



Экзопланеты: мир иных миров

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

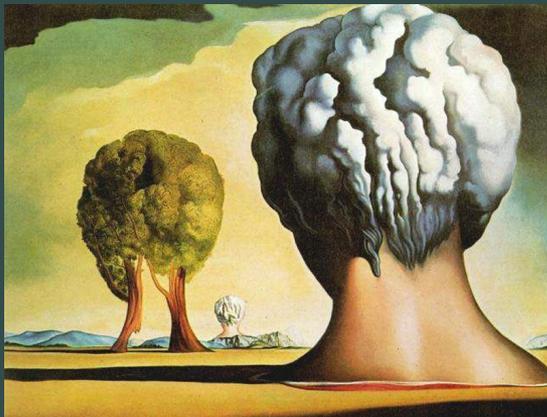
Экзопланеты

Одним из самых важных открытий последних 20 лет стало обнаружение экзопланет.

Первая была открыта в 1995.

Сейчас специализированные наземные программы и спутники существенно увеличили число известных планет у других звезд.

765 планет на 13 мая 2012 года exoplanet.eu

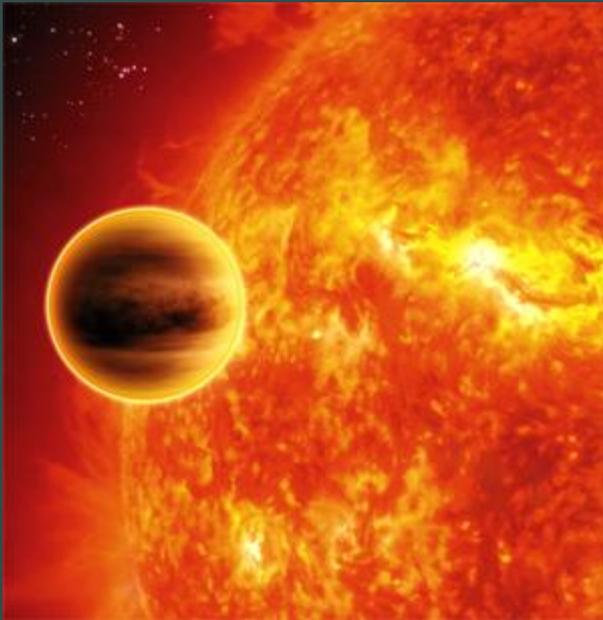


Область быстро развивается и с точки зрения новых наблюдений (и постройки приборов), и с точки зрения теории (т.к. оказалось, что многое мы не понимали или понимали не так).

Какая экзопланета была открыта первой?

- Первая надежно подтвержденная планета, вращающаяся вокруг другой нормальной звезды, была открыта в 1995 году Майором и Квелоцом.
- Однако еще в 1992 году надежнейшее обнаружение планеты было сделано Вольцшаном и Фрейлом, но вращалась она вокруг ... радиопульсара!
- В 1988 году появилась работа Кэмпбелла и др., в которой говорилось о планетном кандидате, но надежно подтвердить его удалось только в 2003 году.
- Наконец, в 1989 году Латам и др. открыли спутник одной из звезд, у которого до сих пор масса оценена недостаточно точно, чтобы сказать планета это или бурый карлик.

Главное открытие



Горячие юпитеры!

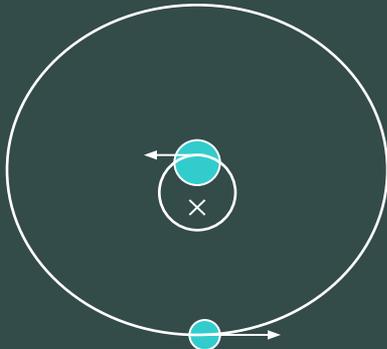
Первые открытые системы оказались совсем не похожи на Солнечную систему.

Гигантские планеты вращаются очень близко от своих звезд, иногда совершая оборот менее чем за сутки.

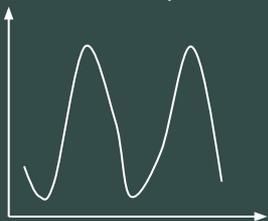
Как открывают?

1. Изменение лучевой скорости звезды (вращение вокруг общего центра масс системы звезда-планеты). 702 планеты.
2. Прохождение планеты по диску звезды. 231 планета.
3. Микролинзирование. 15 планет.
4. По таймингу (пульсары, белые карлики и двойные). 17 планет.
5. Прямые изображения. 31 планета.

Лучевые скорости



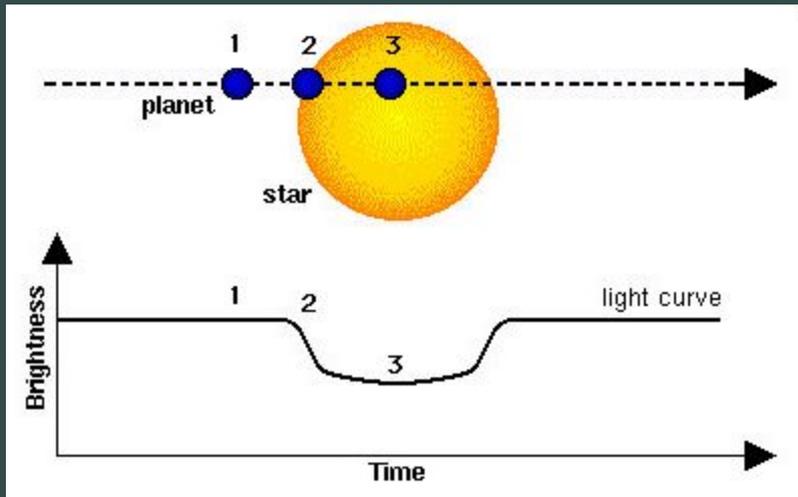
Видим только яркую звезду.
Будет заметно, что она движется
то к нам, то от нас.



Измеряем:
- Период
- Массу



Транзитные экзопланеты

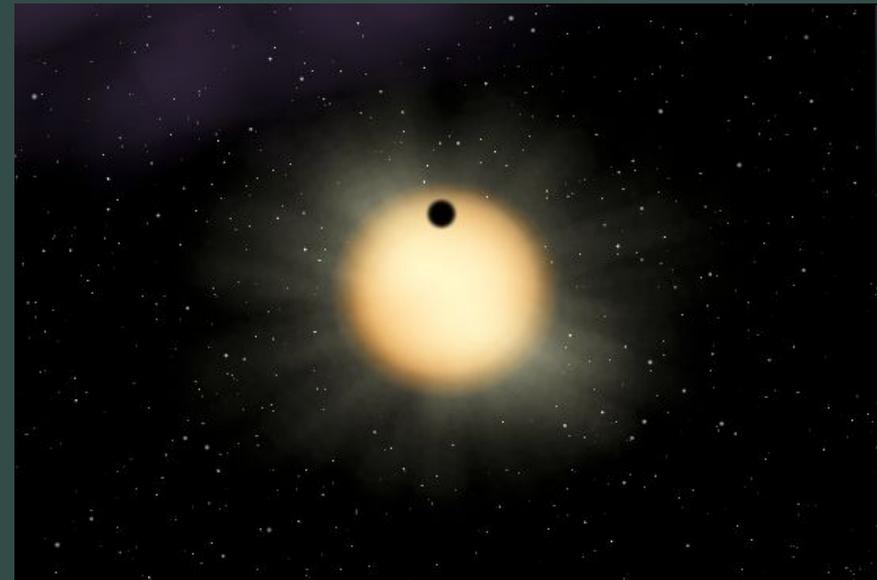


Прохождение планеты по диску звезды (мы почти в плоскости орбиты).
Ослабление блеска звезды из-за «затмения».

Измеряем период и радиус.

