

Раскаленные планеты

В.Н. Витер

Человек высадился на Луну, правда, для этого астронавтам потребовались скафандры, предохраняющие от высокого вакуума. Для длительного пребывания на поверхности Луны, человеку нужно иметь защиту и от значительных перепадов температур. Днем поверхность нашего спутника нагревается до 120 °С, а ночью или просто в тени она остывает до –160 °С. В некоторых лунных кратерах, куда никогда не попадают солнечные лучи, намного холоднее: температура там лишь на несколько десятков градусов выше абсолютного нуля.

Примерно такая же защита понадобится людям, которые отважатся высадиться на Марс: разреженная атмосфера сглаживает колебания температур, но давление на поверхности Красной планеты очень низкое. Оно в сотни раз меньше земного.

Возле поверхности Венеры давление почти соответствует давлению в океане на километровой глубине, а температура превышает 460 °С. Казалось бы, в таких условиях человек немедленно будет раздавлен и сожжен. Но это не обязательно так: рекорд погружений в океан, «смоделированных» в барокамере, составляет более 1500 м. И такое высокое давление не причинило добровольцам никакого вреда¹. В случае необходимости можно создать специальные скафандры, которые предохранят космонавтов и от нестерпимой жары на поверхности Венеры (хотя бы на короткое время).

Вполне можно представить себе и защитные средства, которые сделают возможным пребывание человека на поверхности Меркурия, Плутона, спутников Юпитера, астероидов или в верхних слоях атмосфер планет-гигантов. Технически это вполне реально. Как туда долететь, и стоит ли ради этого рисковать человеческими жизнями – совсем другой разговор. Такие путешествия уже давно «состоялись» в многочисленных научно-популярных фильмах. Но существуют миры, пребывание человека в которых трудно представить даже в самых смелых фантазиях.

¹ Конечно, в таком эксперименте необходимо строго соблюдать специальные условия подъема давления и последующей декомпрессии.

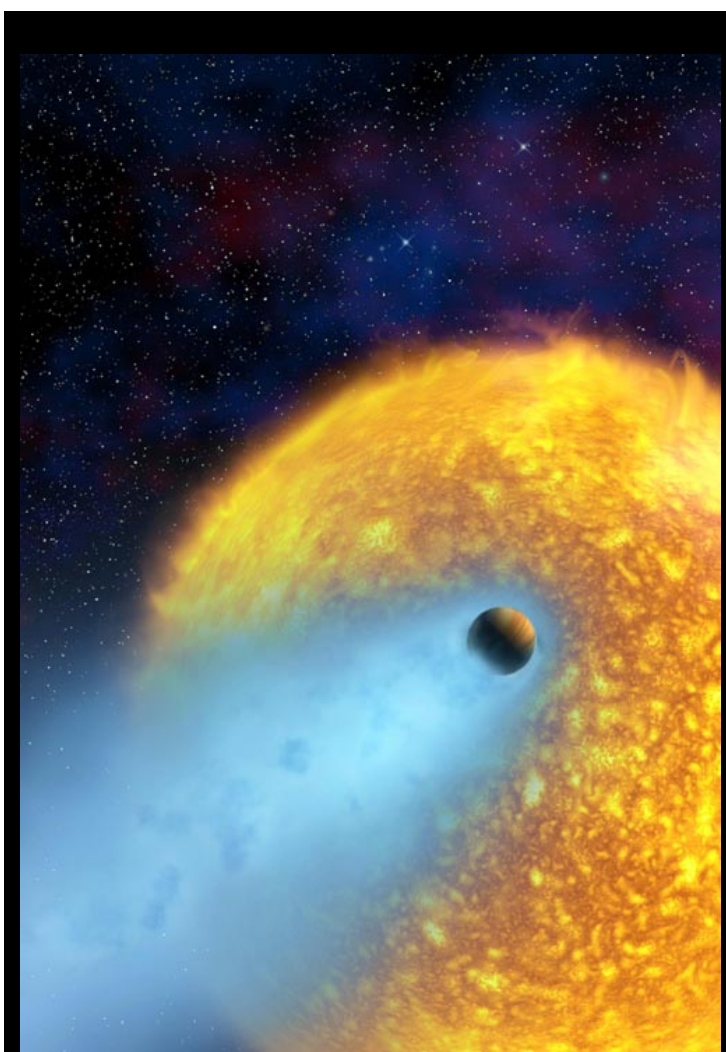
Озирис (HD 209458 b)

Наблюдения, проведенные при помощи космического телескопа Хаббл, подтвердили факт существования очень необычной планеты, которая вращается вокруг звезды, расположенной на расстоянии около 150 световых лет от Земли в созвездии Пегаса.

Планета представляет собой типичный горячий юпитер. Ее официальное название HD 209458 b, но ученые часто называют эту планету Осирис – в честь древнеегипетского бога смерти. Радиус планеты близок к 100 000 км (в 1.4 раза больше радиуса нашего Юпитера), а масса составляет только 0.7 массы Юпитера (примерно $1.3 \cdot 10^{24}$ тонн). В ходе наблюдений в 2007 году удалось даже зафиксировать следы атмосферы Осириса — из-за того, что небольшая часть света от звезды доходит до нас, проходя через плотную нижнюю атмосферу планеты, оказалось возможным увидеть в спектре линии поглощения натрия.

Подобных планет известно довольно много и количество открытий стремительно продолжает расти. Однако Осирис удивил всех необычайно близким расстоянием к материнской звезде: 0.047 а.е.², что составляет около 7 миллионов километров. Для сравнения Земля отдалена от Солнца примерно на 150 миллионов километров или 1 а.е., Меркурий – 58 миллионов километров (0.387 а.е.).

