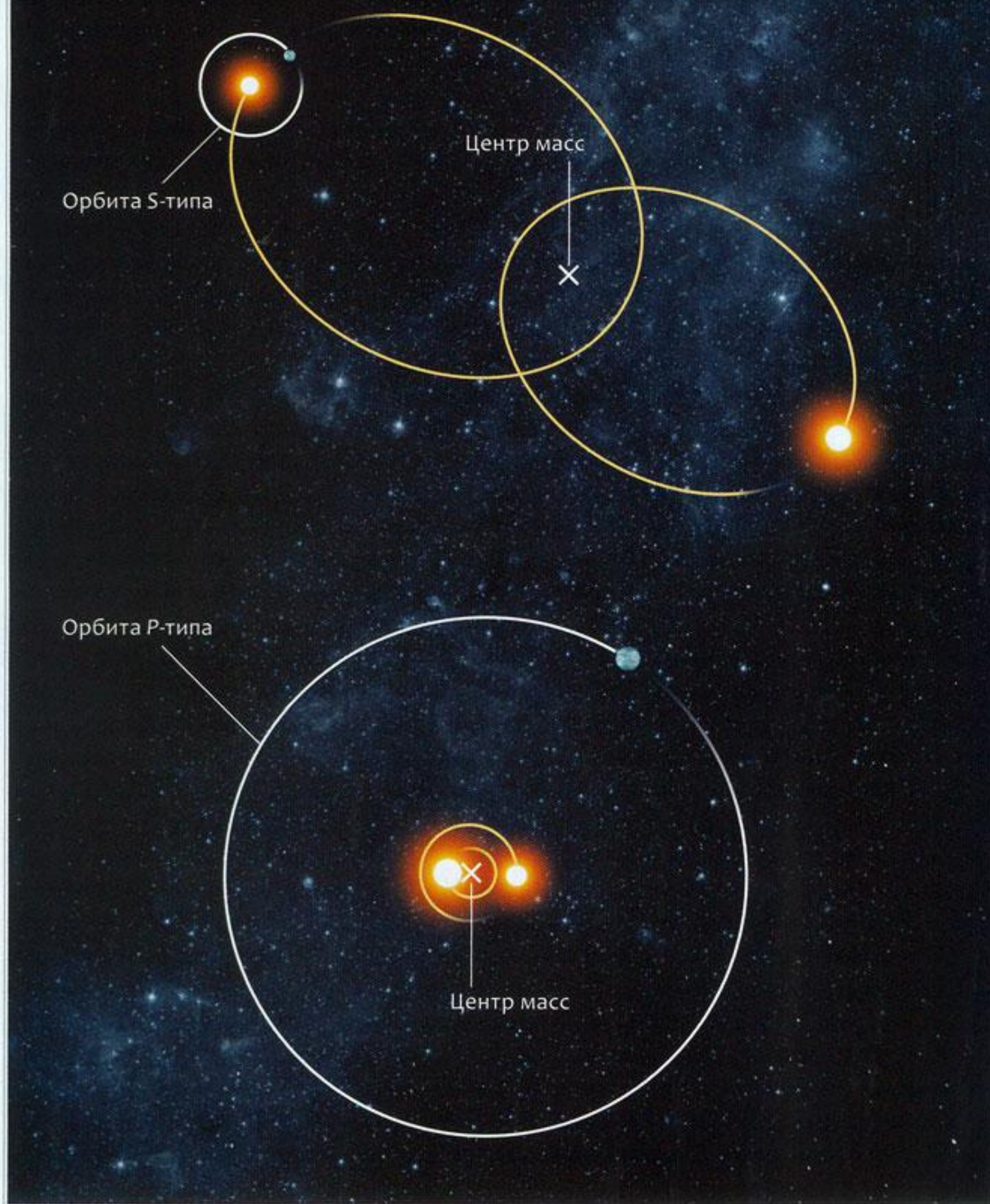
Поиск планет у двойных звезд начался в 1980-х гг., даже еще раньше, чем астрономы обнаружили первые свидетельства существования каких-либо экзопланет, т.е. планет вне нашей Солнечной системы. Хотя прохождения в системе двойной звезды могут выглядеть гораздо более сложными, надежда открыть такие планеты питалась простым предположением: если планета действительно обращается вокруг затменной двойной звезды, следует ожидать, что она движется в той же плоскости, что и сами звезды. Другими словами, если с точки

! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Двойные звезды встречаются довольно часто, и астрономы пытались понять, могут ли существовать планеты двойной звезды — т.е. планеты, обращающиеся вокруг двух солнц.
- Некоторые опасались, что условия вокруг двойной звезды могут оказаться слишком нестабильными, что не позволит там формироваться планетам.
- Однако недавние открытия показали, что планеты двойной звезды не только существуют, но и могут располагаться в зоне жизни двойной системы, где возможно существование жидкой воды.

ДВА КЛАССА ПЛАНЕТ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Двойные звезды чрезвычайно разнообразны. Некоторые движутся по огромным замкнутым кольцам своих орбит вокруг общего центра масс, совершая полный оборот за сотни лет. Эти звезды ведут себя так, как будто они изолированы; планета S-класса может обращаться вокруг каждого члена такой пары, почти не испытывая влияния со стороны второй звезды. Но звезды, расположенные близко одна к другой, могут оборачиваться за несколько недель или даже дней. Многие годы оставалось неясным, могут ли планеты P-класса выжить в условиях хаотически меняющегося гравитационного поля, обращаясь вокруг пары звезд.



в плоскости их орбиты, то звезды на каждом орбитальном обороте проходят друг перед другом, блокируя часть излучения. Точно моделируя, как ослабляется световой поток во время затмений, мы можем выяснить размеры и форму звезд, а также геометрию их орбит. Вкупе с другими измерениями мы можем определить их радиусы и массы. Только затменные двойные звезды позволяют надежно измерять массы и радиусы звезд, и эти данные затем используются для оценки физических характеристик одиночных звезд и не затмевающих друг друга звездных пар.

Если звезды в двойной системе находятся очень далеко друг от друга, обращаясь с периодом, скажем, в сотни лет, то они почти не влияют друг на друга и ведут себя так, как будто бы находятся в полном уединении. Планеты могут обращаться вокруг одной из звезд, и в общем случае присутствие второй звезды почти не оказывает на них влияния. Такие планеты называют «планетами одной звезды» или планетами S-класса; в минувшем десятилетии были обнаружены десятки таких планет.

Намного интереснее случай, когда звезды настолько близки друг к другу, что оборот одной вокруг другой занимает всего несколько недель или даже дней. Чтобы планета в такой двойной системе имела стабильную орбиту, она должна обращаться вокруг обеих звезд, а не одной из них. Численные расчеты показывают, что расстояние орбиты планеты от звезд должно быть больше минимальной критической величины. Если орбита будет лежать слишком

близко, вращающаяся двойная система нарушит устойчивость орбиты планеты и либо поглотит ее, либо выбросит в галактическое пространство.

Минимальное стабильное удаление планеты примерно в два-три раза больше расстояния между звездами. Планеты такого рода называют «планетами двойной звезды», или планетами P-класса. В то время как планеты, обращающиеся вокруг одиночных звезд и вокруг одной звезды

зрения земного наблюдателя звезды затмевают друг друга, то и планета, скорее всего, будет затенять одну или обе звезды. Иными словами, предполагается, что орбиты звезд и планеты лежат в одной плоскости, — вполне разумная гипотеза, которую можно было проверить.

Во многих отношениях затменные двойные звезды — именно тот фундамент, на котором выстроена астрофизика звезд. Если направление на наблюдателя лежит

КАК ОБНАРУЖИТЬ ПЛАНЕТЫ ВОКРУГ МНОГОЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Двойные звезды — уникально полезные астрономические объекты, легко раскрывающие свои тайны. Если для земного наблюдателя эти звезды при движении по орбитам затмевают друг друга, мы можем многое узнать о каждой из них, измеряя ослабление их яркости во время затмений. Этим можно воспользоваться и для обнаружения планет, обращающихся вокруг двойных звезд. Но заметить планеты не так просто — системы из трех тел могут вести себя очень сложно. Здесь показаны идеализированные версии эффектов, которые ищут астрономы.

