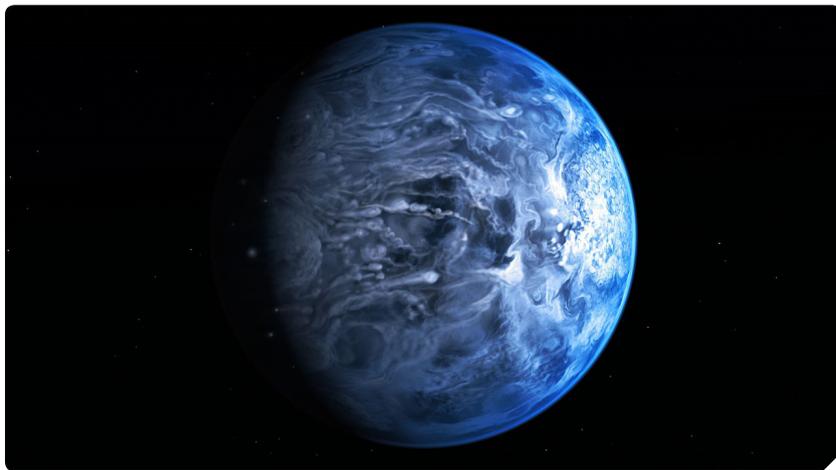


Экзопланеты,

или История одного открытия

Человечество далеко не сразу пришло к идее, что далёкие звёзды — это объекты, очень похожие на наше Солнце, что вокруг них могут существовать планетные системы, подобные нашей Солнечной системе. Впервые эту мысль высказал Гераклид Понтийский около 350 г. до н.э., но она не нашла никакой поддержки ни у его современников, ни у более поздних философов и учёных. И только в 1584 году Джордано Бруно написал: «Существуют... неисчислимые солнца, бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца». Окончательно идея о возможности существования планет за пределами Солнечной системы утвердилась намного позже — в 18–19 веках с развитием научной картины мира и пониманием, что ни Земля, ни Солнце не занимают какое-то особенное положение во Вселенной.

Изначально предполагалось, что планеты могут существовать только у звёзд или других тел звёздной массы, например, пульсаров. Сейчас есть свидетельства, что существуют и свободнолетающие планеты, не связанные гравитацией с какой-либо звездой. Поэтому термин «экзопланета» следует понимать как «любая планета, находящаяся вне Солнечной системы, внесолнечная планета».



 Экзопланета — любая планета, находящаяся вне Солнечной системы

Рис. 1. Экзопланета HD 189733 Ab в представлении художника. Экзопланета была открыта в 2005 году, по массе и размерам она немного превосходит Юпитер. Погода на HD 189733 Ab смертельна для человека

Методы поиска экзопланет очень похожи на исследования коричневых карликов. Коричневыми карликами обычно называются небесные тела с массой в диапазоне примерно 0,012–0,07 масс Солнца. Их масса достаточна велика, чтобы температура внутри них превысила 10^6 Кельвинов и началось термоядерное горение дейтерия и лития, но недостаточна для поддержания устойчивой реакции слияния ядер водорода. Поэтому мы познакомимся с ними в рамках этого урока, хотя формально коричневые карлики не являются планетами.

 Коричневые карлики

Экзопланетам и коричневым карликам, вращающимся вокруг родительской звезды, присваиваются названия, состоящие из названия этой звезды и строчной буквы латинского алфавита, за исключением буквы «a». Если в системе известно несколько экзопланет, то буквы соответствуют порядку, в котором они были открыты. Часто в качестве собственного имени звезды используется название исследовательского проекта, в котором была открыта экзопланета. Например, проект HATNet (Hungarian Automated Telescope Network) открыл экзопланету, которая получила обозначение HAT-P-3b, она вращается вокруг звезды HAT-P-3. Позднее этой экзопланете было дано собственное имя — «Теберда»¹ — в честь реки в Карачаево-Черкесии, протекающей недалеко от крупнейшего в России телескопа БТА.

Первые открытия экзопланет

Сообщения об открытии планет у других звёзд регулярно появлялись начиная с середины 19-го века. Однако все они были опровергнуты последующими наблюдениями. Научный подход к задаче поиска и исследования экзопланет был заложен российско-американским астрономом Отто Струве в 1952.

Он предложил два метода поиска, доступных уже в то время: 1) наблюдение доплеровского смещения линий в спектре звезды, возникающего вследствие движения звезды вокруг центра масс системы, содержащей массивную экзопланету (метод лучевых скоростей), и 2) наблюдение падения блеска звезды, вызванного прохождением большой экзопланеты между наблюдателем и звездой (метод транзитов, от англ. *transit* — прохождение).

Однако вплоть до конца 20-го века была известна только одна планетная система — Солнечная, и в ней все планеты-гиганты находятся далеко от родительской звезды. Если исходить из предположения, что все планетные системы похожи на нашу, то задача обнаружения экзопланет сильно усложняется: транзиты планеты, похожей на Юпитер, могут наблюдаться у очень малого количества экзопланетных систем и происходить раз в несколько лет, а изменение скорости родительской звезды вдоль луча зрения малы и происходят очень медленно. Первые экзопланеты могли быть открыты ещё в середине 20-го века, но никто не знал, у какой звезды их искать. Потому что никто не мог позволить себе использовать оборудование обсерваторий для длительного эксперимента с неясными перспективами достижения успеха.

Развитие методов астрономических наблюдений, прежде всего цифровых технологий получения и обработки изображений, позволило в 1980-х годах начать регулярный поиск экзопланет методом лучевых скоростей. Первые надёжные кандидаты в экзопланеты были найдены в 1988–1989 годах, но проверка и окончательное подтверждение этих открытий завершились уже в 21-м веке. Такая ситуация не редкость в науке, поэтому вопрос о приоритете



Отто Людвигович Струве
(1897–1963)

 Метод лучевых скоростей

 Метод транзитов

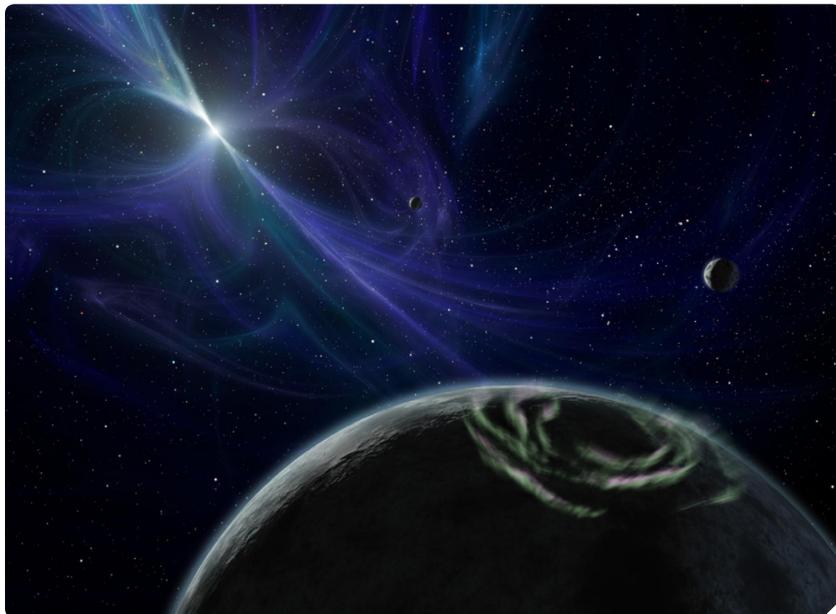
¹Имя Теберда было выбрано по результатам голосования, организованного Международным Астрономическим Союзом, в котором каждая страна получила возможность выбрать имя для одной экзопланеты.

открытия не всегда можно решить однозначно. Далее под понятием «открытие» мы подразумеваем неопровержимое подтверждение существования экзопланеты.

Первым официально признанным открытием считаются три экзопланеты, вращающиеся вокруг радиопульсара PSR 1257+12, случайно обнаруженные в 1992 году (Рис. 2). О наличии планет астрономы догадались по небольшим периодическим изменениям частоты пульсаций пульсара.

 Первые открытые экзопланеты

Рис. 2. Художественное представление о системе PSR 1257+12



В 1995 году методом лучевых скоростей была открыта первая экзопланета у обычной звезды — 51 Пегаса b. Вплоть до конца 20-го века метод лучевых скоростей был основным источником наших знаний об экзопланетах. Ситуация начала меняться после того, как были открыты системы, в которых большие планеты вращаются очень близко к родительской звезде, а значит, вероятность наблюдения транзита оказалась вовсе не так мала, как думали раньше. Впервые транзит наблюдался в 1999 году у экзопланеты HD 209458 b, открытой ранее методом лучевых скоростей. Это доказало, что метод транзитов может применяться для поиска экзопланет наряду с методом лучевых скоростей. В 2002 году транзитным методом была открыта первая экзопланета — OGLE-TR-56b.

Методы поиска и изучения экзопланет

На 23 июля 2020² года было обнаружено 4183 экзопланеты, входящие в состав 3107³ планетных систем (Рис. 3). Ещё 5405 экзопланет имеют статус кандидатов — их существование не подтверждено независимым методом.

²Актуальное число известных экзопланет можно уточнить на сайте <https://exoplanets.nasa.gov>.

³В большинстве систем мы обнаружили пока только одну экзопланету. Однако, например, в системах TRAPPIST-1 и KOI-351 известно семь и восемь экзопланет соответственно.

Видимое угловое расстояние между экзопланетой и её родительской звездой редко превышает 0,1–0,01 угловой секунды. При этом видимая яркость звезды в 10^5 – 10^7 раз больше, чем у экзопланеты. В итоге прямое наблюдение экзопланет становится чрезвычайно сложной задачей. В основном методы поиска и исследования экзопланет являются косвенными — по их влиянию на наблюдаемые свойства родительской звезды, такие как видимый блеск или лучевую скорость.

Различные методы поиска экзопланет имеют свои преимущества и недостатки. Наиболее эффективные методы поиска — транзитный и лучевых скоростей — принесли 76% и 19% новых экзопланет соответственно (Рис. 3). Но важность других методов заключается не столько в открытии новых экзопланет, сколько в исследовании уже известных.

