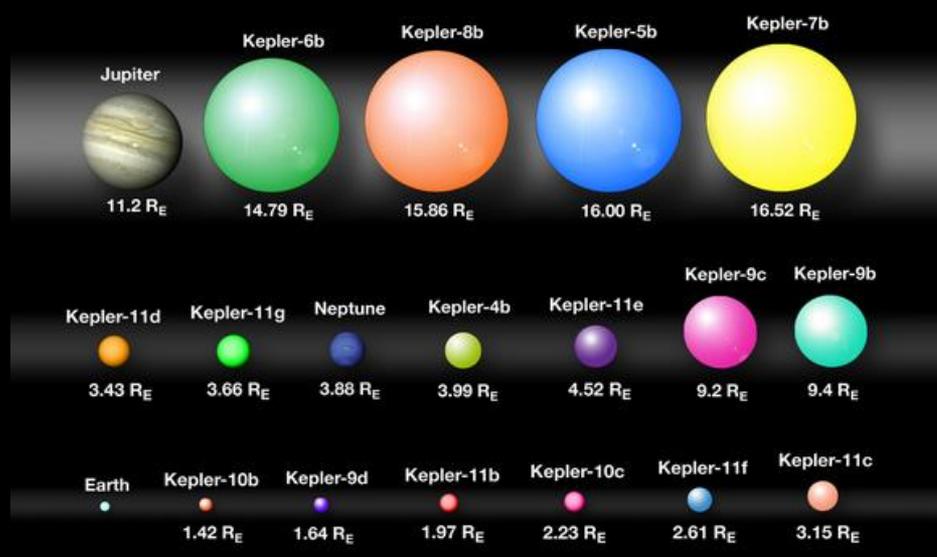


Планеты и их загадки

Kepler Planets

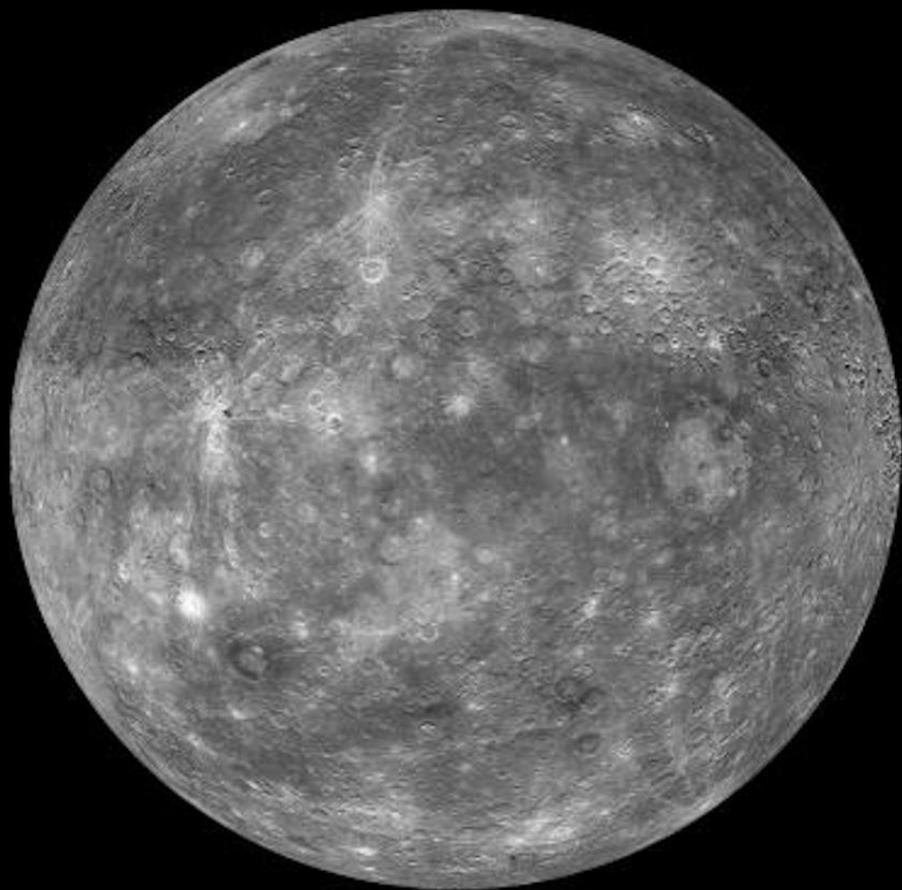


Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

Солнечная система



Меркурий



Похож на Луну.
Атмосферы нет.

Самая маленькая
из больших планет
Солнечной системы.

Венера



Радарное изображение
поверхности Венеры.
Цвета условные.

Плотная атмосфера.

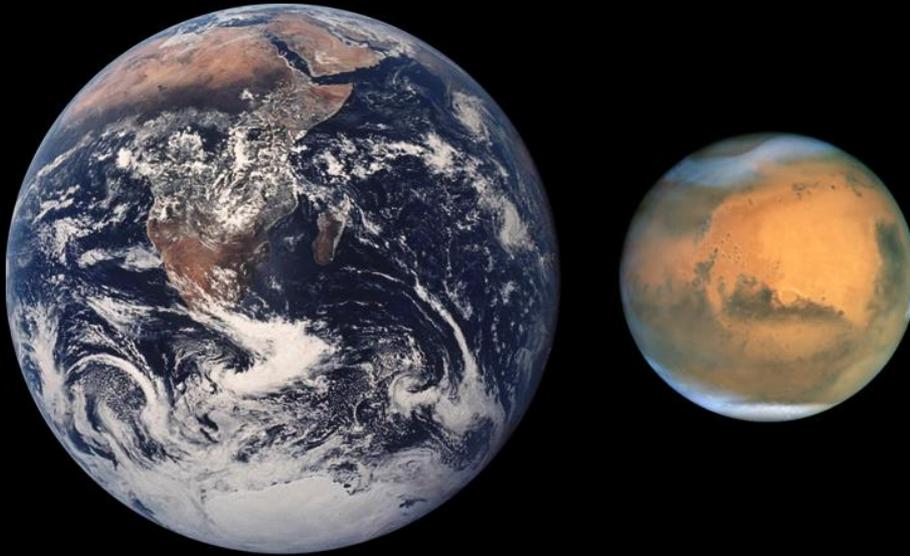
На поверхности
высокое давление
и температура.

По массе и размеру
похожа на Землю,
но по условиям –
совсем не похожа.



Фотография Венеры

Марс



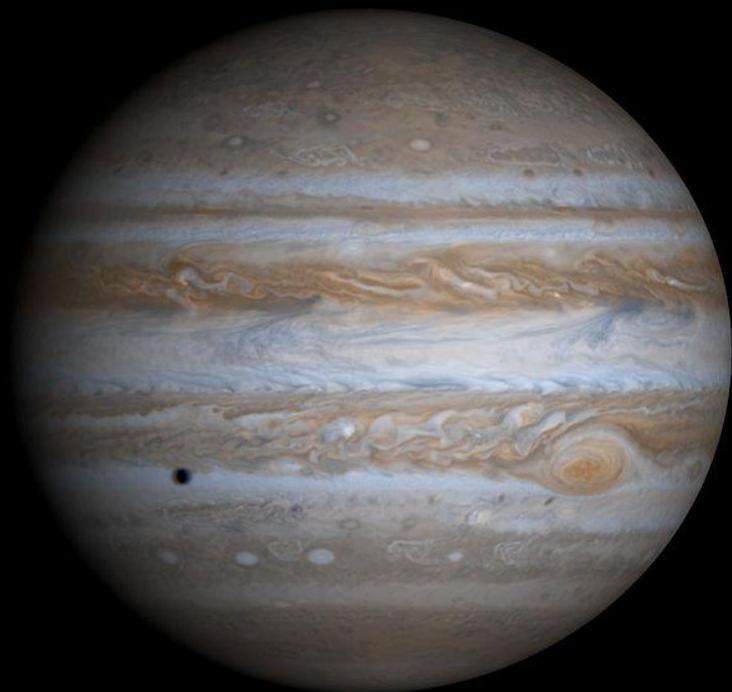
Меньше Земли (и намного легче).

Атмосфера очень разреженная.

Магнитное поле – слабое.

Возможно, в прошлом климат был другим, в частности, на Марсе могла существовать вода.

Юпитер



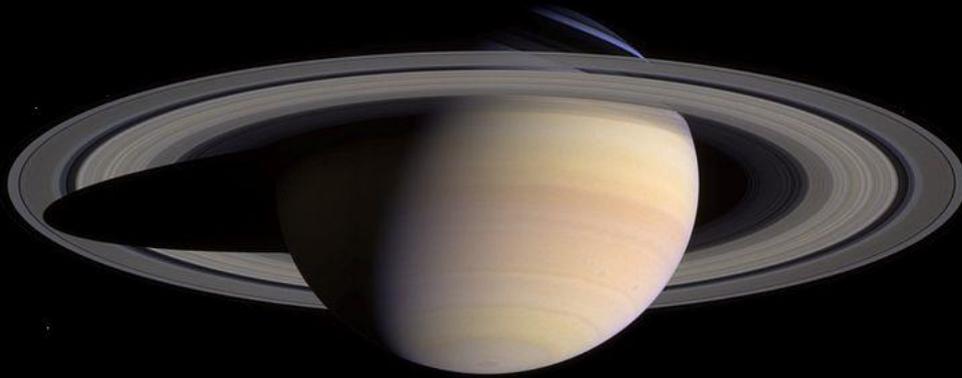
Самая большая планета Солнечной системы.
Тяжелее всех остальных вместе взятых.

Мы видим атмосферу.

Глубоко внутри должно быть ядро из тяжелых элементов (соответствующих по составу железно-каменным планетам).

Но многое про внутреннее строение Юпитера остается неизвестным.

Сатурн



По структуре похож на Юпитер.
Но ядро и слой
металлического водорода меньше,
а слой газообразного и жидкого
водорода и гелия – больше.

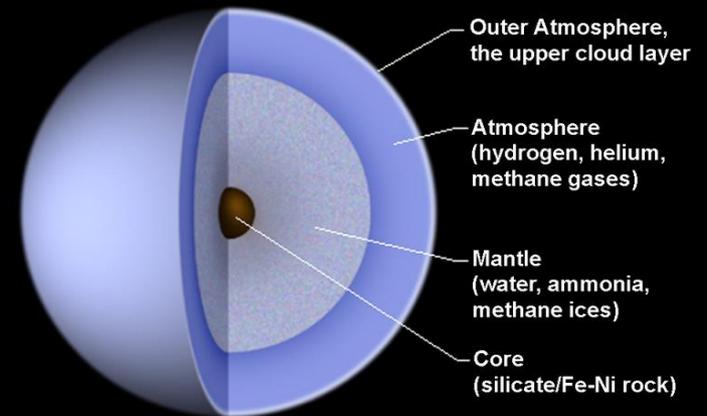
Уран



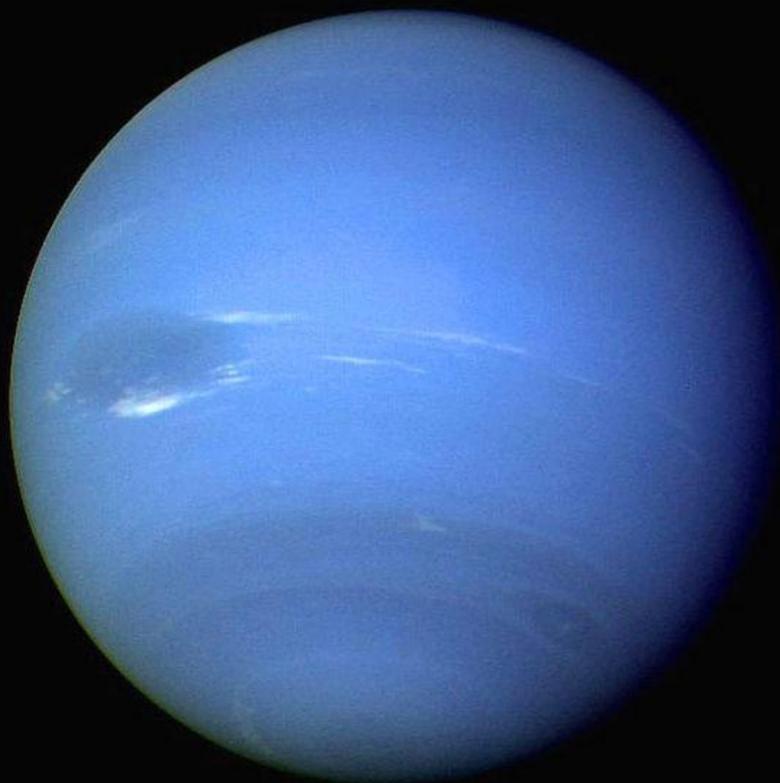
Ледяной гигант.

В 15 раз тяжелее Земли.

Лед не только водяной.
Внутри – твердое ядро.



Нептун

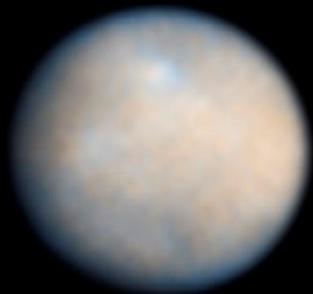


Ледяной гигант.
17 масс Земли.

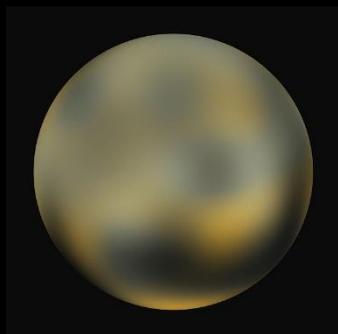
Ледяная мантия и
железно-каменное ядро.
Лед из воды, аммиака
и метана.

Карликовые планеты

Плутон, Церера и еще несколько крупных тел.