На что похожи двойные звезды

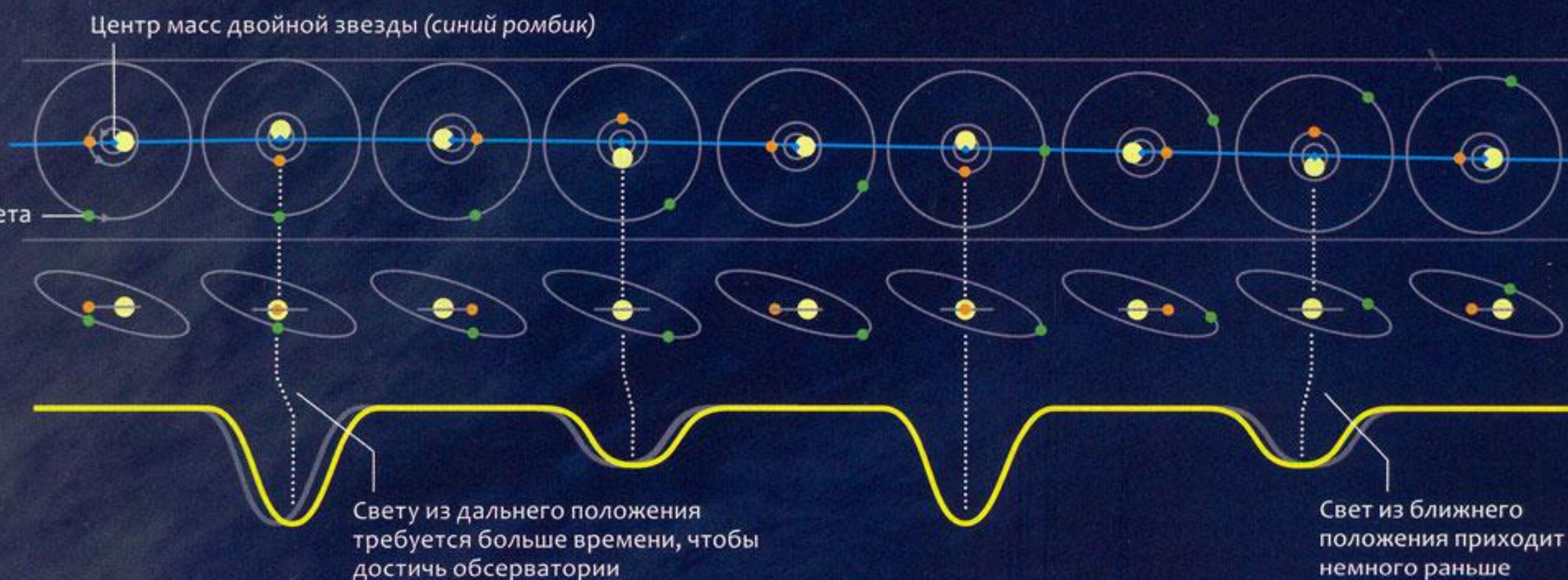
Схемы не в масштабе

В системе затменных двойных звезд каждая звезда на короткое время блокирует свет другой, создавая периодические падения яркости