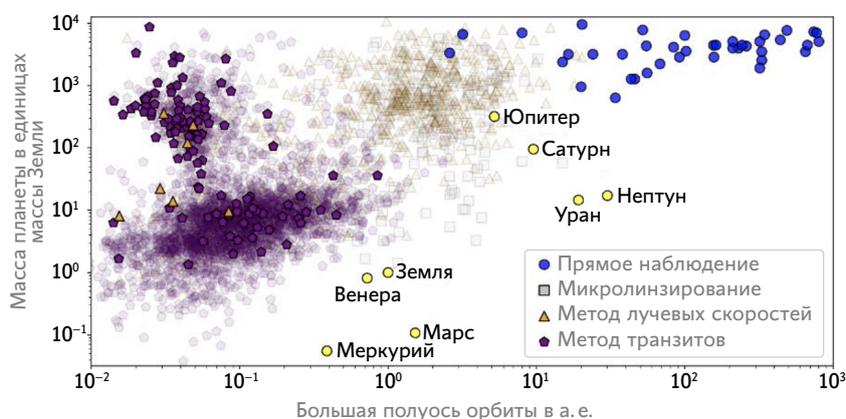


Рис. 3. Параметры (масса и большая полуось орбиты) известных на июль 2020 года экзопланет. Символами отмечены методы открытия экзопланет

Транзитный метод

Идея транзитного метода поиска экзопланет чрезвычайно проста: при прохождении планеты между родительской звездой и наблюдателем (транзите) видимый блеск звезды будет уменьшаться (Рис. 4). Относительная величина падения блеска, или глубина транзита, определяется квадратом отношения размеров экзопланеты и родительской звезды:

$$dF = \frac{R_n^2}{R_3^2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_n и R_3 обозначают радиусы планеты и звезды. Частота наблюдений транзитов равна частоте обращения планеты вокруг родительской звезды: чем меньше период обращения планеты, тем чаще мы сможем видеть транзиты. Транзит наблюдается, только если плоскость орбиты экзопланеты близка к лучу зрения (Рис. 3), угол между ними не должен превышать величины $\alpha \leq \arcsin(R_3/a)$, где a — радиус орбиты⁴. Вероятность, что система будет ориентирована

⁴ Данное соотношение верно, если планета обращается по круговой орбите и её размер много меньше размера звезды.

под таким углом к лучу зрения⁵ $P = \frac{R_3}{a} \cdot 100\%$ (геометрическая вероятность⁶). Продолжительность транзита определяется угловой скоростью движения экзопланеты по орбите и наклоном плоскости орбиты к лучу зрения. Если планета только слегка касается диска звезды, то транзит будет коротким.

В таблице 1 приведены параметры транзитов планет Солнечной системы для гипотетического инопланетного наблюдателя. Там же приведены параметры для экзопланеты HD 209458 b.

Таблица 1. Параметры транзитов планет Солнечной системы и экзопланеты HD 209458 b

| Планета | Период обращения (лет) | Максимальная продолжительность транзита (часов) | Падение блеска во время транзита (%) | Геометрическая вероятность (%) |
|-------------|------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Меркурий | 0,241 | 8,1 | 0,0012 | 1,19 |
| Венера | 0,615 | 11,0 | 0,0076 | 0,65 |
| Земля | 1,000 | 13,0 | 0,0084 | 0,47 |
| Марс | 1,880 | 16,0 | 0,0024 | 0,31 |
| Юпитер | 11,86 | 29,6 | 1,01 | 0,089 |
| Сатурн | 29,5 | 40,1 | 0,75 | 0,049 |
| Уран | 84,0 | 57,0 | 0,135 | 0,024 |
| Нептун | 164,8 | 71,3 | 0,127 | 0,015 |
| HD 209458 b | 0,0096 | 3,1 | 1,5 | 11,7 |

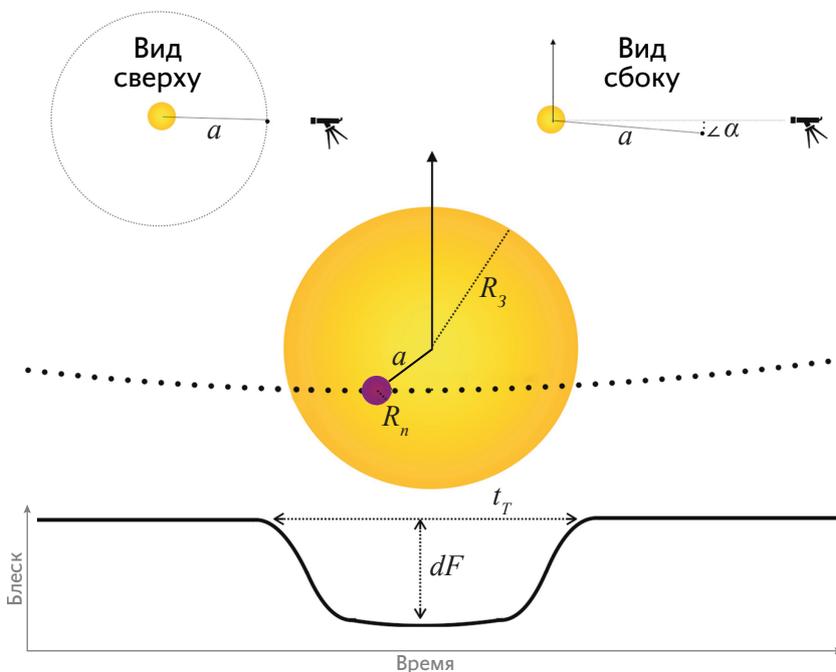


Рис. 4. Транзитный метод поиска экзопланет: если наблюдатель расположен вблизи плоскости орбиты планеты, то он может видеть периодическое уменьшение блеска звезды, вызванное затмением во время прохождения планеты между наблюдателем и звездой

⁵ Наблюдение транзита возможно, если наблюдатель находится на линии, наклонённой к плоскости орбиты экзопланеты на угол $< R_3/a$ (радиан). Этот угол образует на сфере «кольцо» с полной площадью $4\pi R_3/a$ (стерадиан). Геометрическая вероятность наблюдения будет равна отношению площади кольца к площади сферы $= R_3/a \times 100\%$.

⁶ Если предположить, что орбиты планет случайным образом ориентированы относительно наблюдателя, эту величину можно интерпретировать как долю звёздных систем, из которых можно наблюдать транзиты. Так, транзиты Земли будут видны из менее чем 0,5% звёздных систем нашей Галактики.

Как видим, наблюдаемые параметры транзита — глубина, продолжительность, частота и форма — зависят от свойств экзопланетной системы. Если у нас есть достоверные оценки массы и размеров родительской звезды, полученные, например, из спектральных наблюдений и наших представлений о строении и эволюции звёзд, то мы можем определить некоторые параметры экзопланеты: её размер, радиус и наклон орбиты, оценить массу, освещённость и температуру поверхности.

Атмосферы планет по-разному пропускают излучение разных длин волн. Например, наличие паров воды приводит к тому, что атмосфера становится менее прозрачной при наблюдениях вблизи длин волн 1,4; 2,0 и 2,9 мкм, что приводит к увеличению глубины транзита на этих длинах волн (Рис. 5). Этот метод исследования атмосфер экзопланет называется трансмиссионной (англ. *transmission* — пропускание) спектроскопией.

✎ Наблюдаемые параметры транзита

✎ Трансмиссионная спектроскопия

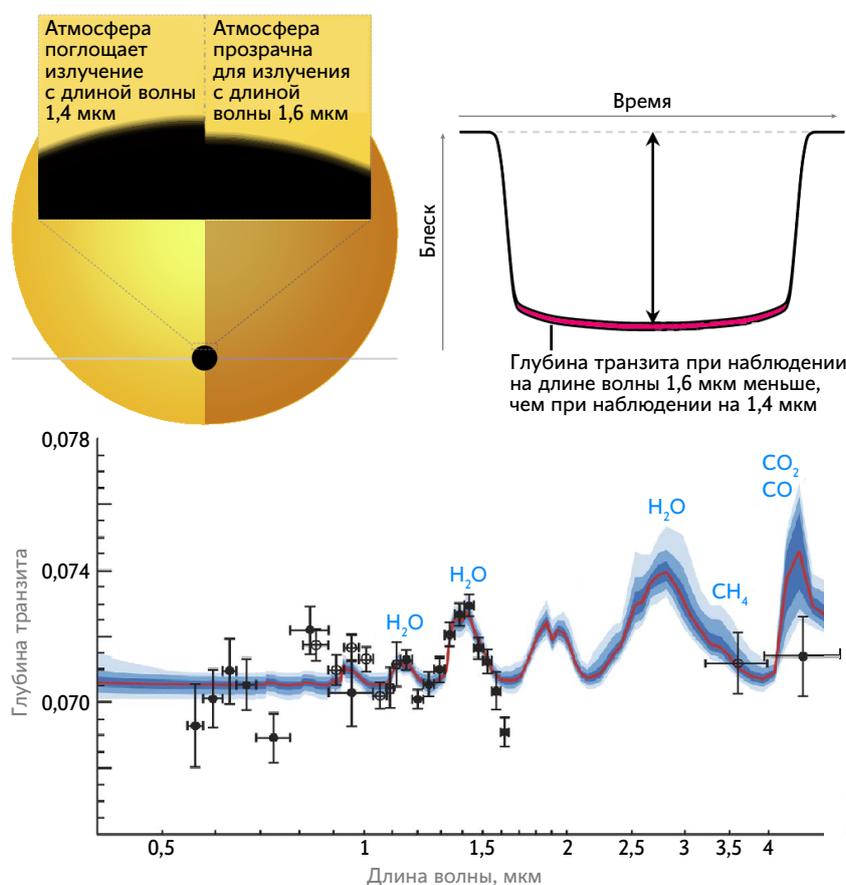


Рис. 5. Верхний рисунок: изменение глубины транзита при наблюдении на разных длинах волн. Нижний рисунок: наблюдения транзитов экзопланеты HAT-P-26b, выполненные на космическом телескопе Хаббл, указывают на наличие паров воды в её атмосфере

Важным преимуществом транзитного метода поиска экзопланет является его доступность. Для наблюдения транзитов глубиной около 1%, вызываемых планетами-гигантами, достаточно небольшого телескопа и цифровой камеры. При этом на каждом кадре будет находиться несколько сотен или тысяч звёзд, у которых можно искать изменения блеска характерной формы. Развитие и удешевление цифровых технологий, методов обработки и анализа данных привело к тому, что к 2003 году в мире насчитывалось 23 проекта по поиску экзопланет транзитным методом. В основном это были роботизированные телескопы с зеркалом диаметром несколько сантиметров.

С поверхности Земли можно эффективно искать только большие экзопланеты. Чтобы преодолеть это ограничение, в 2006 году была запущена первая космическая обсерватория для поиска экзопланет — CoRoT, а затем ещё несколько космических телескопов: Kepler (2009), TESS (2018), Cheops (2019). Наблюдения из космоса позволили обнаруживать транзитным методом планеты, похожие на Землю, например, Kepler-62f. Сейчас космические обсерватории стали наиболее эффективным инструментом для поиска новых экзопланет. Так, космическая обсерватория Kepler позволила обнаружить более половины всех известных экзопланет.

Геометрическая вероятность обнаружения экзопланеты резко снижается с увеличением радиуса её орбиты. К тому же, чтобы обнаружить планету с большим периодом обращения, требуется больше времени, так как транзиты происходят очень редко. Это приводит к тому, что транзитным методом чаще открываются экзопланеты, расположенные близко к родительской звезде. При анализе данных о распространённости и свойствах экзопланетных систем следует аккуратно учитывать это проявление наблюдательной селекции. Иначе может сложиться впечатление, что большинство экзопланет вращается очень близко к своим центральным звёздам.