Сейчас известны
сотни транзитных планет
и тысячи кандидатов

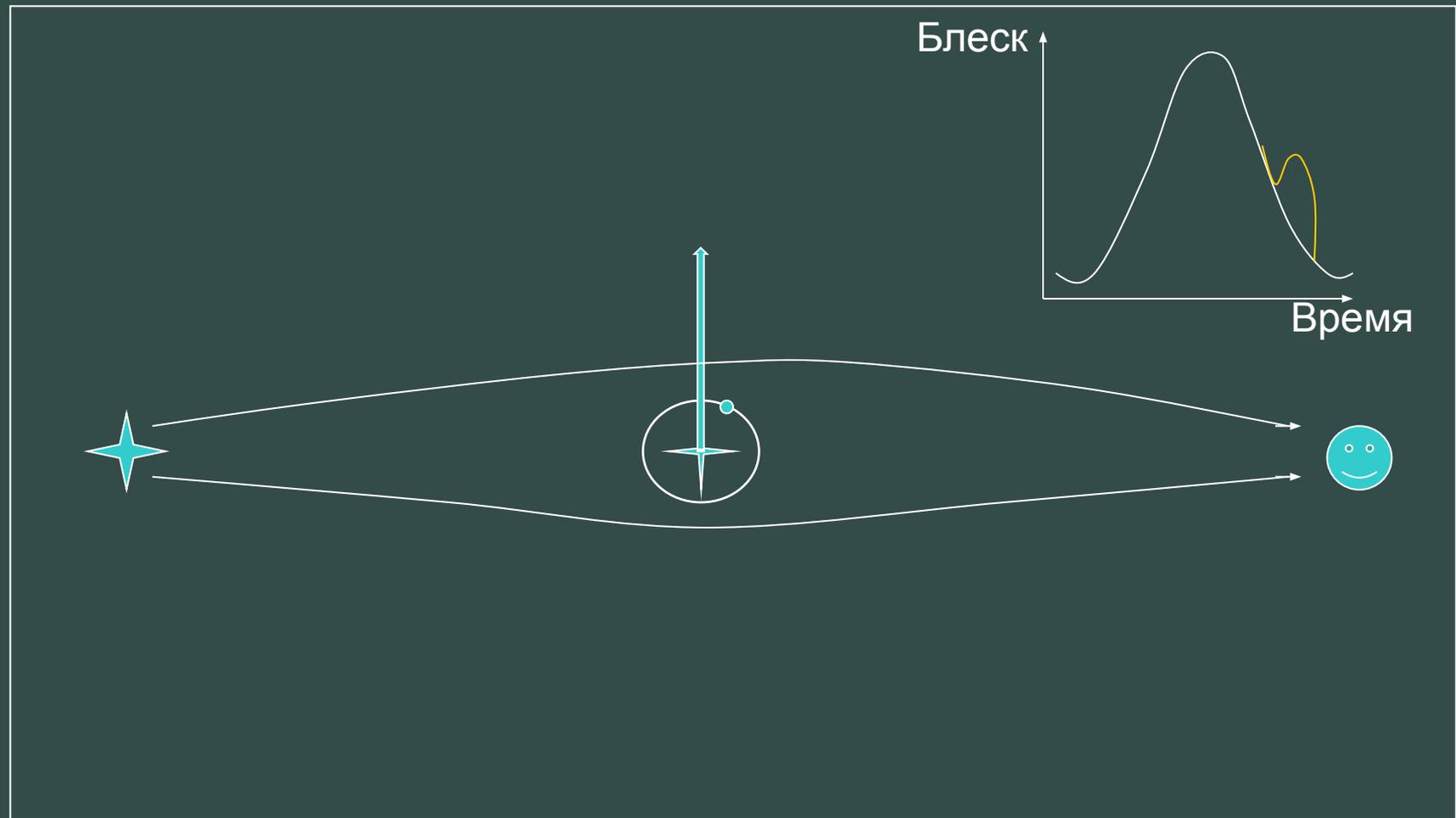
<http://exoplanet.eu>



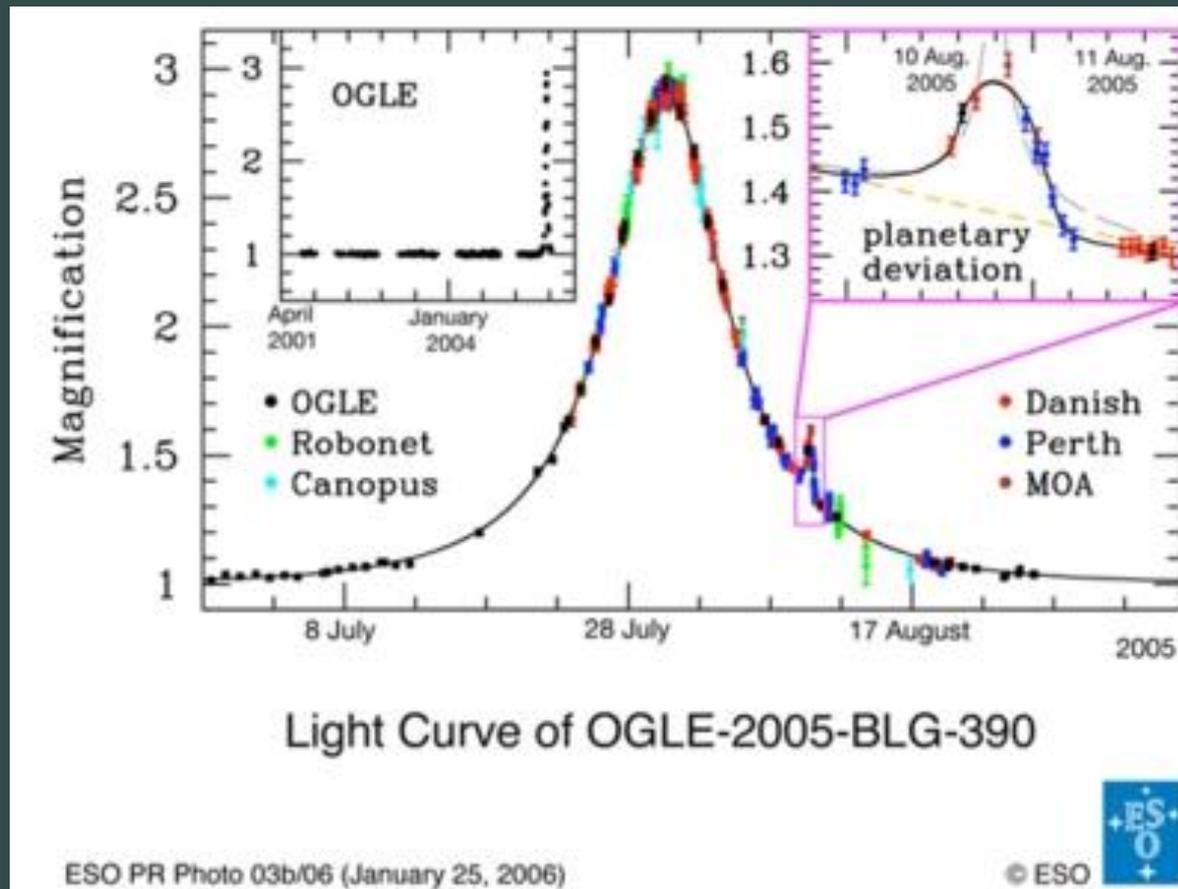
Kepler и CoRoT



Микролинзирование



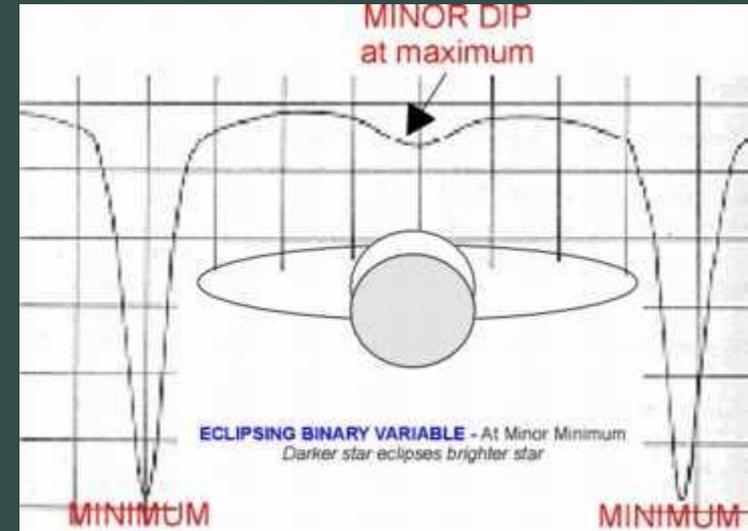
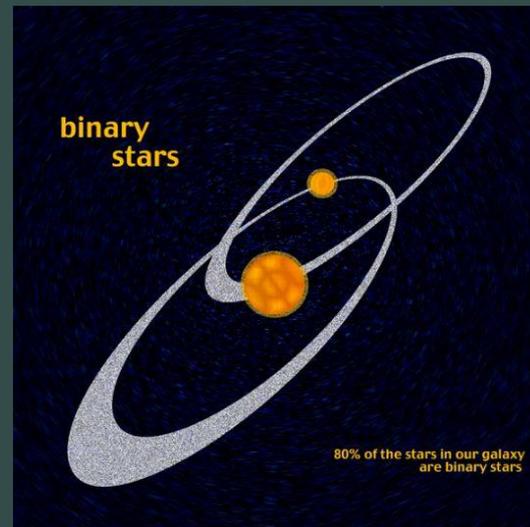
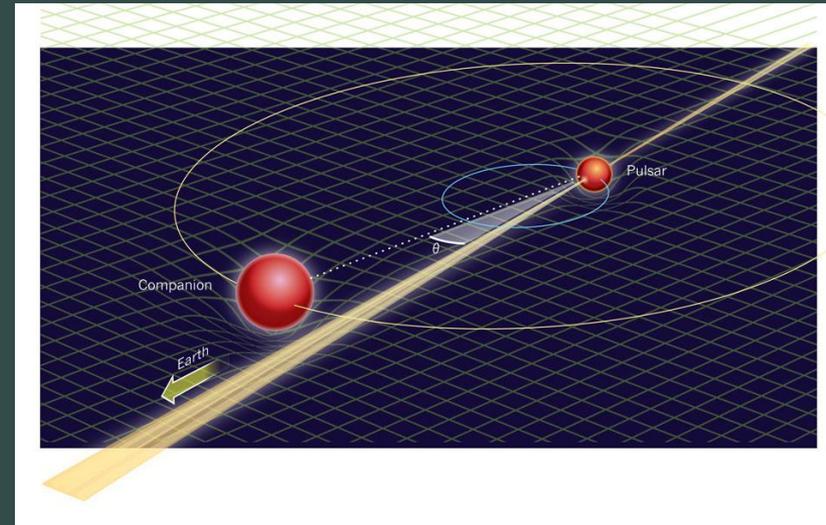
<http://www.eso.org/public/images/eso0603b/>



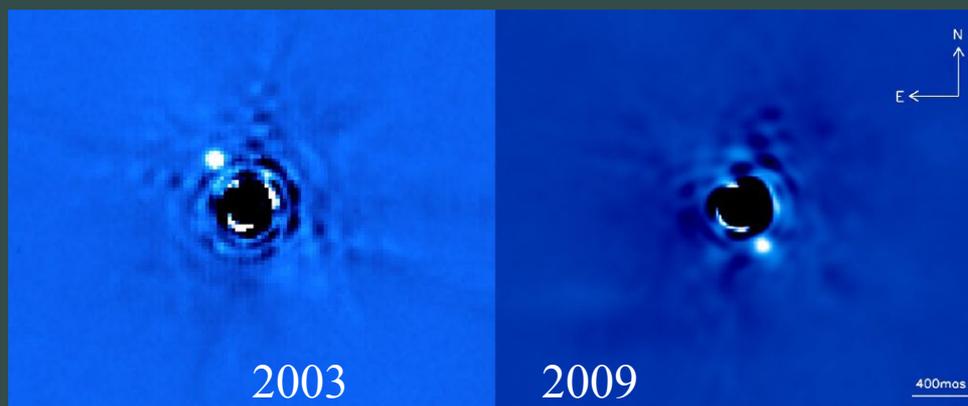
<http://www.eso.org/public/images/eso0603b/>

Тайминг

Заставляя наблюдаемый источник периодического сигнала (радиопульсар или пульсирующий белый карлик) или компоненты двойной системы смещаться, планета меняет время прихода импульсов или моменты затмений. Т.е., обнаруживается, что у наблюдаемых объектов есть темный достаточно массивный спутник.



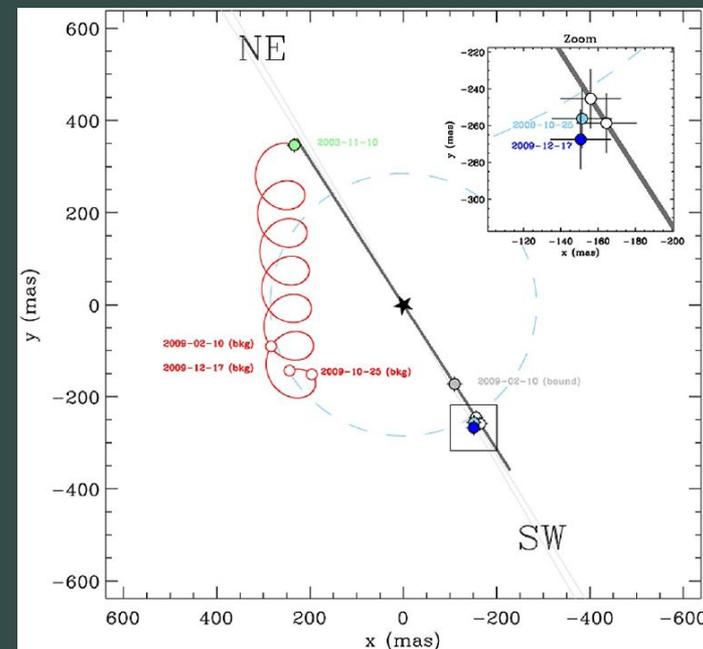
Планета около бета Живописца



Расстояние планеты от звезды около 10 а.е.

Это самое короткое расстояние для планеты, которую удалось увидеть непосредственно.

Звезде всего 10 миллионов лет, значит, планеты-гиганты могут образовываться очень быстро.

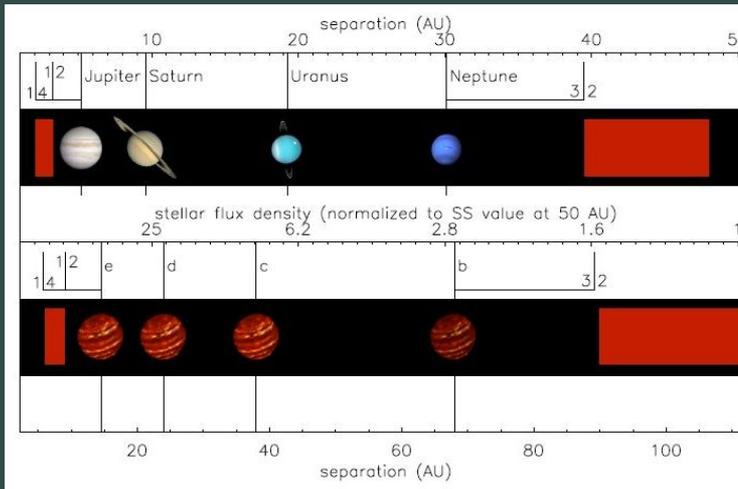


Изображение четвертой планеты вокруг HR 8799

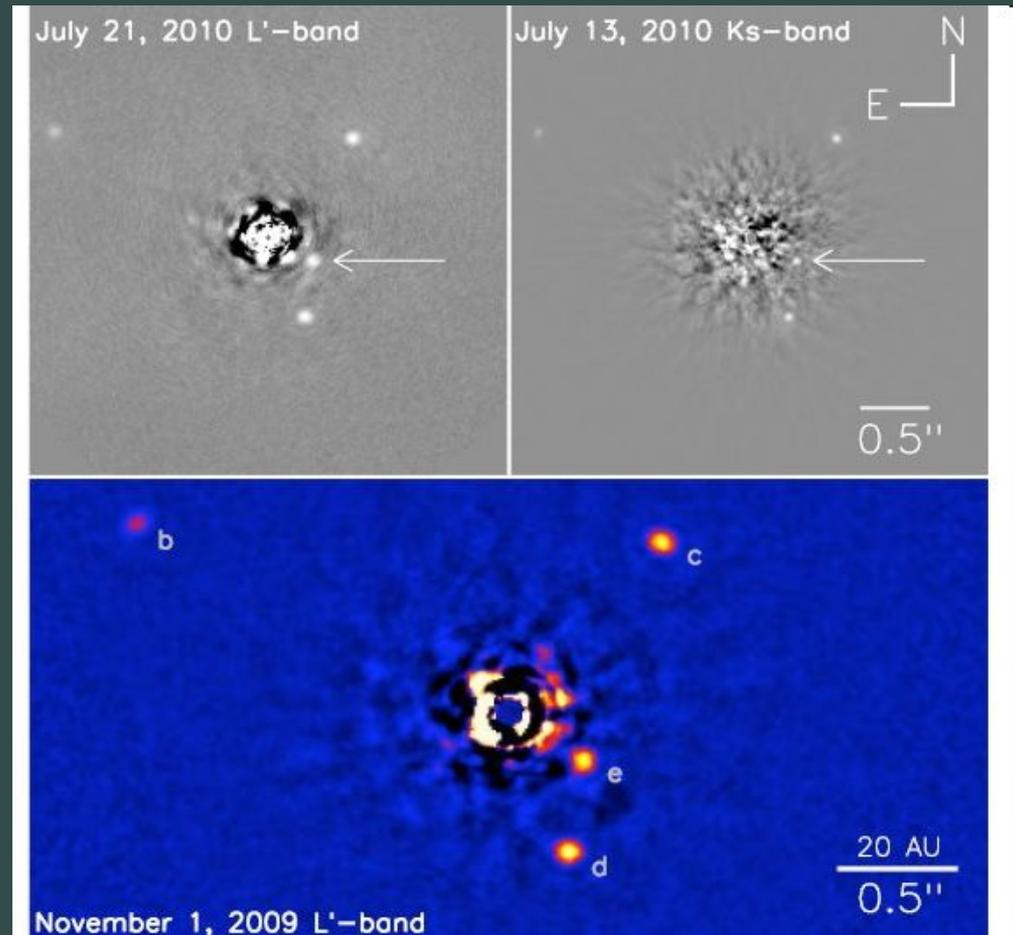
Keck II

Расстояние 14 а.е.
Это меньше, чем
у трех других.