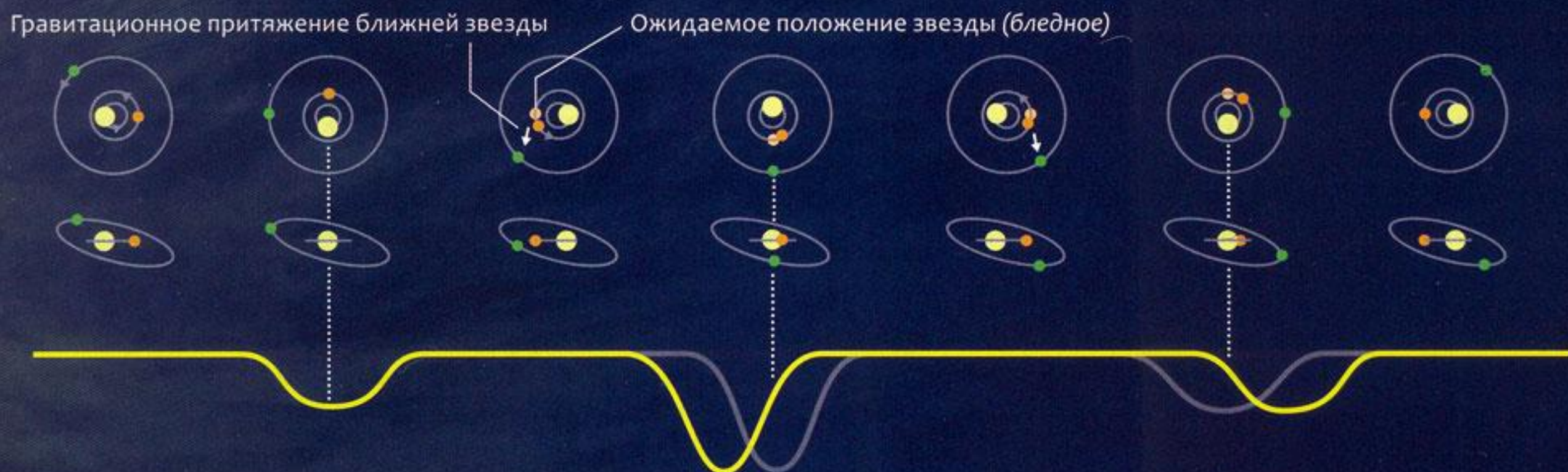
Эффект разницы времени прохождения света

В системе трех тел центр масс двойной звезды обращается вокруг общего центра масс системы трех тел. Поэтому звезды будут располагаться то дальше от Земли, то ближе к нам. Дополнительное расстояние означает, что свету требуется больше времени, чтобы достигнуть наших телескопов, поэтому начало и конец затмения немного задерживаются. При уменьшении расстояния затмения наблюдаются раньше.



