

Экзопланеты: как открываем и изучаем?

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

Экзопланеты

Одним из самых важных открытий последних 30 лет стало обнаружение экзопланет.

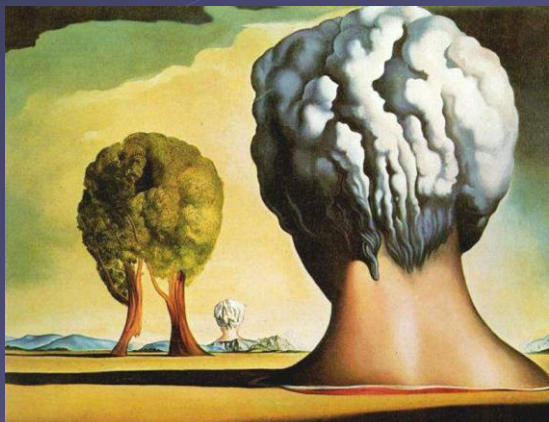
Сейчас специализированные наземные программы и спутники существенно увеличили число известных планет у других звезд.

На данный момент >4000 планет (exoplanet.eu) плюс несколько тысяч кандидатов.



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).

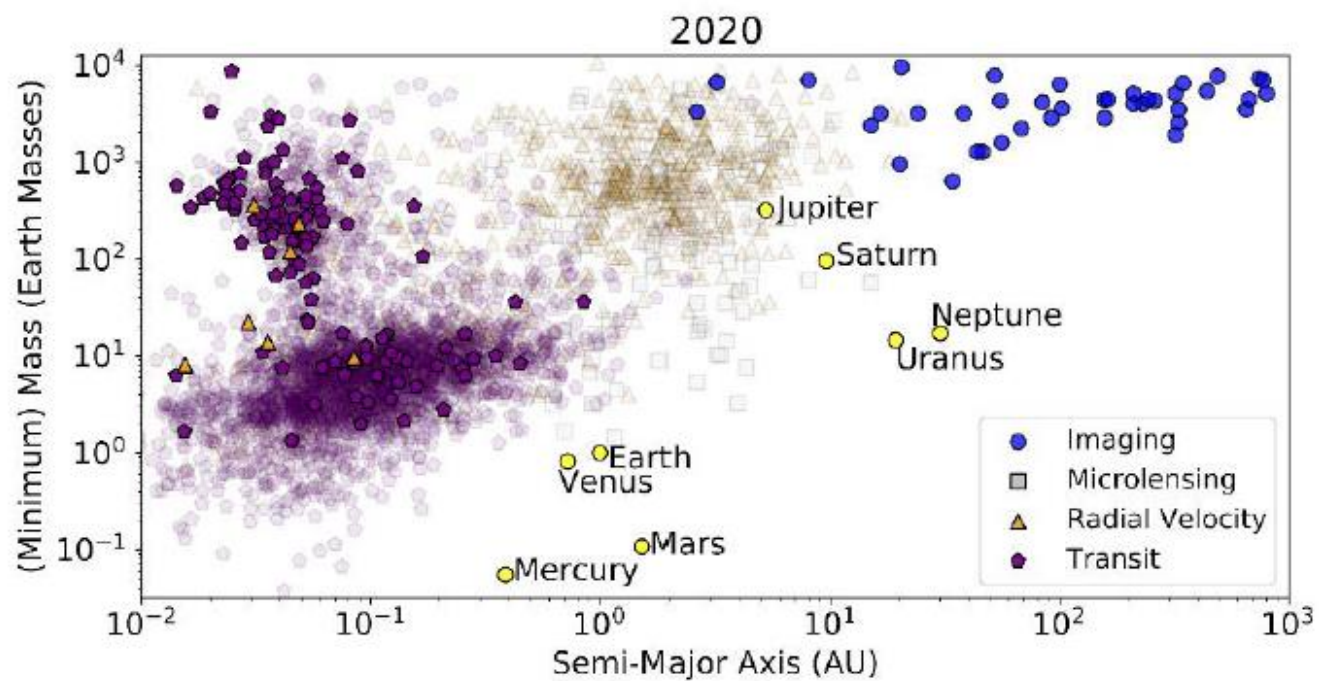
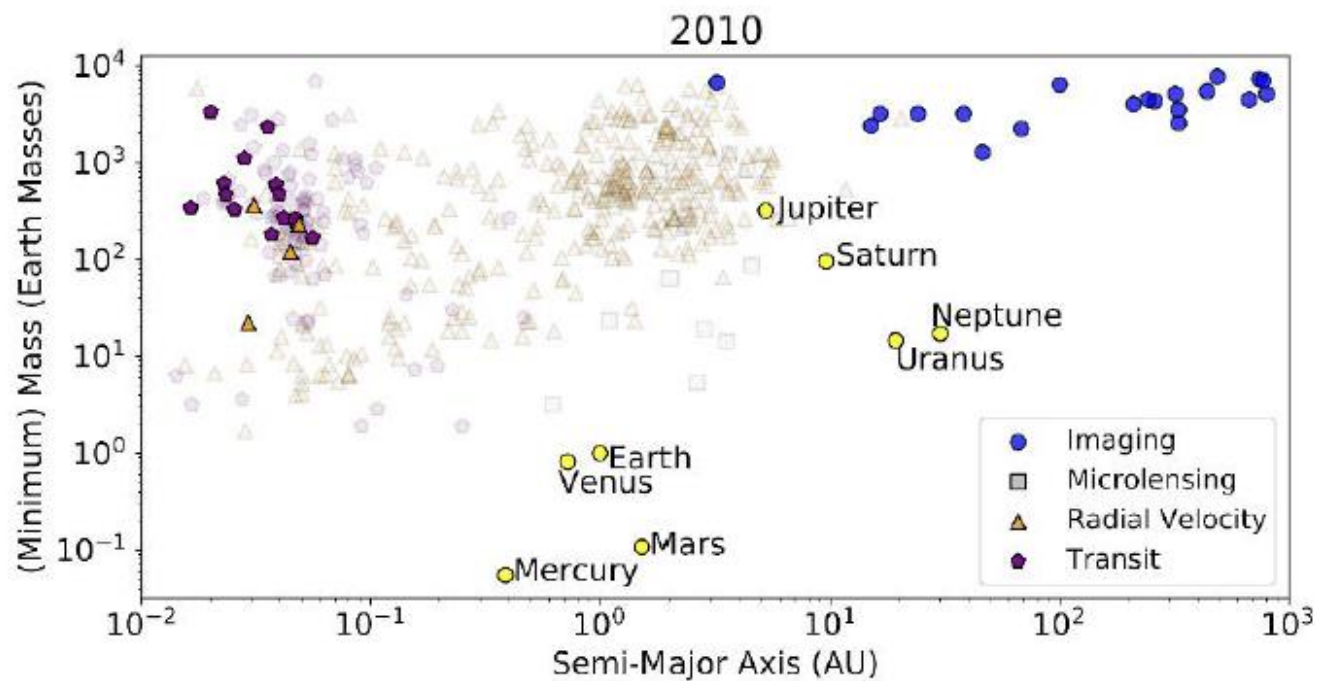
В 2015 г. впервые экзопланетам присвоили имена!