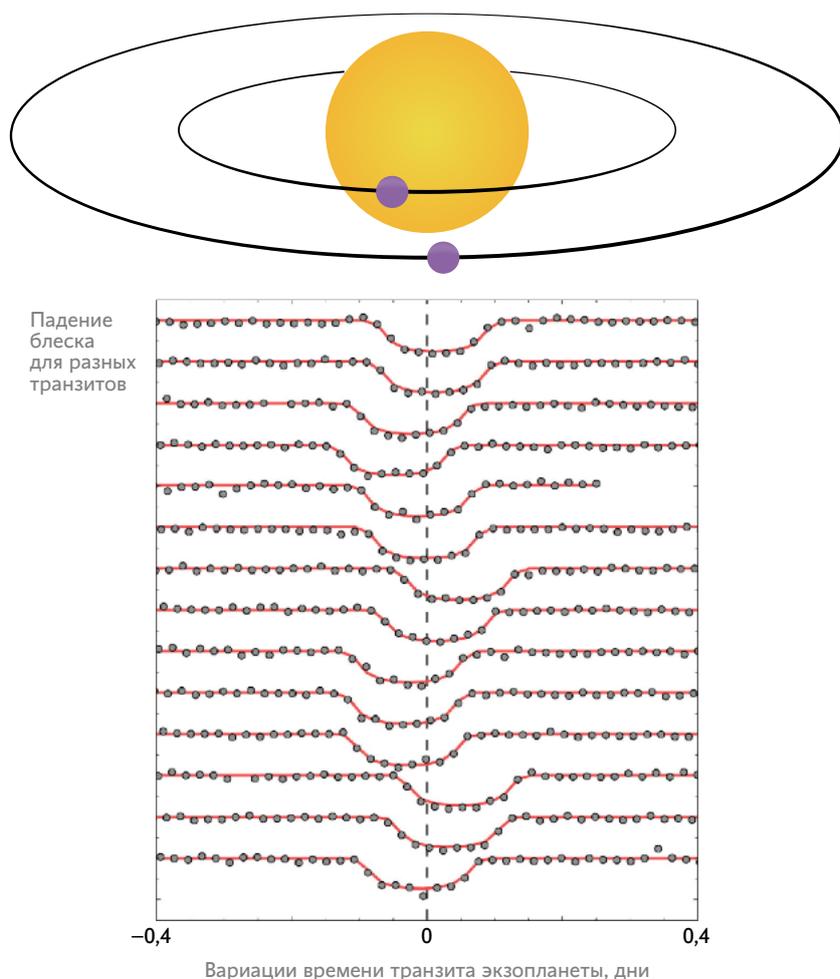


Рис. 6. Экзопланетная система, в которой наблюдаются транзиты внутренней планеты, а внешняя не является транзитной (вверху). Смещение времени транзита внутренней планеты Kepler-46b, указывающее на наличие в системе ещё одной планеты, не показывающей транзиты (внизу)

Рассматривая транзитный метод обнаружения экзопланет, мы видели, что чем дальше экзопланета от своей родительской звезды, тем меньше вероятность наблюдения её транзитов. Таким образом, в некоторых системах транзитным методом были открыты только

внутренние планеты. Но на их движение влияет гравитация внешних, не транзитных планет. Это влияние приводит к смещению моментов начала и конца транзита (см. Рис. 6). Анализируя величину и периодичность изменений времени транзита, можно сделать вывод о массе и параметрах орбит не транзитных планет в системе. К сожалению, этот метод не очень информативен и весьма требователен к точности наблюдений.

Метод лучевых скоростей

Все тела в планетной системе, в том числе и центральная звезда, вращаются вокруг общего центра масс — барицентра системы. Положение барицентра не совпадает с центром звезды — например, центр Солнца движется в окрестности барицентра Солнечной системы по сложной траектории и может удаляться от него на 1,5 млн км. (Рис. 7). Траектория движения звезды определяется массами планет и радиусами их орбит. Следовательно, измеряя положение звезды или её скорость в разные моменты времени, можно определить параметры планет в системе.

 Барицентр системы

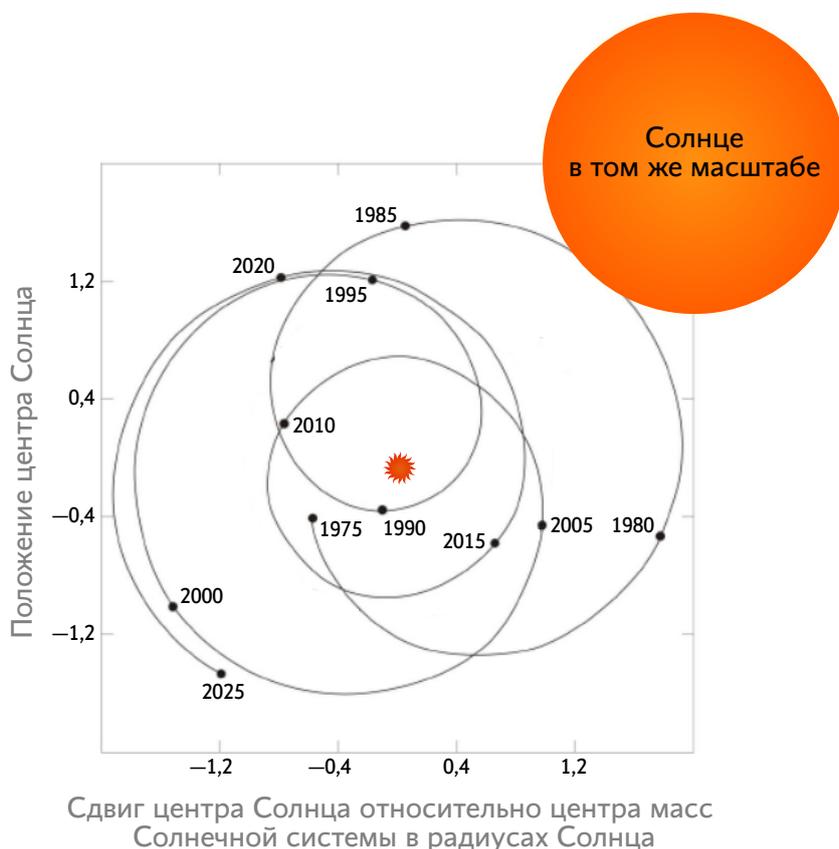


Рис. 7. Движение центра Солнца относительно центра масс Солнечной системы

Проще всего измерять лучевую скорость — скорость движения объекта вдоль луча зрения. Благодаря эффекту Доплера спектральные линии в спектре звезды будут смещаться в красную сторону, когда звезда удаляется от наблюдателя, и в синюю, когда звезда приближается к наблюдателю. Слабое излучение далёкой экзопланеты при этом не наблюдается, важно только излучение центральной звезды системы (Рис. 8). Важным преимуществом метода лучевых скоростей является возможность искать и изучать экзопланеты

 Лучевая скорость

на больших расстояниях от родительской звезды или со значительным наклоном плоскости орбиты к лучу зрения, для которых не наблюдаются транзиты.

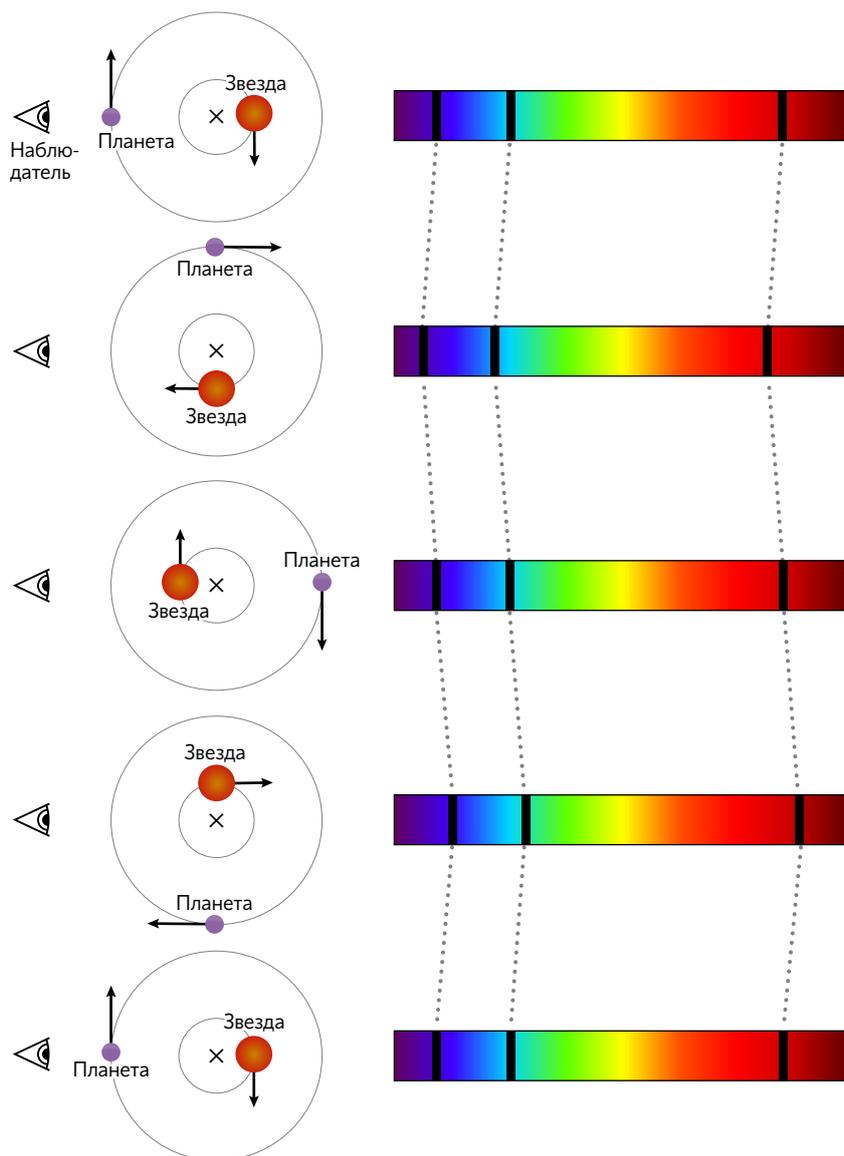


Рис. 8. Метод лучевых скоростей: планета и звезда движутся вокруг общего центра масс, для наблюдателя звезда то удаляется, то приближается, и её спектр испытывает доплеровское смещение то в красную сторону, то в синюю. Излучение экзопланеты при этом настолько слабое, что не оказывает влияния на наблюдаемый спектр

Амплитуда изменения лучевой скорости звезды вычисляется из зако-

нов Кеплера: $V_3 = M_{II} \sqrt{\frac{G}{a M_3}}$, где индекс 3 соответствует массе

и скорости звезды, II — параметрам планеты, a — большая полуось орбиты планеты, G — гравитационная постоянная. В Таблице 2 приведены амплитуды и периоды изменения лучевых скоростей планет Солнечной системы для гипотетического инопланетного наблюдателя, а также эти параметры для экзопланеты 51 Пегаса b — первой из открытых методом лучевых скоростей. Из приведённой выше формулы следует, что метод более эффективен для поиска массивных экзопланет с короткими периодами обращения.

Вывод амплитуды изменения лучевой скорости звезды

Рассмотрим случай орбиты с нулевым эксцентриситетом.