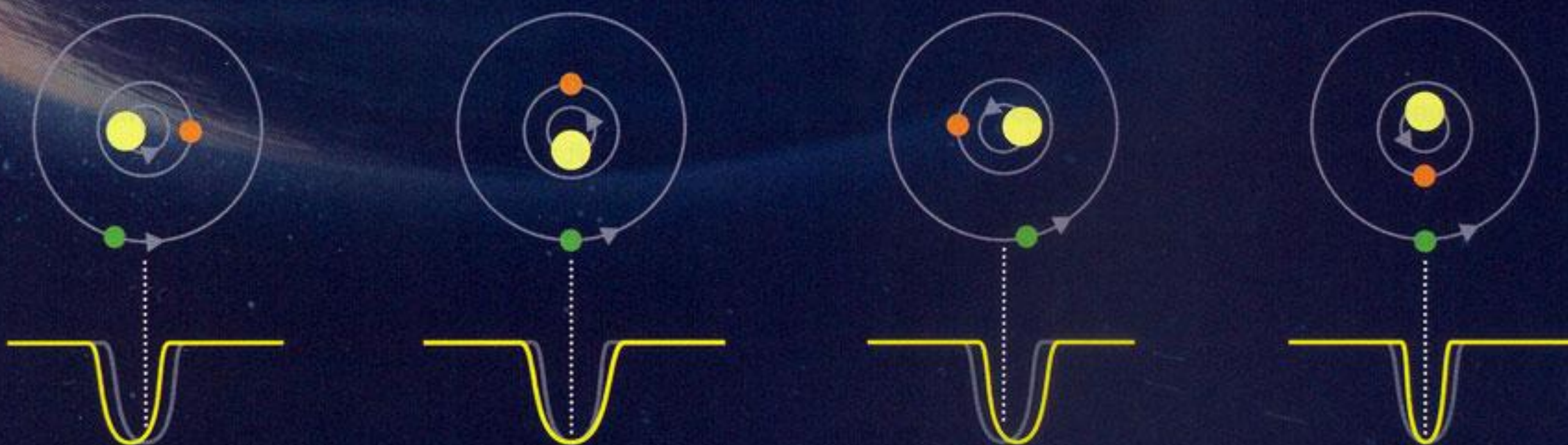
Динамический эффект

Планеты могут влиять и на движение звезд в двойной системе. Если радиус орбиты планеты относительно мал, она влияет на движение одной (или обеих) звезд. Если же одна из звезд менее массивна, чем другая, ее орбита пройдет ближе к планете, что усилит эффект. Близкие проходы могут менять орбиты двух тел сложным образом. На этом примере притяжение планетой вторичной звезды вызывает более раннее затмение главной, а затмение вторичной начнется позднее.



Прохождение планеты на фоне двойной звезды

Если планета проходит перед звездой, она может заслонить часть излучения звезды. В двойных системах сами звезды движутся. В результате иногда планета проходит перед главной звездой раньше, а иногда позже. Кроме того, если планета и звезда движутся в одном направлении, прохождение будет более длительным, а если в противоположных — более коротким. Этот эффект дает задержку в несколько дней и даже более.



в системах удаленных друг от друга двойных звезд, встречаются весьма часто, мы заинтересовались, может ли природа создать планетную систему у двойной звезды, в которой планеты обращаются вокруг обеих звезд.

В простейшем случае — одна звезда с одной планетой — прохождения происходят со строгой периодичностью, что значительно облегчает их обнаружение. Но добавьте еще одну звезду, и система из трех тел начнет демонстрировать довольно сложные эффекты. Сложность возникает благодаря тому, что звезды быстро движутся (*относительно центра масс системы. — Примеч. пер.*), — в отличие от системы с одной звездой, где светило практически неподвижно. Поскольку две звезды расположены намного ближе друг к другу, чем к планете, они должны обращаться друг вокруг друга быстрее, чем планета вокруг них, — известный закон Иоганна Кеплера, управляющий движением планет. Таким образом, планета будет проходить перед быстро движущимися объектами и иногда будет пересекать звездный диск раньше, а иногда позже. Хотя эти прохождения точно предсказуемы (если известны массы и орбиты тел), они происходят не периодически. Кроме того, длительность прохождения будет изменяться в зависимости от относительного движения планеты и звезды, которую она закрывает: если они двигаются в одном направлении, время прохождения будет больше, но когда звезда находится на другой половине своей орбиты и движется в противоположную сторону, прохождение будет короче. Эти изменения затрудняют обнаружение планет двойной звезды, но в то же время дают важное преимущество: когда орбита двойной звезды расшифрована, картину изменяющихся моментов и длительности прохождений можно использовать для надежного подтверждения присутствия планеты в двойной системе. Ни одно другое астрономическое явление не демонстрирует подобной картины. Это уникальное свойство планеты двойной звезды — железное свидетельство ее существования.

Как это было в первый раз

Пока технические проблемы в начале 2013 г. не вывели «Кеплера» из игры, он неустанно следил за пятачком неба в поисках характерного ослабления сигнала, вызванного пересечением планетами дисков своих звезд. В ходе этих поисков «Кеплер» открыл также более 2 тыс. новых затменных двойных звезд. Было обнаружено и несколько экзотических систем, включая первую из известных затменную тройную звезду.

В 2011 г. один из нас (Лоренс Дойл) вместе с коллегой Робертом Слоусоном (Robert Slawson), работающим вместе с ним в Институте SETI в Маунтин-Вью, штат Калифорния, заметили дополнительное затмение в системе двойной звезды KIC 12644769. Две звезды затмевали друг друга с периодом в 41 день, но были и три других, необъяснимых, затмения. Первые два случились с интервалом в 230 дней, а следующее произошло спустя 221 день — на девять дней раньше, чем ожидалось. Это был как раз тот признак, что указывает на движение планеты вокруг двойной звезды.