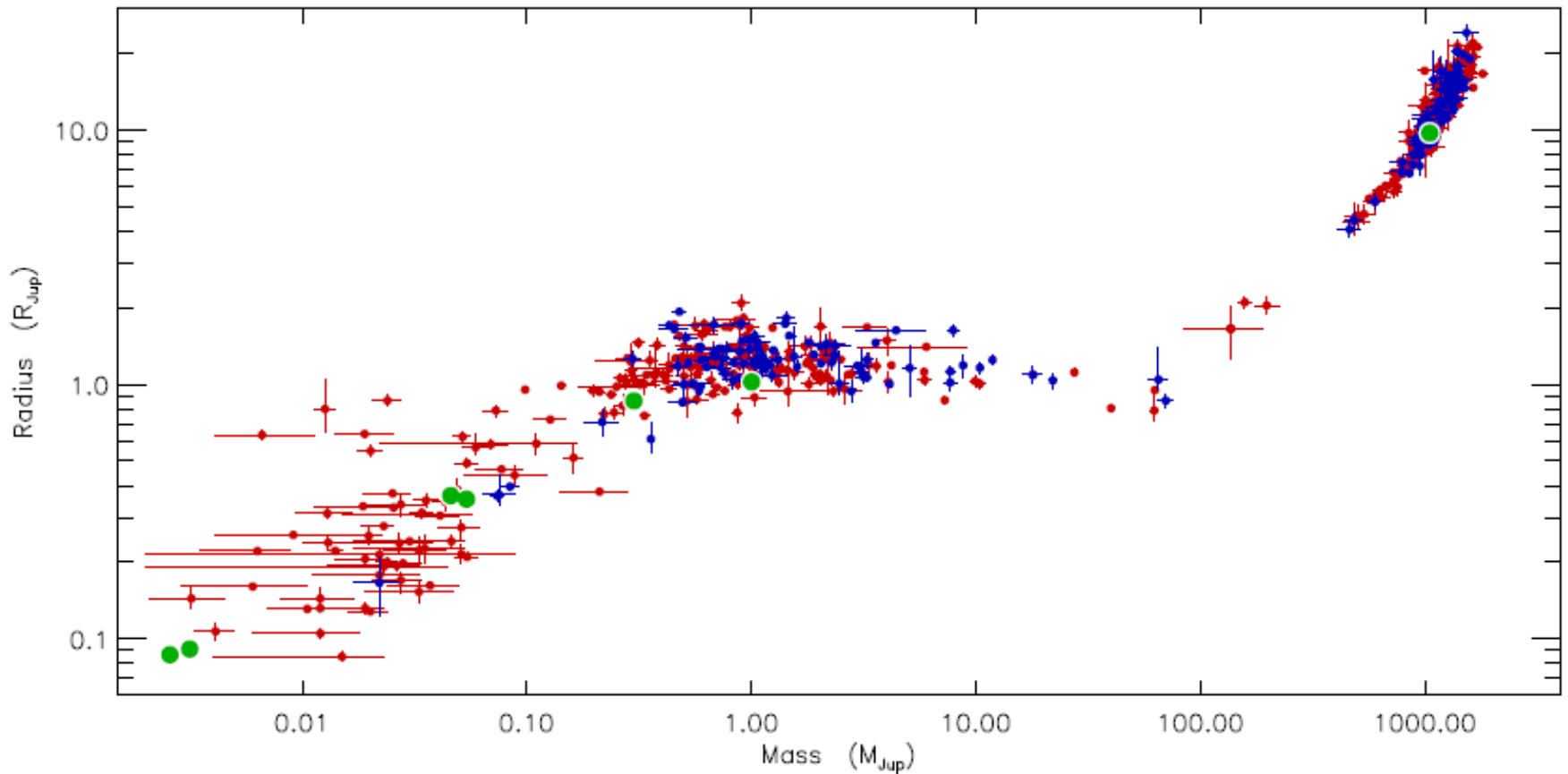
Какая экзопланета была открыта первой?