Церера



Плутон

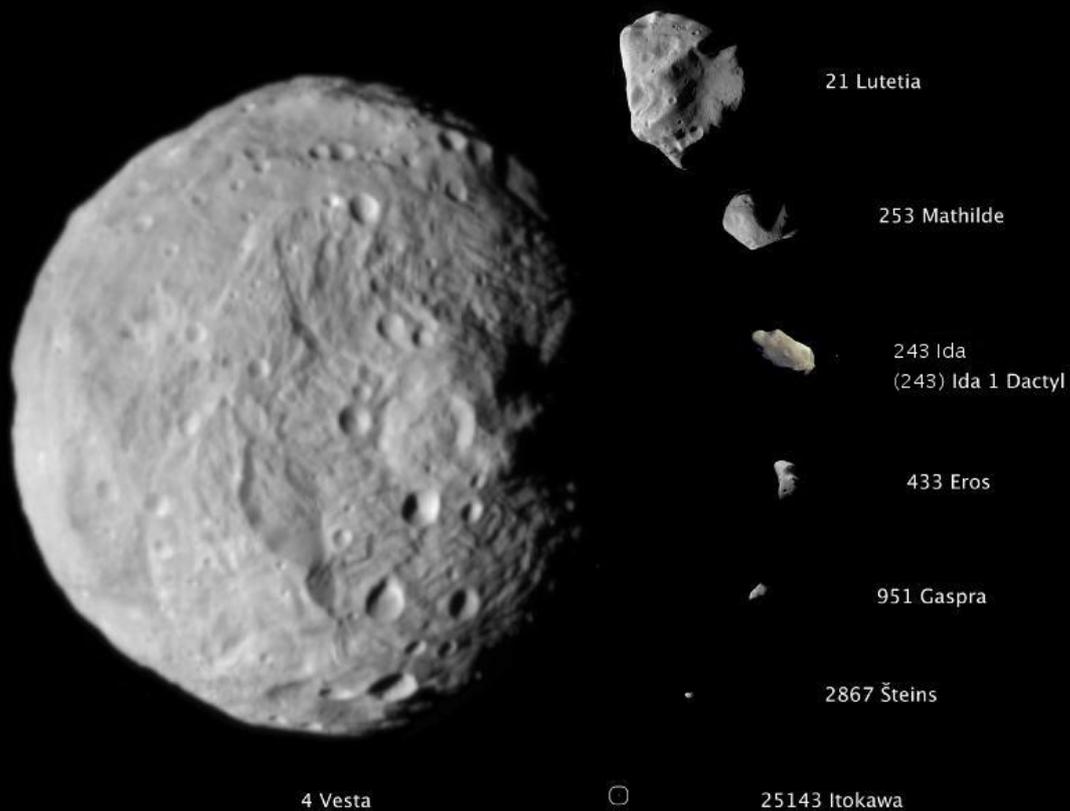


Эрида

Должны быть еще сотни неоткрытых объектов.

Астероиды

Слишком маленькие, чтобы быть круглыми



Бурые карлики



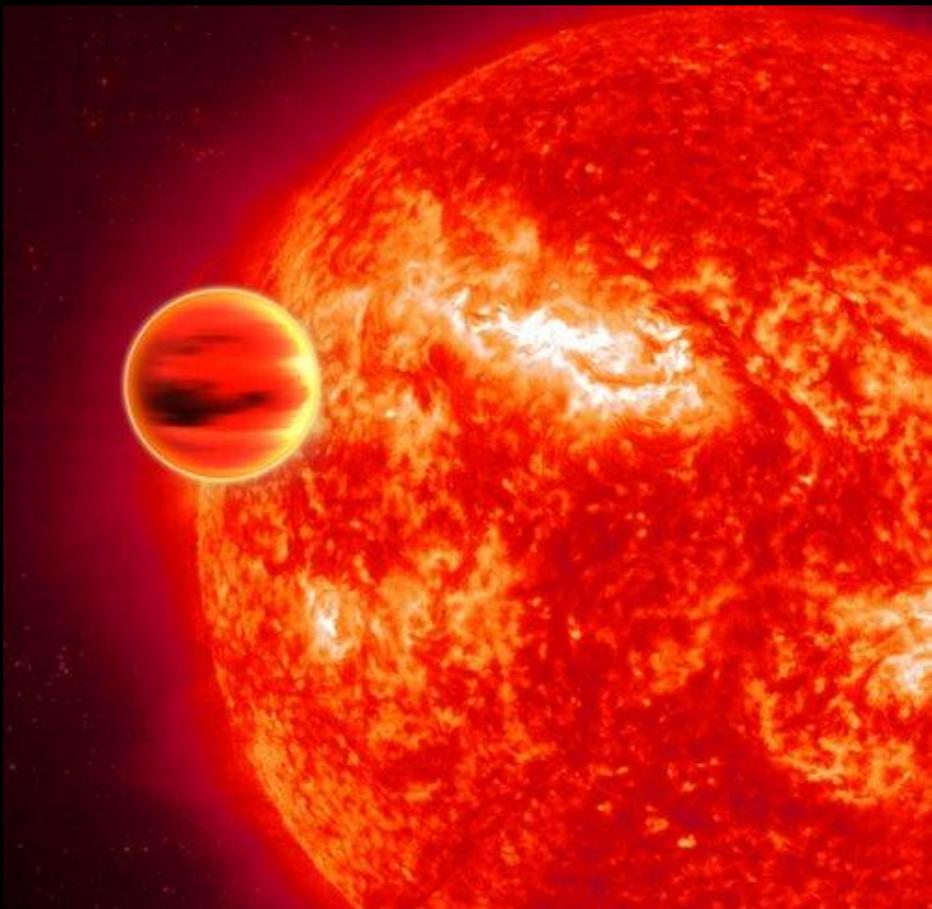
Между планетами и звездами.

От 13 до 80 масс Юпитера.

В них не идут реакции превращения водорода в гелий, но идут реакции на других элементах: дейтерий, литий.

От планет могут отличаться не только массой, но и историей формирования.

Горячие юпитеры



Первое же открытие экзопланеты стало неожиданностью.

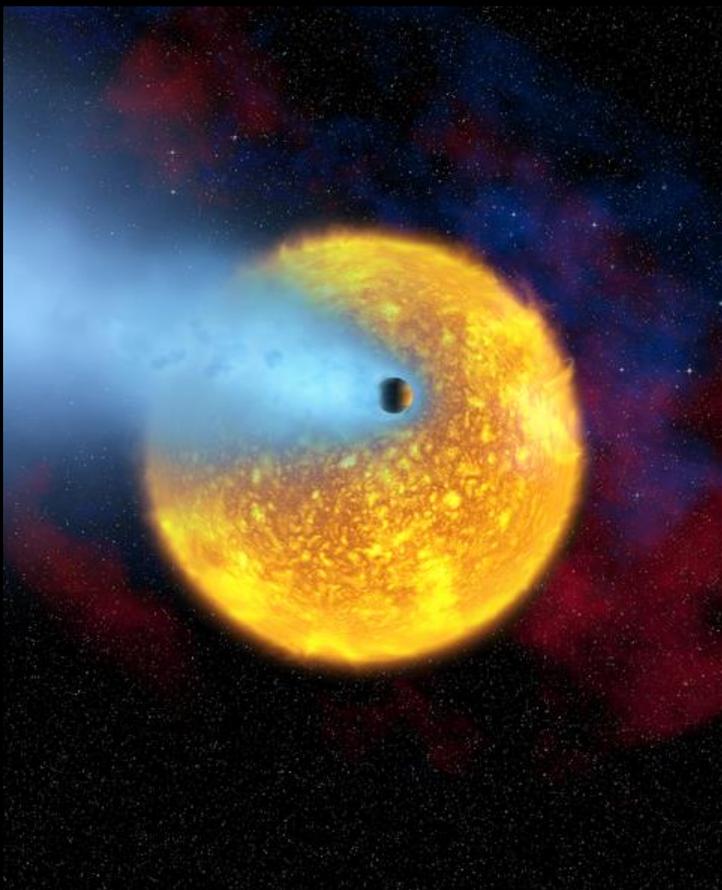
Большие планеты делают оборот вокруг своей звезды не за годы, а за часы!

Температура внешних слоев составляет тысячи градусов!

Неудивительно, что некоторые планеты раздуваются и даже испаряются!

Правда, горячие юпитеры довольно редки: $\sim 1\%$ звезд.

Хтонические миры



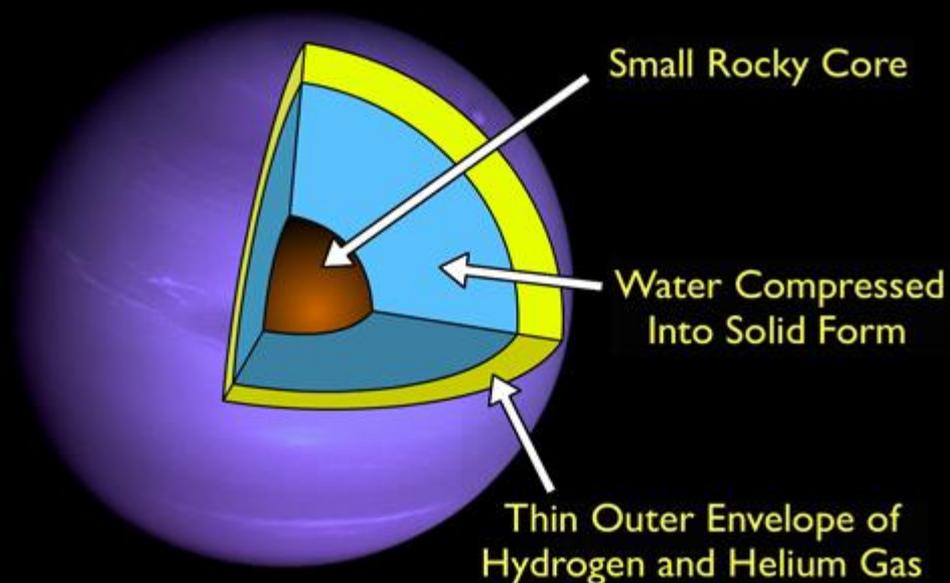
Если взять газового гиганта и пододвинуть его близко к звезде, то внешние слои могут испариться, и в результате останется только твердое ядро.

Это и есть хтоническая планета.

Кандидат COROT-7b.

Горячие нептуны

Inside Gliese 436b



Масса как у Урана или Нептуна,
а расстояние от звезды –
меньше чем у Земли.

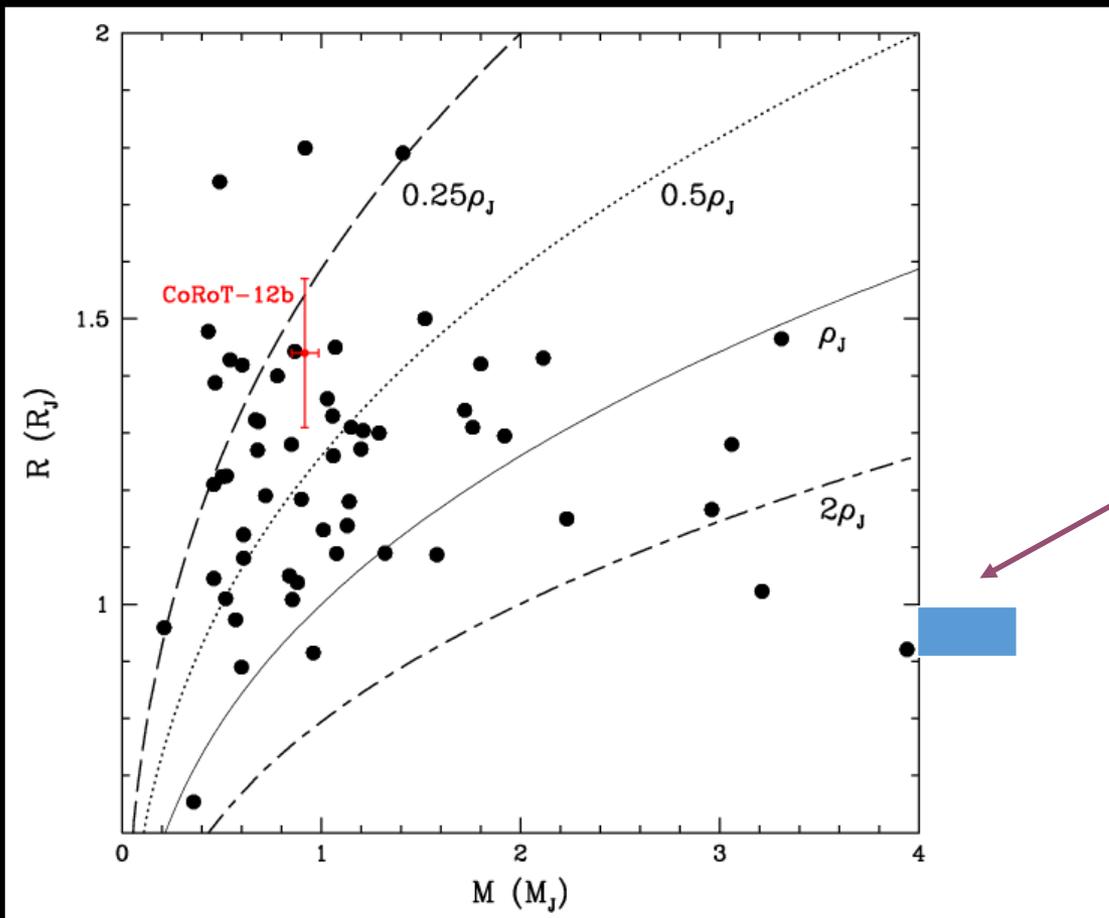
Планета-океан



Если ледяная планета
подойдет слишком
близко к звезде,
то может стать
планетой-океаном

Кандидат: GJ1214b

Плотная гигантская планета: CoRoT-20b



Горячий юпитер
Плотность 8-9 г/см³

Масса 4-4.5 $M_{\text{ЮПИТЕРА}}$

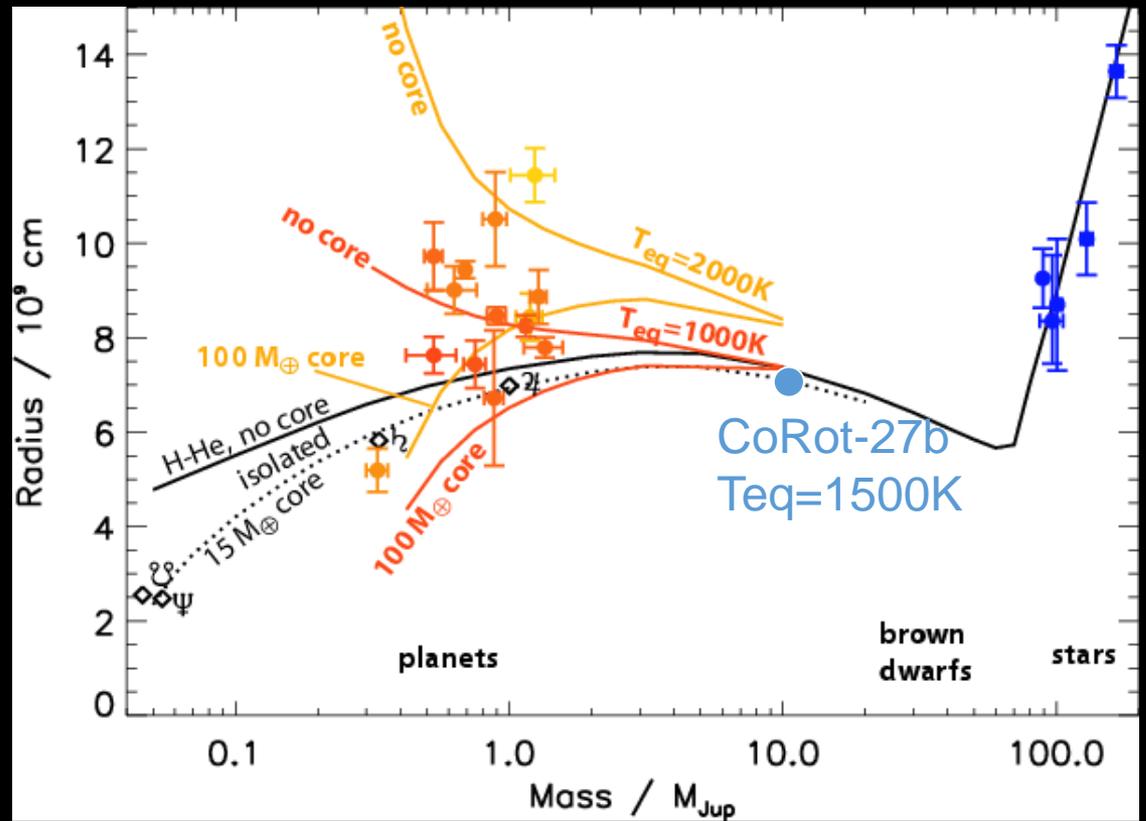
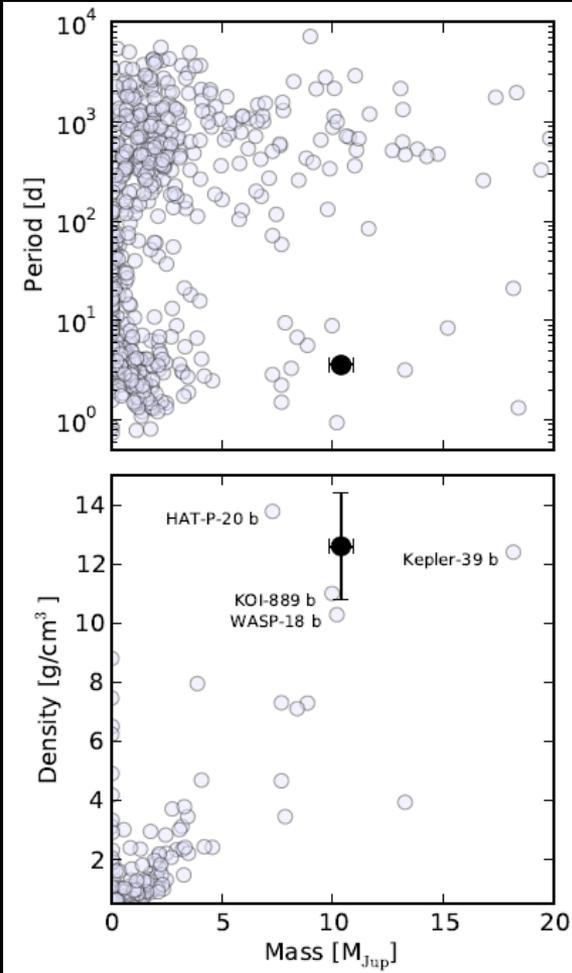
Радиус 0.8-0.9 $R_{\text{ЮПИТЕРА}}$