Впрочем, это могла быть просто небольшая тусклая звезда, закрывающая часть звезды большего размера: «Кеплер» уже продемонстрировал нам, что такие затменные тройные системы — не что-то исключительно редкое. Слабое затемнение указывало, что объект, возможно, имеет небольшой радиус, но звездоподобные объекты, такие как коричневые карлики, тоже не очень велики, и нельзя было сказать с уверенностью, что замеченный объект — планета. Необходимо было измерить его массу.

В системе трех тел невидимый спутник двойной системы может выдать свое присутствие двумя основными путями. Представьте себе две звезды, затмевающие друг друга, и относительно большую планету, обращающуюся поодаль вокруг этой парочки. Звезды двойной системы движутся друг вокруг друга, но и центр масс этой пары движется вокруг центра масс системы всех трех тел. Поэтому звезды двойной системы оказываются то немного ближе к Земле, то немного дальше. Когда они расположены дальше, свет звезд идет к нам дольше и затмения наблюдаются немного позже. Когда звезды расположены ближе к нам, затмения наблюдаются раньше. Чем больше масса третьего тела, тем больше эта разница. Циклический эффект, связанный с временем путешествия света, позволяет сделать вывод о присутствии невидимого объекта и оценить его массу. И чем дальше отстоит третье тело от двойной системы, тем больше этот эффект, поскольку дополнительное расстояние, а значит, и задержка во времени, возрастает по правилу рычага. В случае нашей предполагаемой планеты на протяжении приблизительно 230 дней не было поддающихся измерению циклических изменений начала затмений, а это означало, что невидимое тело имеет небольшую массу. Но насколько небольшую?

Влиять на двойную систему третье тело может и непосредственно своей гравитацией. Этот так называемый динамический эффект чаще, чем эффект, связанный со временем путешествия света, используют для изучения объектов, близко расположенных друг к другу. Невидимый спутник слегка изменяет орбиты звезд в двойной системе, а это влияет на моменты начала затмений. Поскольку меньшая из двух звезд приближается к третьему телу ближе, чем большая, ее орбита будет возмущена сильнее. В отличие от эффекта времени путешествия света динамический эффект влияет на моменты затмений более сложным образом.

Один из наших коллег по научной группе, работавшей с телескопом «Кеплер», Дэниел Фабрицкий (Daniel S. Fabrycky) из Чикагского университета отметил, что объект звездной массы должен сильно влиять на времена затмений, тогда как планета проявит себя намного более слабым, но потенциально поддающимся измерению образом. Что касается нашей системы, в ней динамический эффект должен был проявиться гораздо сильнее эффекта разницы во времени прохождения света. Мы искали и в итоге нашли изменения во времени начала затмений, показавшие, что притяжение звезд (*к невидимому телу. — Примеч. пер.*) и близко не достигало величины, которую создал бы спутник звездной массы.

Мощный финальный аккорд в этом исследовании прозвучал, когда Джошуа Картер (Joshua A. Carter) из Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики построил сложную компьютерную модель системы. Она в точности совпала со всеми данными наблюдений для планеты с массой почти как у Сатурна. Прекрасное совпадение данных наблюдений и моделирования подтвердило существование планеты и дало исключительно точные значения радиусов, масс и орбитальных характеристик системы.

Наша планета *Kepler-16b* стала первой обнаруженной транзитной планетой, движущейся вокруг двойной звезды. Сочетание транзитных и динамических эффектов сделало это открытие неоспоримым. Поскольку с поверхности этой планеты каждая из двух звезд должна выглядеть как наше Солнце, *Kepler-16b* вскоре получила прозвище Татуин в честь вымышленной планеты из киноэпопеи «Звездные войны»: на ней тоже должны наблюдаться двойные восходы и закаты. Научная фантастика стала научным фактом.