- Первая надежно подтвержденная планета, вращающаяся вокруг другой нормальной звезды (51 Пегаса), была открыта в 1995 году Майором и Кело. В результате конкурса имён МАС планета получила название Димидий (Dimidium)
- 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 октября 2019 масса была оценена недостаточно точно, чтобы сказать, планета это или бурый карлик. Теперь мы знаем – что это бурый карлик ([1910.07835](#)).





Планеты и звезды

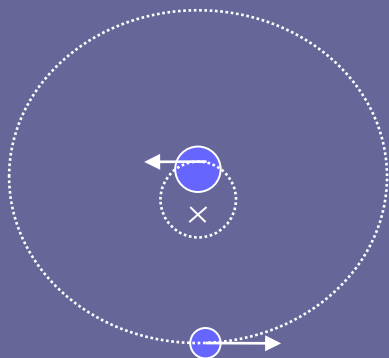


Бурые карлики имеют массы от $\sim(12-13)$ до $\sim(75-80)$ масс Юпитера.

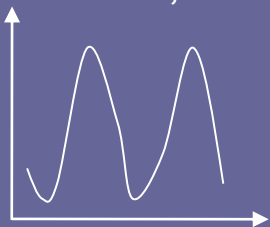
Как открывают?

1. Изменение лучевой скорости звезды (вращение вокруг общего центра масс системы звезда-планета). ~800 планет.
2. Прохождение планеты по диску звезды. >2900 планет (плюс тысячи кандидатов).
3. Микролинзирование. ~80 планет.
4. По таймингу (пульсары, белые карлики, двойные и планетные системы). >30 планет.
5. Прямые изображения. >10 планет.
6. Выделение света планеты. Десятки планет.
7. Астрометрия. 2(?) планеты

Лучевые скорости



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



Измеряем:

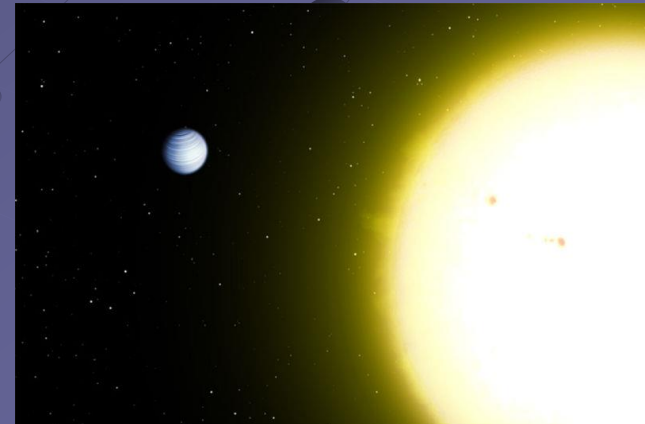
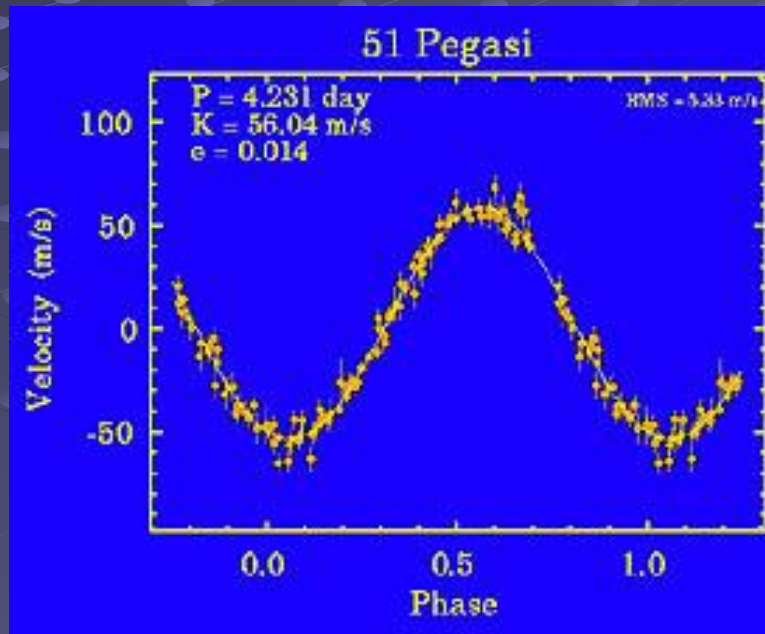
- Период
- Массу