Запишем третий закон Кеплера в виде:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM_3}{4\pi^2}, \quad (1)$$

где a – большая полуось орбиты планеты, P – период обращения планеты по орбите, M – масса звезды. Массой планеты мы пренебрегаем, так как она мала по сравнению с массой звезды.

Период обращения планеты связан с величиной большой полуоси и орбитальной скоростью как:

$$P = \frac{2\pi a}{V_{\Pi}}. \quad (2)$$

Откуда следует, что:

$$a = \frac{V_{\Pi} P}{2\pi}. \quad (3)$$

Подставим уравнение (3) в уравнение третьего закона Кеплера (1):

$$V_{\Pi}^3 P = 2\pi GM_3. \quad (4)$$

Учитывая уравнение (2), получаем, что скорость движения планеты по орбите будет равна:

$$V_{\Pi}^2 = \frac{GM_3}{a}. \quad (5)$$

Уравнение (5) соответствует уравнению для первой космической скорости. Скорости движения звезды и планеты по их орбитам вокруг общего центра масс системы обратно пропорциональны их массам. Используя это, определяем скорость движения звезды:

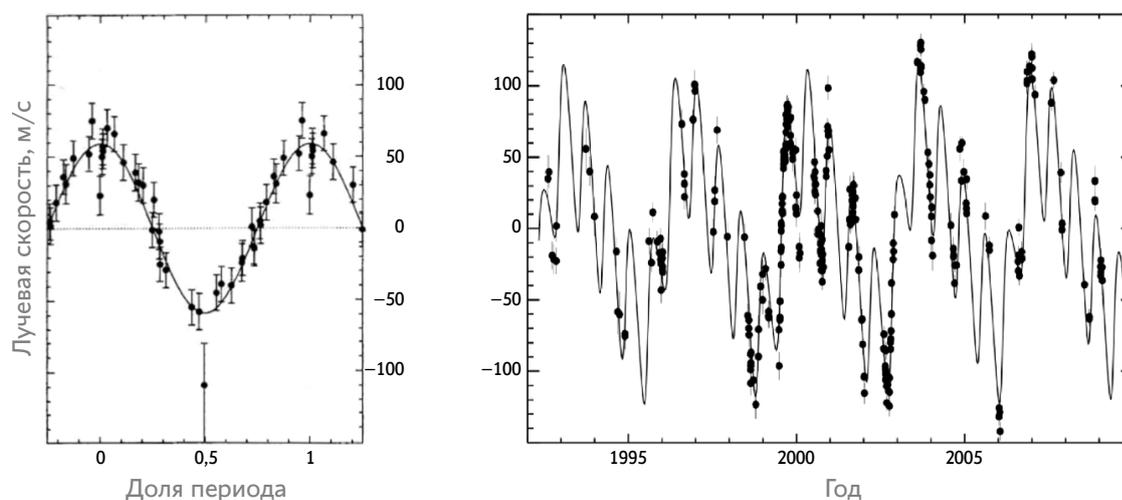
$$V_3 = \frac{M_{\Pi}}{M_3} V_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_3} \sqrt{\frac{GM_3}{a}} = M_{\Pi} \sqrt{\frac{G}{aM_3}}, \quad (6)$$

которая равна амплитуде изменения лучевой скорости без учёта наклона плоскости орбиты к лучу зрения.

| Планета | Масса планеты в массах Земли | Большая полуось орбиты (а. е.) | Период изменения лучевой скорости (лет) | Амплитуда изменения лучевой скорости (м/с) |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Меркурий | 0,06 | 0,4 | 0,241 | 0,08 |
| Венера | 0,82 | 0,7 | 0,615 | 0,09 |
| Земля | 1,000 | 1,0 | 1,000 | 0,09 |
| Марс | 0,11 | 1,5 | 1,880 | 0,008 |
| Юпитер | 318 | 5,2 | 11,86 | 12,46 |
| Сатурн | 95 | 9,5 | 29,5 | 2,75 |
| Уран | 14 | 19,2 | 84,0 | 0,29 |
| Нептун | 17 | 30,1 | 164,8 | 0,28 |
| HD 209458 б | 150 | 0,05 | 0,01158 | 57,0 |

Таблица 2. Амплитуды изменения лучевой скорости Солнца (с точки зрения удалённого наблюдателя), вызванные различными планетами Солнечной системы. В последней строчке приведена амплитуда лучевой скорости звезды HD 209458, вызванная обращающейся вокруг неё планетой HD 209458 б

В системе с одной экзопланетой на круговой орбите лучевая скорость звезды будет изменяться в зависимости от времени как синусоида (Рис. 9). Для систем с несколькими экзопланетами наблюдаемая лучевая скорость звезды будет выглядеть как сумма синусоид (Рис. 9).



Метод лучевых скоростей позволяет определять массы и параметры орбит экзопланет более точно, чем метод транзитов. Но наиболее полные и точные исследования получаются для систем, к которым применимы оба метода. Это возможно не для всех звёзд с наблюдаемыми транзитами экзопланет, а только для достаточно ярких, чтобы они были доступны для исследования спектральными методами. Это ограничение привело к тому, что многие кандидаты в экзопланеты, прежде всего от космической обсерватории Kepler, до сих пор остаются не подтверждёнными⁷ другими методами.

Рис. 9. Слева: оригинальный рисунок из работы Мишеля Майора и Дидье Кело 1995 года, показывающий изменение лучевой скорости звезды 51 Пегаса на протяжении одного периода, равного 4,23 суток. Справа: изменение лучевой скорости звезды ипсилон Андромеды на протяжении 18 лет. На рисунке хорошо выделяются колебания лучевой скорости с периодами 0,66 и 3,49 года, соответствующие второй и третьей планете в системе

⁷Кандидат в планеты считается подтверждённым, если он наблюдался двумя разными методами. Хотя это применимо не для всех планет: например, планеты, открытые методом гравитационного линзирования, не могут быть подтверждены другим методом.

Лучшие современные спектрографы (Рис. 10) позволяют измерять лучевые скорости с точностью около 10 см/с. Есть надежда, что в ближайшем будущем для метода лучевых скоростей будут доступны исследования планет, похожих на Землю и вращающихся вокруг солнцеподобных звёзд с периодами около года, — то есть для двойников Земли.

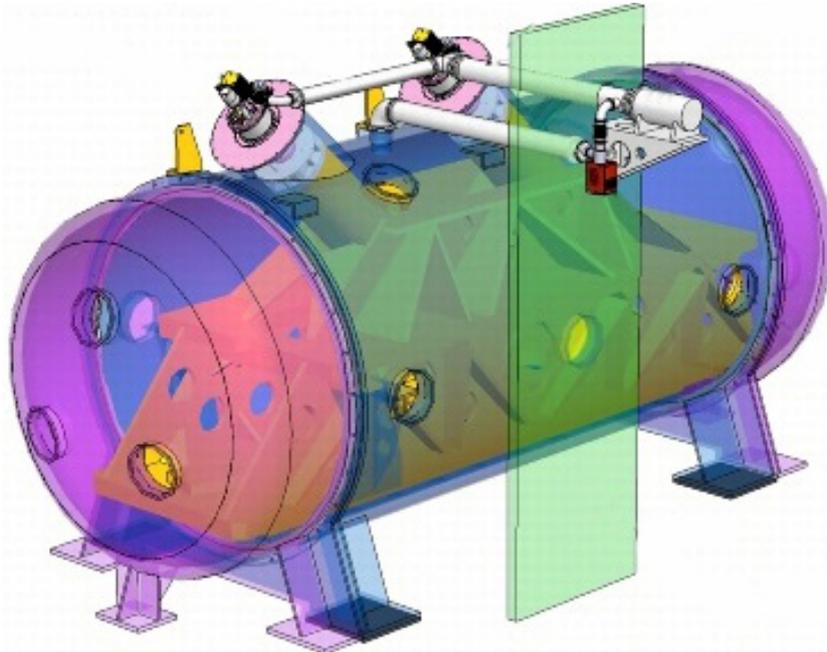
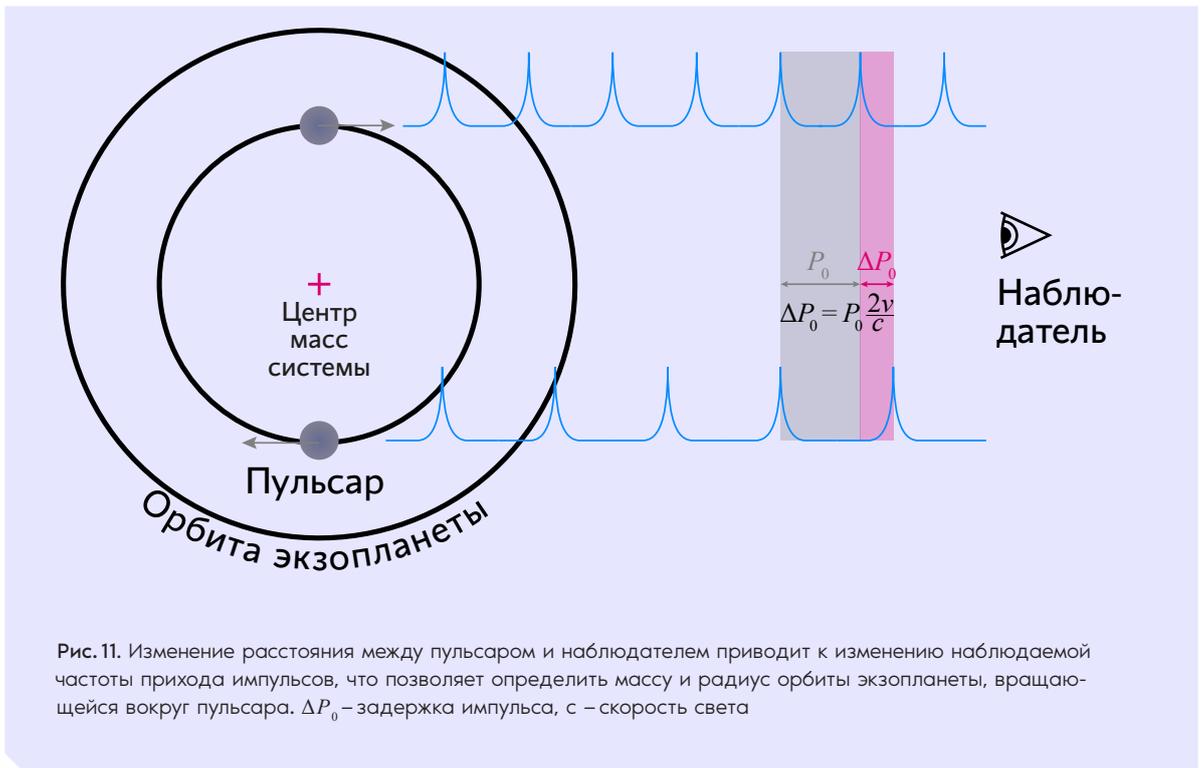


Рис. 10. Спектрограф ESPRESSO (англ. – Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations), работающий в Южной Европейской Обсерватории, позволяет измерять лучевые скорости далёких звёзд с точностью 10 см/с, что в десять раз меньше скорости идущего пешком человека. Чтобы добиться высокой стабильности измерений, спектрограф смонтирован внутри вакуумированной трубы диаметром 2 метра и установлен неподвижно, а свет звёзд от телескопа до прибора передаётся по оптическому волокну

Задержка сигнала пульсаров

Радиопульсары – это быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильным магнитным полем, излучающие короткие импульсы в радиодиапазоне. Частота импульсов достигает нескольких сотен в секунду и остаётся очень стабильной на протяжении многих лет. Если вокруг пульсара вращается массивное тело, например, экзопланта, то пульсар движется вокруг общего центра масс системы, расстояние между пульсаром и наблюдателем периодически изменяется. Изменение расстояния приводит к тому, что импульсы приходят к наблюдателю то чуть раньше, то с задержкой. Измерив величину задержки, можно определить положение центра масс системы относительно пульсара и вычислить массу и параметры орбит экзопланет в системе. Таким образом в 1992 году были открыты первые экзопланеты вокруг пульсара PSR 1257+12.