Похожа на Солнечную

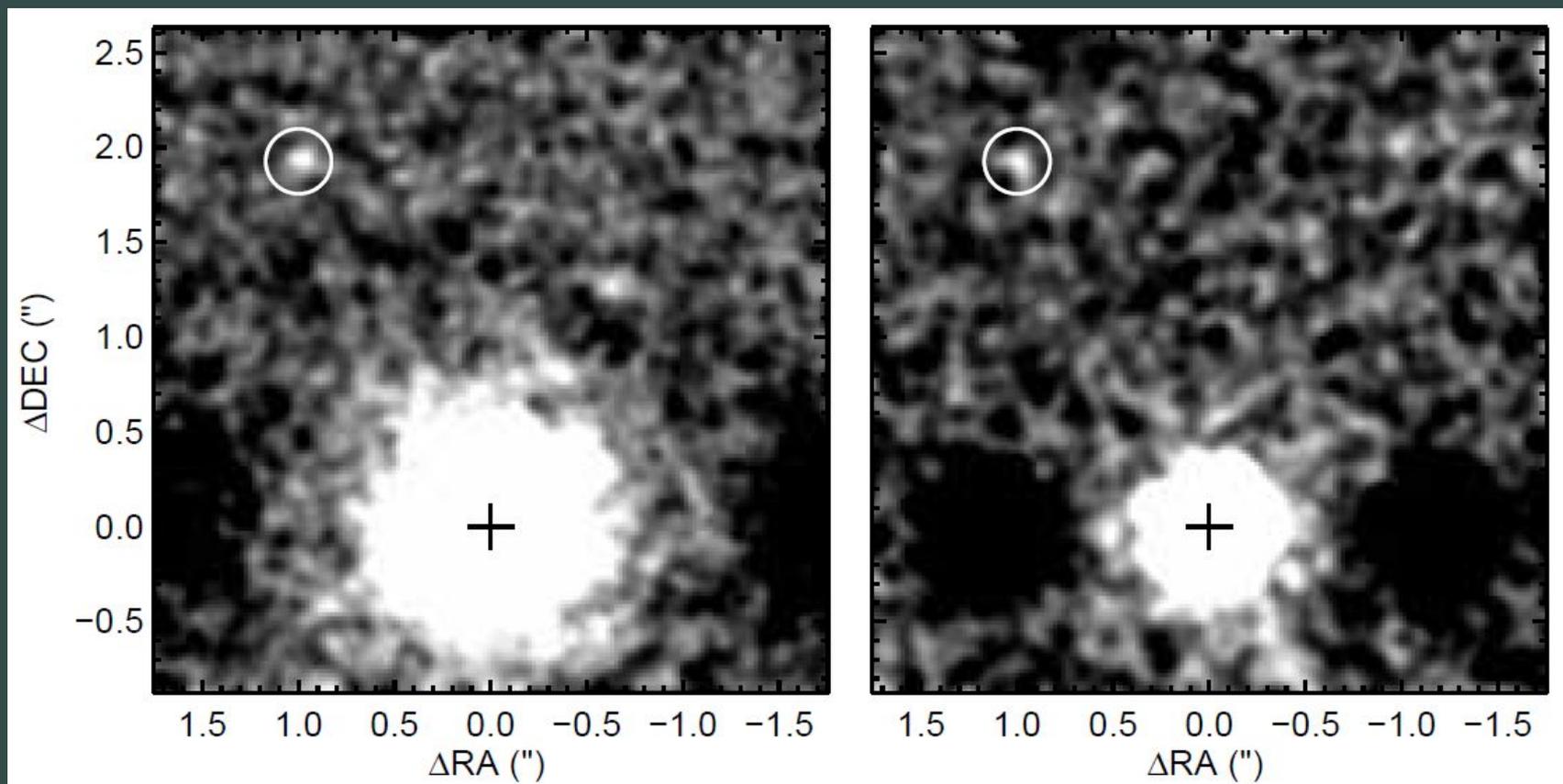


arXiv: 1011.4918

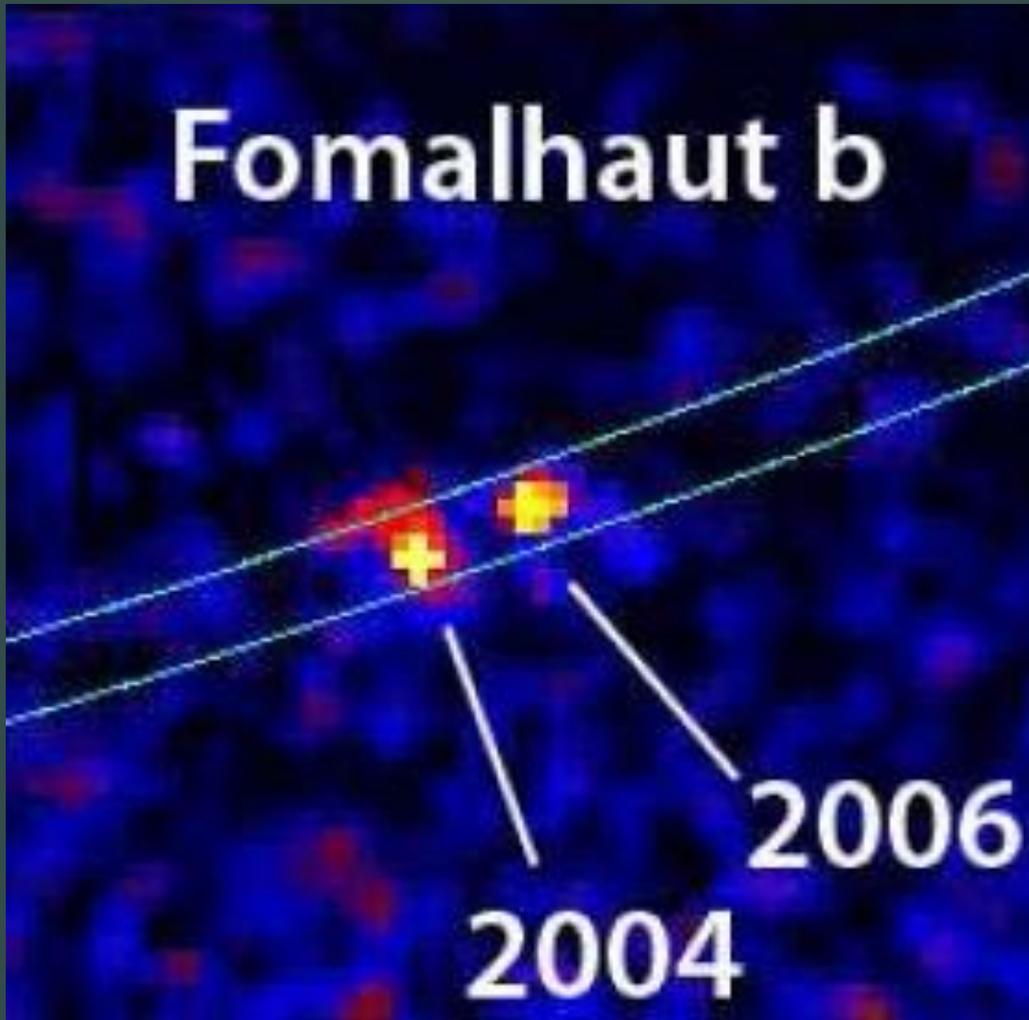


Прямое изображение планеты около молодой звезды типа Солнца

1RXS J160929.1-210524



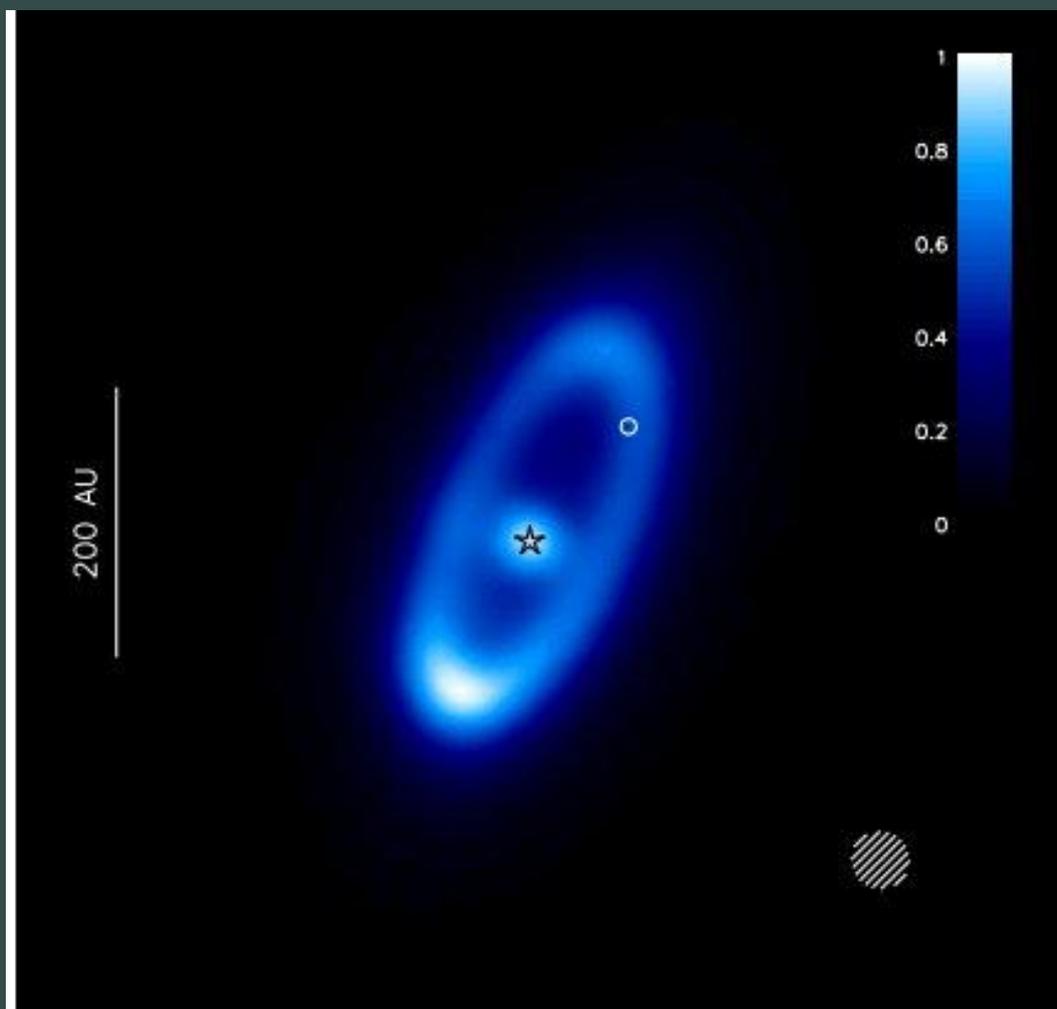
Экзопланета у звезды Фомальгаут



Орбита 115 а.е.

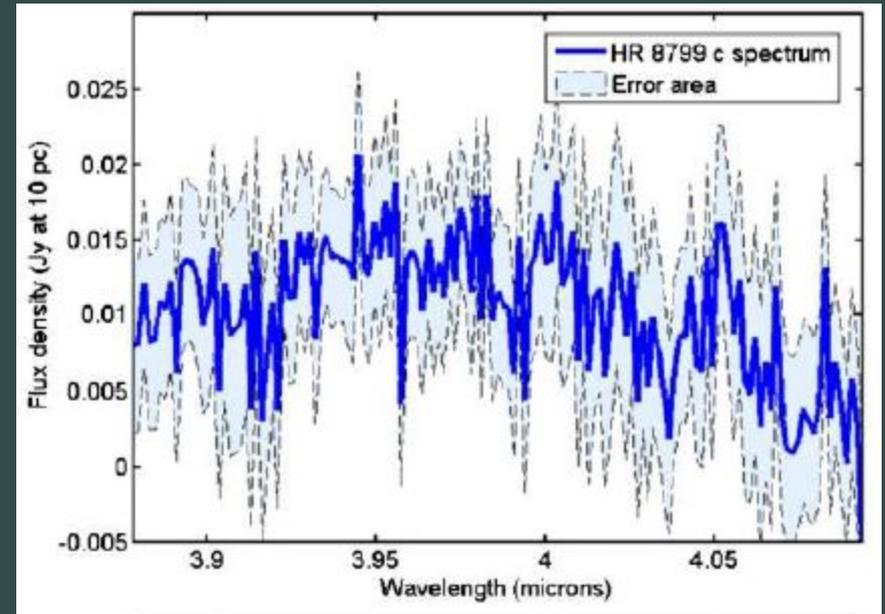
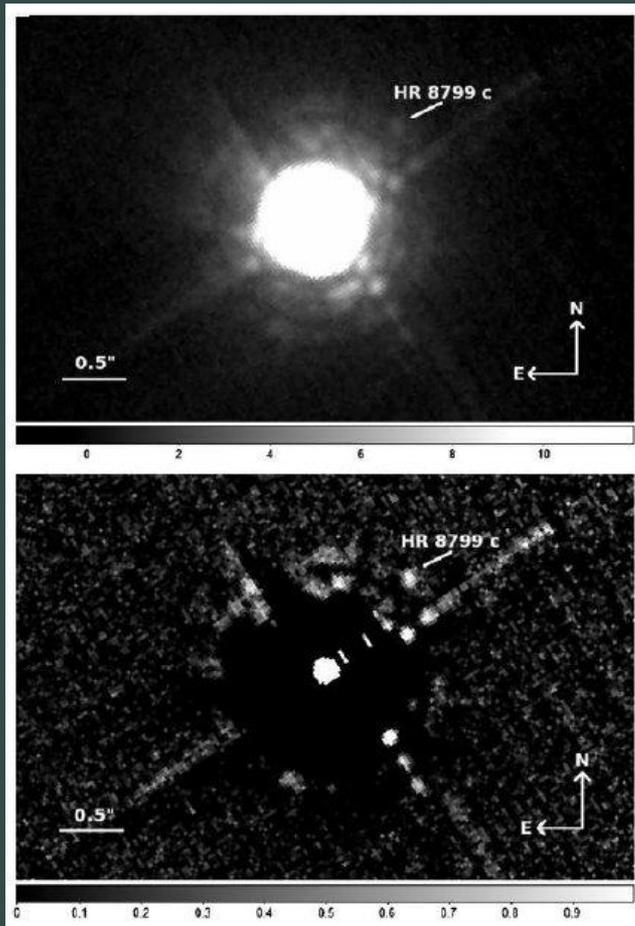
Однако, есть сомнения ...

Остаточный диск у Фомальгаута



Изображение получено с помощью спутника Herschel.

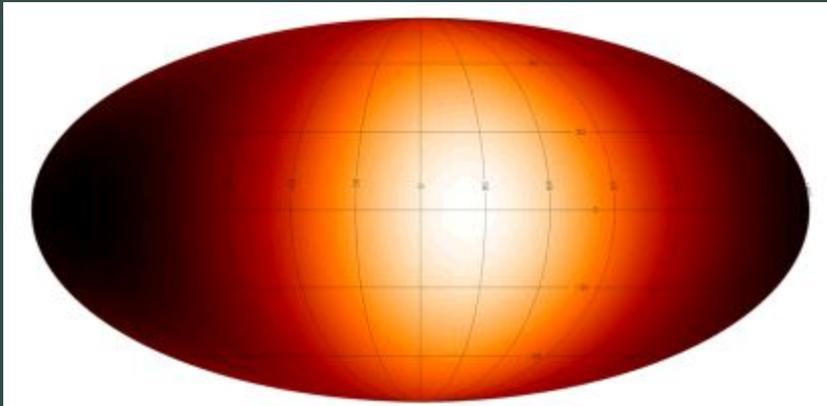
Спектр экзопланеты



Впервые напрямую (на VLT)
получен спектр экзопланеты.
«Юпитер» ($M \sim 10 M_J$, 38 a.e.).