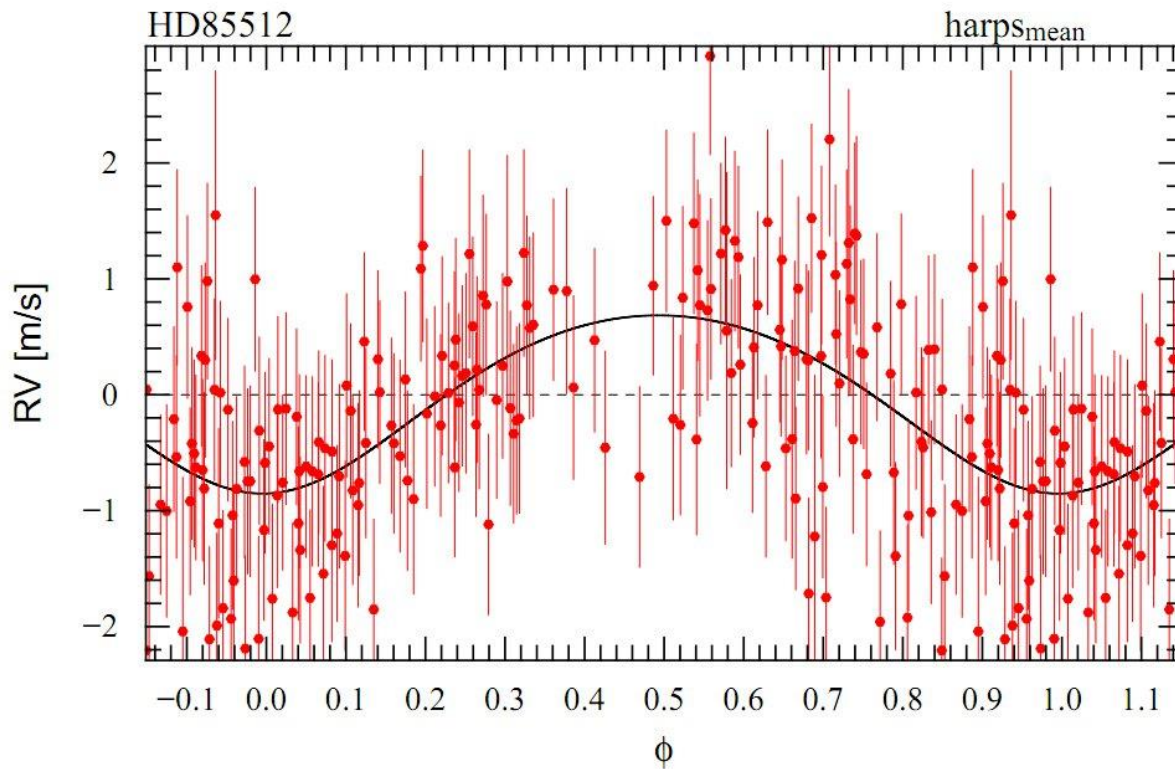
Первая надежная экзопланета у нормальной звезды

51 Пегаса

Michel Mayor и Didier Queloz 1995 год



Первые открытия легких планет

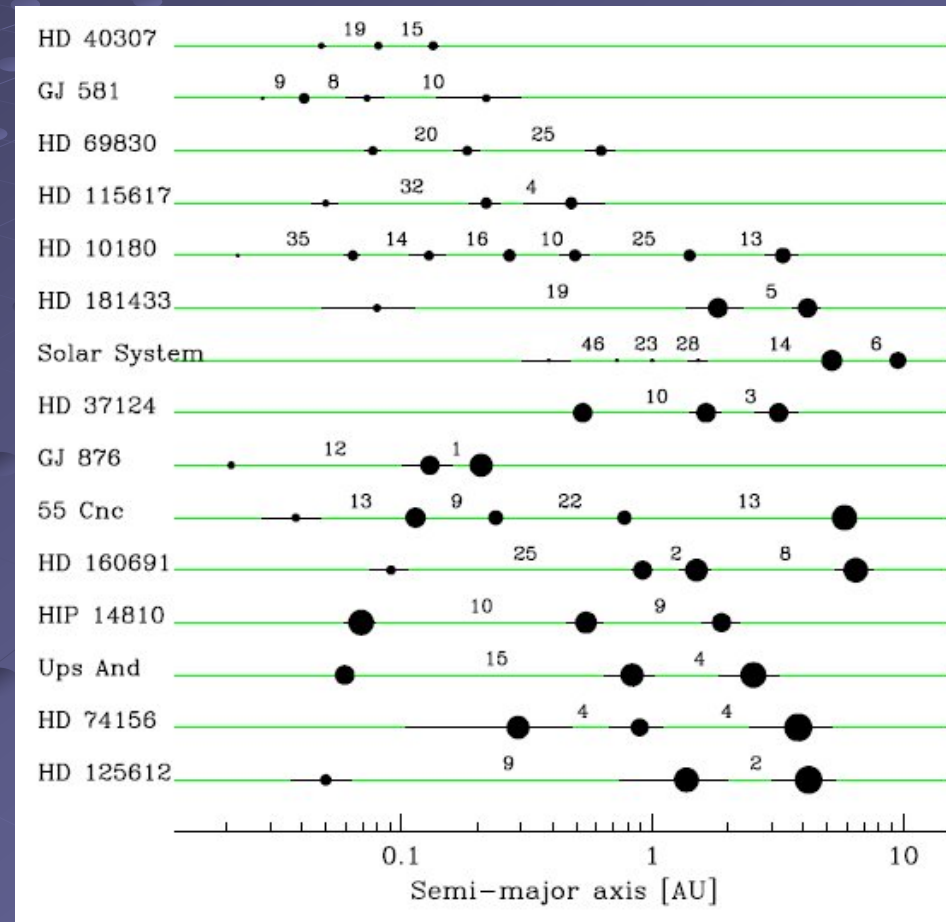


Маломассивная планета на самой границе зоны обитаемости. Открыта по данным HARPS. Это наземный проект. Измеряется масса, т.к. наблюдается изменение лучевой скорости звезды.

Семь планет около HD 10180

HARPS

Надежно обнаружено пять
нептуноподобных планет
(12-25 масс Земли) →
на орбитах от 0.06 до 1.4 а.е.
Также, возможно, есть одна
более массивная
и одна менее массивная
планеты.