Благодаря такому близкому расположению планета очень быстро вращается по своей орбите, год на ней составляет всего 3.5 земных суток. Для сравнения: Меркурий,

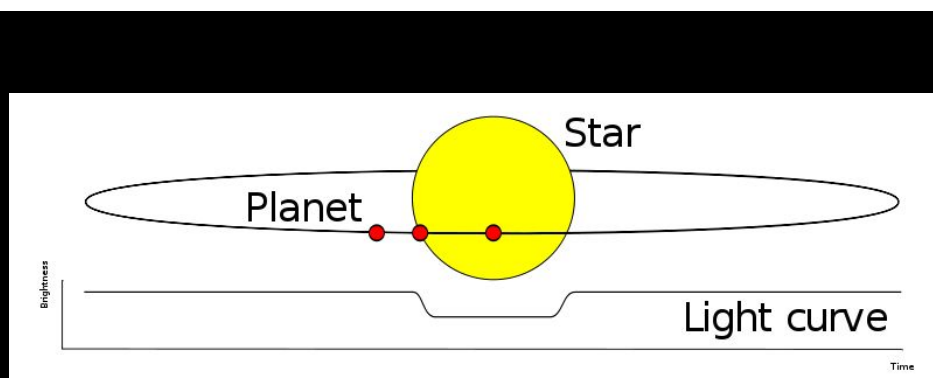


Так представляет себе Осирис художник

² Астрономическая единица (сокращение - а.е.) равна среднему расстоянию от Земли до Солнца

ближайшая к Солнцу планета, делает полный оборот за 88 дней, наш Юпитер совершает оборот вокруг Солнца за 11.9 земных лет, Плутон – за 248 земных лет.

Планета расположена настолько близко к материнской звезде, что почти соприкасается с внешними слоями ее атмосферы. Возникает вопрос: может ли планета стабильно существовать на таком расстоянии от звезды, или же она медленно испаряется? Измерение температуры нижних слоев атмосферы дали величину, немногим выше 1000 °С. Этого недостаточно, чтобы атомы и молекулы, преодолев силу гравитации, начали активно покидать атмосферу. С другой стороны, верхние и более разреженные слои атмосферы Озириса могут быть нагреты до гораздо более высоких температур. Такое явление, в частности, наблюдается в атмосфере нашей планеты.



Изменение яркости звезды при прохождении по ее диску Озириса
(по оси абсцисс отложено время, ординат – светимость)

Одно дело размышления, и совсем другое дело – наблюдения. Первоначально Озирис был открыт, когда ученые обнаружили небольшое (около 1.5 %) падение яркости материнской звезды во время периодического прохождения планеты по ее диску. Недавние дополнительные наблюдения за планетой, проведенные на этот раз в ультрафиолетовом диапазоне, показали, что Озирис затмевает свое солнце гораздо сильнее — яркость звезды падает на 15 %, это соответствует размеру окружающего планету водородного облака примерно в 4.3 радиуса Юпитера. Однако планета такой массы как Озирис может удерживать своим притяжением вещество только на расстоянии 3.6 радиуса Юпитера³.

Единственное объяснение этого противоречия состоит в том, что планета непрерывно теряет свою газовую оболочку. Измерения позволили сделать вывод, что атомы покидают атмосферу Озириса со скоростью до 130 км/с, что значительно

³ Область, внутри которой притяжение небесного тела больше, чем притяжение соседних небесных тел, называется полостью Роша.

превышает вторую космическую скорость на этой планете (43 км/с).

В 2010 году было установлено, что излучение звезды и звездный ветер постоянно сдувают с планеты сильный поток газов. Такое явление наблюдается в нашей Солнечной системе, когда кометы приближаются к Солнцу. Подобно кометам за Озирисом тянется «хвост» газов. Изучение этого хвоста показало, что планета испаряется целиком: как легкие, так и тяжелые элементы покидают ее. Не удивительно, что Озирис стали называть «планета-комета» или «кометная планета». В результате испарения вещества в космическое пространство кометы постепенно разрушаются, однако, такая участь Озирису вряд ли грозит: при текущей скорости испарения планета полностью исчезнет через триллион лет, а это значительно превышает время жизни материнской звезды.

С помощью детальных наблюдений Озириса в ультрафиолетовом диапазоне были идентифицированы линии поглощения, отвечающие атомам и ионам углерода и кислорода. В инфракрасном спектре атмосферы ученые не обнаружили пика, который соответствует молекулам воды (при 10 мкм), зато была найдена линия при 9.65 мкм, которая обусловлена присутствием силикатной пыли. Природу еще одного пика с максимумом 7.78 мкм установить не удалось.

Как показали расчеты, на Озирисе дуют ветры со скоростью примерно 2 км/с, или 7 тыс. км/ч (с возможными вариациями от 5 до 10 тыс. км/ч). Звезда сильно нагревает дневную сторону планеты, где температура поднимается до 1000°C. Благодаря сильному приливному влиянию звезды, Озирис всегда повернут к ней одной стороной (вспомните аналогию с нашей Луной). Другая сторона, которая никогда не поворачивается к звезде, значительно холоднее. Большой перепад температур между дневной и ночной сторонами Озириса порождает ветры фантастической силы.