Изменение времени прихода импульсов можно рассматривать как изменение частоты пульсара. При таком подходе метод эквивалентен методу лучевых скоростей, когда длина волны излучения смещается благодаря эффекту Доплера вследствие движения излучающего тела вдоль луча зрения (Рис. 11).



Другие методы поиска и исследования экзопланет

В настоящее время все остальные способы поиска экзопланет сильно уступают по эффективности транзитному методу и методу лучевых скоростей. В сумме все другие методы позволили открыть только около 5% экзопланет, поэтому их рассмотрение вынесено в дополнительные материалы к этому уроку. Однако ситуация быстро меняется с развитием технологий астрономических наблюдений. Увеличение угловой разрешающей способности позволит более эффективно получать прямые изображения экзопланет, повышение точности измерения блеска и наблюдения в инфракрасном диапазоне из космоса — наблюдать изменение фаз и затмения экзопланет родительскими звёздами. В то же время часть методов достигли своего насыщения и вряд ли будут существенно развиваться в будущем, — например, поиск экзопланет вокруг пульсаров по изменению частоты их пульсаций.

Наибольший прогресс в исследовании экзопланет в ближайшем будущем связывают с вводом в строй гигантских наземных телескопов диаметром 30 и более метров (ELT, GMT, TMT) и космических обсерваторий (JWST, PLATO, ARIEL, RST), которые позволят изучать условия на поверхности и в атмосферах экзопланет, искать следы жизни и т. д.

Метод гравитационного линзирования

Метод гравитационного микролинзирования позволяет искать экзопланеты умеренных масс, вплоть до планет с массой Марса, и расположенные на большом удалении от родительской звезды. Для этого в течение длительного времени проводятся наблюдения области неба с большим количеством звёзд, например, Магеллановых Облаков – ближайших к нам карликовых галактик. Если между наблюдателем и далёкой звездой проходит массивное тело, то оно искривляет прямолинейный ход световых лучей – возникает гравитационная линза. Для наблюдателя этот эффект проявляется как кратковременное увеличение блеска далёкой звезды в несколько раз. Увеличение яркости зависит от массы тела, создающего гравитационную линзу, что позволяет определять эту массу. Если линза создаётся не одиночной звездой, а планетной системой, то наблюдается несколько последовательных пиков увеличения блеска, и продолжительность промежутка между ними позволяет оценить расстояние между родительской звездой и экзопланетой (Рис. 12). Недостатком метода является однократность события: провести повторные наблюдения экзопланетной системы методом гравитационного линзирования никогда не удаётся в силу чрезвычайной редкости явления.

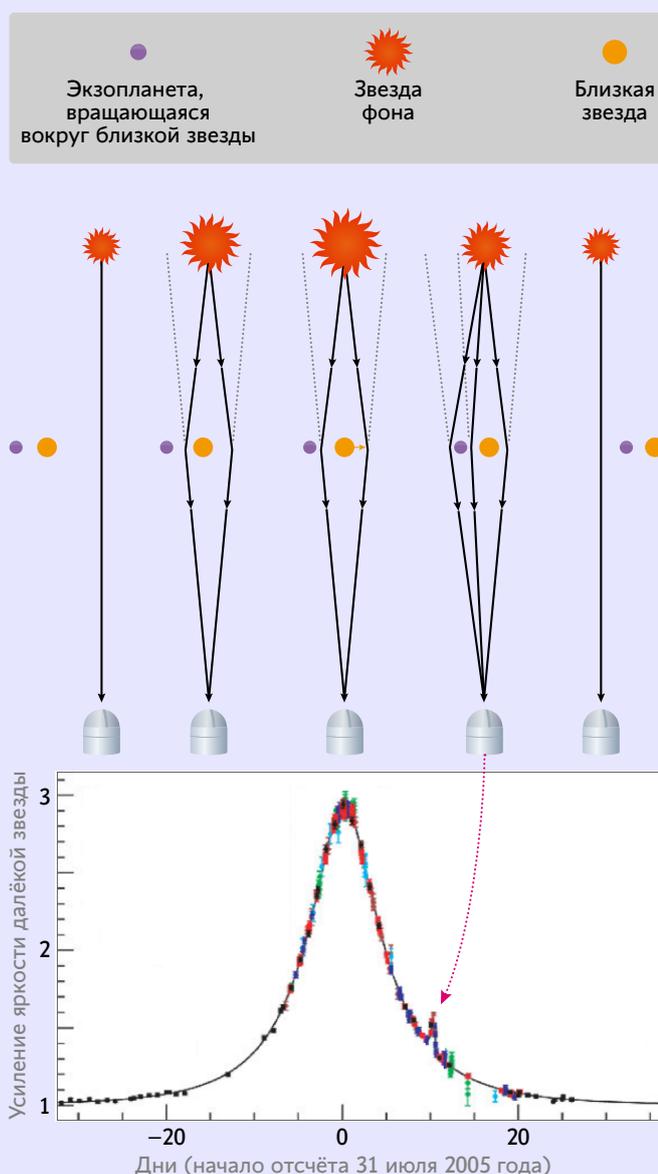


Рис. 12. Схема возникновения гравитационной линзы (вверху). Событие гравитационного линзирования OGLE-2005-BLG-390L, вызванное звездой с массой около 0,2 масс Солнца и экзопланетой с массой около 5,5 масс Земли (внизу)

Метод прямых изображений

Получить изображение планет, вращающихся вокруг далёкой звезды, очень сложно: угловое расстояние между звездой и планетами крайне мало, а яркость звезды намного больше, чем яркость планет. В итоге изображения планет просто тонут в ярком ореоле вокруг звезды. Тем не менее эта задача решена для некоторых экзопланетных систем уже сейчас (Рис. 13), и методы получения прямых изображений экзопланет активно развиваются.

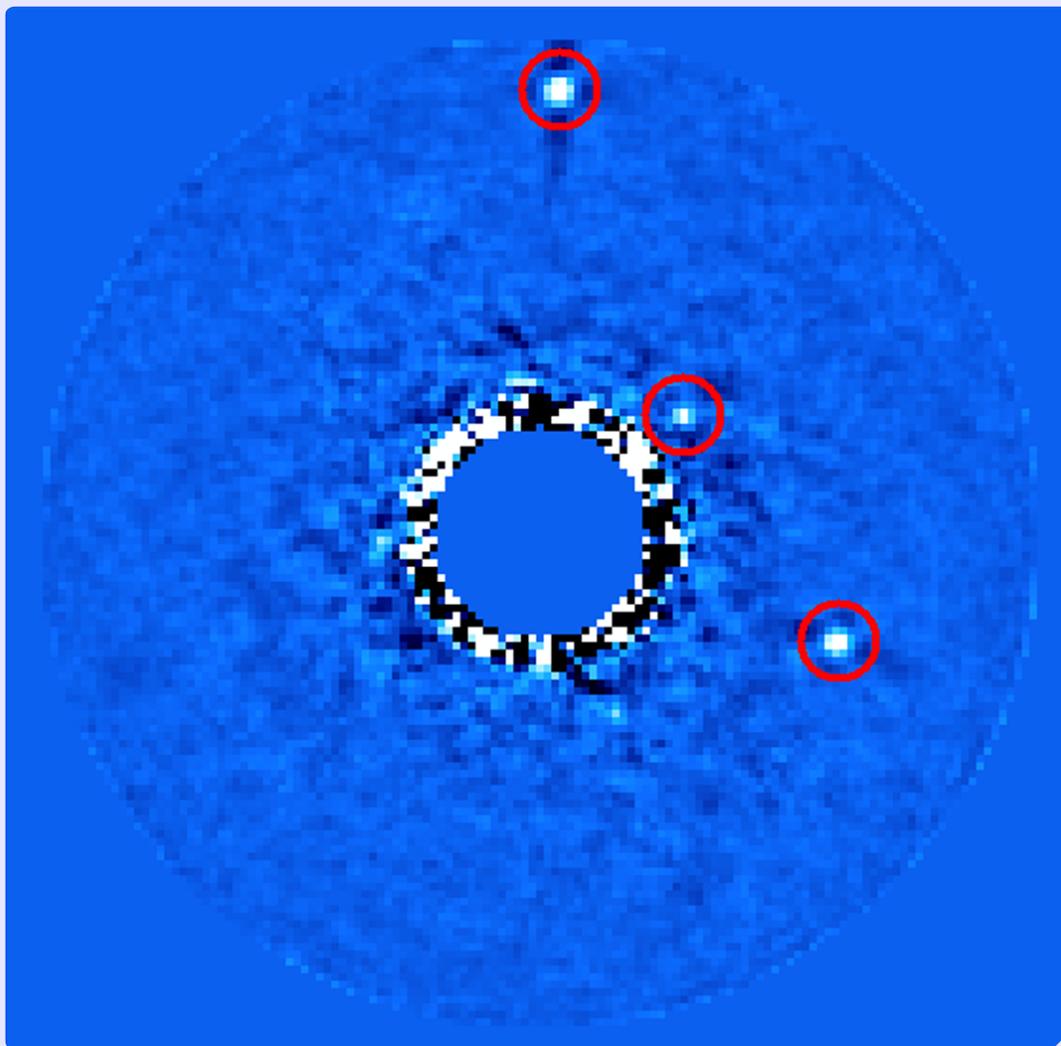


Рис. 13. Три экзопланеты около звезды HR 8799. Изображение получено на коронографе CHARIS (англ. – Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph), установленном на 8,2-метровом телескопе Subaru

Наблюдения лучше проводить в инфракрасном диапазоне, где видимый блеск горячей звезды становится меньше, а молодые экзопланеты видны по-прежнему. Блеск звезды можно сильно ослабить, используя небольшой непрозрачный экран (Рис. 14), закрывающий изображение звезды так же, как Луна закрывает Солнце во время солнечных затмений. Впервые этот метод был применён Бернаром Лео в 1931 для наблюдений солнечной короны вне затмений, поэтому такие приборы называются коронографы.