Планета у Проксимы Центавра

Расстояние 1.3 пк -
ближайшая!

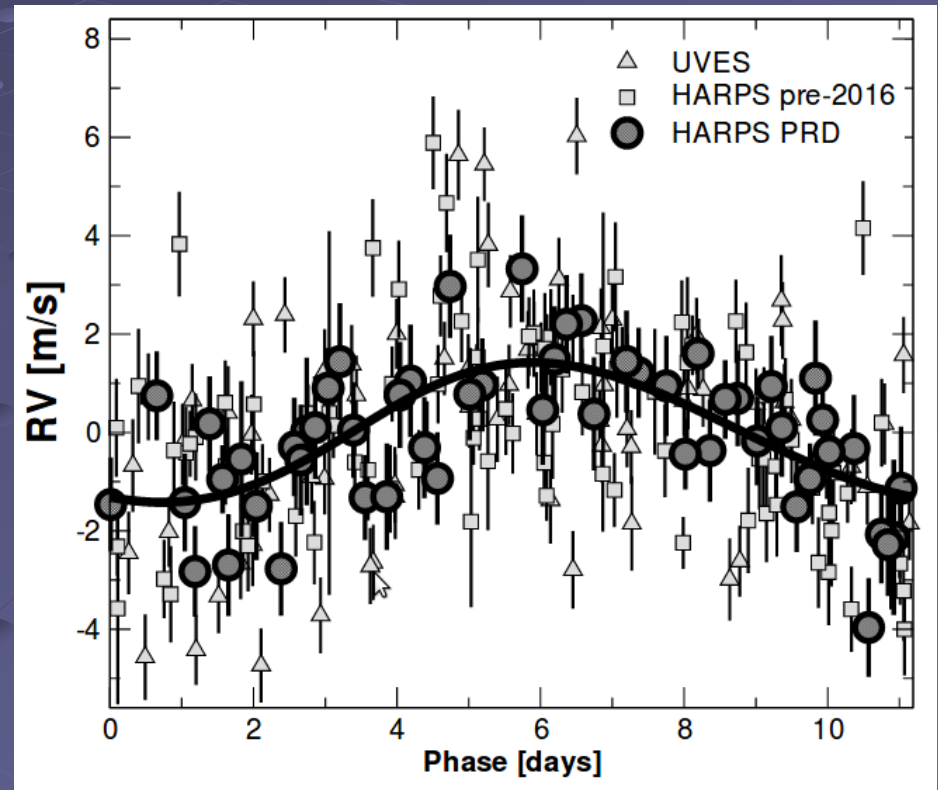
Масса звезды 0.12 солнечных.

Масса планеты 1.3 земных.

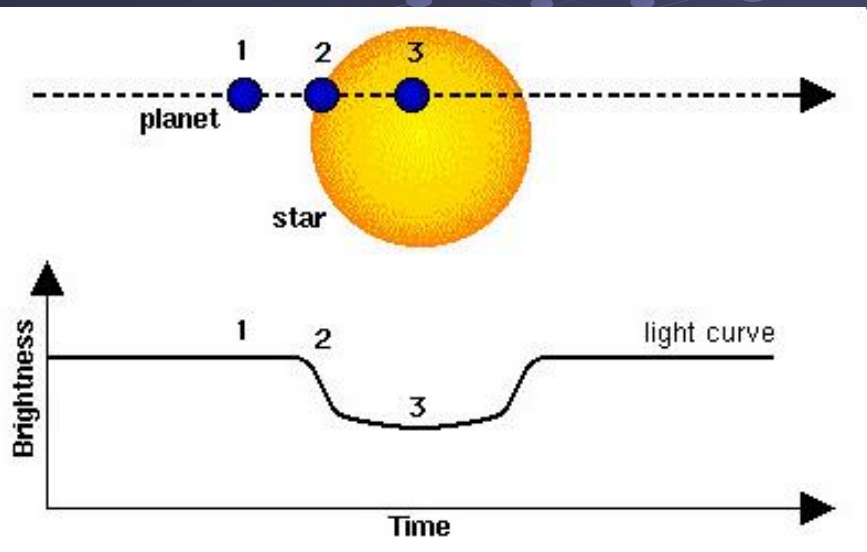
Расстояние от звезды 0.05 а.е.

Период обращения 11 дней.

Температура поверхности
позволяет существовать
жидкой воде!



Транзитные экзопланеты

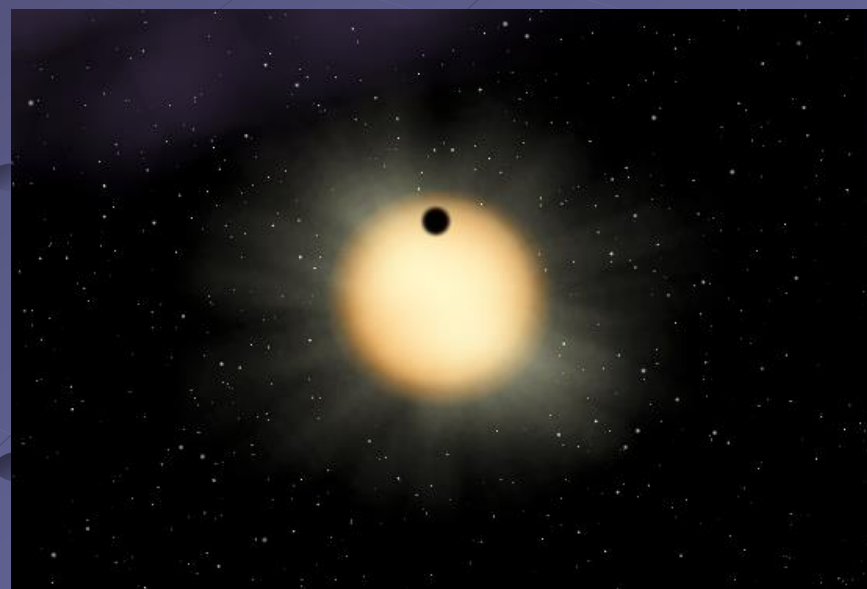


Прохождение планеты по диску звезды (мы почти в плоскости орбиты). Ослабление блеска звезды из-за «затмения».