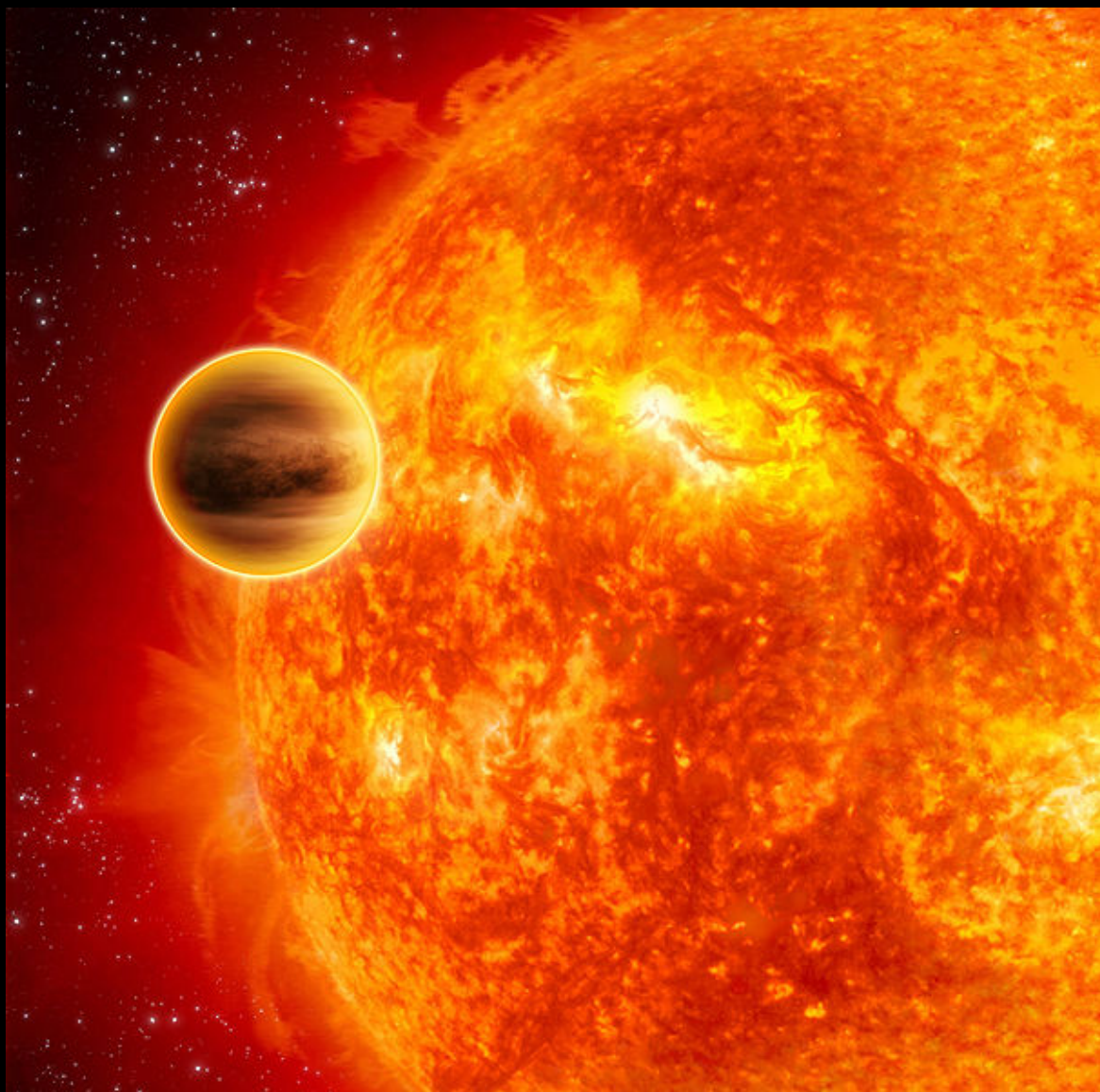


HD 189733 b

Планета HD 189733 b вращающаяся вокруг звезды HD 189733, которая расположена на расстоянии 63 световых лет от нас (созвездие Лисичка). По размерам и массе эта экзопланета примерно на 10% больше, чем наш Юпитер, однако в отличие от последнего HD 189733 b расположена на расстоянии всего 0.031 а.е. от материнской звезды (примерно 4.6 млн. км). Это в 30 раз меньше, чем расстояние от Земли до Солнца и ближе, чем расстояние от Озириса до своей звезды.

Период обращения HD 189733 b вокруг материнской звезды (т.е. местный год) составляет около 2.2 дня. Вероятно, вращение этой планеты синхронизировано с ее орбитальным движением — планета всегда повернута к звезде одной стороной.