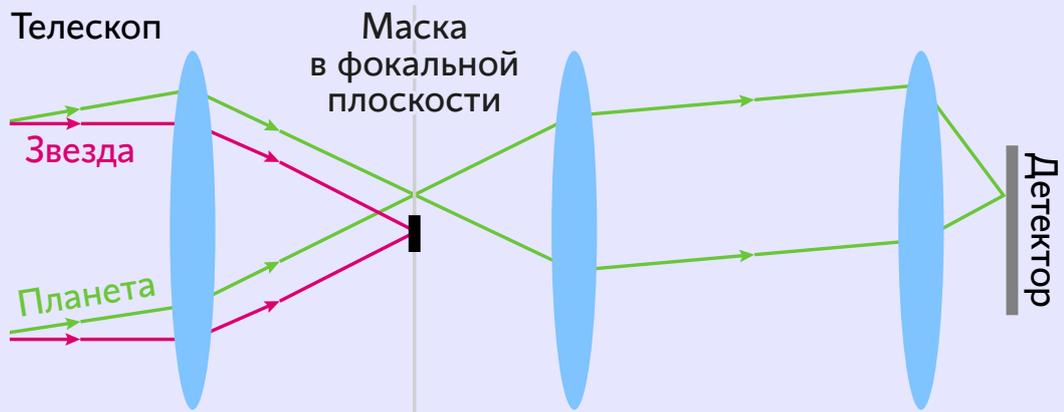


Рис. 14. Схема коронографа

Звёздные коронографы позволяют получать прямые изображения экзопланет, достаточно удалённых от родительских звёзд, и измерять их положения. Длительные ряды наблюдений дают возможность вычислить параметры орбит экзопланет, а косвенно можно оценить их размеры, массы и свойства их атмосфер.

Коронографы становятся стандартным оборудованием для многих планируемых космических миссий, направленных на исследования экзопланет. Проектируется новое поколение космических коронографов, в которых затмевающий звезду экран расположен между телескопом и изучаемой экзопланетной системой (Рис. 15), что позволит существенно увеличить контраст изображения и повысить точность измерений.

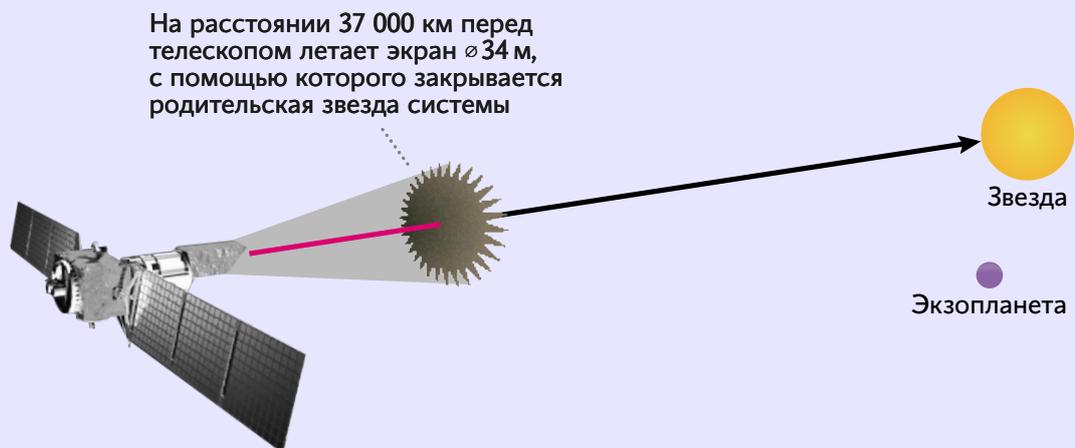


Рис. 15. Концепция космического коронографа для прямых наблюдений экзопланет

Изменения фаз экзопланеты

При движении планеты вокруг родительской звезды, так же, как у Венеры и Меркурия в нашей Солнечной системе, наблюдается смена фаз (Рис. 16). При этом экзопланета не обязательно должна быть транзитной. И хотя яркость отражённого экзопланетой света мала, она все же вносит небольшой вклад в суммарный наблюдаемый блеск системы. Проводя высокоточные измерения, можно выделить слабую переменную составляющую, соответствующую изменению видимого блеска экзопланеты при изменении фаз.

Амплитуда изменения блеска определяется размерами экзопланеты и её способностью отражать свет — чем больше коэффициент отражения, тем выше амплитуда изменения блеска, вызванная сменой фаз. Таким образом можно оценить свойства экзопланеты. Например, планеты с облаками из водяного пара имеют более высокий коэффициент отражения, а изменение коэффициента отражения указывает на изменения облачного покрова экзопланет, несимметричная форма кривой блеска и её переменчивость интерпретируются как наличие ветров в атмосферах экзопланет, а наблюдения в нескольких цветах позволяют сделать предположения о составе атмосфер.

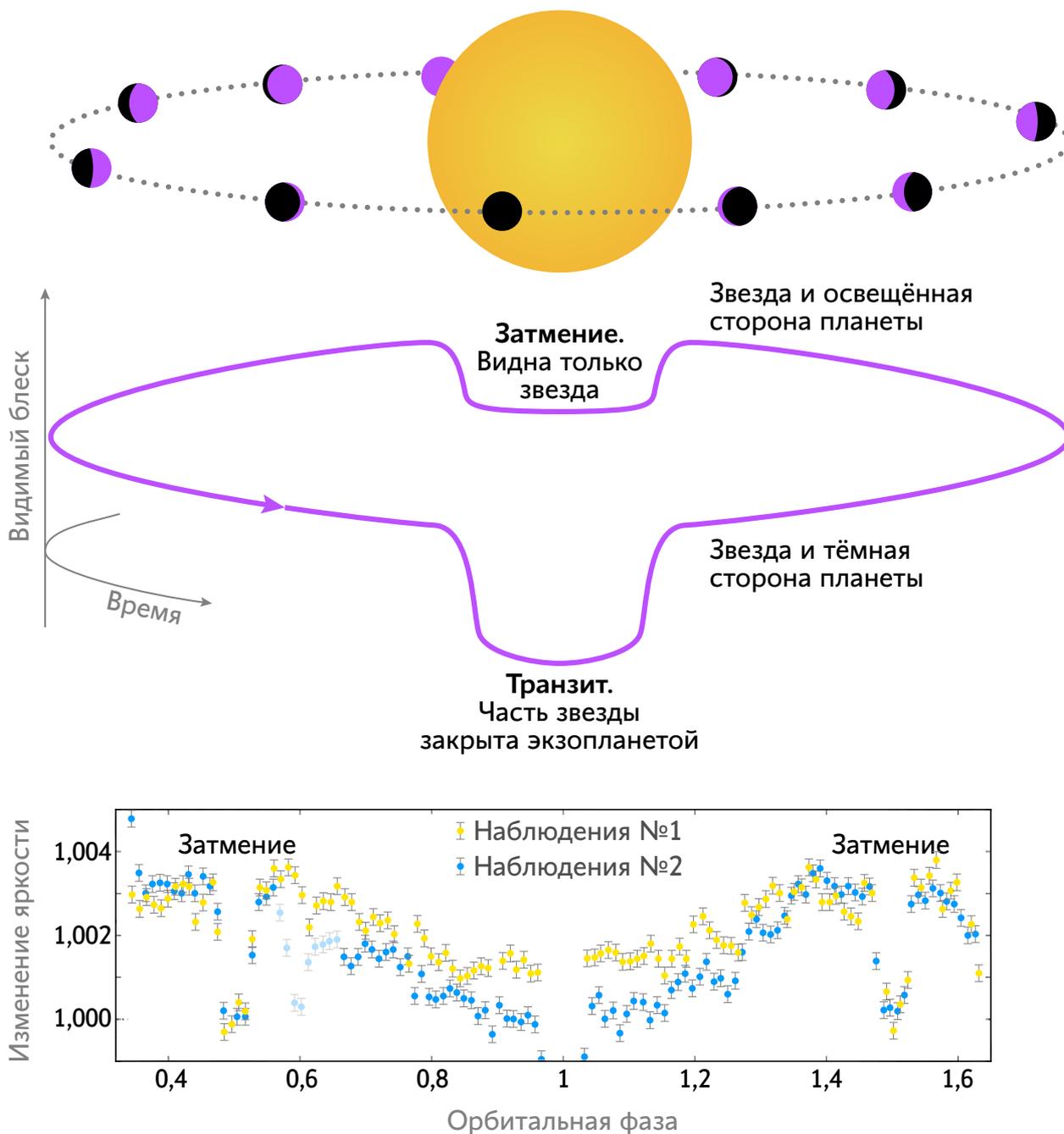


Рис. 16. Наблюдения экзопланеты WASP-43b указывают на изменения состояния её атмосферы. Яркость тёмной стороны экзопланеты в инфракрасном диапазоне различна для двух разных наблюдений, что говорит об изменении условий, например, о движении облаков. Результат получен на космической обсерватории Spitzer

Возникновение планетных систем

На прошлых уроках вы познакомились с современными представлениями об образовании Солнца и звёзд из газопылевого облака — небулярной гипотезой (от англ. *nebula* — туманность). В рамках небулярной гипотезы формирование планетных систем происходит на заключительных этапах коллапса протозвёздного облака. В системе координат, связанной с вращающимся газопылевым облаком, на каждую частицу будет действовать центробежная сила, направленная перпендикулярно оси вращения облака и противостоящая сжатию в этом направлении. Суммарное влияние центробежной силы и силы тяжести приводит к тому, что сжимающееся облако приобретает форму диска (Рис. 17, 18). Многократные прямые наблюдения протопланетных дисков доказывают справедливость небулярной гипотезы происхождения звёзд и планетных систем.