Орбита имеет большой (0.56) эксцентриситет и должна сильно эволюционировать.

Существование такой планеты ставит интересные вопросы перед моделями формирования и эволюции экзопланет

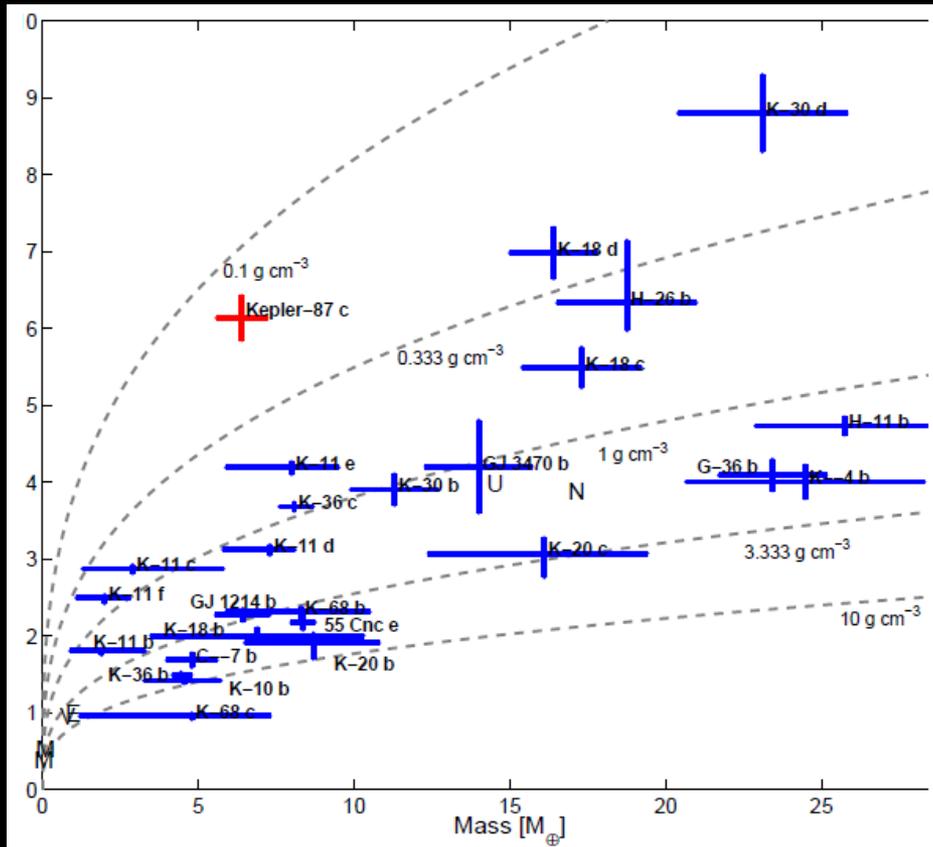
... еще плотнее: CoRot-27b

Горячий юпитер (орбитальный период – пол-недели).
Переходный тип между планетами и бурными карликами?



1401.1122
0704.1919

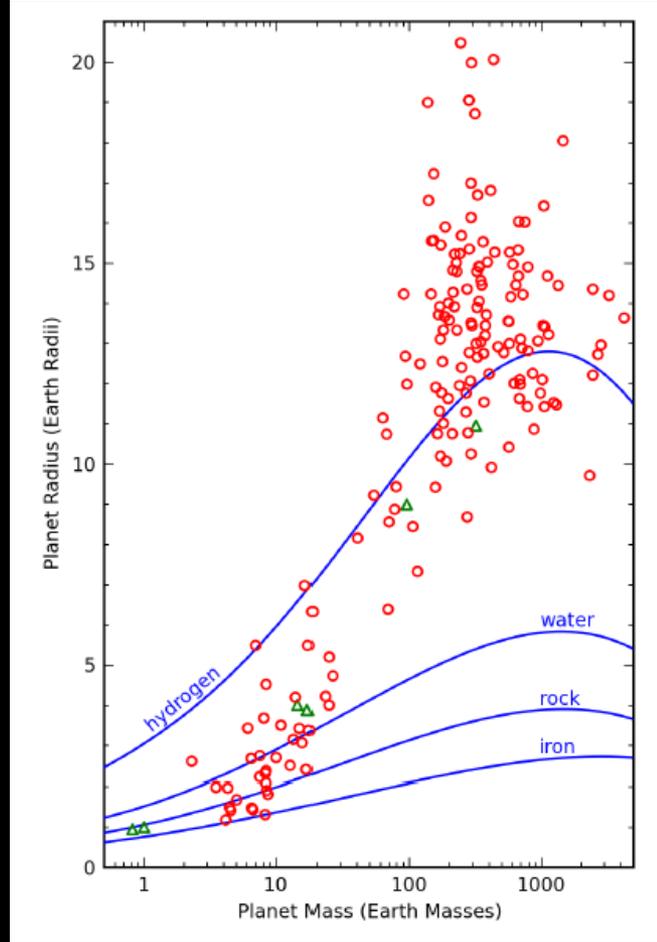
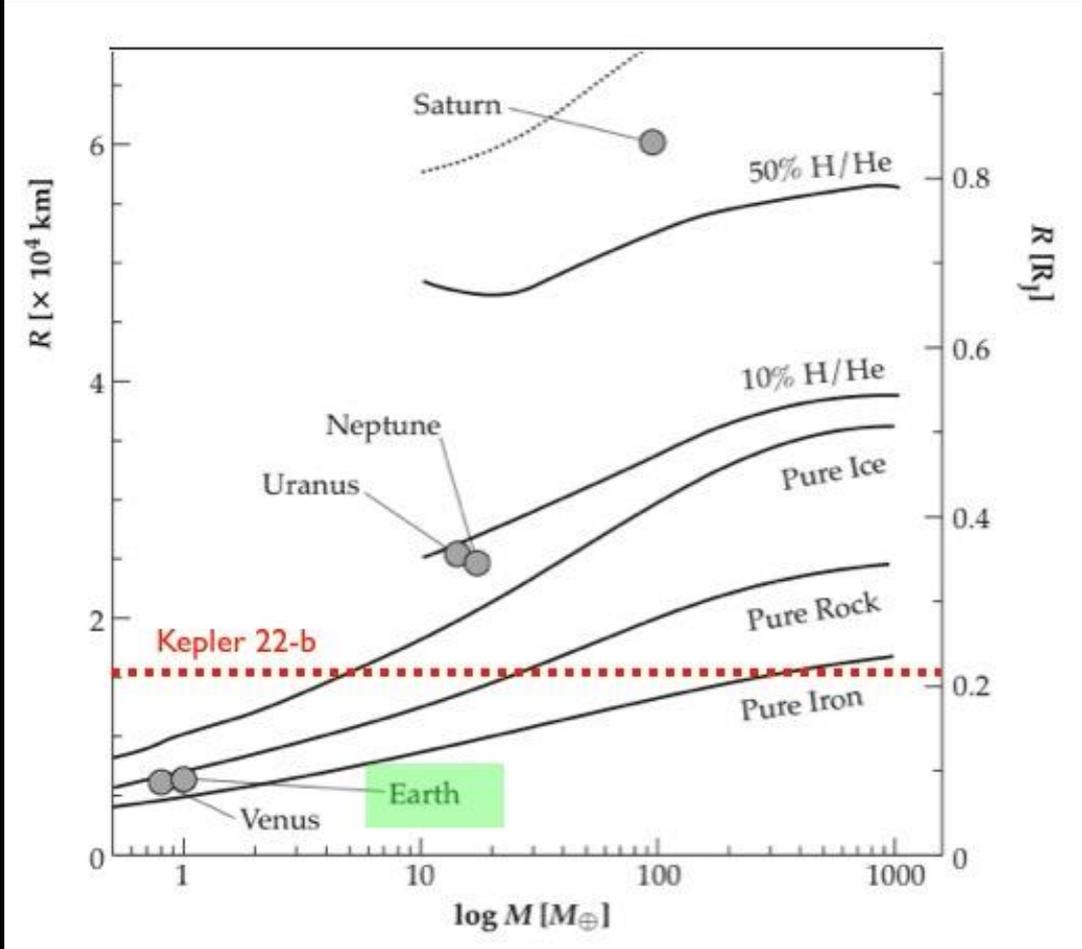
Планеты низкой плотности



Kepler-87c
 $M \sim 6.5 M_{\text{Earth}}$
 $R \sim 6.1 R_{\text{Earth}}$
 Плотность $\sim 0.15 \text{ g/cm}^3$
 $T_{\text{orb}} \sim 192 \text{ дня}$
 (на конец 2013 года
 это был рекорд для
 транзитных планет у
 одиночных звезд)

Система старая,
 планета сильно не греется

Состав планет



Непохожие близнецы

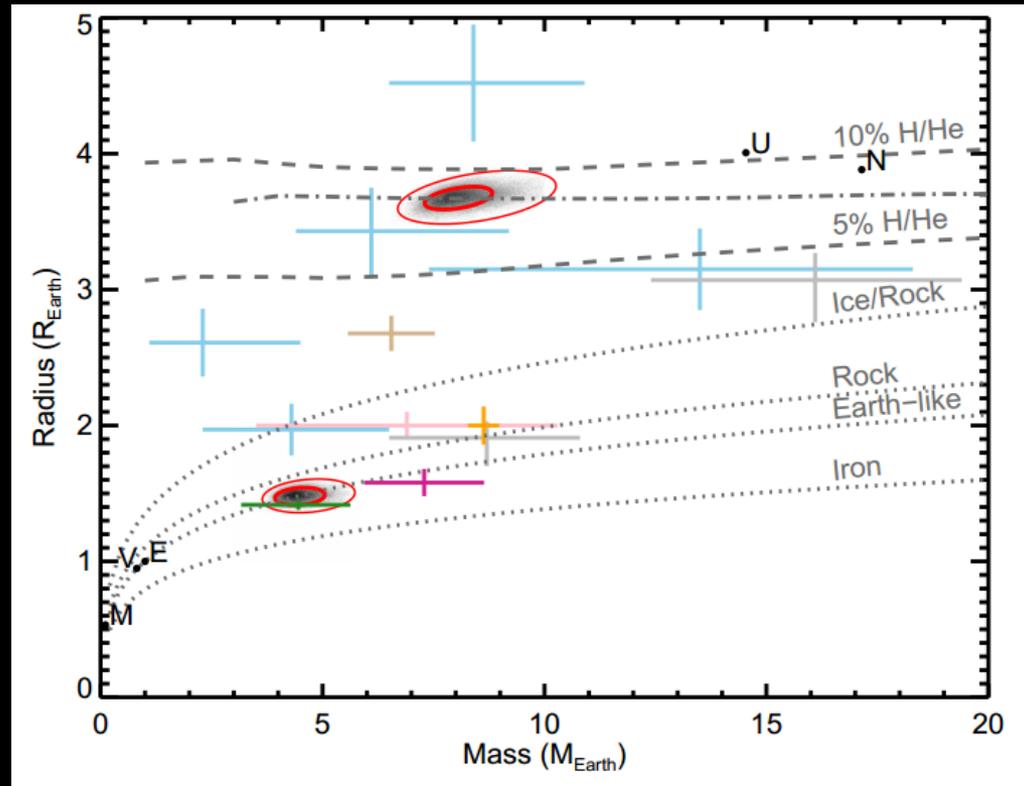
Кеплер – 36.

Пара планет на близких орбитах,
но с очень разными свойствами.

Одна – каменная сверхземля.
Другая – аналог Нептуна.

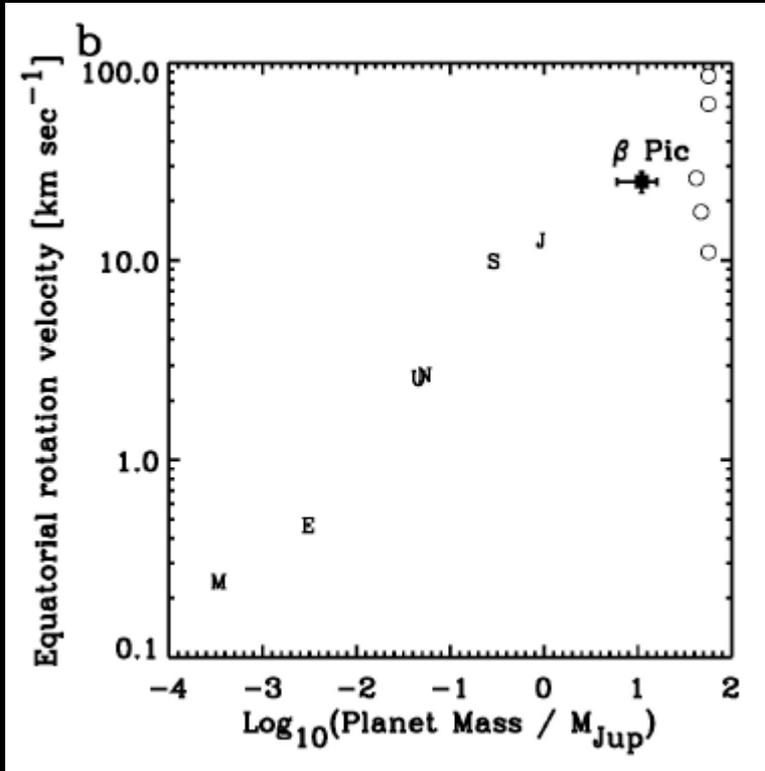
Орбитальные периоды планет:
16.8 и 13.2 дня.