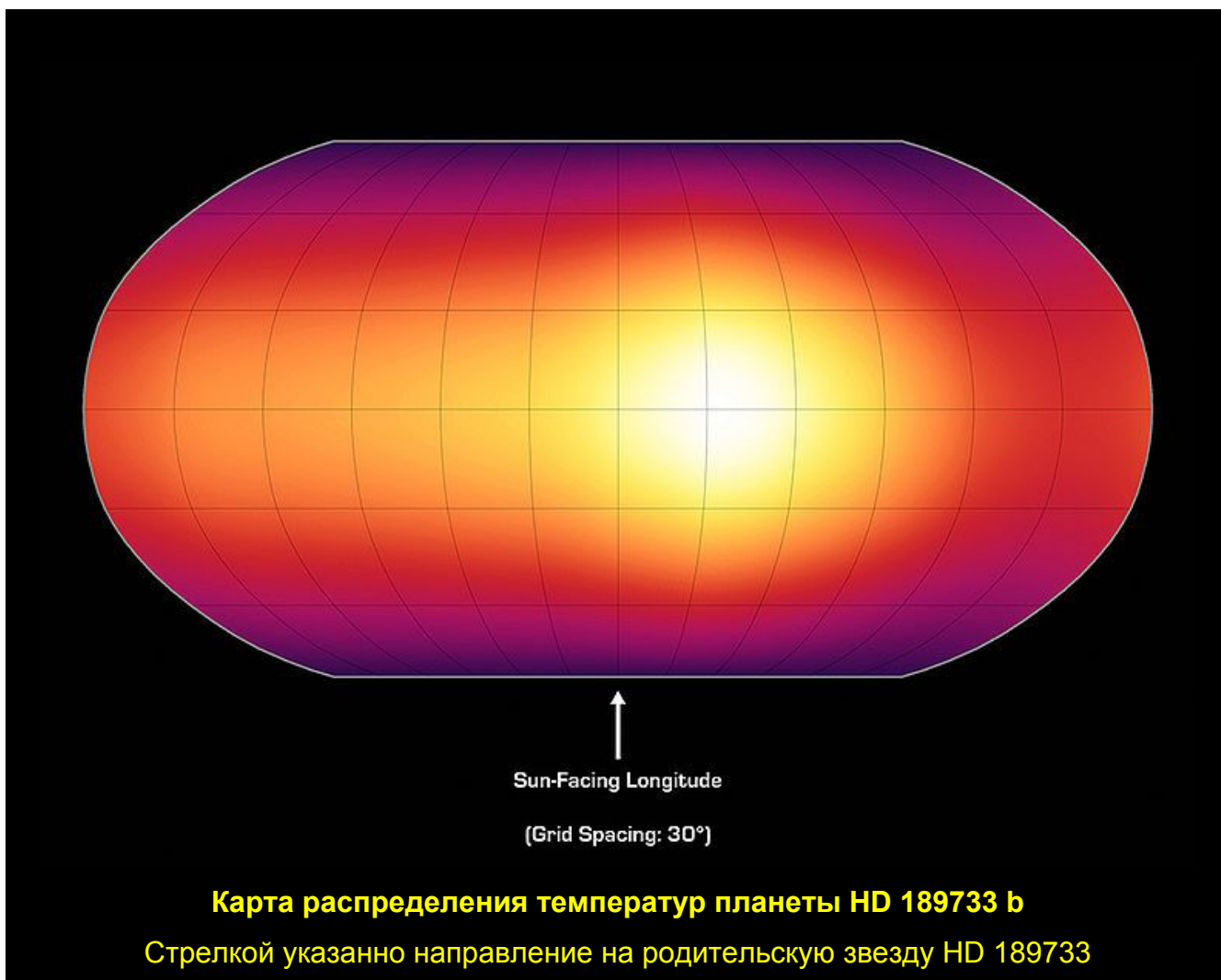


Планета HD 189733 b глазами художника

С помощью телескопа Хаббл, ученые смогли наблюдать туманную атмосферу вокруг планеты. Когда планета находится между нами и звездой, ее атмосфера приобретает красноватый оттенок. Благодаря атмосферным аэрозолям, на планете должны наблюдаться рассвет и закат. Из чего состоит этот туман точно неизвестно, по предварительным оценкам, это должны быть крошечные пылинки (диаметром менее 1 мкм) — частички железа, силикатов, оксида алюминия. При помощи телескопа Спитцер на планете удалось обнаружить значительные количества паров воды, а также метан. Вспомним, что в спектре Озириса линия воды найдена не была.

Для HD 189733 b впервые в истории исследования экзопланет удалось составить карту температур на поверхности. По инфракрасным наблюдениям космического телескопа Спитцер температура атмосферы планеты варьируется от 425 до 930 °С.

При этом самое горячее место на поверхности HD 189733 b находится не в точке, направленной прямо на звезду, а смещено на 30 градусов восточнее. Это смещение говорит о постоянно дующем с запада на восток урагане в атмосфере этой планеты. Он и переносит тепловую энергию. Исследователи оценили его скорость приблизительно в 9600 км/час (2.7 км/с).



В марте 2010 года было установлено, что планета HD 189733 b испаряется со скоростью 1-100 тысяч тонн в секунду.