 Небулярная гипотеза

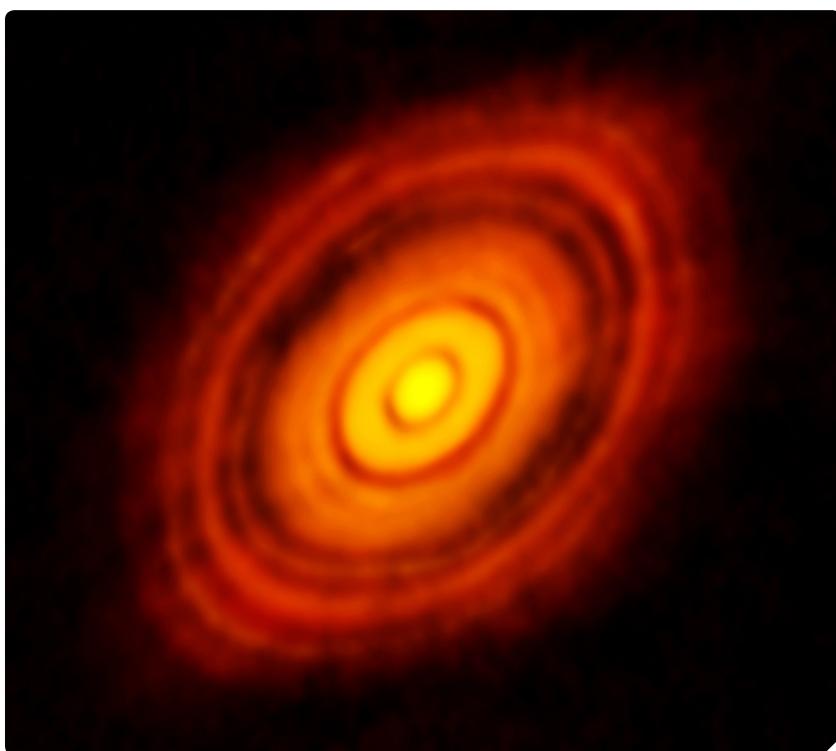


Рис. 17. Протопланетный диск у звезды HL Тельца, изображение получено в ИК диапазоне на телескопе ALMA

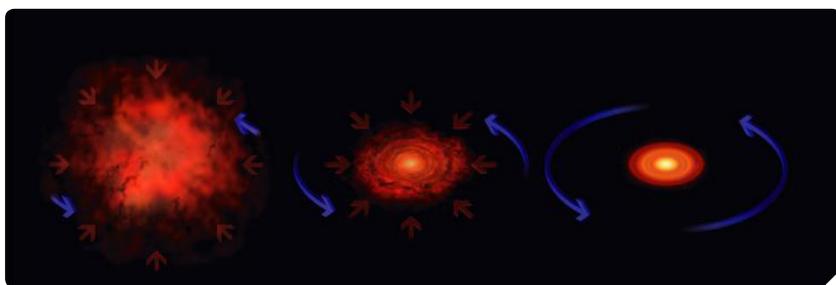


Рис. 18. Изначально протозвёздное облако очень разреженное и медленно вращается. По мере сжатия повышается его плотность и температура. Момент импульса облака при этом, хотя бы частично, сохраняется, что приводит к увеличению угловой скорости вращения и усилению влияния центробежной силы по мере коллапса облака. Суммарное влияние силы тяжести и центробежной силы приводит к тому, что облако приобретает форму диска

Горячая протозвезда в центре диска нагревает вещество диска неравномерно — внутренняя его часть имеет более высокую температуру, а периферийные области остаются холодными. Вследствие этого состав диска различен: в центре ледяные оболочки пылинок и даже часть пылинок испарились и перешли в газообразное состояние, а ближе к краям диска почти всё вещество находится

в конденсированном твёрдом состоянии (Рис. 19). Условная граница между этими областями называется снеговой линией. Строго говоря, снеговых линий несколько, и они различные для разных веществ. Так, для воды с температурой плавления 273 К снеговая линия будет намного ближе к звезде, чем для метана, у которого температура плавления составляет 91 К.

✎ Снеговая линия

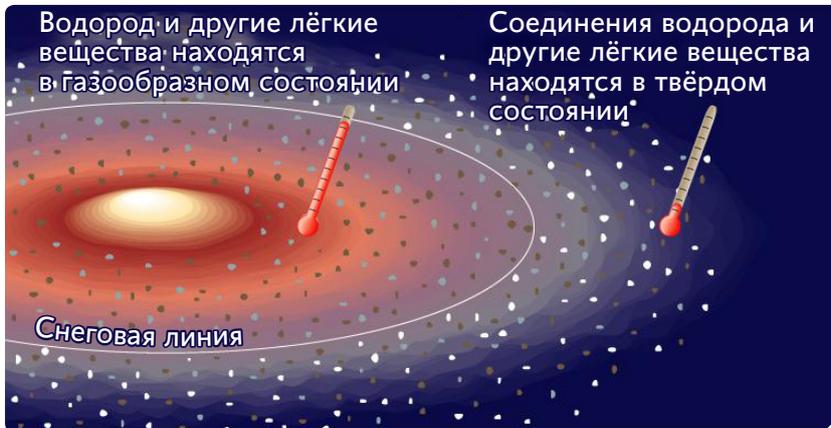


Рис. 19. В горячей центральной области протопланетного диска каменные и металлические пылинки остаются твёрдыми, а более лёгкие вещества переходят в газообразное состояние. На краях диска почти всё вещество находится в твёрдом состоянии. Условная граница между областями называется снеговой линией

Пылинки в диске имеют размер около микрометра и создают очень слабое гравитационное притяжение, но все же слипаются вместе за счёт сил межмолекулярного взаимодействия и частичного расплавления при столкновении на больших скоростях. Компьютерное моделирование процесса слипания пылинок показывает, что за время порядка десятков-сотен тысяч лет в диске образуется множество тел размером от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Сейчас мы можем наблюдать эти тела в составе метеоритов (Рис. 20).

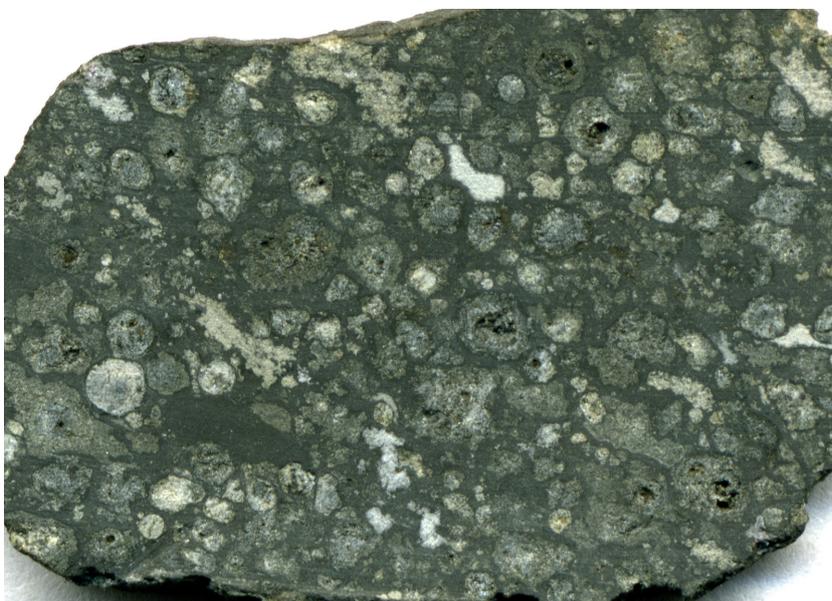


Рис. 20. Внутреннее строение метеорита Альенде. Хорошо видны вкрапления оксидов кальция и алюминия. Возраст метеорита определён методом радиоизотопного анализа и составляет 4,567 млрд лет, что на 30 млн лет больше возраста Земли

Рост на масштабе от сантиметров-метров до километров — наименее изученная стадия формирования планет. Моделирование показывает, что он должен проходить очень быстро, иначе тела промежуточных масс быстро теряют скорость из-за взаимодействия с газом в диске и падают на протозвезду. Рост тела с размером, превышающим километр, определяется в основном гравитационным

взаимодействием с другими подобными телами. Это приводит к тому, что массивные планетезимали (от англ. *planet* — планета и англ. *infinitesimal* — бесконечно малая) быстрее увеличивают свою массу за счёт поглощения менее массивных.

В течение примерно одного миллиона лет образуется несколько сотен или тысяч планетезималей с массой в диапазоне 1–10% массы Земли. Столкновения и радиоактивный распад приводят к их нагреву и расплавлению. Расплавленные тяжёлые элементы собираются в ядрах, более лёгкие образуют кору будущих планет. Во внутренней области будущих планетных систем образуются планеты земного типа, состоящие преимущественно из тяжёлых химических элементов. Во внешней области диска, за снеговой линией, где в изобилии присутствуют лёд и газ, из планетезималей образуются массивные ядра (с массой около 10 масс Земли), вокруг которых аккумулируется газ и в итоге образуются газовые гиганты. Не всё вещество протопланетных дисков используется для образования больших планет. Часть вещества остаётся в виде планетезималей, которые в дальнейшем наблюдаются как кометы и астероиды.

Описанный выше сценарий образования планетных систем подтверждается наблюдениями протопланетных дисков, исследованиями комет, астероидов и метеоритов в Солнечной системе. Однако такая модель противоречит наблюдениям газовых гигантов вблизи родительских звёзд, например, системы 51 Пегаса. Объяснить этот факт можно процессом миграции газовых гигантов к центральной звезде на поздних стадиях формирования планет. Миграция планет в направлении центральной звезды происходит благодаря гравитационному взаимодействию с остатками протопланетного диска. Благодаря силе гравитационного притяжения массивные планеты создают рядом с собой области повышенной плотности вещества диска — приливные волны, таким образом момент импульса планеты по своей орбите переходит в кинетическую и тепловую энергию вещества диска. Уменьшение кинетической энергии планеты приводит к уменьшению размеров её орбиты и миграции в направлении центральной звезды.

Медленная эволюция планетных орбит продолжается и после рассеивания протопланетного диска, за счёт их взаимного гравитационного взаимодействия. Меняются орбиты не только больших планет, но и оставшихся планетезималей. Некоторые из них мигрируют во внутреннюю часть планетной системы и сталкиваются с каменными планетами, образовавшимися внутри снеговой линии протопланетного диска. В значительной степени именно такие столкновения ответственны за формирование на Земле океанов и атмосферы с большим количеством лёгких элементов.

 Продолжительность и скорость миграции определяется временем жизни протопланетного диска, его массой, плотностью, вязкостью и другими параметрами. При определённых условиях возможна миграция планет по направлению к внешним областям системы

Свойства и классификация экзопланет

Небулярная гипотеза образования планетных систем предсказывает, что химический состав планеты определяется тем, на каком расстоянии от центра диска она родилась. Чем ближе к горячей протозвезде, находящейся в центре протопланетного диска, тем меньше в составе планеты легкоплавких веществ и больше тугоплавких. Протозвёздные туманности состоят преимущественно из водорода и гелия, тяжёлых тугоплавких элементов в их составе относительно немного (<2% от массы). Соответственно, планеты, образующиеся в горячих внутренних областях протопланетного диска, имеют очень ограниченные ресурсы для роста и остаются относительно лёгкими. Планеты, рождающиеся в холодных внешних областях протопланетного диска, могут быть намного массивнее.

Важный вывод из сказанного выше: чем массивнее планета, тем больше в её составе лёгких элементов.

Экзопланеты изучаются относительно недолго, поэтому до сих пор нет общепринятой схемы их классификации. Можно выделить несколько основных критериев, по которым экзопланету относят к тому или иному типу: масса, размер, температура, состав.

Для примера рассмотрим классификацию на основе массы и размеров⁸ (Рис. 21).

— Экзопланеты с массой до 2 масс Земли состоят преимущественно из тугоплавких элементов в твёрдом или жидком состоянии, имеют слабовыраженную атмосферу. Их радиус примерно пропорционален кубическому корню из массы ($R \sim M^{1/3}$). Такие экзопланеты называют землеподобными, или просто «земли», со строчной буквы. Именно к этому классу относятся внутренние планеты Солнечной системы: Меркурий, Венера, Земля и Марс.

 «земли»

— Экзопланеты с массами 2–150 масс Земли имеют в составе много легкоплавких веществ и имеют выраженные атмосферы. В отличие от твёрдого вещества и жидкости, плотность газа сильно зависит от давления и меняется с расстоянием от центра планеты. Это приводит к тому, что радиус растёт быстрее с ростом массы как $R \sim M^{2/3}$. Такие планеты называют нептунopodobными, или просто «нептунами». В Солнечной системе к этому классу относятся Уран, Нептун и Сатурн.