Большие полуоси орбит планет:
0.115 и 0.128 а.е.

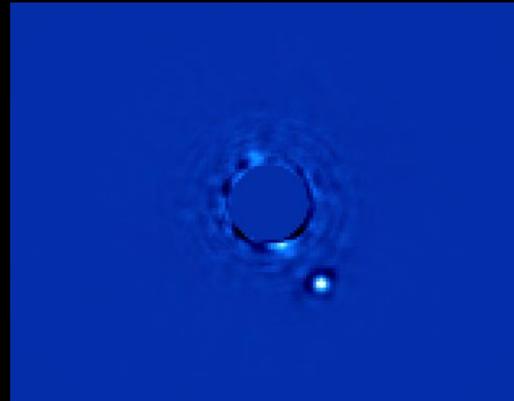


Плотности отличаются в 8 раз!

Быстро вращающаяся планета



Скорость вращения 25 км/с
Сутки делятся 7-9 часов.



бета Живописца

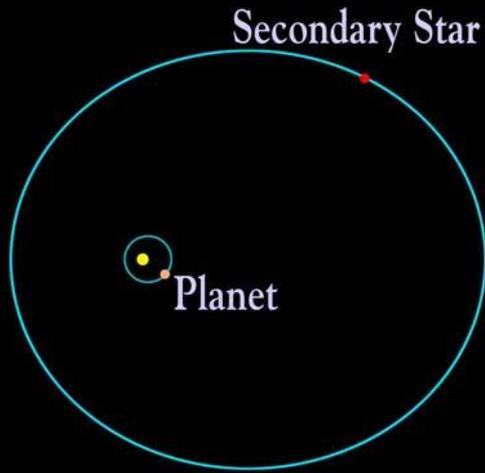


Наблюдения на VLT

1404.7506

Планеты у двойных звезд

Есть две основные конфигурации:
близко к одной из звезд или далеко от обеих

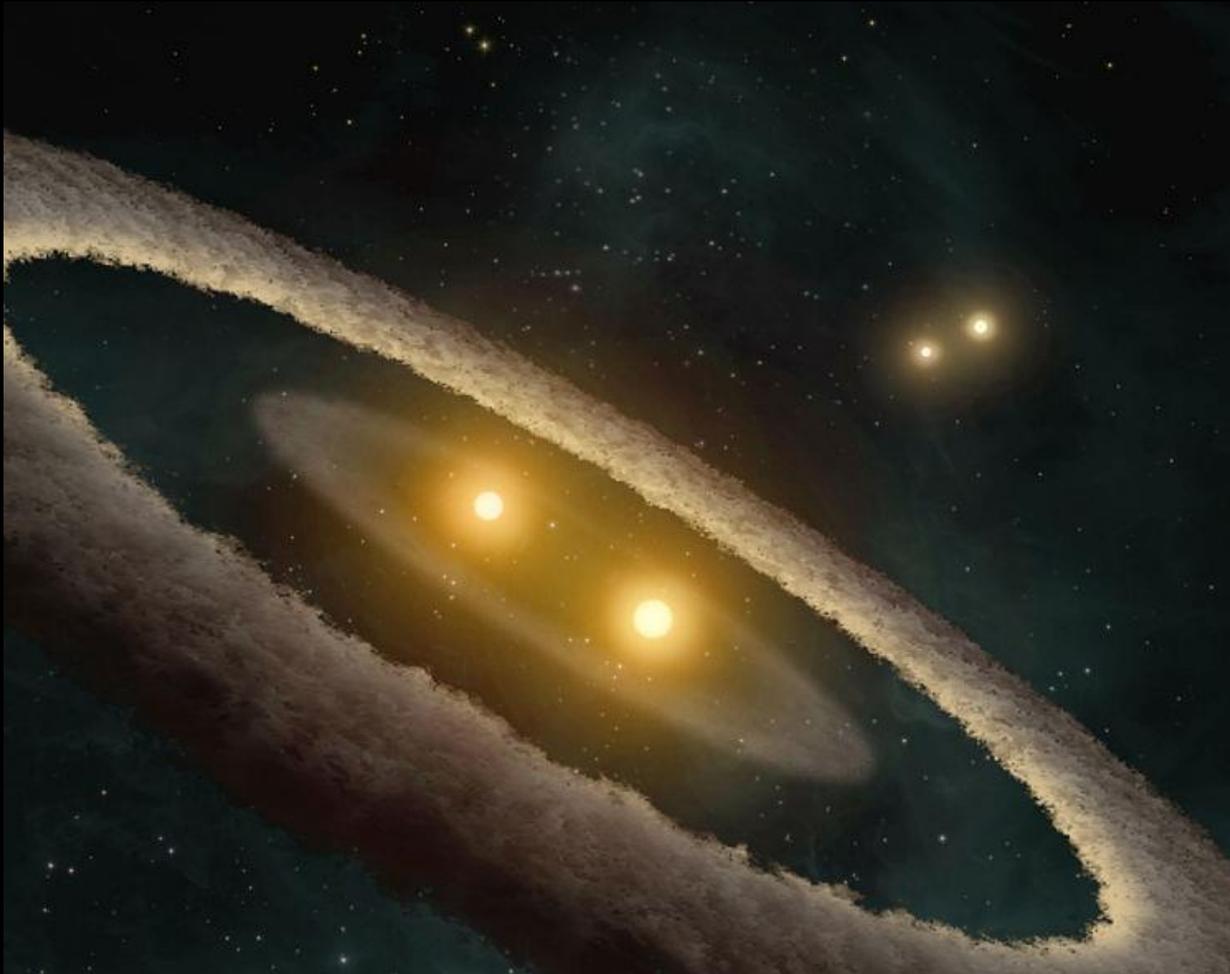


[1 AU = distance between Earth and Sun]



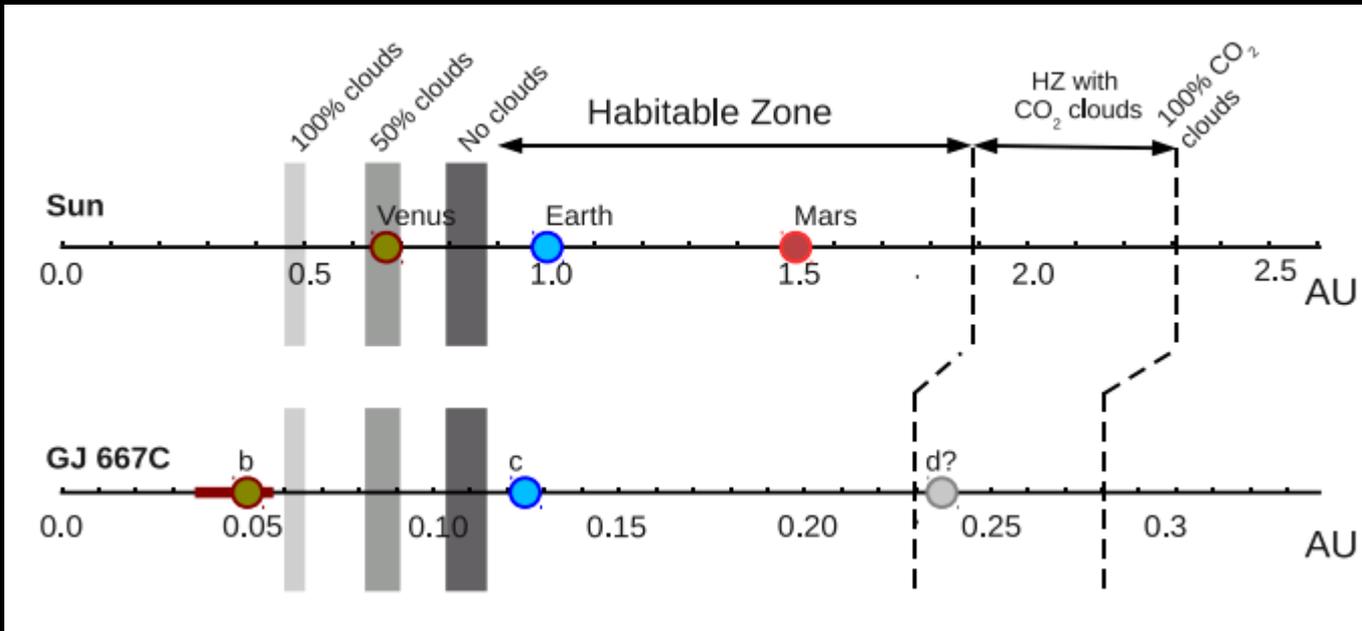
Планеты в двойных

Сейчас известно около сотни планет у двойных звезд.



Мы даже видим
протопланетные диски
в двойных системах.

Планета в зоне обитаемости у тройной звезды



Новый анализ
данных HARPS

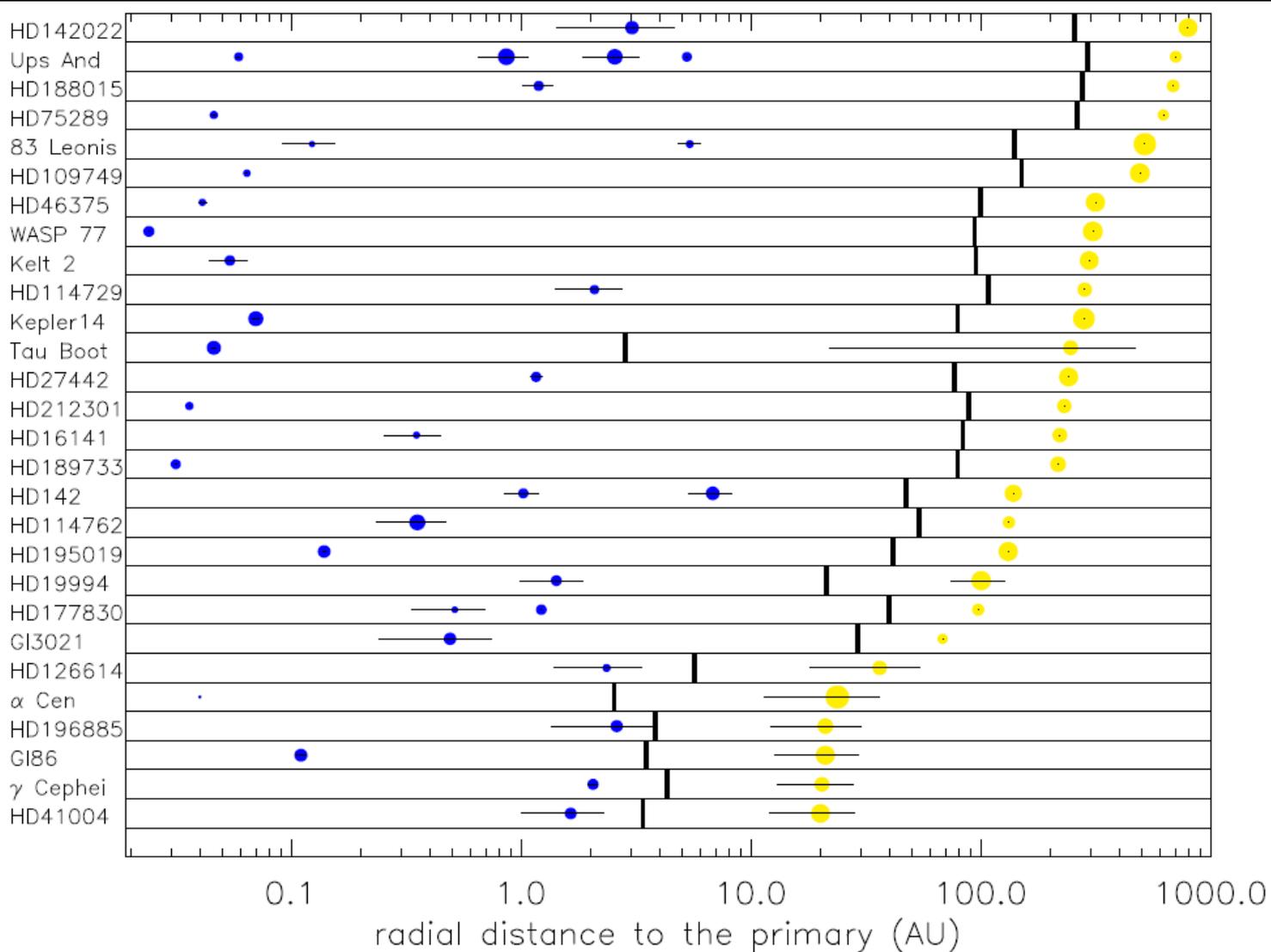
Три планеты

Одна из них (c) –
в зоне обитаемости.
Ее масса $>4.5 M_{\text{Земли}}$

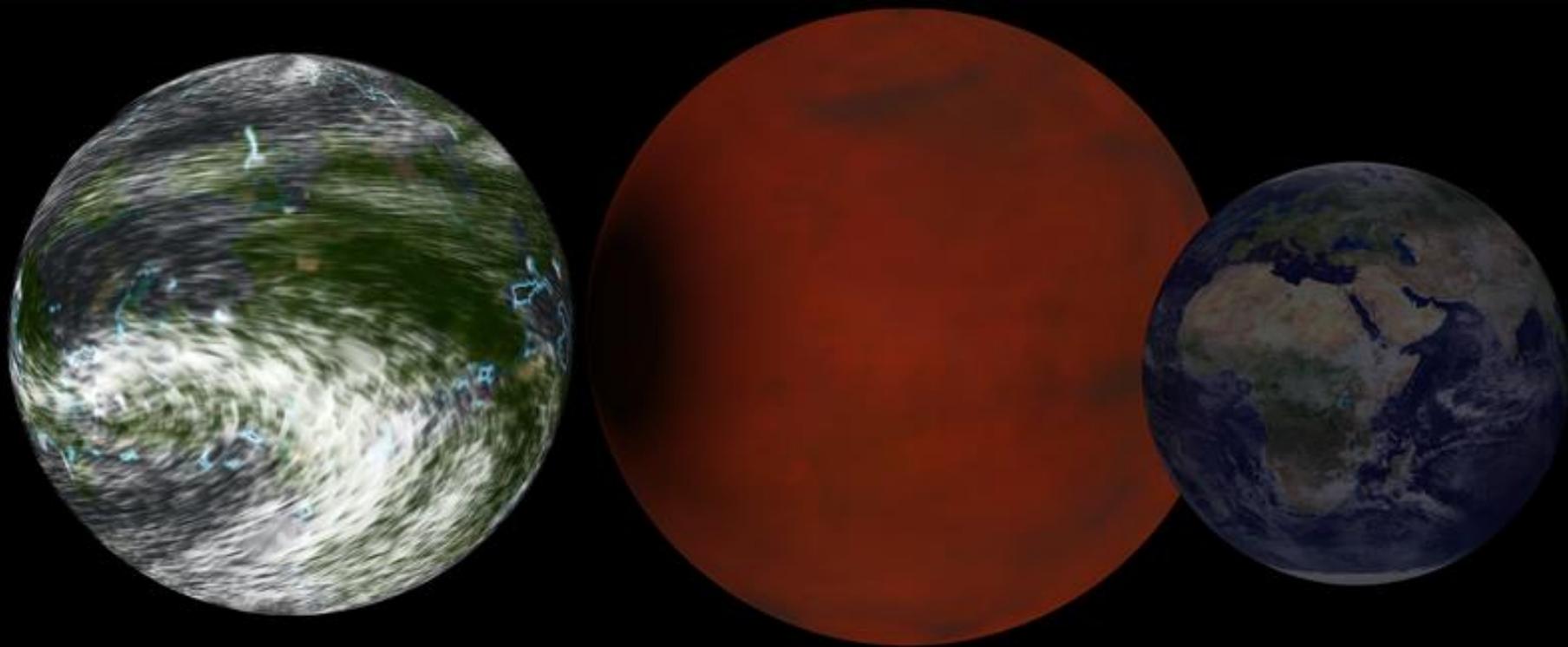
Звезда – близкий (20 св. лет) красный карлик. Он вращается вокруг двойной системы из двух К-карликов. Расстояние до пары >250 а.е. Звезда имеет пониженную металличность.