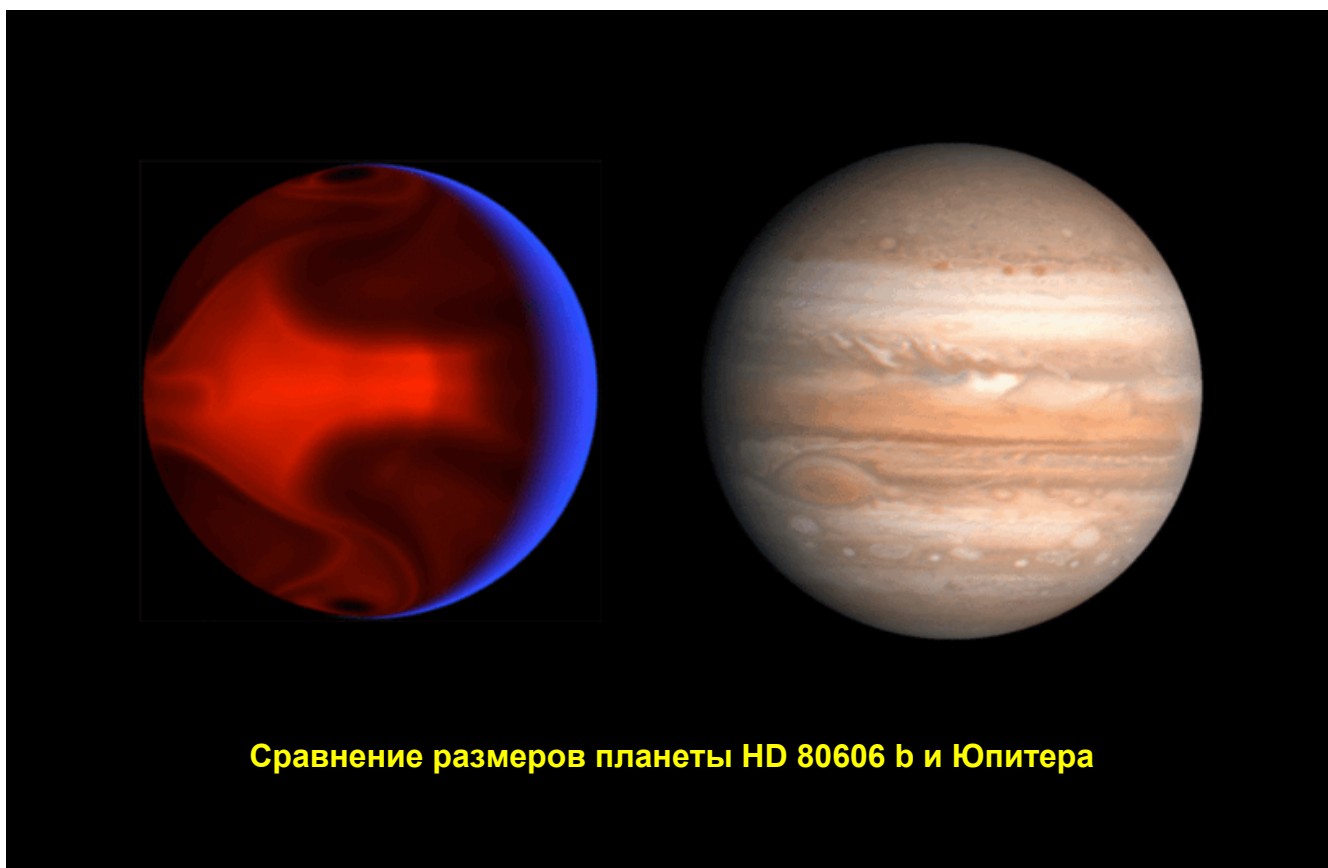
Комета размером с Юпитер

Две рассмотренные выше планеты относятся к классу горячих юпитеров – планет, которые имеют массу порядка массы нашего Юпитера, но расположены очень близко к своему солнцу. С нашей точки зрения условия на таких планетах просто адские, но они стабильны: орбита горячих юпитеров близка к круговой, а смене дня и ночи препятствует мощное приливное влияние звезды. Если забыть то очень существенное различие, что горячие юпитеры расположены очень близко к звезде, они вполне будут напоминать планеты-гиганты нашей Солнечной системы.

Оказалось, что планеты-гиганты, подобные горячим юпитерам, находятся в меньшинстве. Гораздо чаще встречаются крупные планеты, которые вращаются по вытянутым эллиптическим орбитам. Типичная планета-гигант, которая вращается вокруг своего солнца с периодом более 5 дней, имеет средний эксцентриситет орбиты 0.23⁴. Однако, некоторые планеты имеют гораздо более вытянутые орбиты, которые напоминают орбиты комет – со всеми вытекающим отсюда последствиями. Рассмотрим несколько примеров.

Экзопланета HD 80606 b вращается вокруг звезды HD 80606, расположенной в созвездии Большой Медведицы. Материнская звезда удалена от Земли на 190 световых лет, является желтым карликом (слабее Солнца) и образует двойную систему вместе со звездой, аналогичной ей по свойствам.

Планета HD 80606 b имеет массу, которая в четыре раза превышает массу нашего Юпитера, но немного уступает ему по размерам. Средняя плотность планеты составляет 4.440 г/см³. Для сравнения, средняя плотность Земли 5.515 г/см³, Юпитера – только 1.326 г/см³.



⁴ Эксцентриситет орбиты (e) – величина, характеризующая форму орбиты. Выражается через отношение большой (a) и малой (b) полуосей орбиты: $e^2=1-b^2/a^2$. При $e=0$ орбита круговая, при $0<e<1$ – эллиптическая. В последнем случае, чем ближе e к 1, тем более вытянута эллиптическая орбита. Например, для орбиты Земли $e = 0.0167$, кометы Галлея $e = 0.967$.

Период вращения планеты HD 80606 b составляет 111 дней (треть земного года и чуть больше года на Меркурии). Планета имеет исключительно вытянутую орбиту: ее максимальное расстояние до звезды составляет 0.84 а.е., минимальное – всего 0.03 а.е. Эксцентриситет орбиты 0.933.

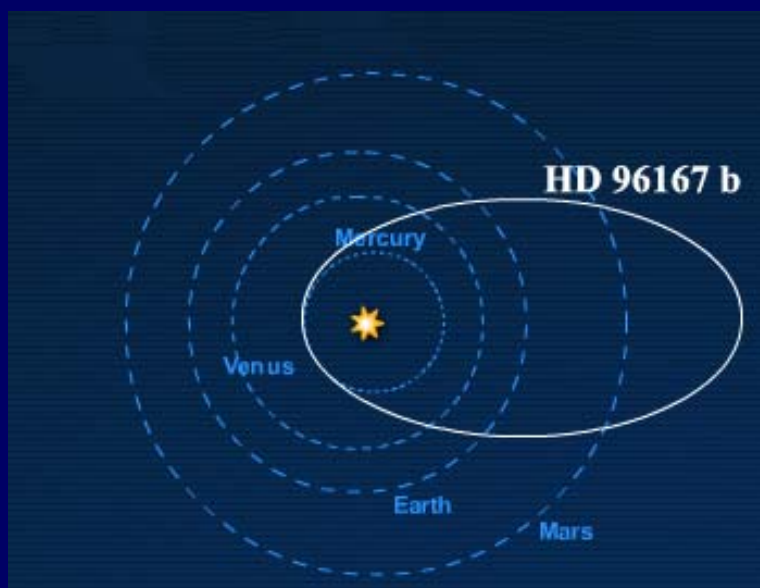
Во время каждого оборота HD 80606 b подходит к материнской звезде в 33 раза ближе, чем Земля и в 10 раз ближе, чем Меркурий, а потом отдаляется от нее на расстояние, которое почти соответствует расстоянию от Земли до Солнца

В перигелии планета получает в 800 раз больше тепла, чем в афелии. Было установлено, что температура на планете возрастает с 500 °С до 1200 °С всего за 6 часов. Поэтому климат планеты считается одними из самых экстремальных. На планете скорость ветра, направленного с горячей стороны на холодную, может превышать 4 км/с.