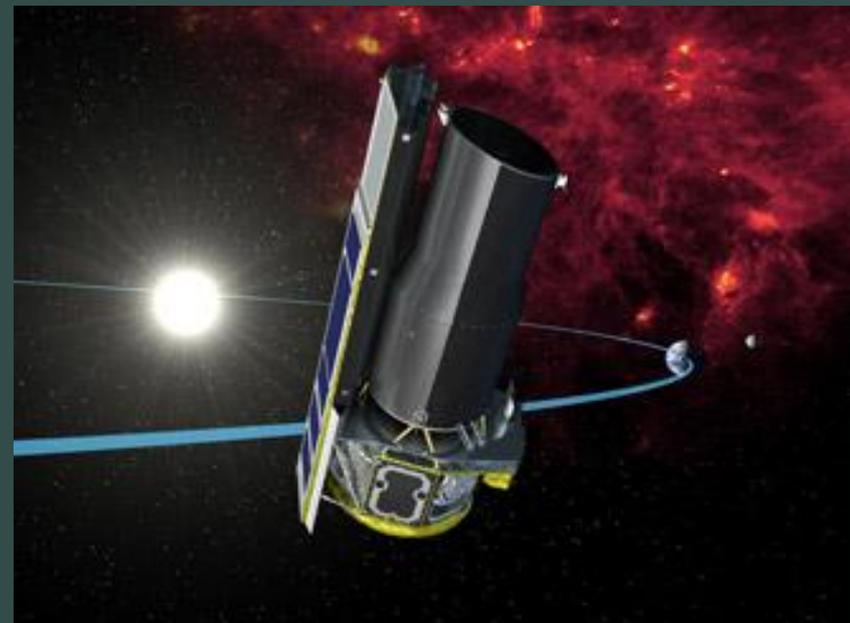
[arxiv:1001.2017](https://arxiv.org/abs/1001.2017)

Карта экзопланеты HD 189733b

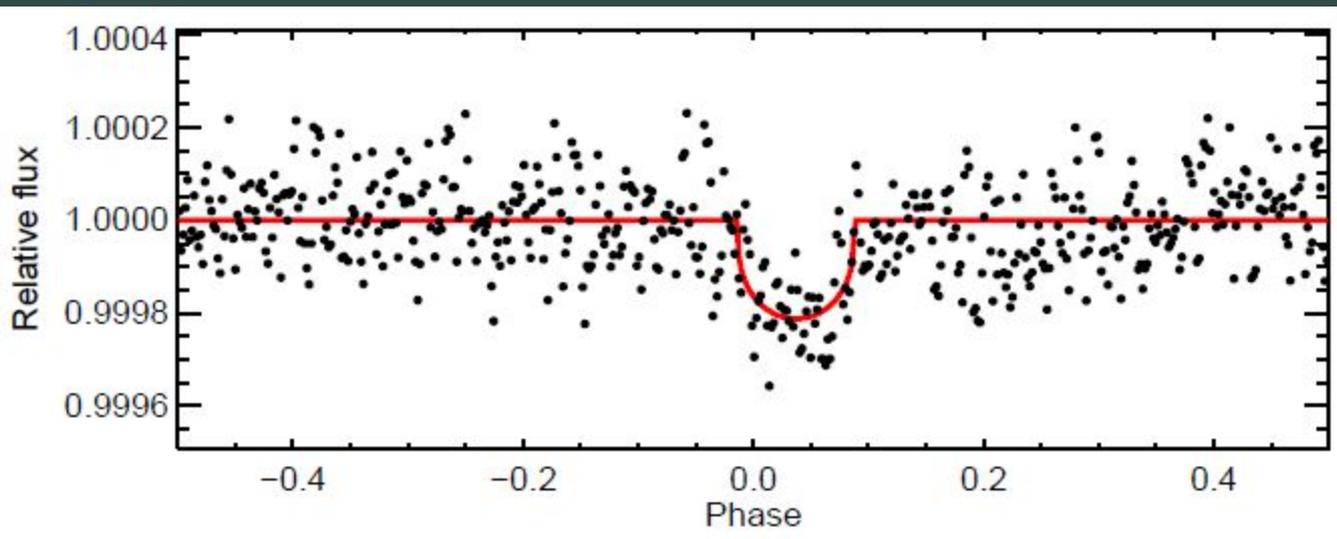


По данным о затмениях удалось построить карту экзопланеты.
Инфракрасная космическая обсерватория имени Спитцера.

Горячее пятно в экваториальной области.



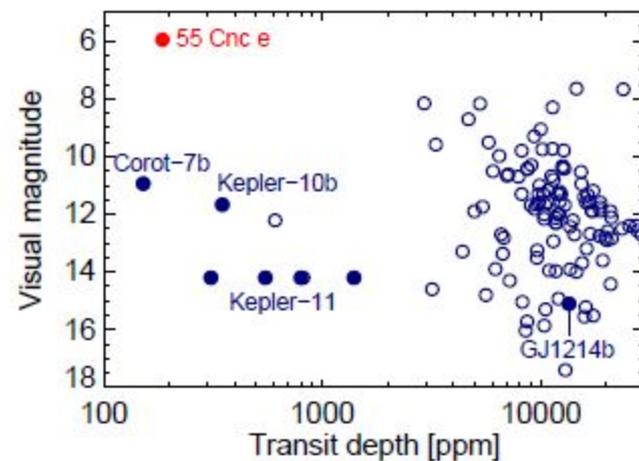
Планета у звезды, видимой невооруженным глазом



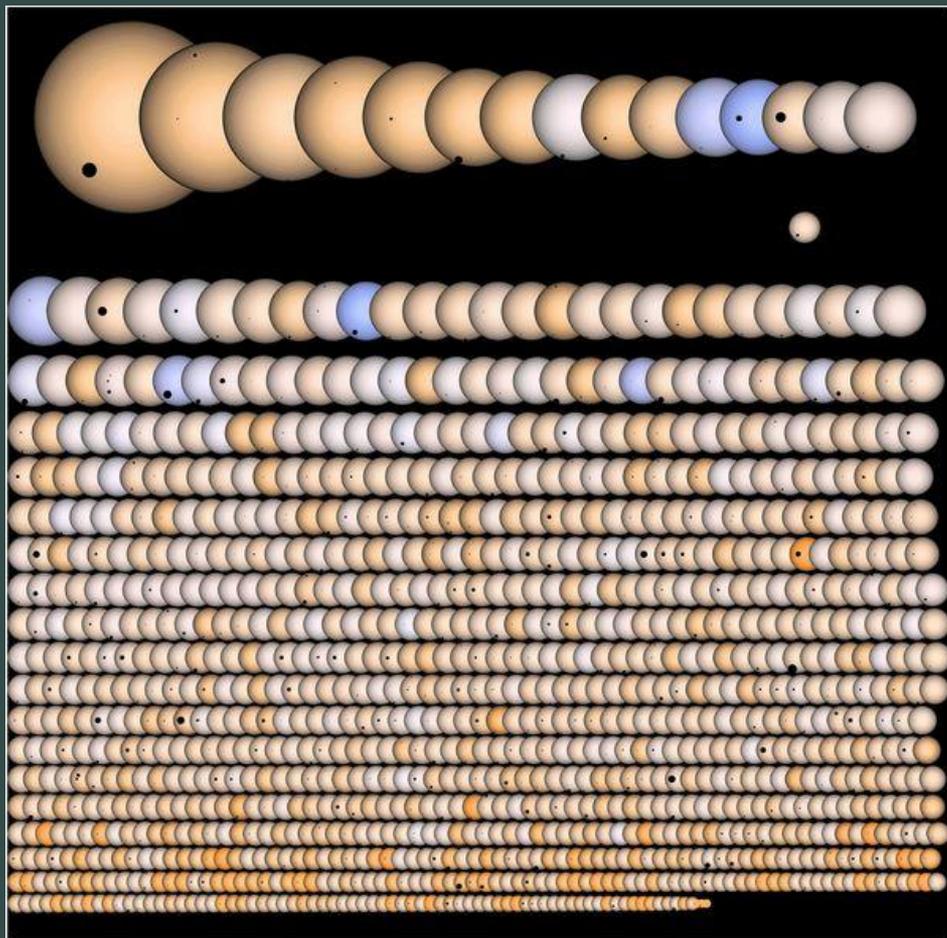
Сверхземля
8-9 масс Земли
1.5-1.8 радиусов Земли
Высокая плотность
Период 0.7 дней

Небольшой канадский спутник MOST

1104.5230



>1200 кандидатов в планеты (на февраль 2011 года)

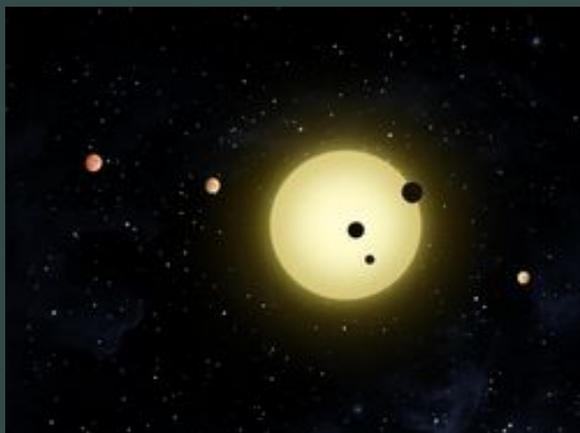


Работа спутника Kepler
Кандидаты имеют размеры
от долей радиуса Земли
до пары радиусов Юпитера.
Больше всего (половина выборки)
нептуноподобных планет
(2-6 радиусов Земли).

Кеплер-11



У звезды типа Солнца вращаются шесть планет. Все они транзитные. Пять имеют орбитальные периоды от 10 до 47 дней. Внутренние планеты относятся к числу самых легких из известных, но оценки радиуса указывают на низкую среднюю плотность: у планет есть оболочки из легких газов.



Шесть транзитных планет!

Kepler-11

Массы
(в земных)

2-6

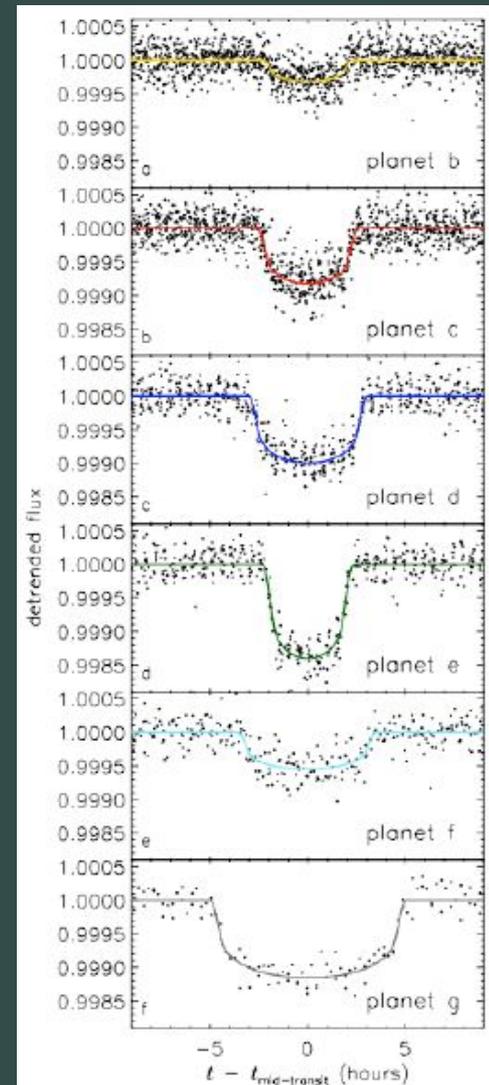
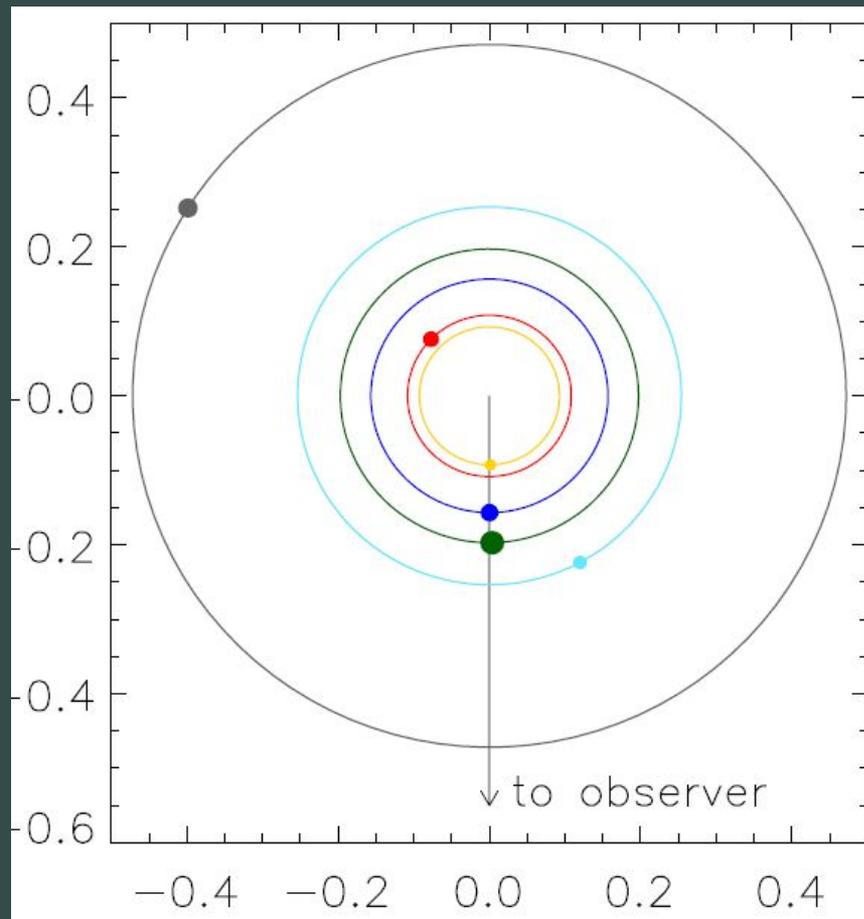
7-18

4-9

7-11

1-5

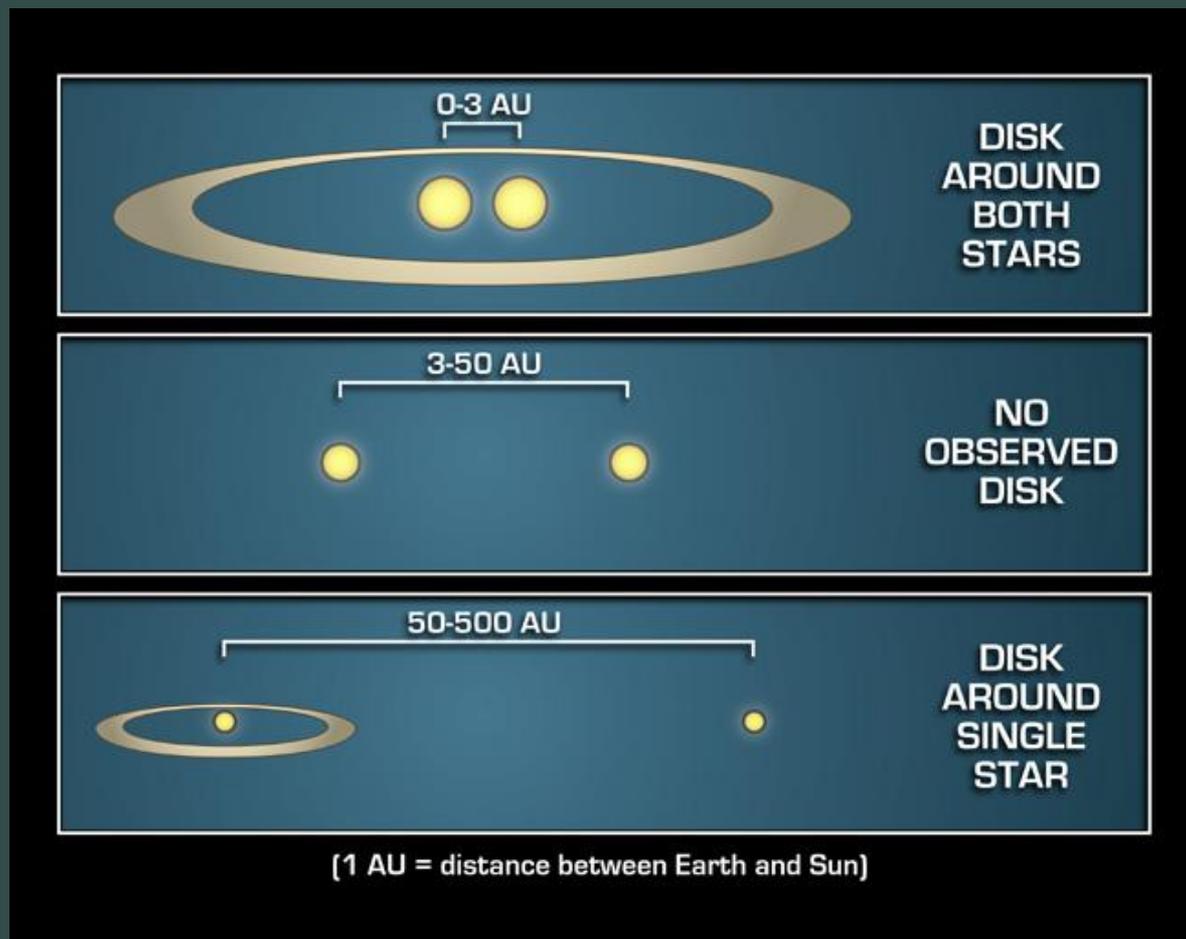
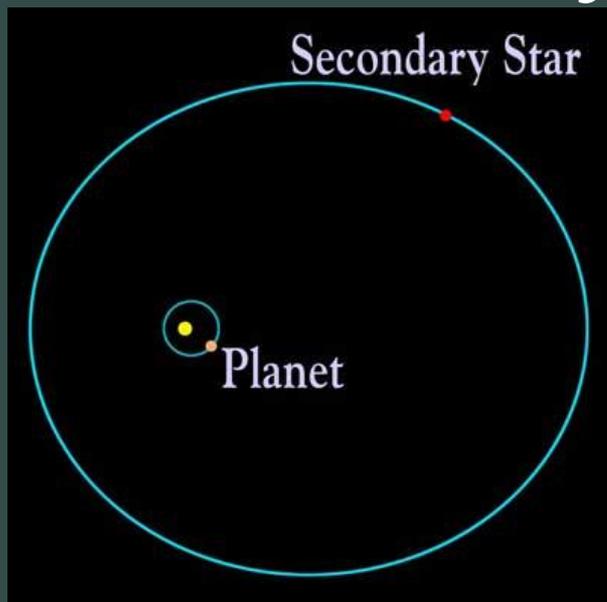
<300