Измеряем период и радиус.

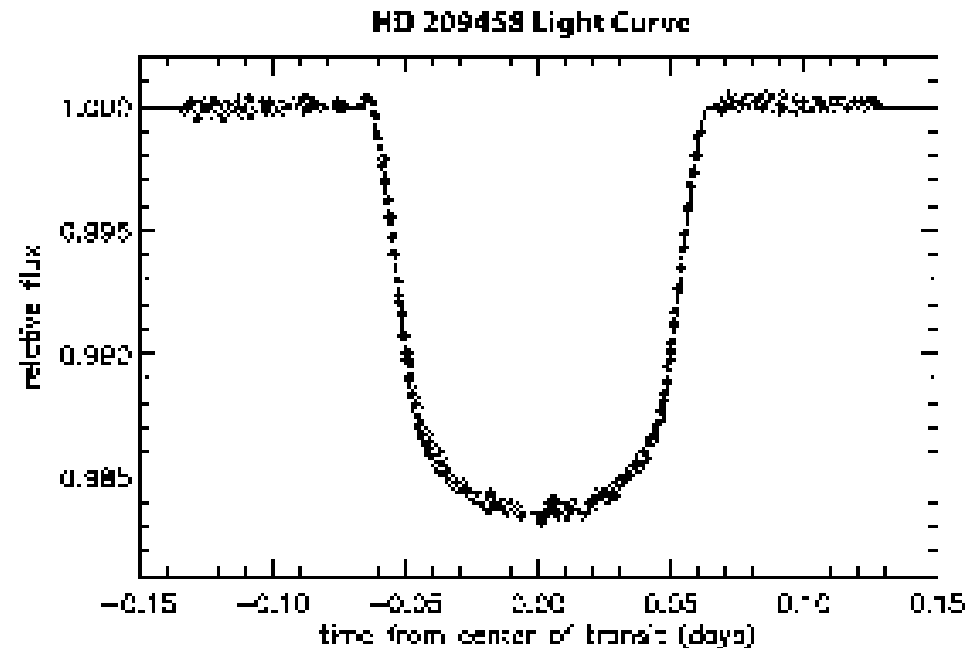
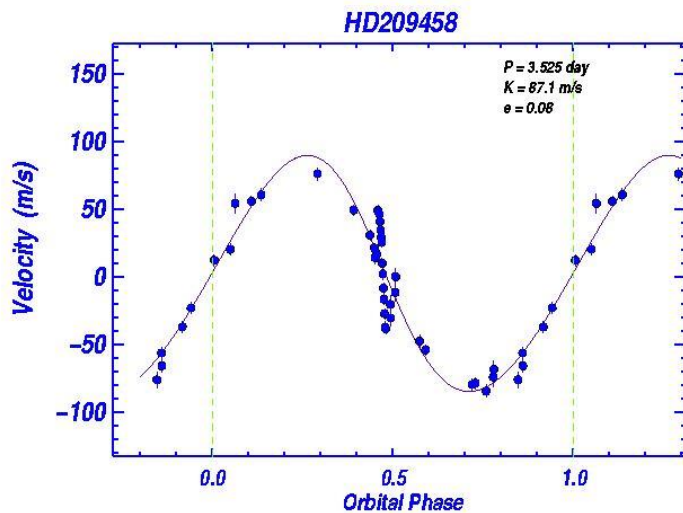
Сейчас известны
тысячи транзитных планет
и тысячи кандидатов