Новый класс планет

На первый взгляд *Kepler-16b* кажется очень странной планетой. Ее орбита проходит пугающе близко от двойной звезды, всего на 9% дальше, чем минимальное критическое расстояние, необходимое для стабильности орбиты. А поскольку в то время это была единственная транзитная планета у двойной звезды, мы стали сомневаться: а вдруг *Kepler-16b* — всего лишь флуктуация?

К счастью, ответ пришел быстро. Работая с Джеромом Оросом (Jerome A. Orosz) из Калифорнийского университета в Сан-Диего, мы уже занимались поиском планет у двойных, которые не проходят на фоне своих звезд. Они должны встречаться намного чаще, поскольку не требуется, чтобы плоскости орбит планеты и двойной звезды совпадали, что необходимо для наблюдения прохождений. Как уже было сказано, небольшие изменения в моментах начала затмений облегчают поиск таких планет. Мы следовали по этому пути в течение нескольких месяцев и нашли несколько систем-кандидатов. Затем во вторник днем в августе 2012 г. один из нас (Уильям Уэлш) заметил прохождения в одной из двойных звездных систем. Уже через несколько часов Фабрицкий построил компьютерную модель, которая воспроизвела изменения моментов начала и продолжительности прохождений, подтвердив тем самым, что транзитный объект — это планета. Так мы открыли *Kepler-34b*. Лихорадочно продолжив поиски, буквально на следующий день Орос обнаружил прохождения у другой затменной двойной звезды, которая также дала приют планете — *Kepler-35b*.

В течение еще нескольких месяцев Орос продолжил работу и открыл *Kepler-38b*, показав, что вокруг двойных встречаются планеты и меньшего размера — типа Нептуна. А затем он открыл систему *Kepler-47*, содержащую как минимум две планеты, продемонстрировав тем самым, что двойные звезды могут дать приют нескольким планетам. Самая последняя из обнаруженных планет

с кратной орбитой, *Kepler-64b* (известная также как *PH1*), была одновременно и независимо открыта студентом Университета Джонса Хопкинса Веселином Костовым (Veselin Kostov) и астрономами-любителями из группы «Охотники за планетами» (*Planet Hunters*). Эта планета принадлежит четырехкратной звездной системе, что еще больше расширяет многообразие условий, в которых могут формироваться планеты.

Семь уже обнаруженных планет двойной звезды говорят нам, что эти объекты — не столь уж и редкое явление и что мы открыли новый класс планетных систем. Из геометрических соображений следует, что для каждой обнаруженной транзитной планетной системы существует примерно от пяти до десяти планет, которые мы не видим, поскольку ориентация их орбит не позволяет зафиксировать из нашей точки пространства их прохождение перед двойными звездами. Учитывая, что в результате поиска примерно у 1 тыс. затменных двойных звезд уже обнаружены семь планет, мы можем с уверенностью сказать, что в нашей галактике десятки миллионов планетных систем у двойных звезд.

Хотя мы не понимаем, почему эти планеты предпочитают столь рискованные орбиты, мы можем сделать важный вывод: формирование планет происходит активно и повсеместно

Все до сих пор обнаруженные «Кеплером» транзитные планеты двойных звезд — это газовые гиганты, не имеющие твердой коры, которая позволила бы космонавту стоять на их поверхности и восхищаться двойными закатами. Продолжается поиск твердотельных планет меньшего размера, хотя обнаружить у двойных звезд планеты размером с Землю будет невероятно трудно.

Но даже с таким небольшим набором планет число интересных вопросов продолжает расти. Например, половина из всех открытых «Кеплером» затменных двойных звезд имеют период обращения по орбите менее 2,7 суток, и поэтому мы ожидали, что половина двойных звезд, у которых есть планеты, будут также иметь периоды обращения менее 2,7 суток. Но ни у одной из них нет столь короткого периода обращения: самый короткий период — 7,4 суток. Почему? Мы высказали предположение, что, по всей видимости, это связано с процессом, некогда сблизившим эти звезды друг с другом.