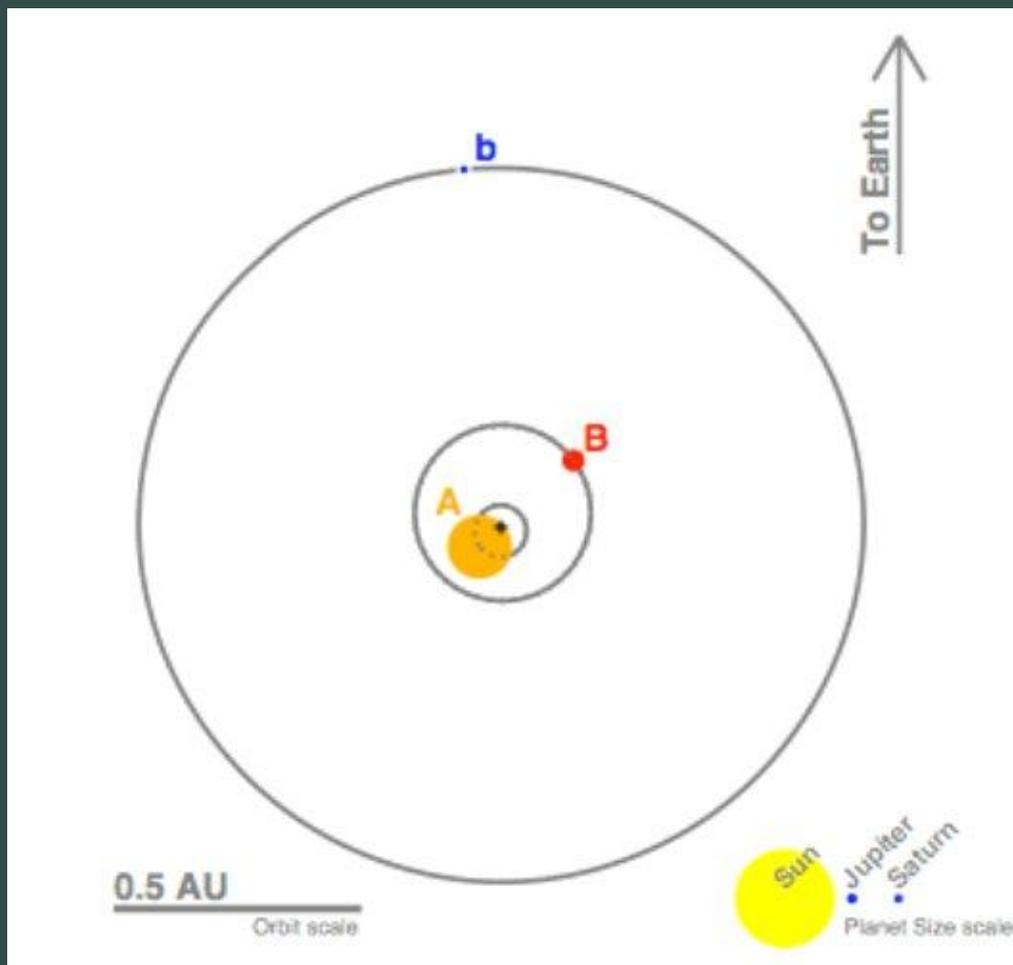
1102.0291

Планеты у двойных звезд

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



Kepler-16: планета Татуин

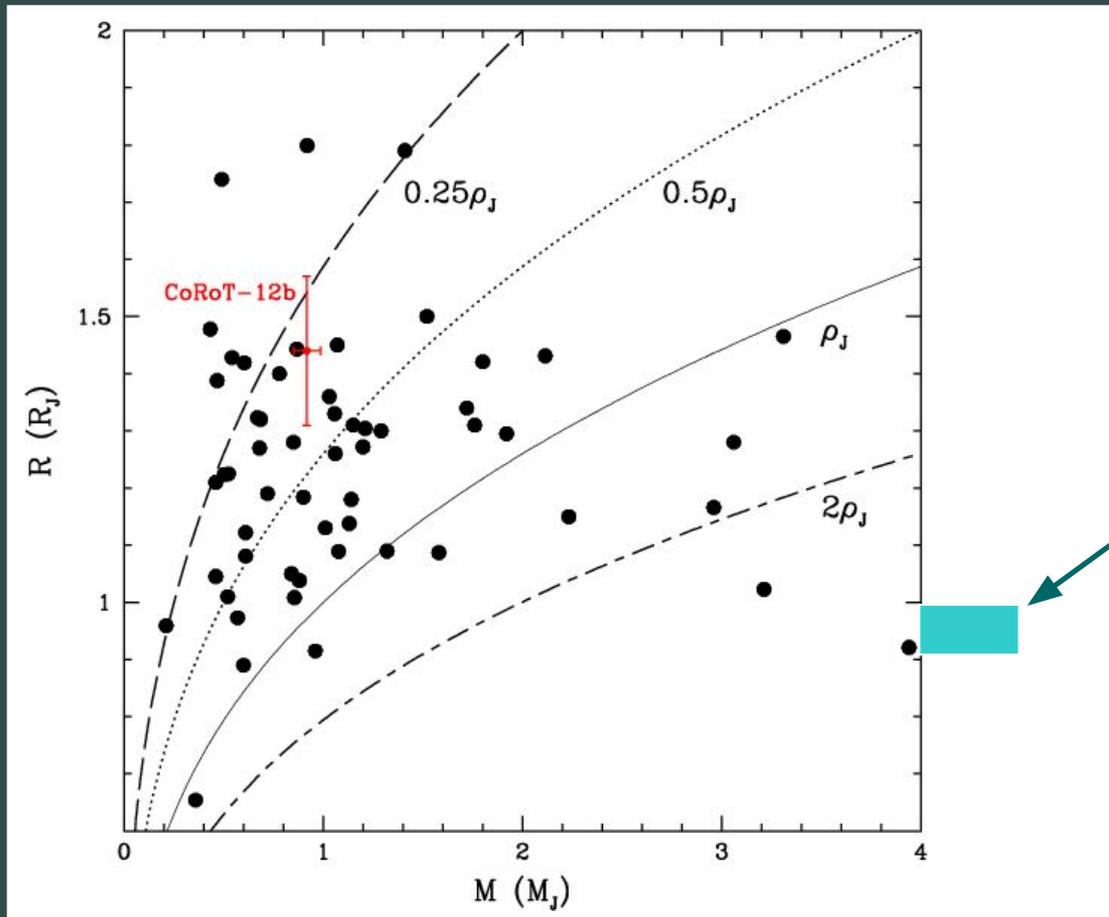


Транзитная планета вокруг двойной. Звезды имеют массы 0.2 и 0.7 масс Солнца и орбитальный период 41 день. Планета вращается в плоскости, и ее период 230 дней.

Сейчас открыты планеты у двойных звезд Кеплер-34 и Кеплер-35. Видимо более 1% тесных двойных имеют планеты, вращающиеся вокруг всей системы в той же плоскости.

Вообще же около 12% кратных звезд имеют планеты (1204.4833).

Плотная гигантская планета: CoRoT-20b



Горячий юпитер
Плотность 8-9 г/см³

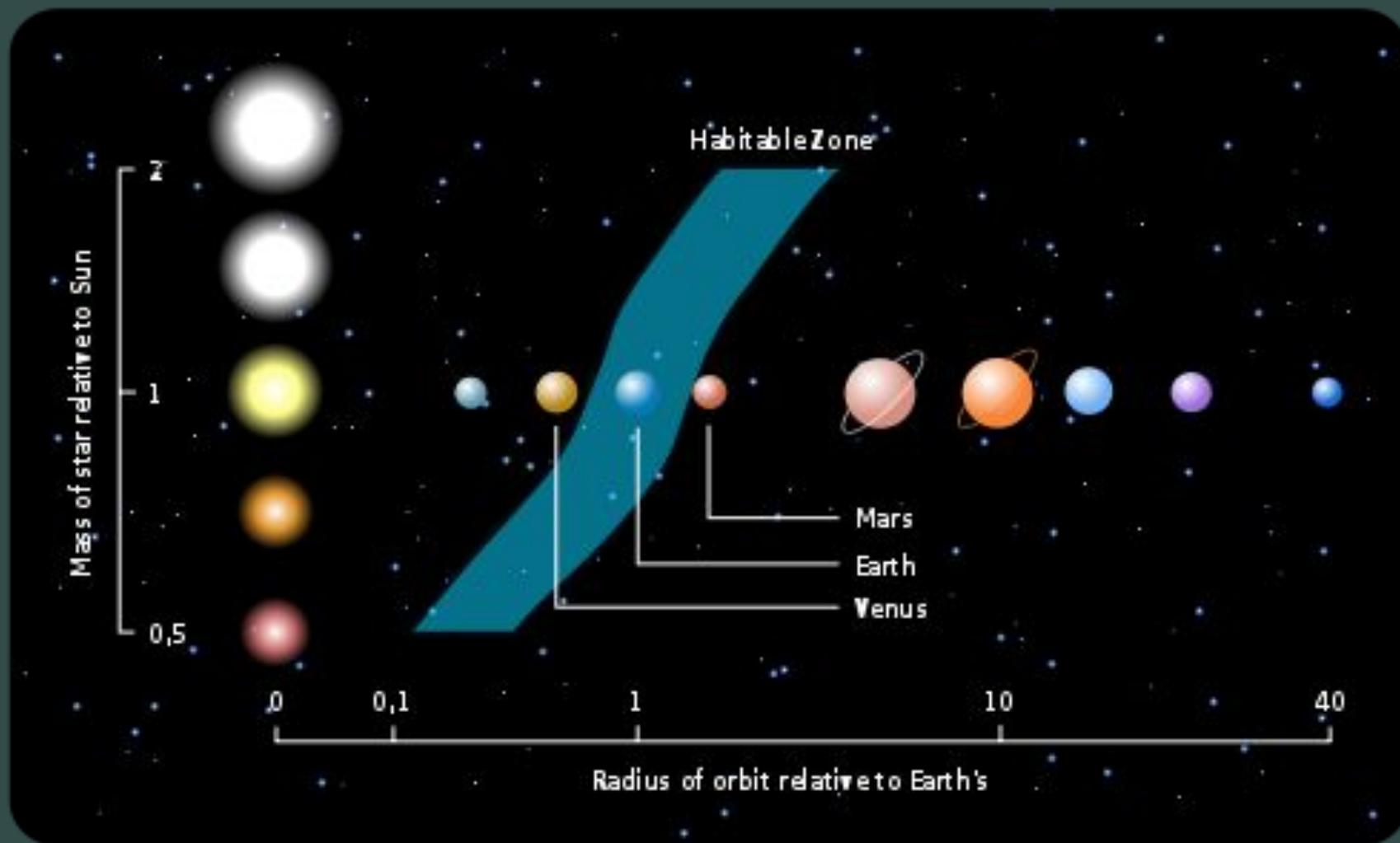
Масса 4-4.5 $M_{\text{ЮПИТЕРА}}$

Радиус 0.8-0.9 $R_{\text{ЮПИТЕРА}}$

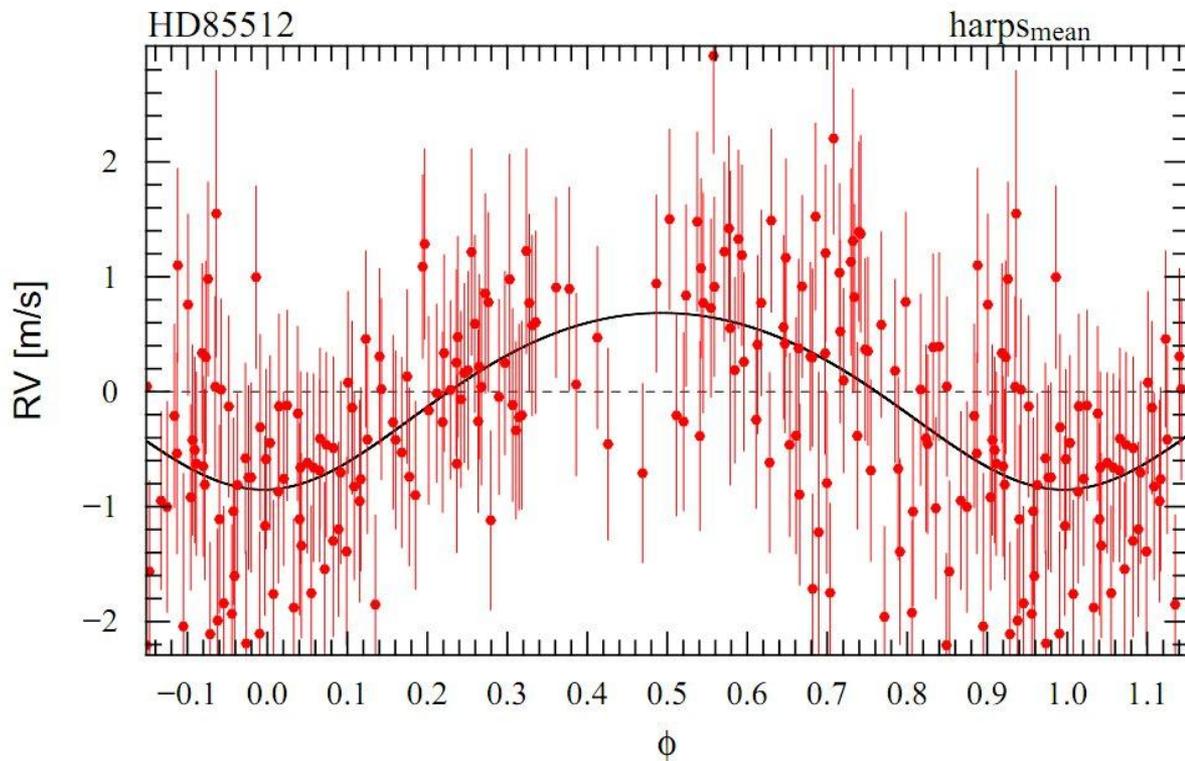
Орбита имеет большой (0.56) эксцентриситет и должны сильно эволюционировать.