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
<http://exoplanet.eu>

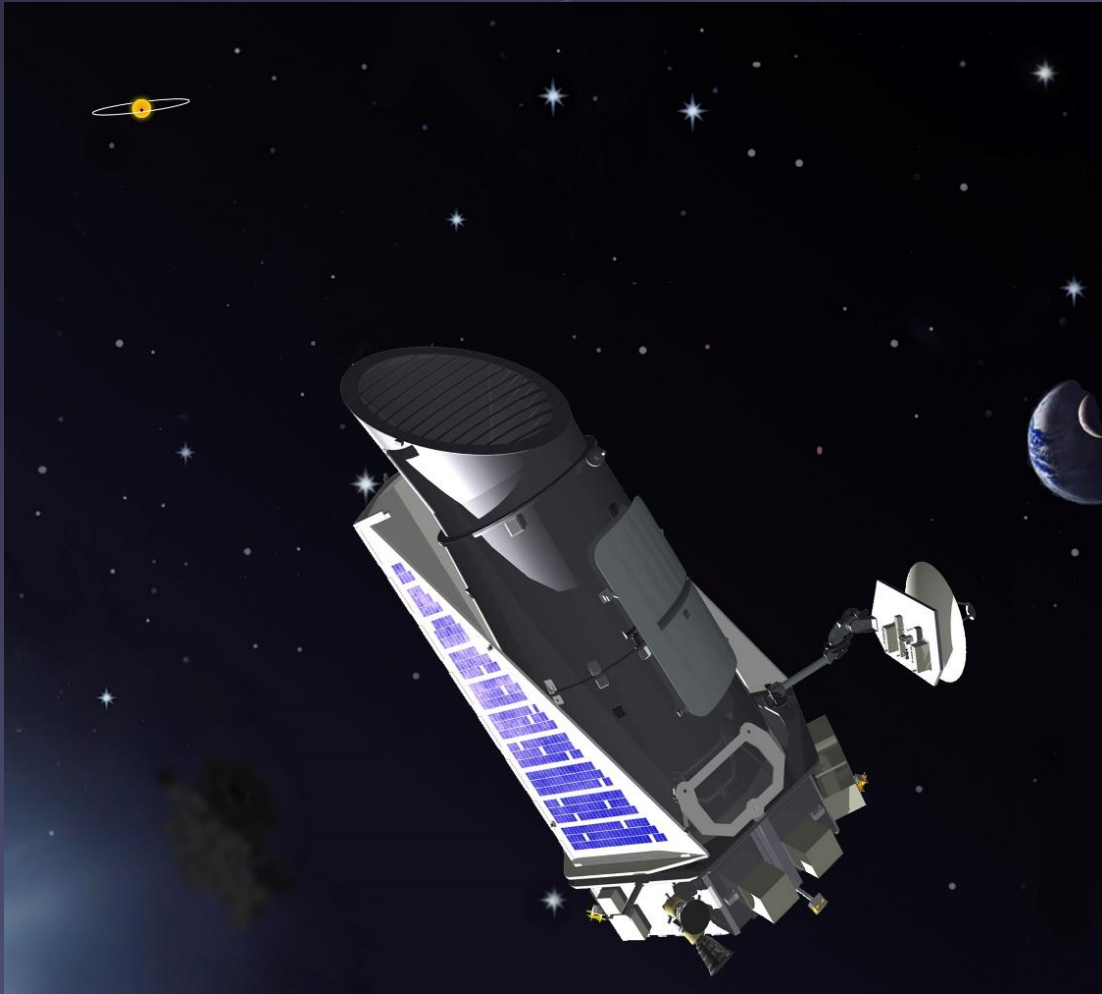


Первое измерение транзита: HD 209458

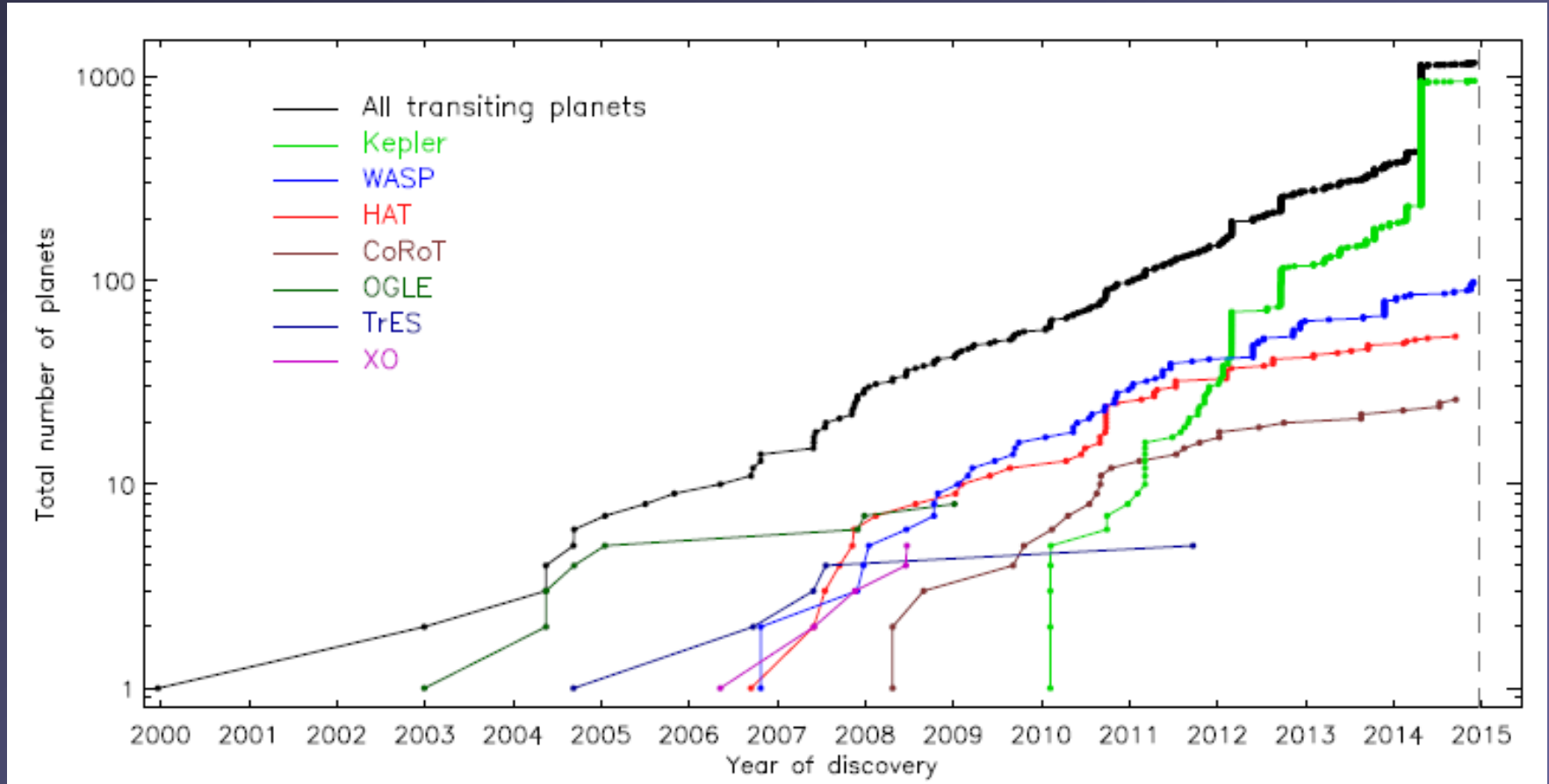
Первое измерение транзита экзопланеты было проведено при наземных наблюдениях. Это было сделано для известной планеты, обнаруженной методом лучевых скоростей. Т.о., ее орбитальные параметры были достаточно хорошо известны.