Структура систем в двойных

1406.1357

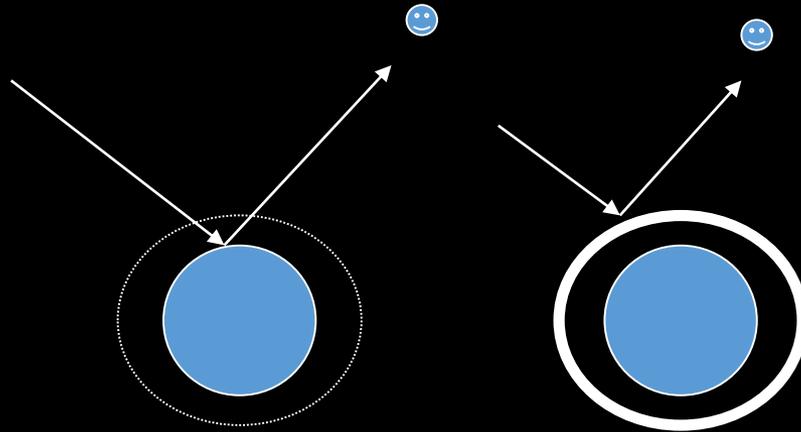


Сверхземли



В несколько раз тяжелее Земли. Состав может быть очень разным.
Часть может быть обитаемыми.

Облака в атмосфере сверхземли GJ 1214b

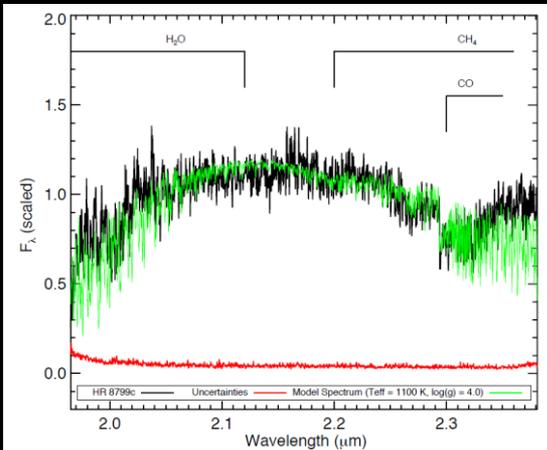


Если планета не покрыта сплошным слоем облаков, то в спектре отраженного света мы увидим линии поглощения, связанные с газами в атмосфере. Если же все закрыто облаками, то линий не будет. Наблюдения показали, что линий нет.



Инфракрасные наблюдения
на Космическом телескопе

Вода и СО в спектре планеты

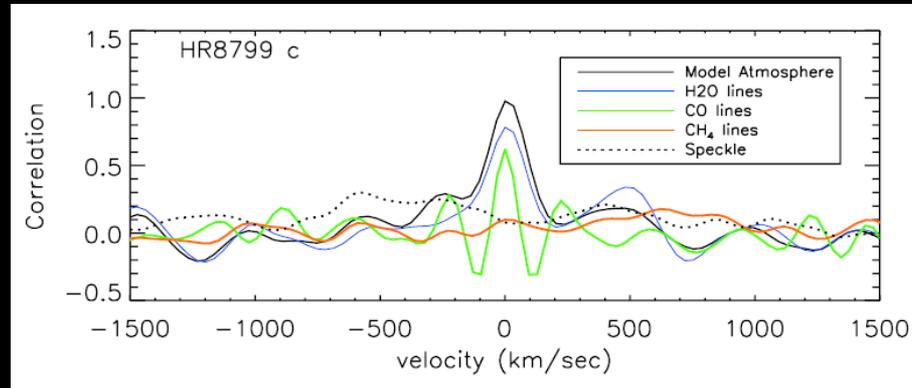


Детальная обработка показала наличие спектральных деталей, связанных с присутствием воды и монооксида углерода в атмосфере планеты HR 8799c.

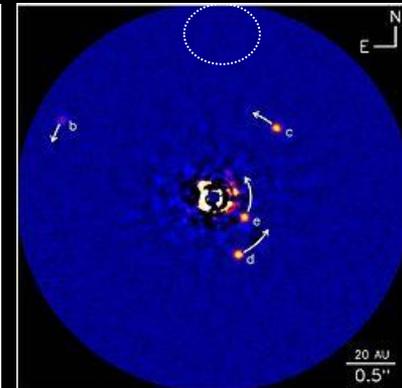
ИК-спектр HR 8799



Наблюдения на Кекс II



1303.3280



HR 8799

Вода в останках планеты

Исследовался околозвездный диск вокруг белого карлика. Полагают, что диск образовался в результате разрушения каменной планеты (или крупного астероида). Диск постепенно выпадает на карлика.

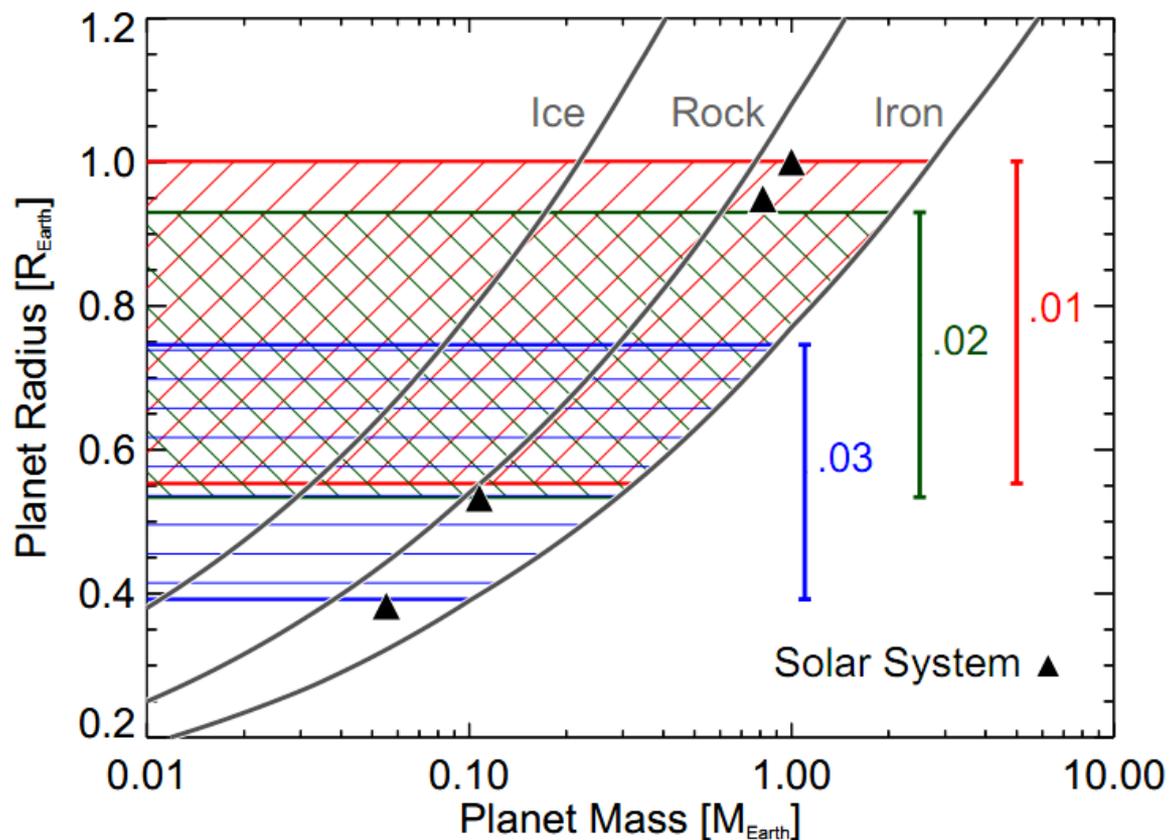
На Космическом телескопе получили детальные ультрафиолетовые спектры двух холодных белых карликов.

Для карлика GD 61 показано, что в его внешних слоях слишком много кислорода. Больше, чем могло появиться при выпадении из диска оксидов, связанных с минералами.

Единственное хорошее объяснение – в диске много воды. Т.е., вода была и в составе планеты, разрушение которой и привело к появлению диска.



Маленькие планеты



KOI 961

Радиусы:
0.5-1 радиуса Земли
0.5-0.9 и 0.4-0.8

Звезда – близкий
M-карлик (100 св.лет)

Орбитальные периоды
от 0.5 до 2 дней.

Похожая на Землю?

Kepler-78b

Впервые одновременно
с достаточно высокой точностью
измерены и масса, и радиус:

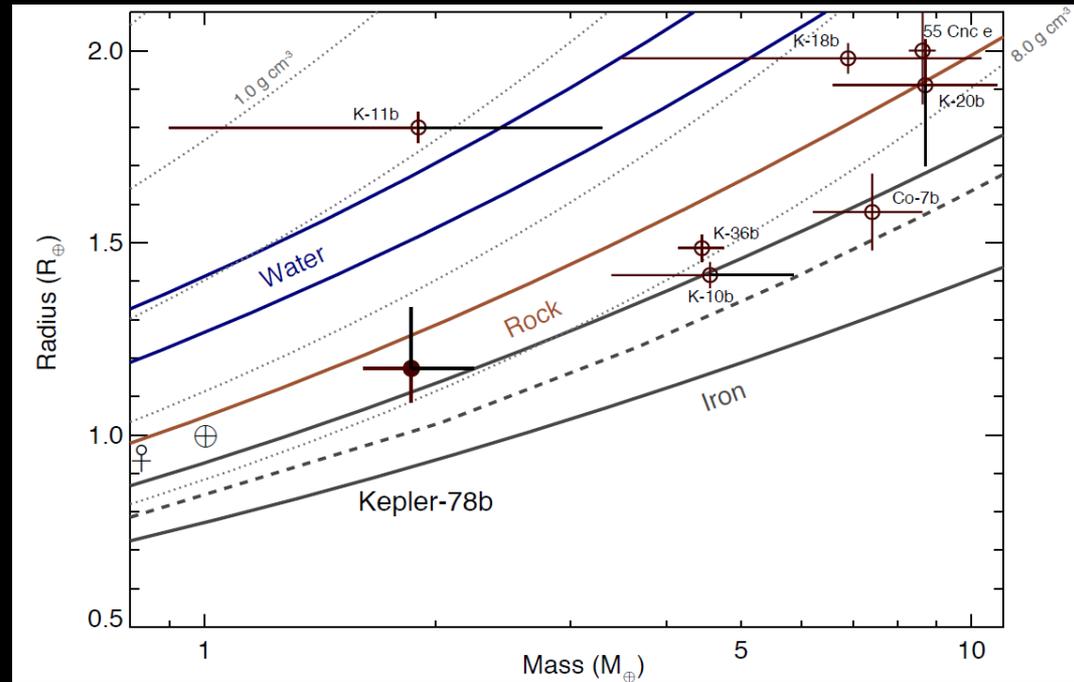
$M \sim 1.86 M_{\text{Earth}}$

$R \sim 1.16 R_{\text{Earth}}$

Плотность $\sim 5.57 \text{ г/см}^3$

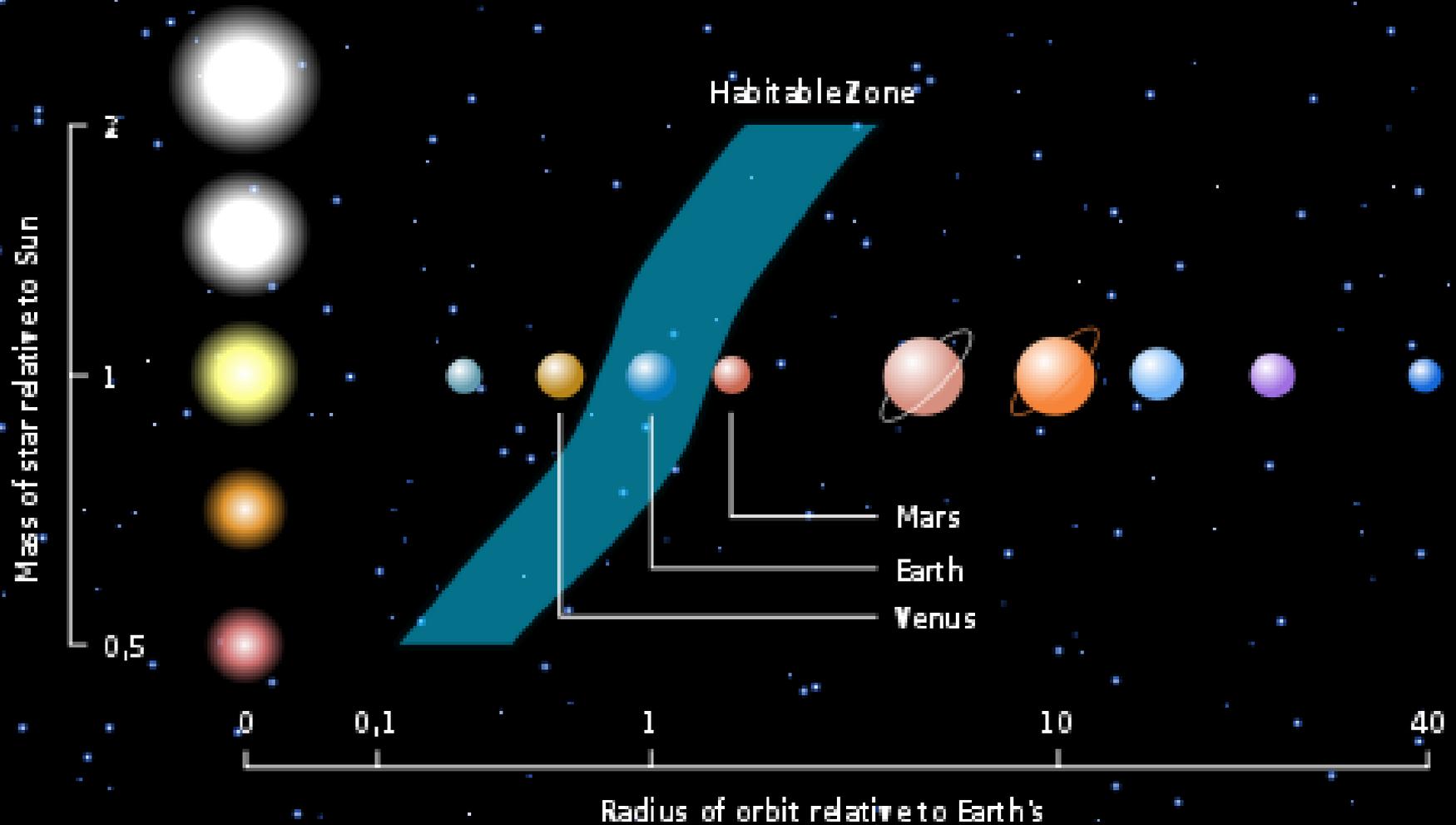
Правда, планета имеет
слишком короткий
орбитальный период: 8.5 часов.
Там жарко