Кроме того, планеты стремятся обращаться на очень близком расстоянии от своих звезд. Если бы они находились еще немного ближе, их орбиты стали бы нестабильными. Что же заставляет их жить в постоянной опасности? Понимание того, почему планеты двойных

звезд располагаются так близко к своему положению неустойчивости, поможет нам усовершенствовать теорию формирования планет и эволюции их орбит.

Хотя мы не знаем, почему эти планеты предпочитают столь рискованные орбиты, тем не менее мы поняли теперь одну важную вещь: тот факт, что планеты могут существовать даже на пороге области хаотического движения, говорит нам, что формирование планет происходит активно и повсеместно.

Динамичная зона жизни

Тенденция открытых «Кеплером» планет двойной звезды располагаться вблизи области неустойчивости имеет интересные следствия. У исследованных «Кеплером» звезд граница этой области, как правило, расположена вблизи зоны жизни — области вокруг звезды (в данном случае — вокруг двух звезд), где ее излучение поддерживает на поверхности планеты температуру, необходимую для существования жидкой воды. Ближе к звезде —

В отличие от Земли, которая имеет почти круговую орбиту вокруг Солнца, расстояние планеты двойной звезды до каждого из своих солнц очень сильно изменяется в течение ее года. Таким образом, времена года на планете, вероятно, сменяют друг друга за несколько недель, по мере того как звезды кружатся друг вокруг друга

и вода на планете закипит; дальше — и вода замерзнет. А жидкая вода — это необходимое условие для существования жизни, какой мы ее знаем.

Вокруг одиночной звезды зона жизни имеет сферическую форму. В двойной системе каждая звезда имеет собственную зону жизни, которые сливаются в деформированный сфероид, если звезды расположены близко друг к другу, как в случае обнаруженных «Кеплером» планет двойной звезды. По мере того как звезды обращаются друг вокруг друга, результирующая зона жизни также вращается вместе с ними. Поскольку звезды движутся быстрее, чем планеты, зоны жизни поворачиваются быстрее, чем планеты обращаются вокруг своих звезд.

В отличие от Земли, которая имеет почти круговую орбиту вокруг Солнца, расстояние планеты двойной звезды до каждого из своих солнц очень сильно изменяется в течение ее года. Таким образом, времена года

на планете, вероятно, сменяют друг друга за несколько недель, по мере того как звезды кружатся друг вокруг друга. Эти климатические изменения, судя по всему, велики и квазирегулярны: «Должно быть, это необузданная стихия», — замечает Орос.

Две из найденных транзитных планет двойной звезды расположены в зоне жизни своих солнц — удивительно большой процент. Правда, нахождение в зоне жизни — условие необходимое, но не достаточное для существования жизни. Например, Луна тоже находится в зоне жизни нашего Солнца, однако она совершенно необитаема, поскольку из-за небольшой массы ее гравитация слишком слаба, чтобы удержать атмосферу. И все же тот факт, что столь значительная доля планет двойной звезды расположена в своих зонах жизни, заставляет задуматься. Какова может быть жизнь и тем более цивилизация на этих планетах при столь резко и быстро сменяющихся временах года? ■

Перевод: А.П. Кузнецов



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. Laurance R. Doyle et al. in Science, Vol. 333, pages 1602–1606; September 16, 2011.
- Transiting Circumbinary Planets Kepler-34 b and Kepler-35 b. William F. Welsh et al. in Nature, Vol. 481, pages 475–479; January 26, 2012.
- Kepler-47: A Transiting Circumbinary Multiplanet System. Jerome A. Orosz et al. in Science, Vol. 337, pages 1511–1514; September 21, 2012.
- Миссия NASA «Кеплер»: <http://kepler.nasa.gov>
- Проект «Охотники за планетами»: www.planethunters.org
- Анимированные изображения Kepler-16 и других систем с двойными звездами см. по адресу: ScientificAmerican.com/nov2013/planets