Экзопланета HD 96167 b вращается вокруг желтого субгиганта, по размерам и светимости превосходящего наше Солнце. Эта звезда расположена в созвездии Чаша на расстоянии около 274 световых лет от нас.

По массе планета уступает Юпитеру (0.68 массы Юпитера), а ее диаметр пока не установлен. Планета обращается по сильно вытянутой эллиптической орбите на среднем расстоянии 1.3 а.е. от родительской звезды. Эксцентриситет орбиты 0.71. В крайних точках орбиты планета то приближается к звезде на 0.38 а.е., то отдаляется от нее на 2.22 а.е. Полный оборот планета совершает приблизительно за 498 суток.

Если бы такая планета была в нашей Солнечной системе, она бы то достигала орбиты Меркурия, то уходила далеко за орбиту Марса.



Сравнение орбиты планеты **HD 96167 b** с орбитами планет нашей Солнечной системы

Экзопланета HD 45350 b расположена на расстоянии примерно в 160 световых лет от нас в созвездии Возничий. Ее масса, по крайней мере, в 1.79 раза больше, чем у Юпитера. Планета вращается по вытянутой эллиптической орбите, при этом она то приближается к своему солнцу примерно как наш Меркурий, то отдаляется от звезды значительно сильнее, чем наш Марс (минимальное расстояние планеты от звезды 0.43 а.е, максимальное – 3.41 а.е.). Не трудно предположить, что такая вытянутая орбита обуславливает резкие климатические изменения на планете, но наблюдать их мы пока что не в состоянии. Ученым остается заниматься только моделированием.

Астрономы считают, что наличие в системе планет-гигантов с эллиптическими орбитами исключает существование там планет, подобных Земле. «Юпитер с эллиптической орбитой» либо «вытолкнет» такие планеты из системы, либо станет причиной их столкновения с другими небесными телами. С другой стороны, миры, подобные нашей Земле, вполне могли бы удержаться в таких системах, став спутниками планет-гигантов.

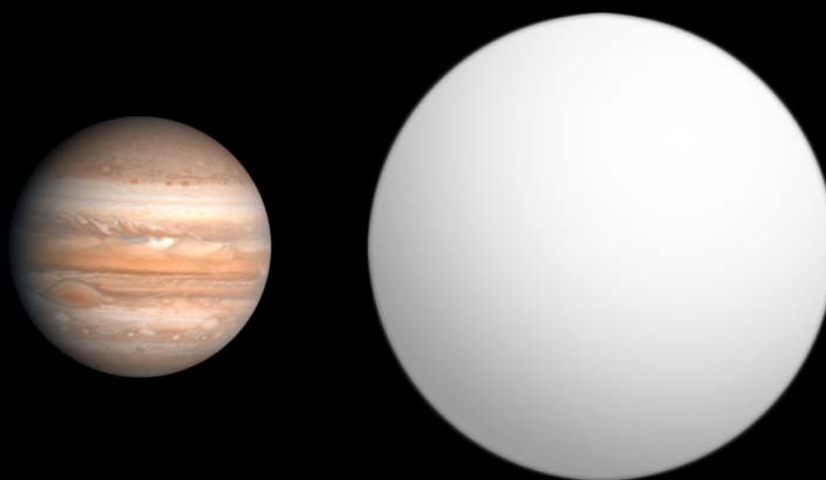
Как Икар

Уже несколько тысяч лет люди помнит миф об Икаре, который слишком близко подлетел к Солнцу на крыльях, склеенных воском. Это стоило ему жизни. Воск расплавился, крылья распались, и Икар упал. Многие века сравнение с Икаром означало опрометчивое приближение к чему-то неизвестному и очень опасному. Оказалось, что судьбу Икара могут разделить не только отдельные люди, но и целые миры. Вернее, ученые уже давно об этом догадывались, увидеть такое событие удалось лишь недавно.