Радиус измерен по данные Kepler,
масса – по данным HARPS

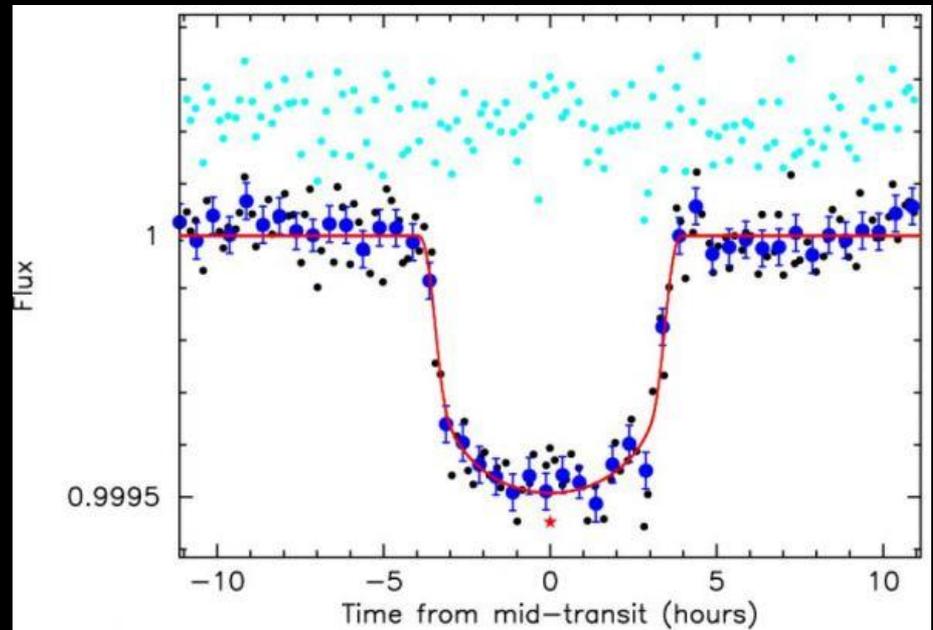
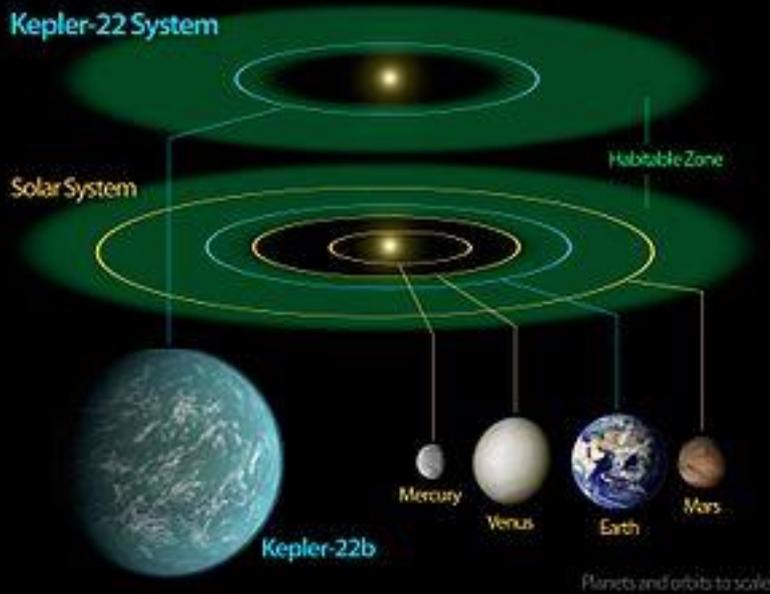


1310.7987

Планеты в зонах обитаемости

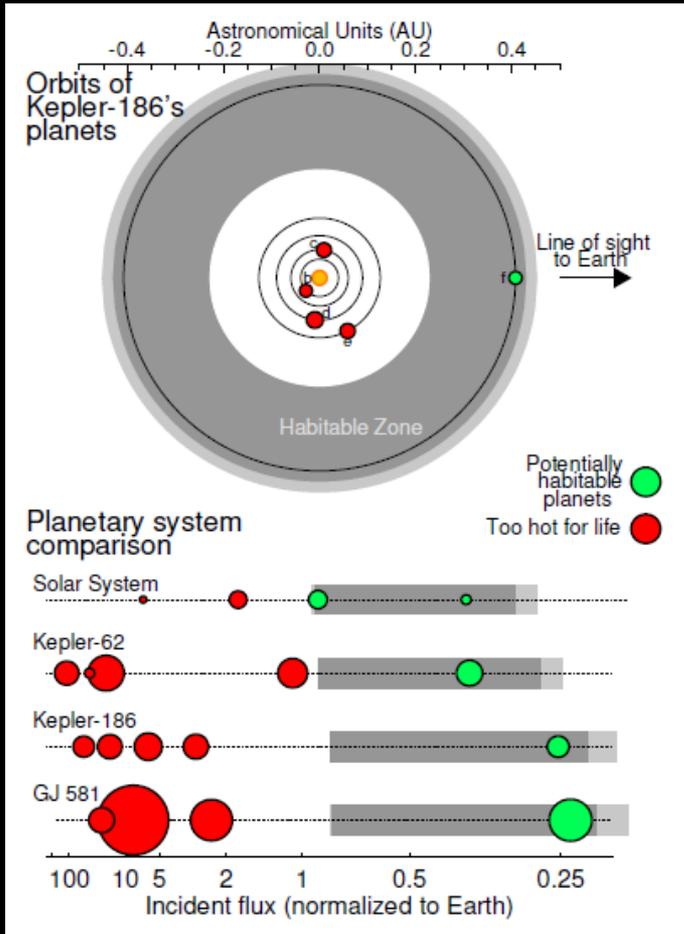


Планета Kepler-22b



Транзитная планета у близкой звезды типа Солнца (класс G5)
Радиус 2.25-2.5 земных. Для массы пока есть только верхний предел.
Орбитальный период 290 дней.
Планета находится в т.н. зоне обитания.

Система Кеплер-186

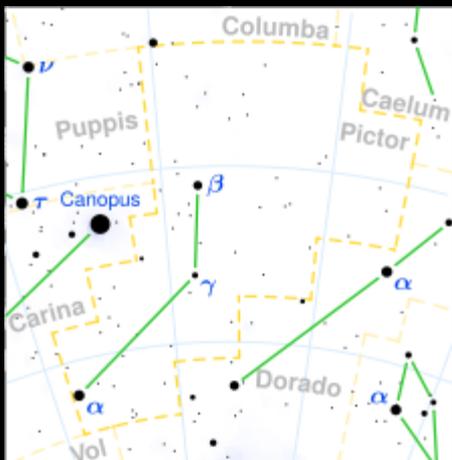


Пять планет вокруг красного карлика.
Все это небольшие планеты.

Кеплер-186f находится в зоне обитаемости
и имеет размеры порядка земного.

Планеты у звезды Каптейна

Звезда Каптейна



Поскольку это звезда гало, то она очень старая. Т.о., и планеты у нее старые.

Одна из них находится в зоне обитаемости.

Звезда с очень большим собственным движением (второе место после Барнарда). Это звезда гало, поэтому у нее большая скорость.



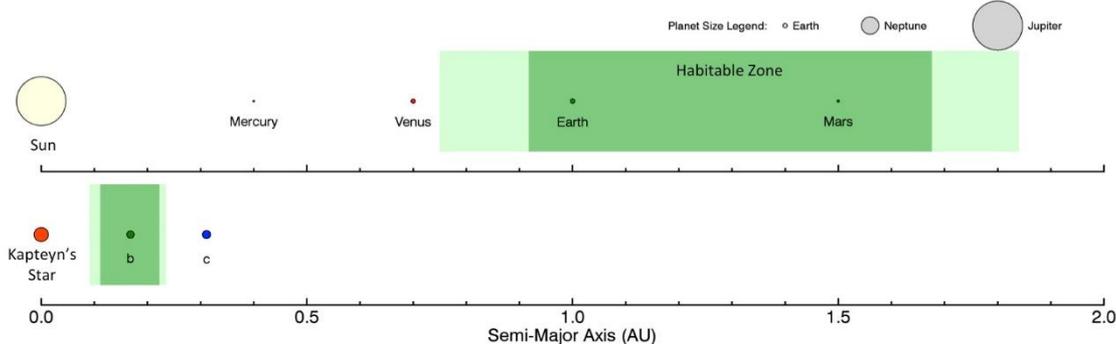
Kapteyn b

Earth



CREDIT: PHL @ UPR Arcibo

Inner Solar System and Kapteyn's Star



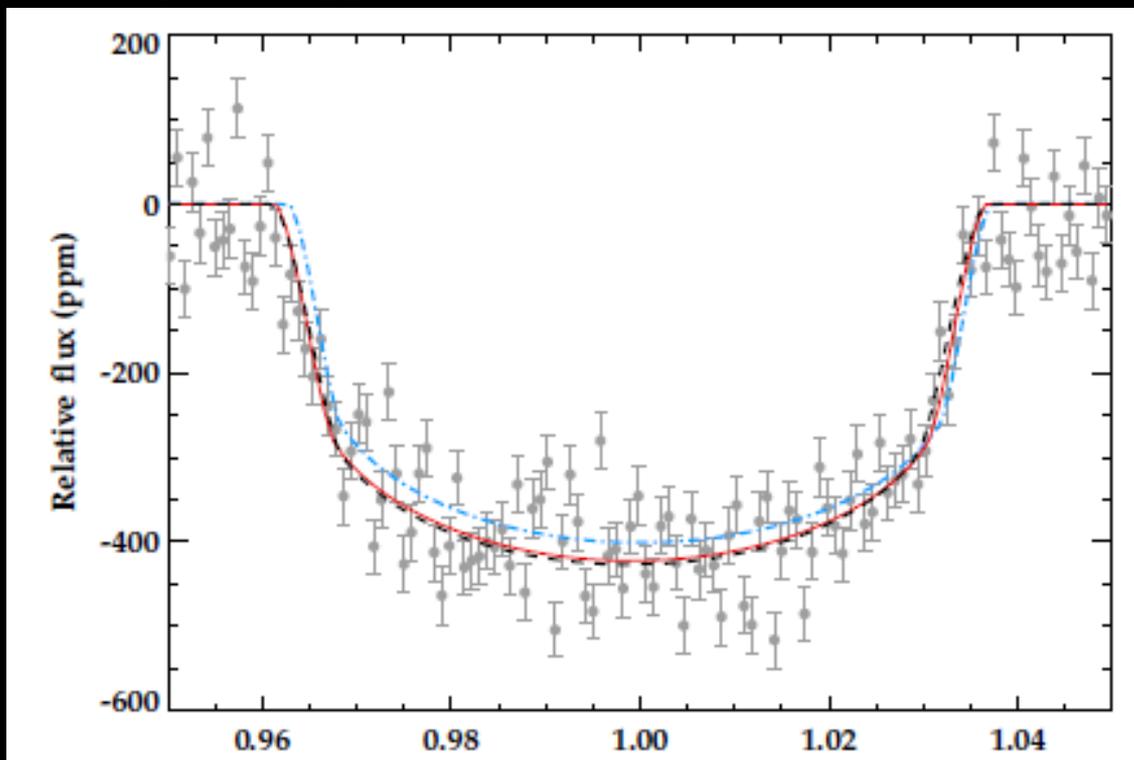
Stars Magnified x10, Planets Magnified x100

Credit: PHL @ UPR Arcibo

Планеты вокруг звезд-гигантов

Известно несколько десятков таких планет.

Они особенно интересны в связи с пониманием судьбы планетных систем на поздних стадиях эволюции звезд.



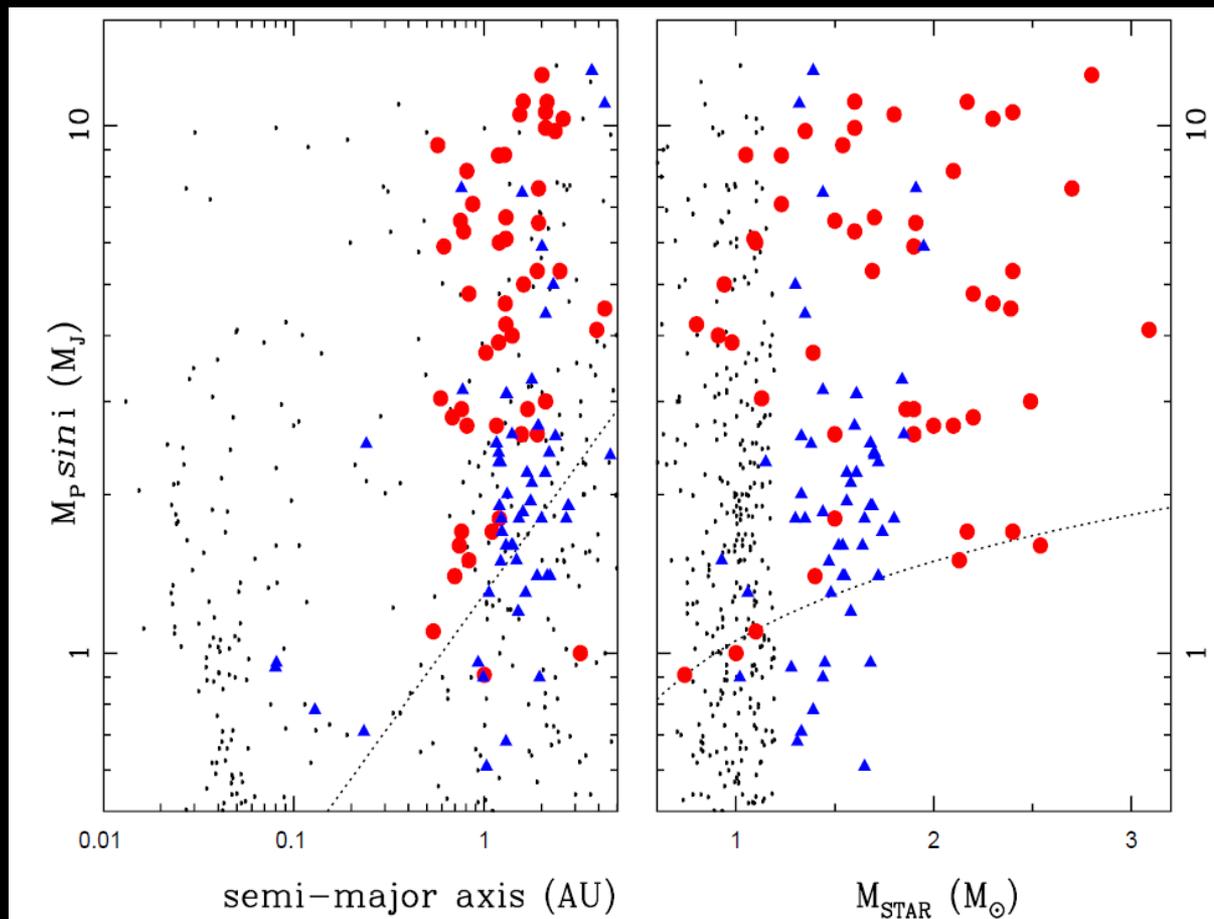
Кеплер-91

Планета Кеплер-91b, во-первых, является самой близкой к звезде среди планет у гигантов (<1.5 радиуса звезды над поверхностью). Звезда закрывает 10% неба!