 «нептуны»

— Если масса экзопланеты превышает 150 масс Земли, то гравитация становится настолько сильной, что давление газа не способно остановить медленное сжатие с выделением тепловой энергии. Для таких экзопланет радиус медленно уменьшается с ростом массы, $R \sim M^{0,04}$. Такие экзопланеты называются юпитерopodobными, или просто «юпитерами», в честь крупнейшей планеты Солнечной системы.

 «юпитеры»

⁸Разделение на типы экзопланет условное и часто используется следующее: планеты с массами 2–10 земных называются «сверхземлями» или «мининептунами», с массами 10–50 земной – ледяными гигантами, от 50 до 3000 масс Земли – газовыми гигантами.

—Наконец, если масса превышает 80 масс Юпитера (или примерно 30 000 масс Земли), то в ядре становятся возможны реакции термоядерного синтеза на ядрах водорода, и объект можно назвать полноценной звездой.

Рассмотренная классификация не является исчерпывающей. Например, в ней не выделяются экзопланеты с массами от 13 до 80 масс Юпитера. В их ядрах давление и температура достаточны для протекания термоядерных реакций ядерного синтеза на ядрах дейтерия, лития, бериллия и бора. Реакции протекают относительно недолго и заканчиваются с истощением запасов термоядерного топлива. Такие объекты называются коричневыми карликами.

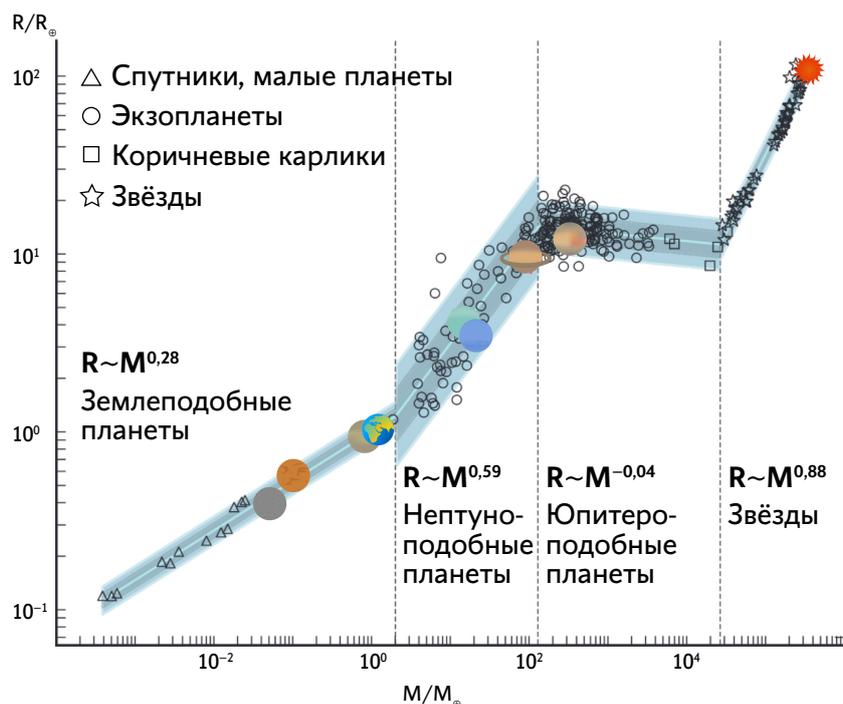
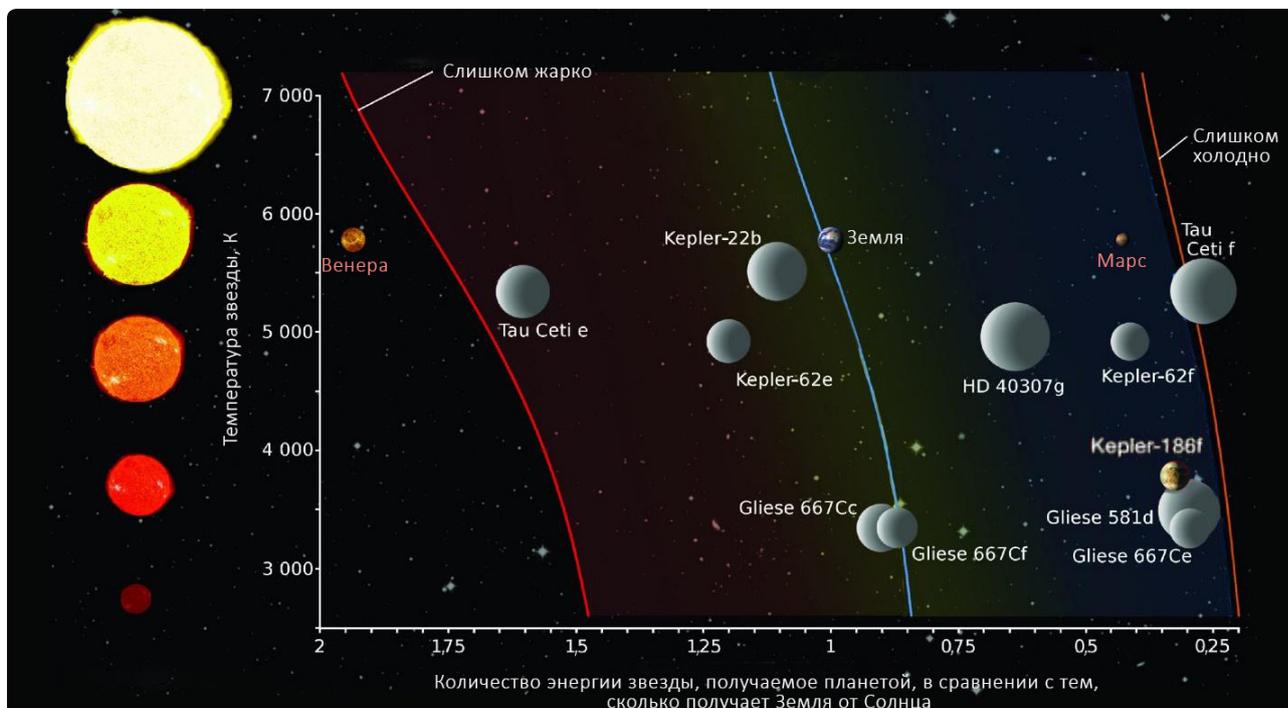


Рис. 21. Классификация экзопланет на основе зависимости радиуса от массы

Так же при классификации стоит учитывать размеры орбиты экзопланеты. Так, «юпитеры», вращающиеся близко к своим звёздам, сильно нагреты и называются «горячими». Уже известная нам экзопланета у 51 Пегаса относится именно к этому классу «горячих юпитеров».

Особый интерес представляют экзопланеты с температурой поверхности около 273 К. На таких экзопланетах могут быть условия, пригодные для возникновения жизни. Для каждой звезды можно определить область, в которой условия на поверхности находящейся в ней планет будут близки к условиям на Земле, — прежде всего, наличие воды в жидкой фазе. Эта область называется «зоной обитаемости». На Рис. 22 показано расположение некоторых экзопланет, Венеры, Земли и Марса относительно зоны обитаемости для их родительских звёзд. Как видно, Венера находится слишком близко к Солнцу и не имеет условий для развития жизни, Марс находится у дальней границы зоны обитаемости. Земля же имеет оптимальную освещённость для развития жизни. Все предположения о размерах зоны обитаемости сделаны на основе единственного известного нам случая появления жизни. Например, не рассматривается возможность развития жизни в океанах на спутниках Юпитера и Сатурна, находящихся далеко за пределами зоны обитаемости.

Зона обитаемости



Расположение экзопланеты в зоне обитаемости не гарантирует возникновение жизни, поэтому делать вывод об обитаемости только на этом основании неправильно. Для однозначного доказательства обитаемости необходимы наблюдения признаков жизни — биомаркеров. Можно выделить три типа биомаркеров, которые теоретически можно наблюдать на экзопланетах:

- наличие жизни меняет состав атмосферы. Так, высокое содержание кислорода и озона в атмосфере Земли обусловлено наличием организмов, способных к фотосинтезу;
- растительность на поверхности и водоросли в океанах могут изменять их цвет. Например, значительная часть поверхности Земли покрыта зелёными лесами, а обилие водорослей Дуналиелла придаёт розовый цвет некоторым озёрам;
- периодические сезонные изменения некоторых параметров. Например, колебания содержания двуоксида углерода, вызванные периодами роста и увядания растительности.

Имеющиеся в настоящее время методы исследования не позволяют успешно подтвердить или опровергнуть наличие биомаркеров на экзопланетах. Наиболее перспективным кажется развитие методов трансмиссионной спектроскопии и поиск следов жизни в атмосферах далёких планет.

Рис. 22. Положение некоторых экзопланет, Венеры, Земли и Марса относительно зоны обитаемости вокруг их родительских звезд. По горизонтальной оси — количество тепла, получаемого от звезды, единица соответствует условиям на Земле. Чем дальше от звезды, тем меньше освещённость и ниже температура. По вертикальной оси — температуры родительских звезд



Автор текста:
Вадим Крушинский, научный сотрудник Лаборатории астрохимических исследований Уральского федерального университета

В тексте использованы иллюстрации:

- Рис. 1. Экзопланета HD 189733 b в представлении художника. ESO // M Kornmesser.
- Рис. 2. Художественное представление о системе PSR 1257+12. NASA // JPL-Caltech/R. Hurt (SSC).
- Рис. 3. Параметры (масса и большая полуось орбиты) известных на июль 2020 года экзопланет. Savransky and Macintosh.
- Рис. 5. Наблюдения транзитов экзопланеты HAT-P-26b. Wakeford, et al., 2017.
- Рис. 6. Смещение времени транзита внутренней планеты Kepler-46b. Nesvorny et al., 2012.
- Рис. 7. Движение центра Солнца относительно центра масс Солнечной системы. Barrie W Jones, 2009.
- Рис. 10. Спектрограф ESPRESSO. ESO.
- Рис. 12. Событие гравитационного линзирования OGLE-2005-BLG-390L. Beaulieu et al., 2006.
- Рис. 13. Три экзопланеты около звезды HR 8799. CHARIS/Princeton Team and NAOJ.
- Рис. 15. Концепция космического коронографа для прямых наблюдений экзопланет. Gary Blackwood, 2014.
- Рис. 16. Изменение фазы экзопланеты приводит к изменению наблюдаемого блеска системы. Stevenson et al., 2016.
- Рис. 17. Протопланетный диск у звезды HL Тельца, изображение получено в ИК диапазоне на телескопе ALMA. ESO.
- Рис. 18. Эволюция протозвёздного облака. Addison-Wesley Longman.
- Рис. 19. Протопланетный диск. Addison-Wesley Longman.
- Рис. 20. Внутреннее строение метеорита Альенде. James St. John.
- Рис. 21. Классификация экзопланет на основе зависимости радиуса от массы. C. BICKEL // SCIENCE.