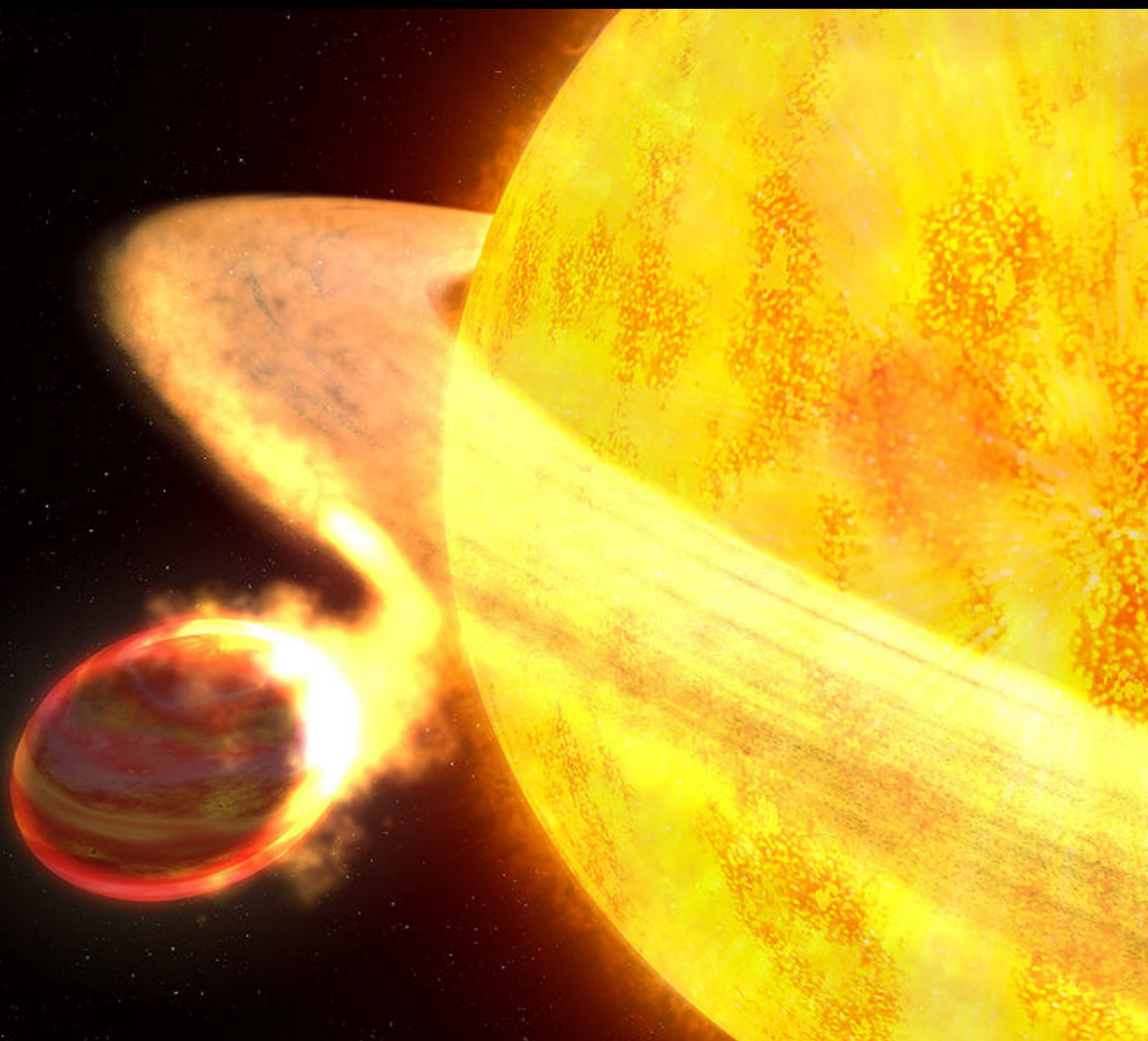
В 2008 году при наблюдениях за звездой WASP-12 было обнаружено прохождение по ее диску планеты, которая получила название WASP-12 b. Ее радиус составляет примерно 1.8 радиуса нашего Юпитера, а масса – 1.4 массы Юпитера. Необычным оказалось расстояние планеты до материнской звезды – 0.022-0.024 а.е., что равно всего 3.1 радиуса самой этой звезды (и в 44 раза ближе, чем расстояние от Земли до Солнца). Планета делает один оборот за 26 часов (практически за земные сутки). Плотность планеты составляет всего 0.326 г/см³ для сравнения плотность самой «разреженной» планеты нашей Солнечной системы – Сатурна в два раза выше (0.687 г/см³).

От близости к звезде поверхность планеты нагревается до 2200 °С, планета находится под влиянием мощнейших приливных сил. В результате WASP-12 b должна приобрести эллиптическую форму (подобно яйцу), а потери ее вещества оцениваются в 10⁻⁷ масс Юпитера в год (или 1.9·10²⁰ кг). Приливные силы не только деформируют

планету, но и сильно разогревают ее недра, чем и объясняется ее низкая плотность. При таких темпах WASP-12 b хватит примерно на 10 млн. лет. Считается, что потерянный планетой газ образует вокруг родительской звезды диск.



Сравнение размеров планеты WASP-12b и Юпитера



Экзопланета WASP-12b

Вокруг атомного ядра вращаются... планеты

Когда массивная звезда исчерпывает запасы топлива, давление газа уже не в состоянии сдерживать гравитационное сжатие. В результате ядро звезды сильно сжимается, электроны вдавливаются в протоны. Выделяется колоссальное количество энергии, и внешние оболочки звезды сбрасываются с большой скоростью. Происходит взрыв сверхновой. Сброшенная оболочка звезды образует планетарную туманность, которая расширяется в космическое пространство.

В центре из ядра звезды возникает компактный объект размером около 10-30 км⁵, который имеет массу ориентировочно 1.4-2.5 масс Солнца. Это нейтронная звезда. Как следует из названия, такая звезда состоит в основном из нейтронов.

Согласно расчетам, нейтронная звезда имеет просто фантастическую плотность: примерно от $3.7 \cdot 10^{17}$ до $5.9 \cdot 10^{17}$ кг/м³, что выше плотности атомного ядра ($3 \cdot 10^{17}$ кг/м³). Фактически, нейтронная звезда представляет собой огромное атомное ядро. Одна чайная ложечка вещества атомного ядра (5 мл) имеет массу около $1.5 \cdot 10^{12}$ кг, что примерно в 250 раз больше массы Великой пирамиды в Гизе (пирамида Хеопса) – $6.25 \cdot 10^9$ кг. Вещество же нейтронной звезды еще в несколько раз тяжелее. Сила тяжести нейтронной звезды настолько велика, что вторая космическая скорость составляет там порядка 100000 км/с (или 1/3 скорости света). Тело, упавшее на нейтронную звезду с высоты 1 м, разгоняется до скорости примерно 2000 километров в секунду, а само падение будет продолжаться около микросекунды. Температура в недрах недавно образовавшейся нейтронной звезды может достигать 10^{11} - 10^{12} К.

Могут ли существовать вокруг нейтронной звезды планеты? Казалось бы, это исключено. Представим себе, что вокруг массивной звезды вращаются планеты. Когда эта звезда становится сверхновой, происходит колоссальный взрыв. В этот момент звезда может затмевать своим светом целые галактики. Все планеты, которые были в ее системе, почти наверняка погибнут во взрыве сверхновой. Таким образом, нейтронная звезда не может «унаследовать» планеты от звезды-предшественницы.