Во-вторых, через <55 млн лет планета упадет на звезду.

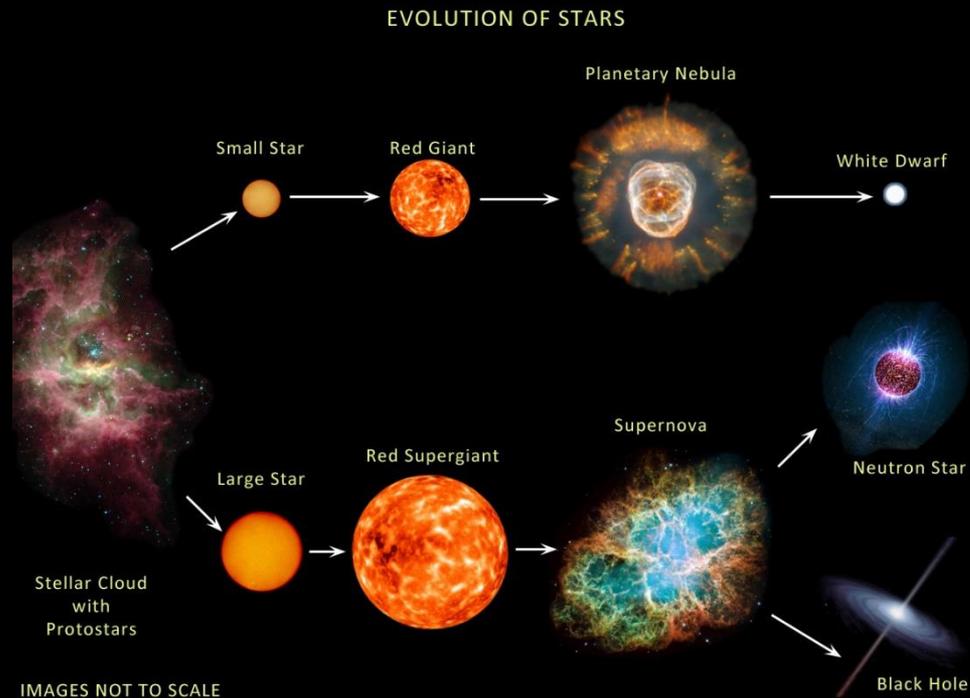
Статистика планет вокруг гигантов

1406.0884



Все надежные планеты
вокруг гигантов
вращаются не слишком
близко к самой звезде

Выброс планет звездами

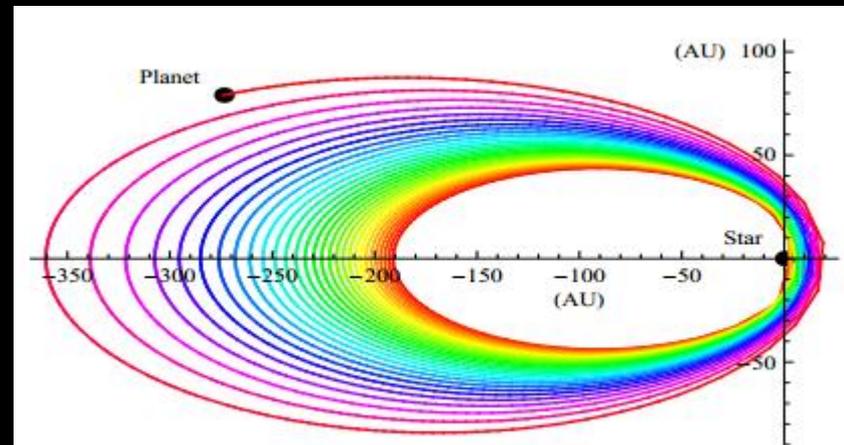


Что происходит с планетами в ходе эволюции звезды?

У звезд типа Солнца планеты на орбитах, как в СС, останутся в системе, но орбиты будут шире. Поэтому и наблюдают планеты у белых карликов

Далекие планеты могут «улетать»

Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!



Одинокие планеты



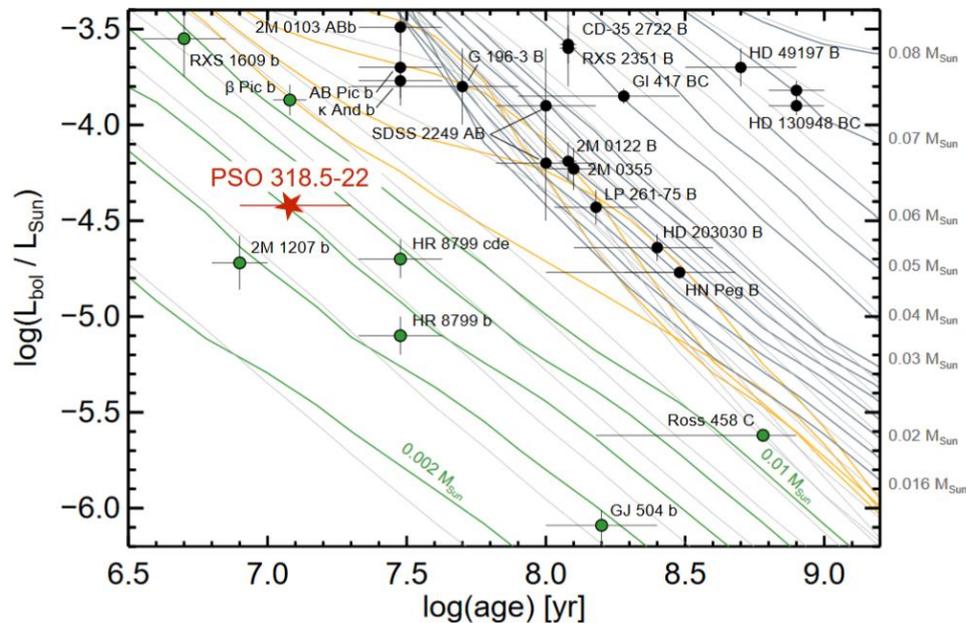
Во-первых, планеты могут покидать звездные системы:

- а) взрывы сверхновых
- б) сброс оболочек
- в) взаимодействие между планетами
- г) сближение с другой звездой
- д) взаимодействие в двойной системе

Во-вторых, некоторые ученые считают, что планеты могут образовываться и без звезд.

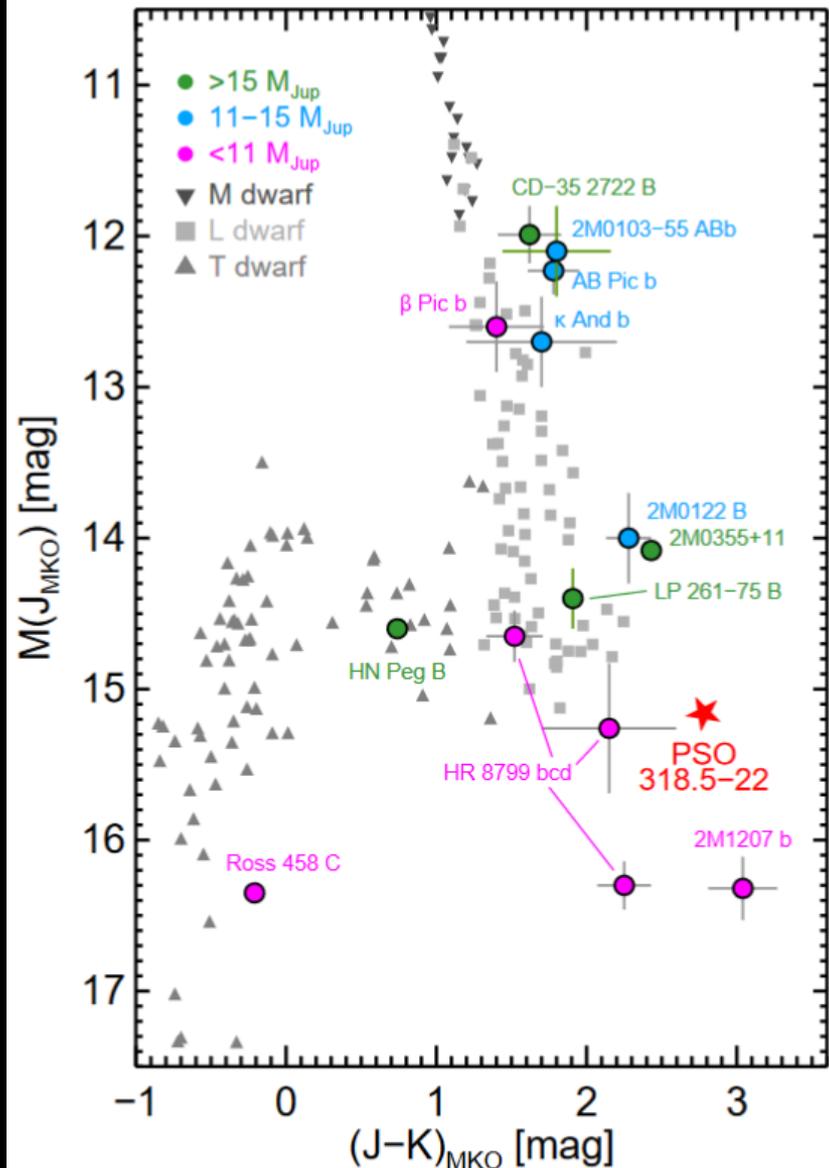


PSO 318.5-22



Physical Properties (age = 12^{+8}_{-4} Myr)

Mass (M_{Jup})	6.5 (-1.0, +1.3)
$T_{\text{eff,evol}}$ (K)	1160 (-40, +30)
$\log(g_{\text{evol}})$ (cgs)	3.86 (-0.08, +0.10)
Radius (R_{Jup})	1.53 (-0.03, +0.02)



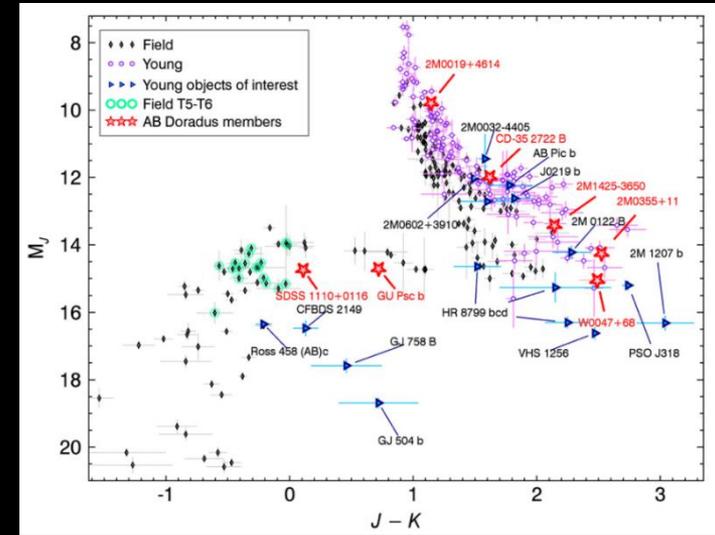
SDSS J1110+0116

Properties of Brown Dwarf High-confidence Candidates Or Bona Fide Members of AB Doradus

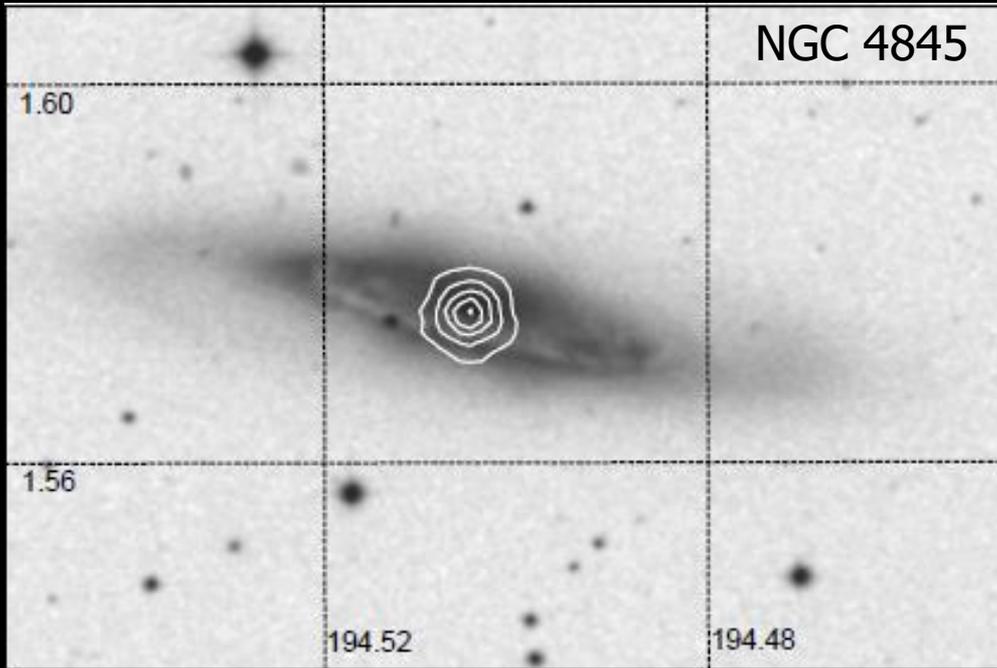
Name	Bona Fide ?	References	Spectral Type ^a	References	$L_{\text{Bol}}^{\text{b}}$ $\log L_{*}/L_{\odot}$	Radius ^b (R_{Jup})	$T_{\text{eff}}^{\text{b}}$ (K)	$\log g^{\text{b}}$	Mass ^c (M_{Jup})
2MASS J00192626+4614078	N	(1)	M8 β	(2), (4)	-2.75 ± 0.08	1.65 ± 0.11	2890 ± 170	4.93 ± 0.04	80–111
CD-35 2722B	Y	(3)	L3 β	(2), (4)	-3.45 ± 0.08	1.27 ± 0.02	2200 ± 100	4.84 ± 0.06	39–51
2MASS J14252798–3650229	Y	(2)	L4 γ	(2)	-4.04 ± 0.01	1.23 ± 0.01	1590 ± 10	4.64 ± 0.04	25–29
2MASS J03552337+1133437	Y	(5)	L3–L6 γ	(2), (4)	-4.06 ± 0.03	1.20 ± 0.04	1590 ± 40	4.67 ± 0.05	21–30
2MASS J00470038+6803543	Y	(6)	L6–L8 γ	(2), (4)	-4.38 ± 0.03	1.28 ± 0.07	1280 ± 40	4.39 ± 0.15	13–22
GU Psc b	N	(7)	T3.5	(7)	-4.88 ± 0.06	1.19 ± 0.03	1000 ± 40	4.31 ± 0.06	10–13
SDSS J111010.01+011613.1	Y	(8)	T5.5	(9)	-4.99 ± 0.02	1.18 ± 0.02	940 ± 20	4.28 ± 0.04	10–12

Еще один объект, обнаруженный при поиске и изучении бурых карликов.