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

Планеты в зонах обитаемости

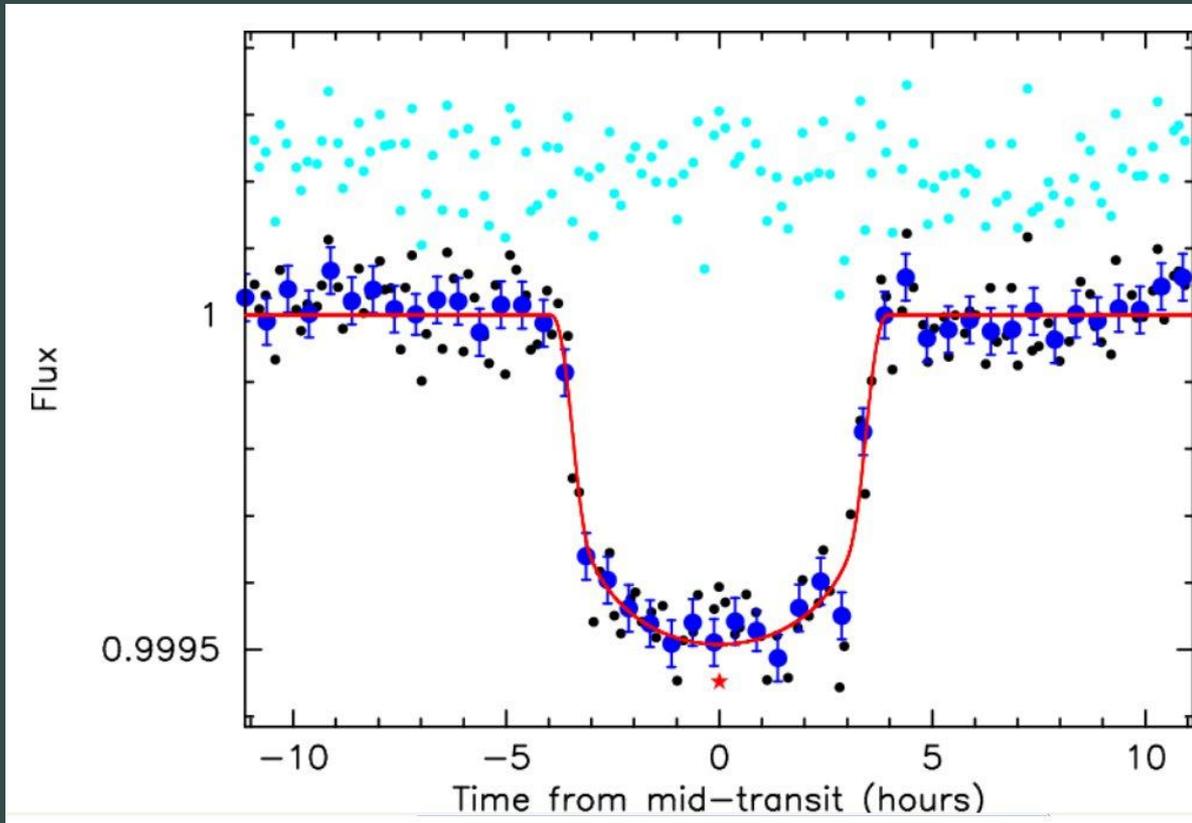


Первые открытия



Маломассивная планета на самой границе зоны обитаемости. Открыта по данным HARPS. Это наземный проект. Измеряется масса, т.к. наблюдается изменение лучевой скорости звезды.

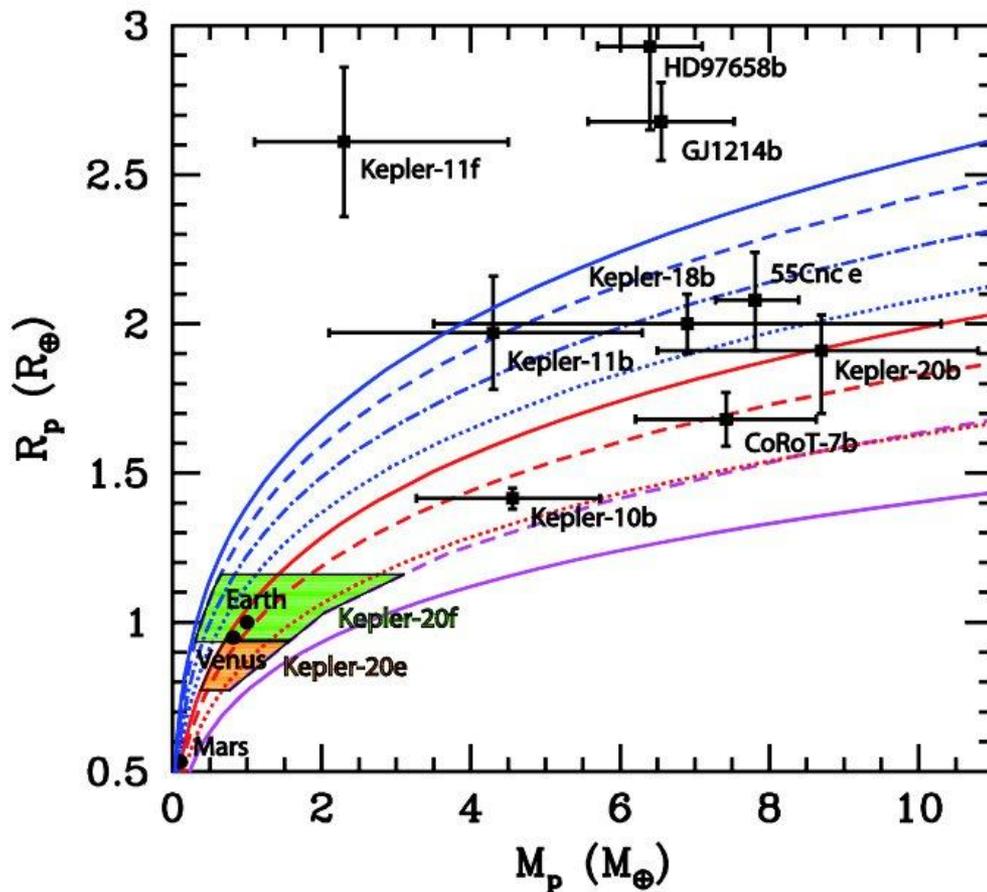
Кеплер-22



Небольшая планета
в зоне обитаемости
у звезды типа Солнца.

Радиус 2.4 земного

Маленькие планеты



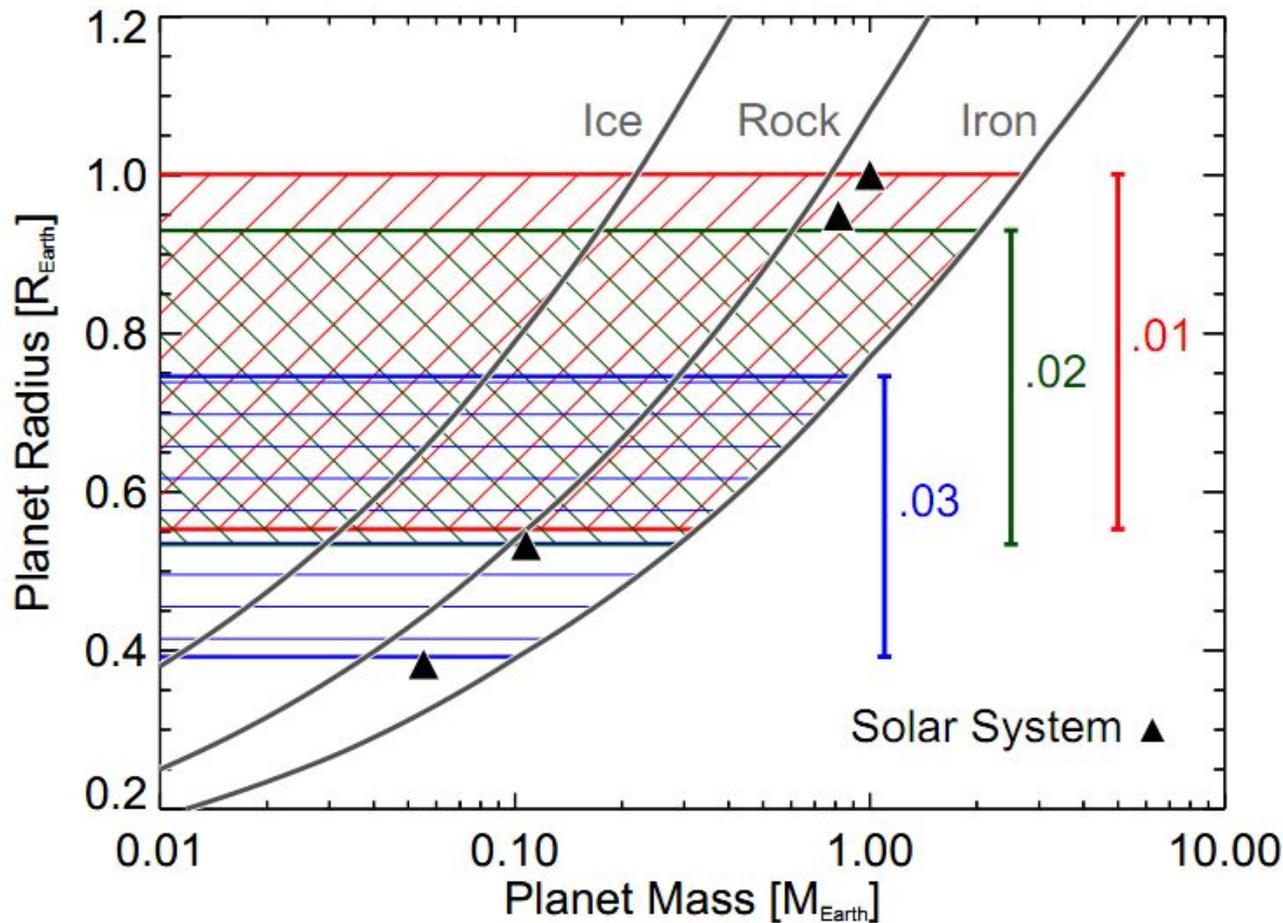
Система Кеплер-20.

Пять планет, две из которых имеют маленькие радиусы:

примерно 1 и 0.9 радиуса Земли.

Планеты находятся близко от звезды, т.е. вне зоны обитаемости.

Еще ...



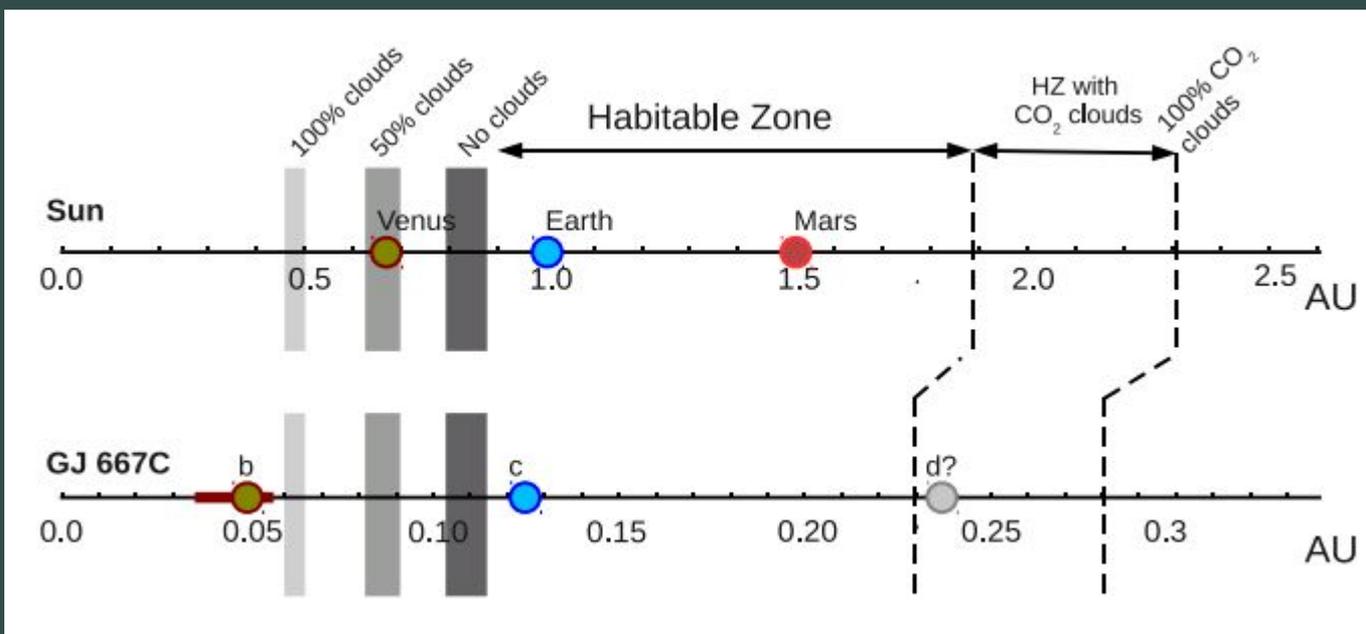
KOI 961

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.