Однако, одни из первых планет, открытых за пределами нашей Солнечной системы, вращаются именно вокруг нейтронной звезды. Благодаря сильному магнитному полю нейтронные звезды излучают в пространство мощные направленные импульсы радиоизлучения (а также других видов электромагнитных волн), которые приходят к нам со строгой периодичностью. За это их еще называют пульсарами⁶.

В 1991 году польский астроном Александр Вольщан, изучая пульсар PSR 1257+12 (расположен примерно в 1000 световых лет от Солнца), заметил периодическое изменение частоты прихода импульсов. Результат был подтвержден его канадским

⁵ Наши знания о нейтронных звездах далеки от исчерпывающих. Приведенные в статье величины являются довольно приближенными.

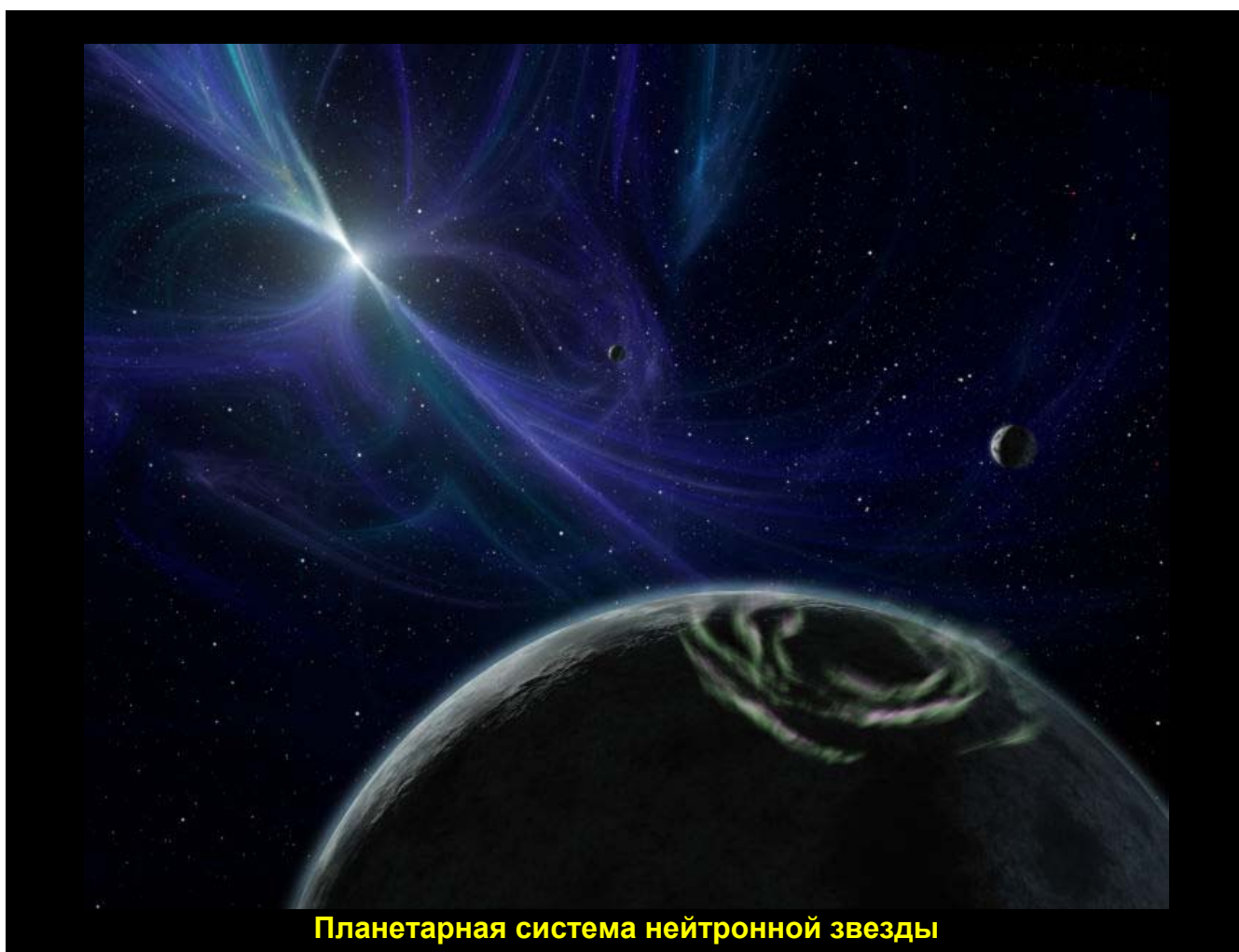
⁶ Строго говоря, не все нейтронные звезды являются пульсарами, но есть основания считать, что пульсар – один из этапов эволюции нейтронной звезды.

коллегий. В 1992 году они совместно опубликовали результаты исследований, в которых обнаруженные периодические изменения частоты объяснялись влиянием двух планет с массой в четыре раза больше земной. Позже была обнаружена еще одна планета с массой вдвое больше массы Луны. Ближайшая из этих планет расположена на расстоянии 0.19 а. е. от пульсара, самая отдаленная - 0.46 а. е. По соотношению периодов обращения планеты напоминают Меркурий, Венеру и Землю.

Про условия на планетах, которые вращаются вокруг пульсара, можно только догадываться. Нейтронная звезда обрушивает на них мощные импульсы электромагнитного излучения и поток заряженных ионов. Поверхность нейтронной звезды очень горячая (по данным измерений – миллионы градусов), однако ее площадь мизерна, поэтому в промежутке между импульсами она дает своим планетам мало света.

Происхождение планет возле нейтронных звезд остается неясным. Столь близкие планеты не смогли бы пережить взрыв сверхновой. Возможно, они сформировались после взрыва из вещества, перетекавшего на пульсар из второго компонента системы, позже утерянного.

Ученые предполагают также наличие планеты в двойной системе PSR B1620-26, состоящей из белого карлика и нейтронной звезды.



Планетарная система нейтронной звезды