Оценки показывают, что масса объекта может попадать в планетный диапазон

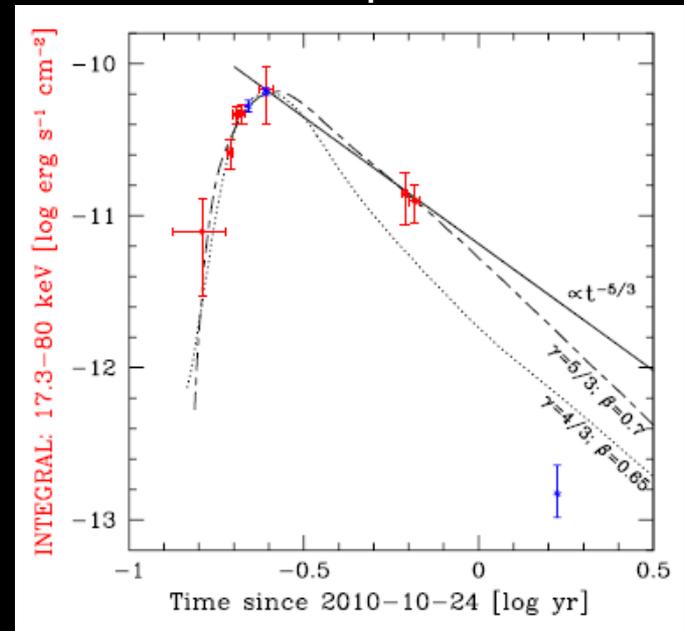


Приливное разрушение сверх-юпитера массивной черной дырой



Похоже на разрушение бурого карлика с массой 14-30 масс Юпитера черной дырой с массой ~ 300000 масс Солнца.

С помощью спутника INTEGRAL открыта сильная вспышка в рентгеновском диапазоне с жестким спектром.

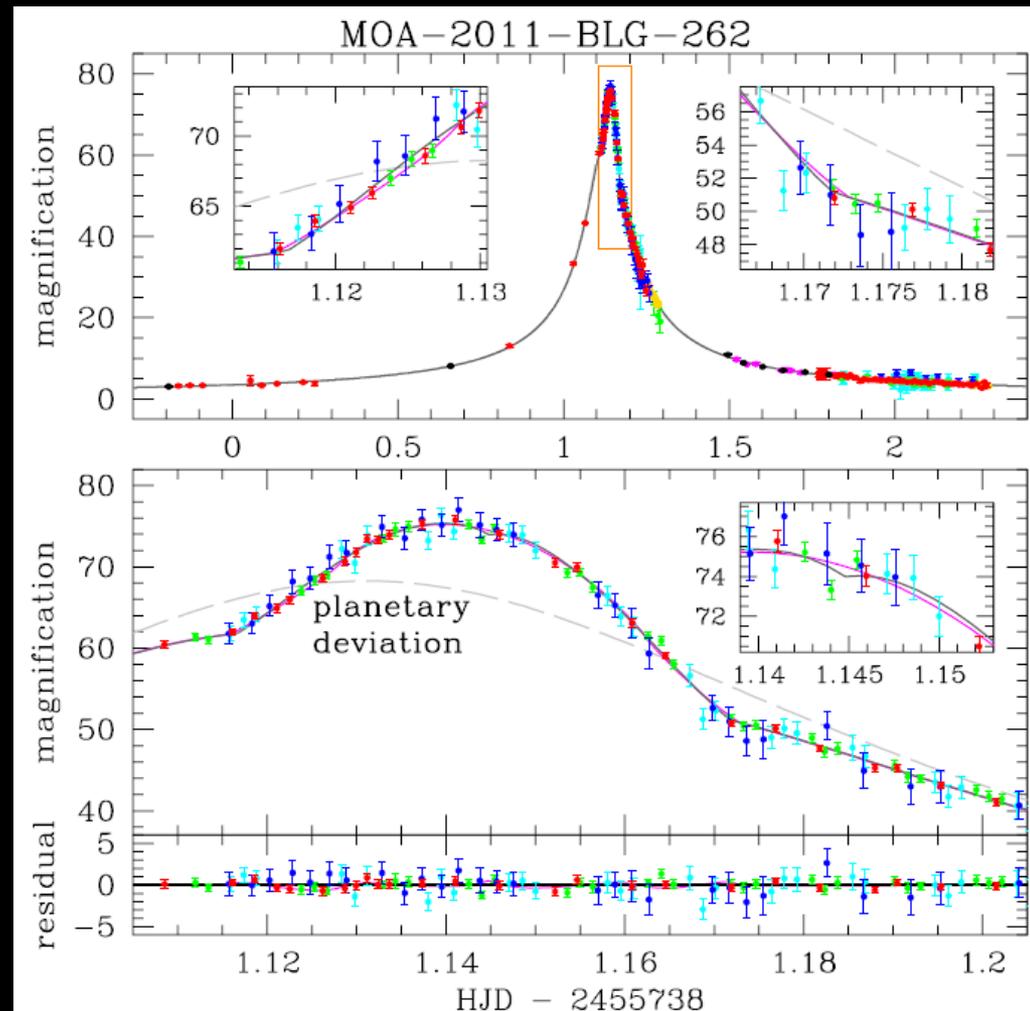
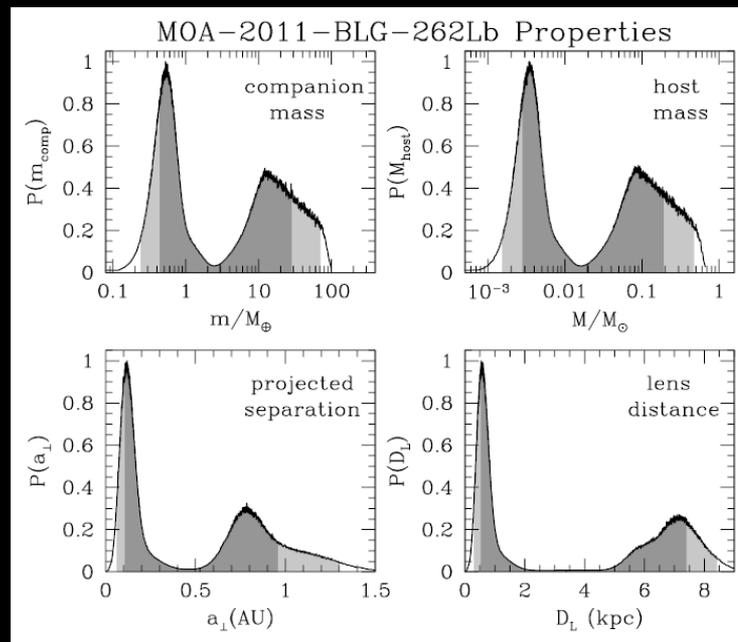


Экзопланета с луной, но без звезды?

Существует два решения:

1. $0.12M_{\text{sun}} + 18M_{\text{Earth}}$
2. $4M_{\text{Jup}} + 0.5M_{\text{Earth}}$

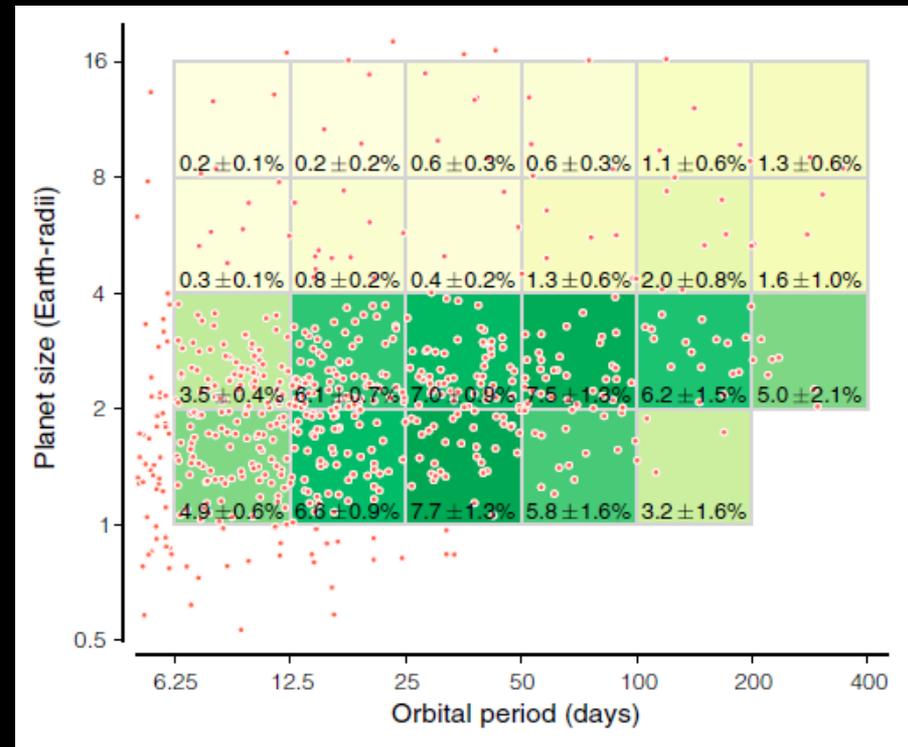
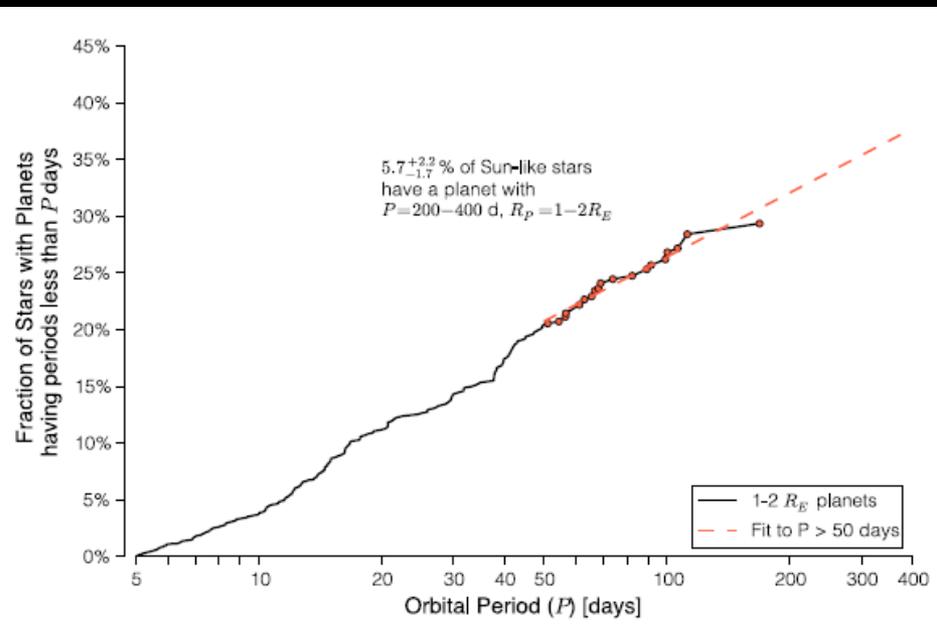
Проблема в определении расстояния до системы



1312.3951

Планеты типа Земли у звезд типа Солнца

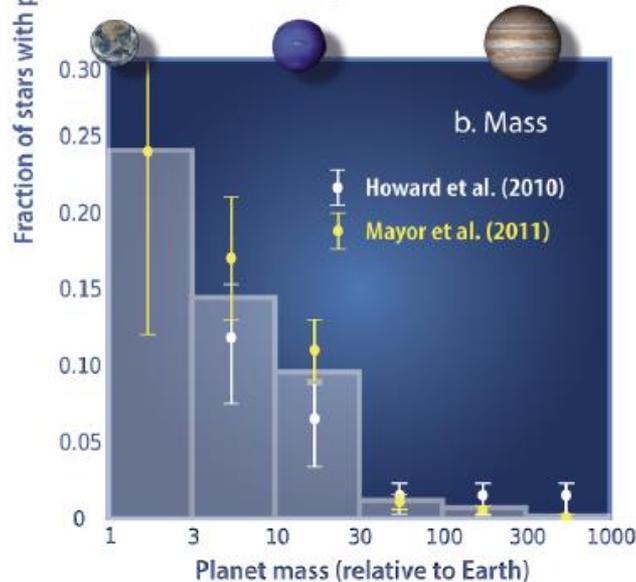
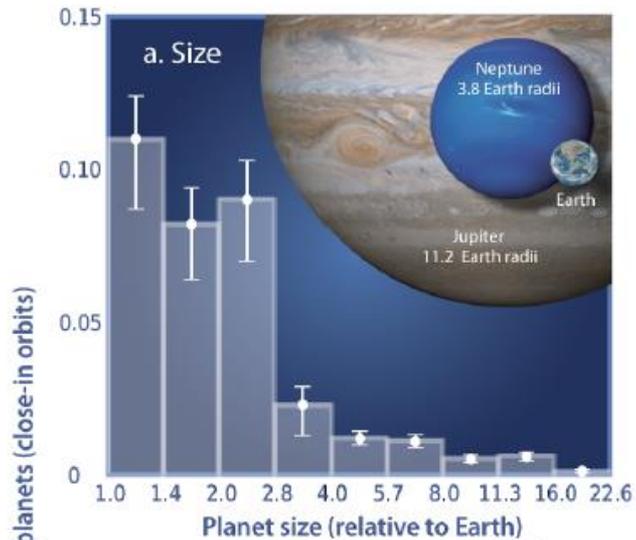
7-15% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли в зонах, где поток излучения отличается от земного менее чем в 4 раза.



3.5-7.5% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли с орбитальными периодами 200-400 дней.

Распределения по массам и размерам

Распределение по размерам построено для транзитных планет.



Распределение по массам построено на основе данных по лучевым скоростям звезд, у которых есть планеты с орбитальными периодами менее 50 дней.

Сколько каких планет?



Данные спутника Кеплер

- Земля
- Сверхземля
- Нептун
- Юпитер
- Самые большие

Мы плохо знаем, сколько каких планет, потому что мы ищем их разными способами.

Рекомендую сайт
Вики Воробьевой
<http://www.allplanets.ru/>