Планета в зоне обитаемости у тройной звезды



Новый анализ
данных HARPS

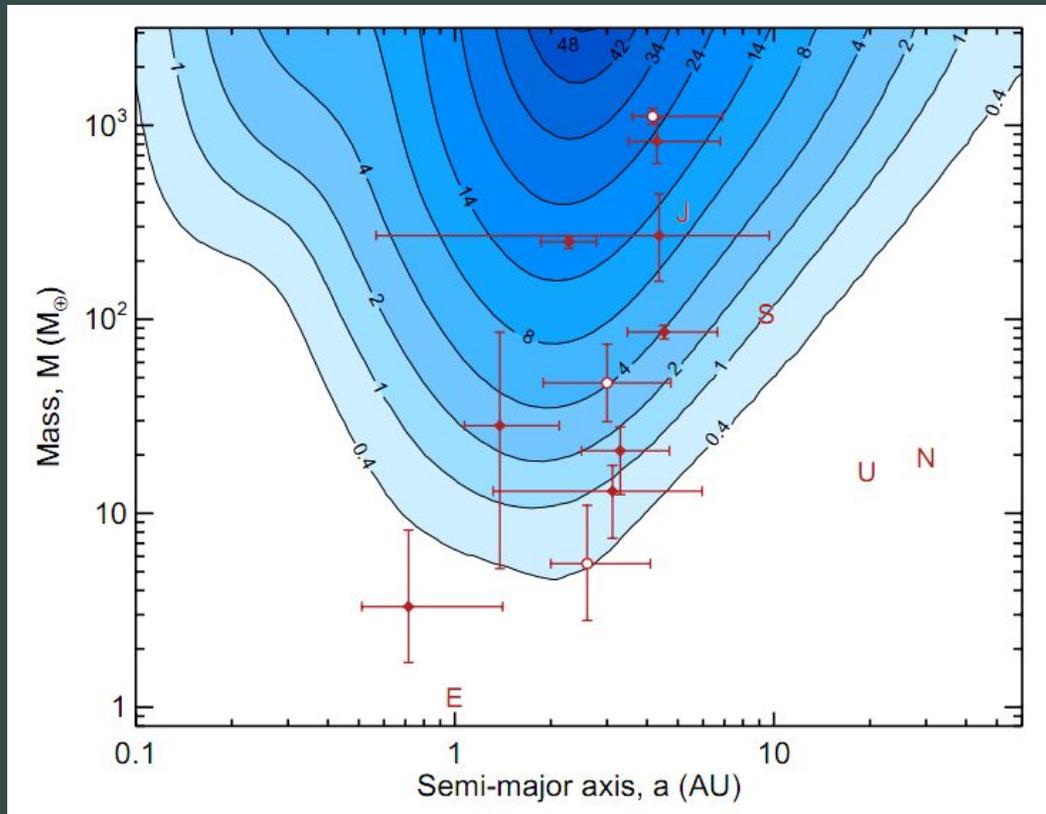
Три планеты

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.

Экзопланеты и микролинзирование



Микролинзирование – эффективный способ поиска экзопланет.

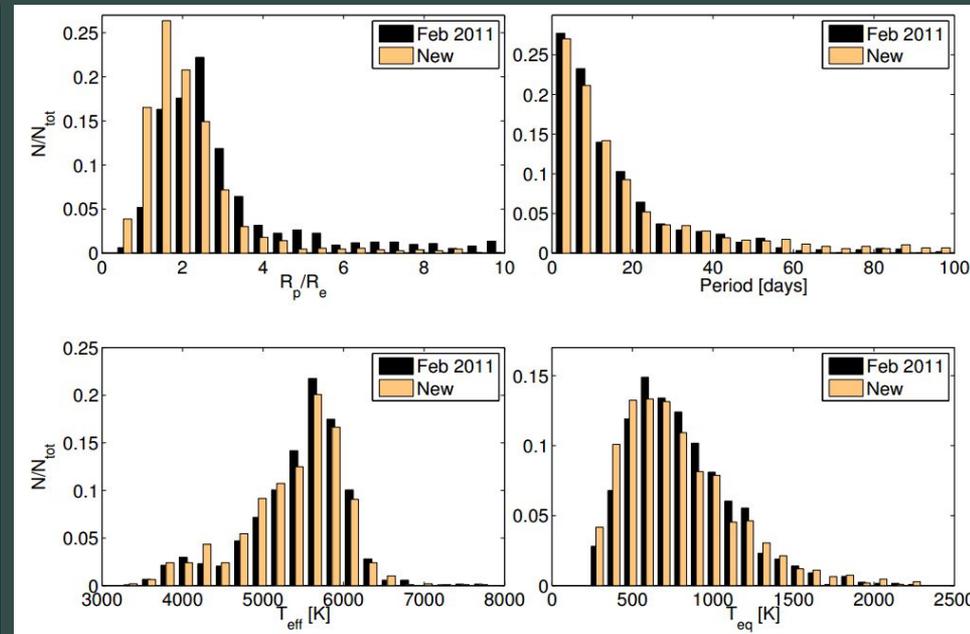
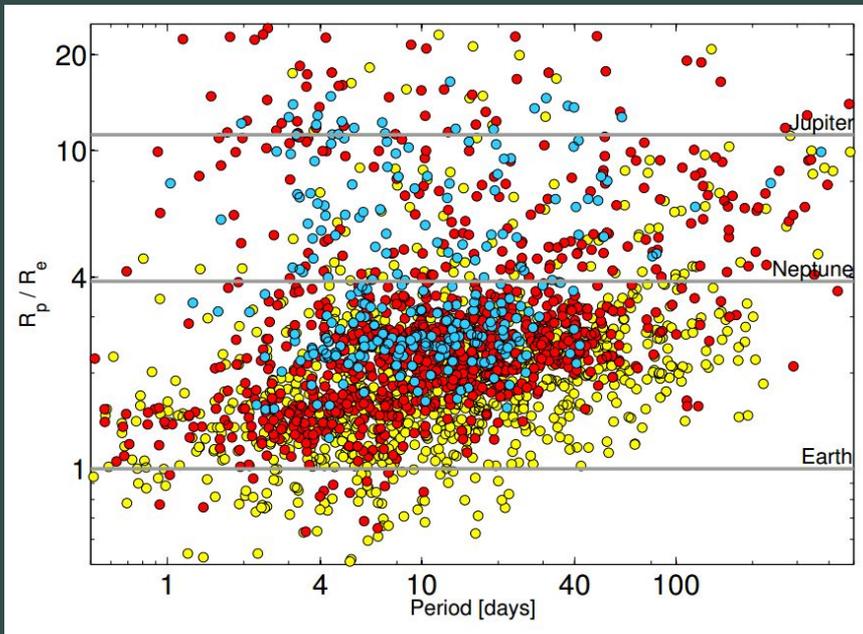
Авторы проанализировали большой массив данных.

Статистика такова: 10-20% звезд имеют планеты с массой 0.3-10 масс Юпитера; холодные нептунopodobные планеты (10-30 масс Земли) есть у 30-70% звезд; наконец, суперземли (5-10 масс Земли) есть у 25-95%.

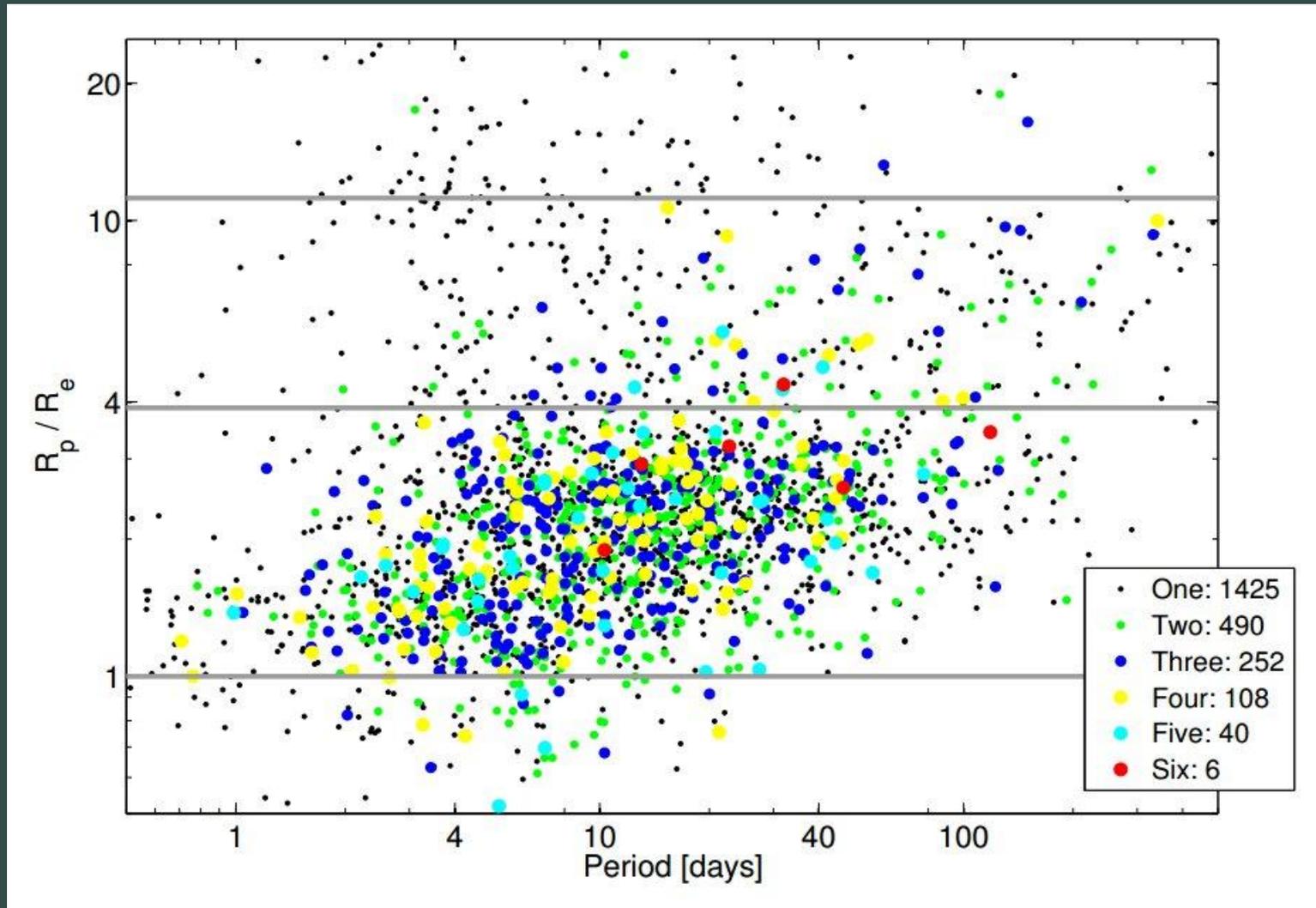
Речь идет об орбитах размером 0.5-10 а.е.

Свежайшие данные Кеплера

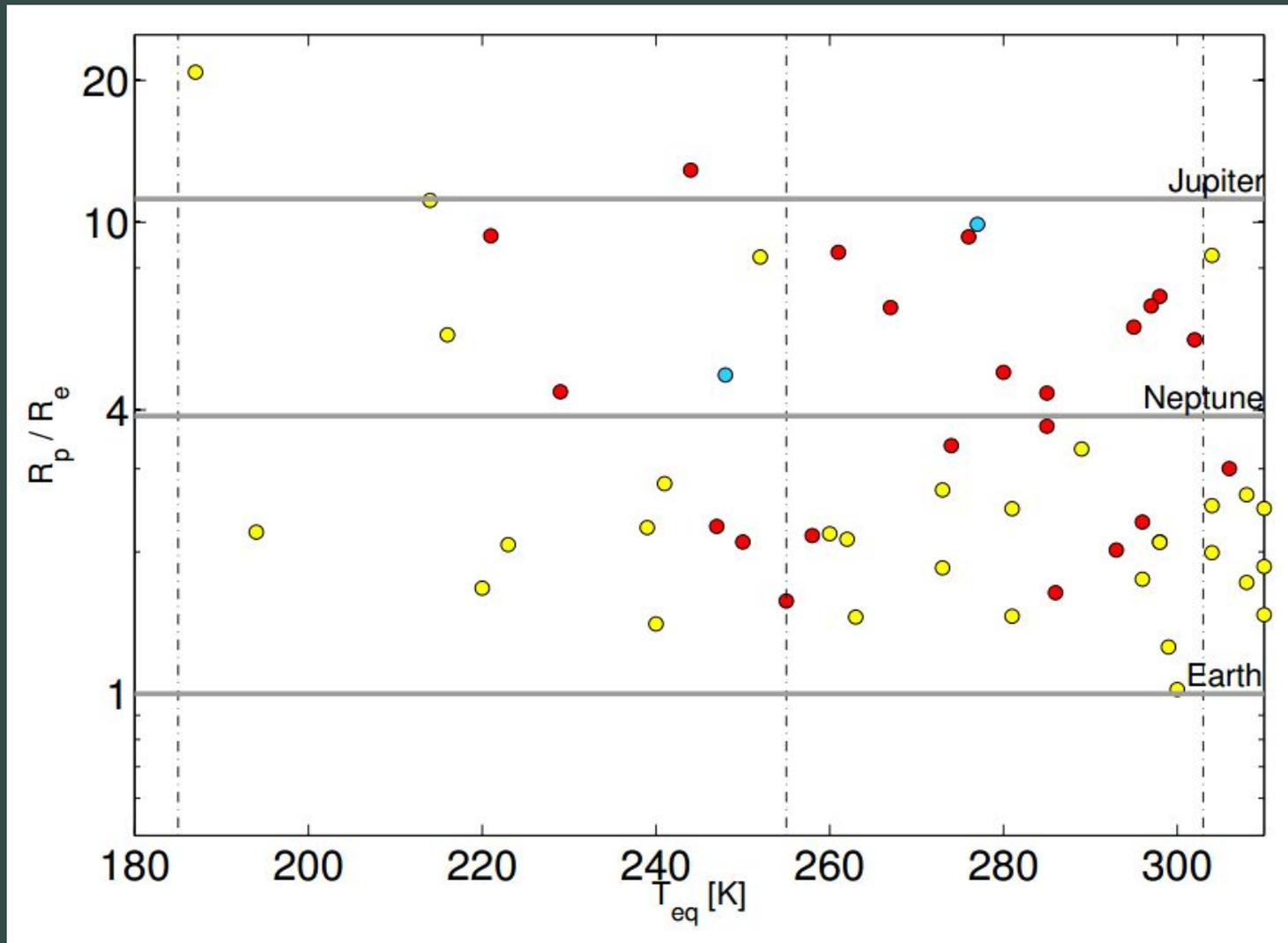
В конце февраля этого года в Архиве появилась новая статья, в которой по результатам использования данных за первые 16 месяцев работы спутника говорится уже о 2300 планетных кандидатах. Особенно возросла доля маленьких (менее 2 земных радиусов) планет и доля планет с большими орбитальными периодами.



Планетные системы на сегодня



Планеты в зоне обитания



Архитектура экзопланетных систем

Системы с тремя и более планетами.

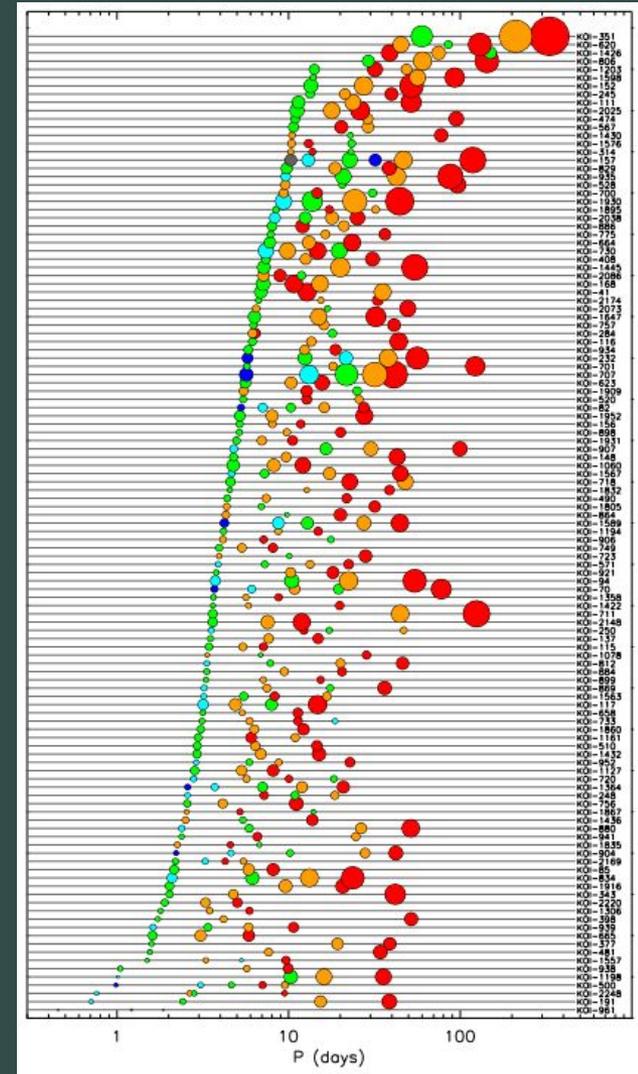
885 планет в 361 системе.

Цвет кружка отражает размер планеты относительно других членов системы.

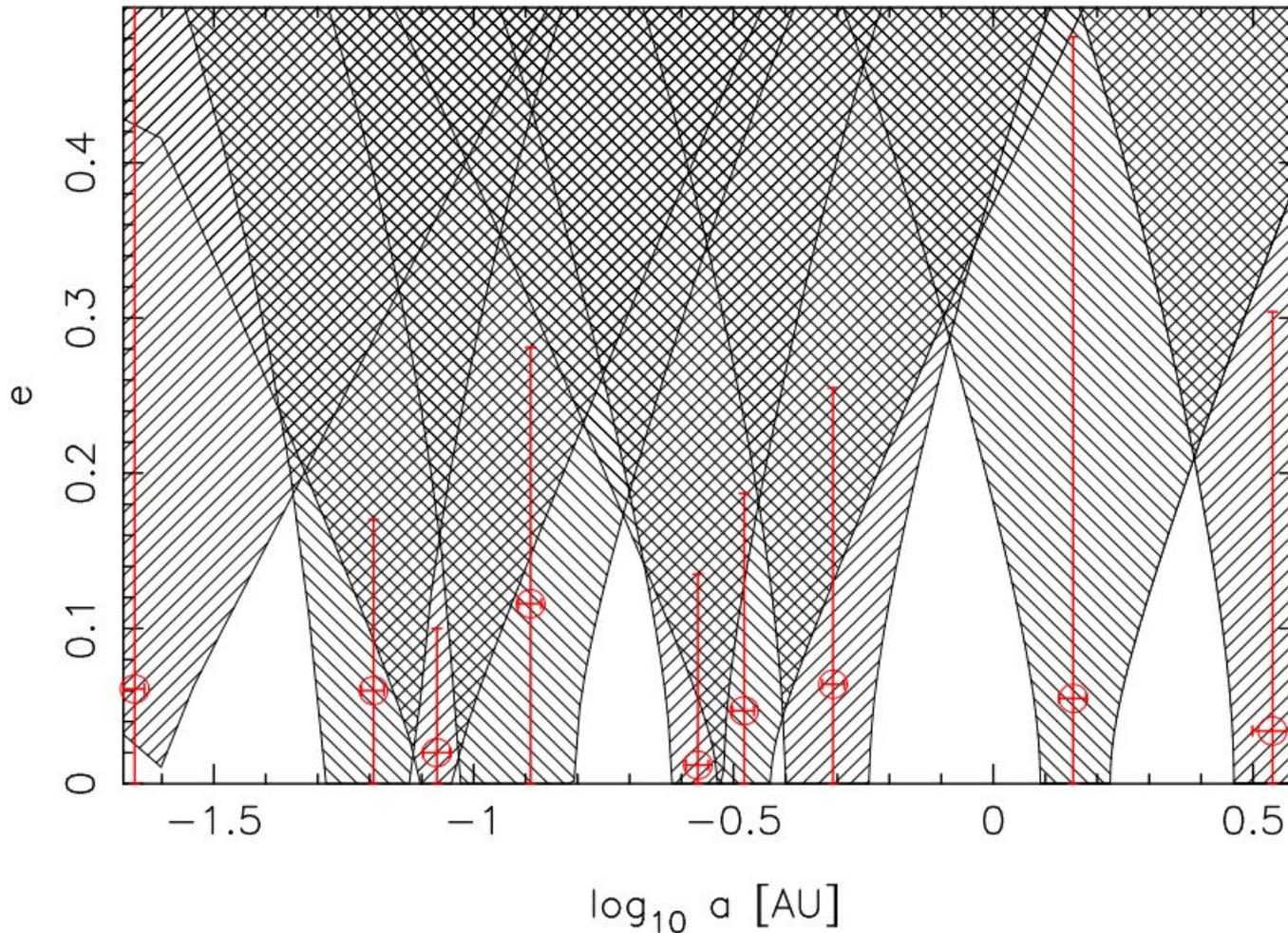
Больше всего «нептунов» и сверхземель с орбитальными периодами около 10 дней.

Т.е., системы не похожи на нашу.

Однако одно важное свойство, видимо, общее: орбиты планет лежат практически в одной плоскости.



9 планет?



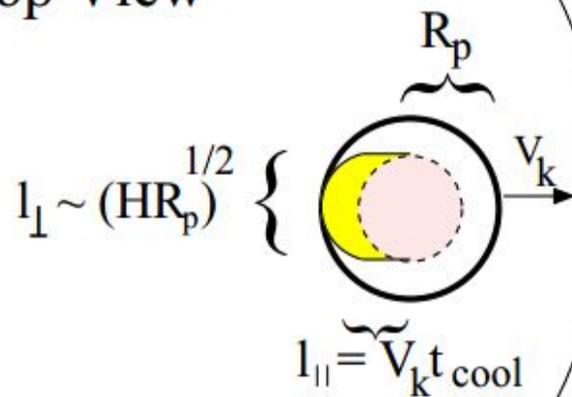
Переобработка данных привела к решению, в котором видны следы существования 9 планет в системе звезды HD 10180.

Ранее говорилось о 6 или 7 планетах в этой системе.

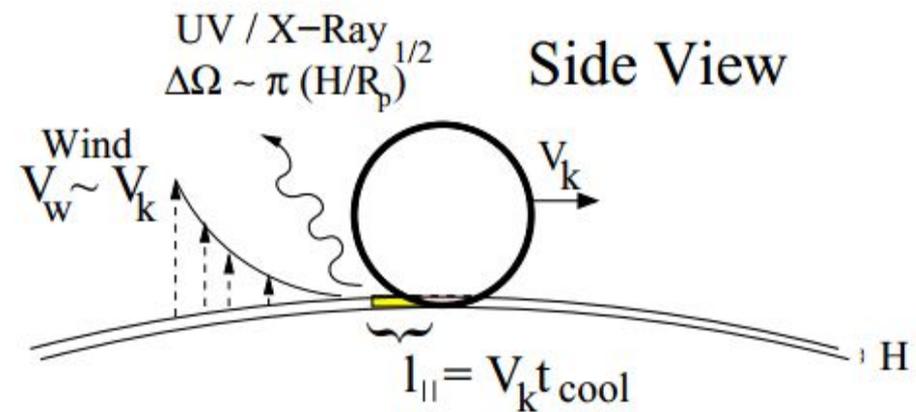
Данные наземных наблюдений с помощью системы HARPS.

Слияния звезд и планет

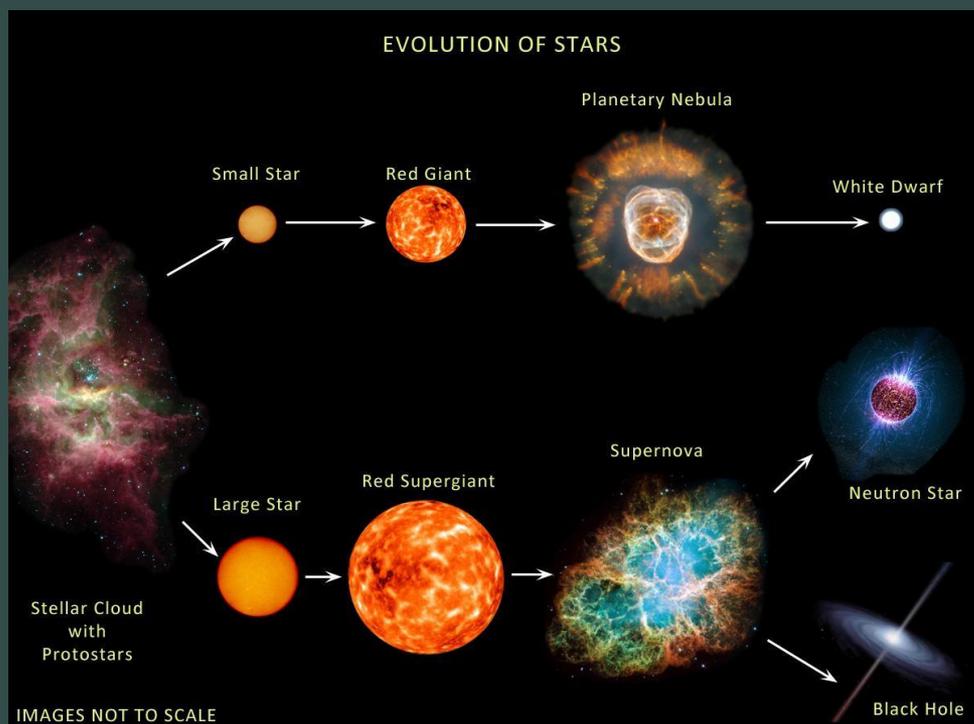
Top View



Side View



Выброс планет звездами



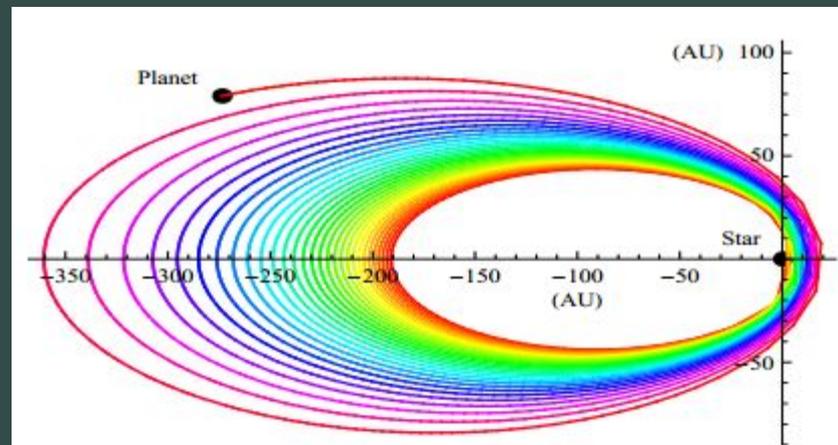
Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!

1107.1239, 1203.3139

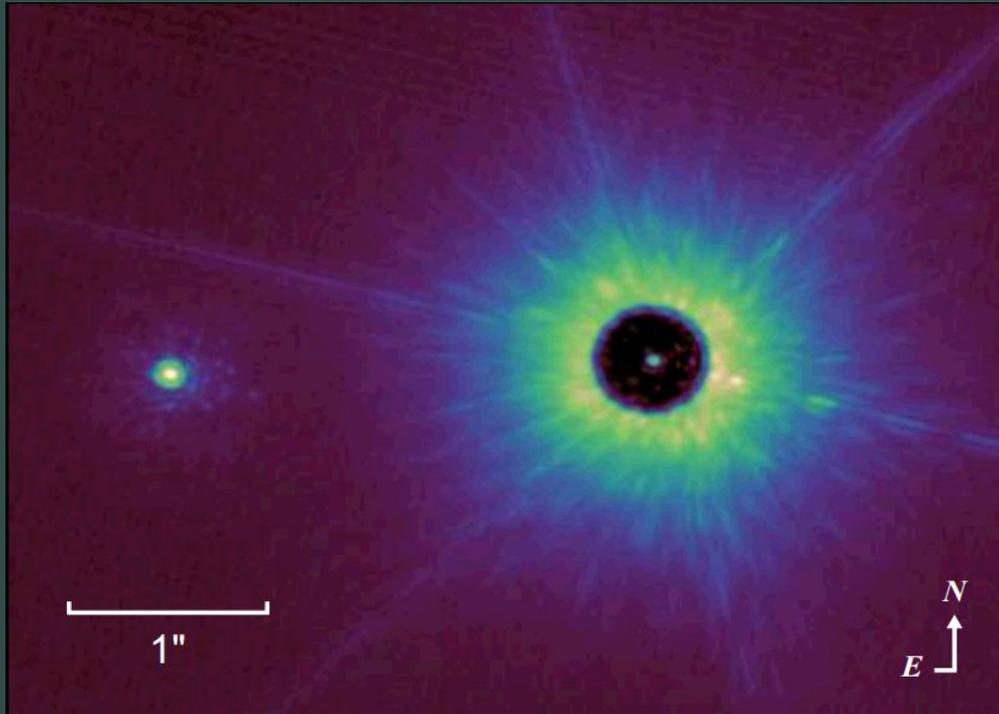
Что происходит с планетами в ходе эволюции звезды?

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»



Самое свежее изображение



Бурый карлик у красного карлика.
1RXS J2351+3127.
Изображение получено на телескопе Кекк II.
Масса бурого карлика 30-40 масс Юпитера.
1205.2084