Kepler и CoRoT



Темп открытия транзитных планет

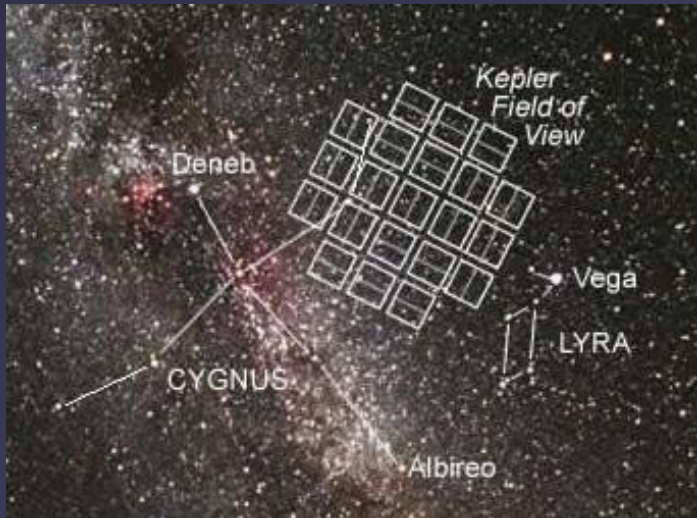


1411.5517

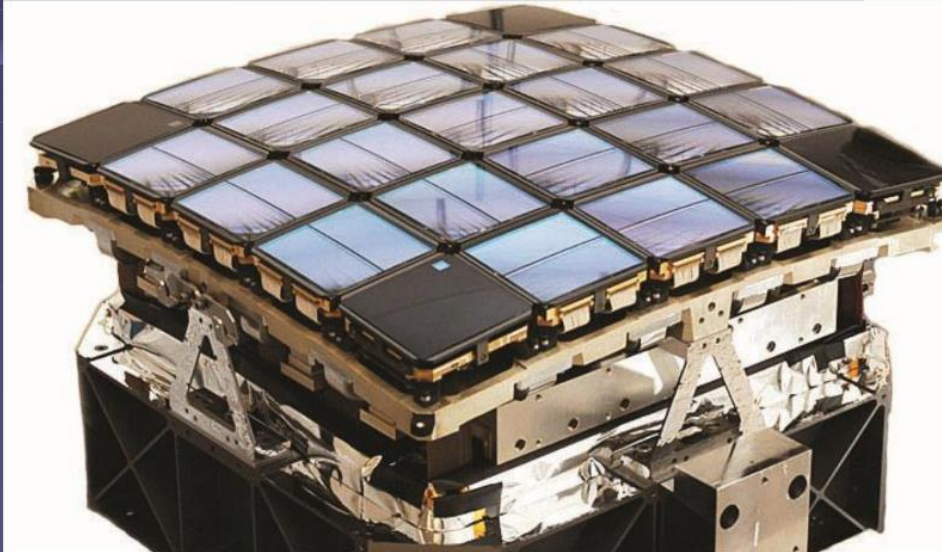
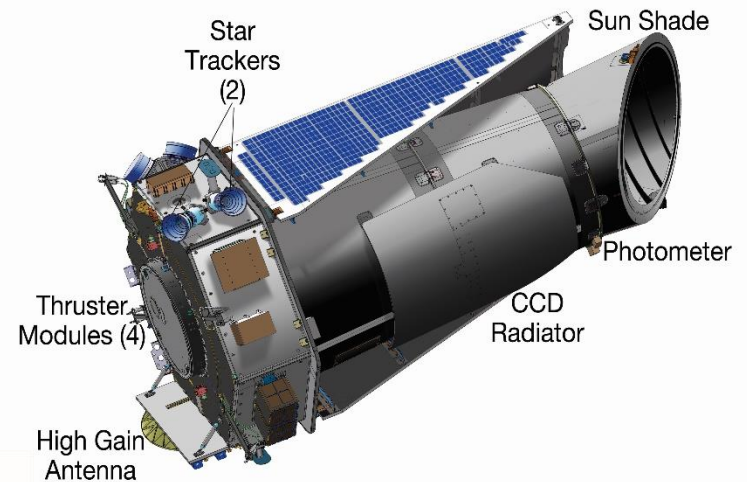
Сейчас работают наземные установки, TESS, плюс есть огромный архив Кеплера.

Кеплер

2009-2013 + K2-mission
0.95 м телескоп

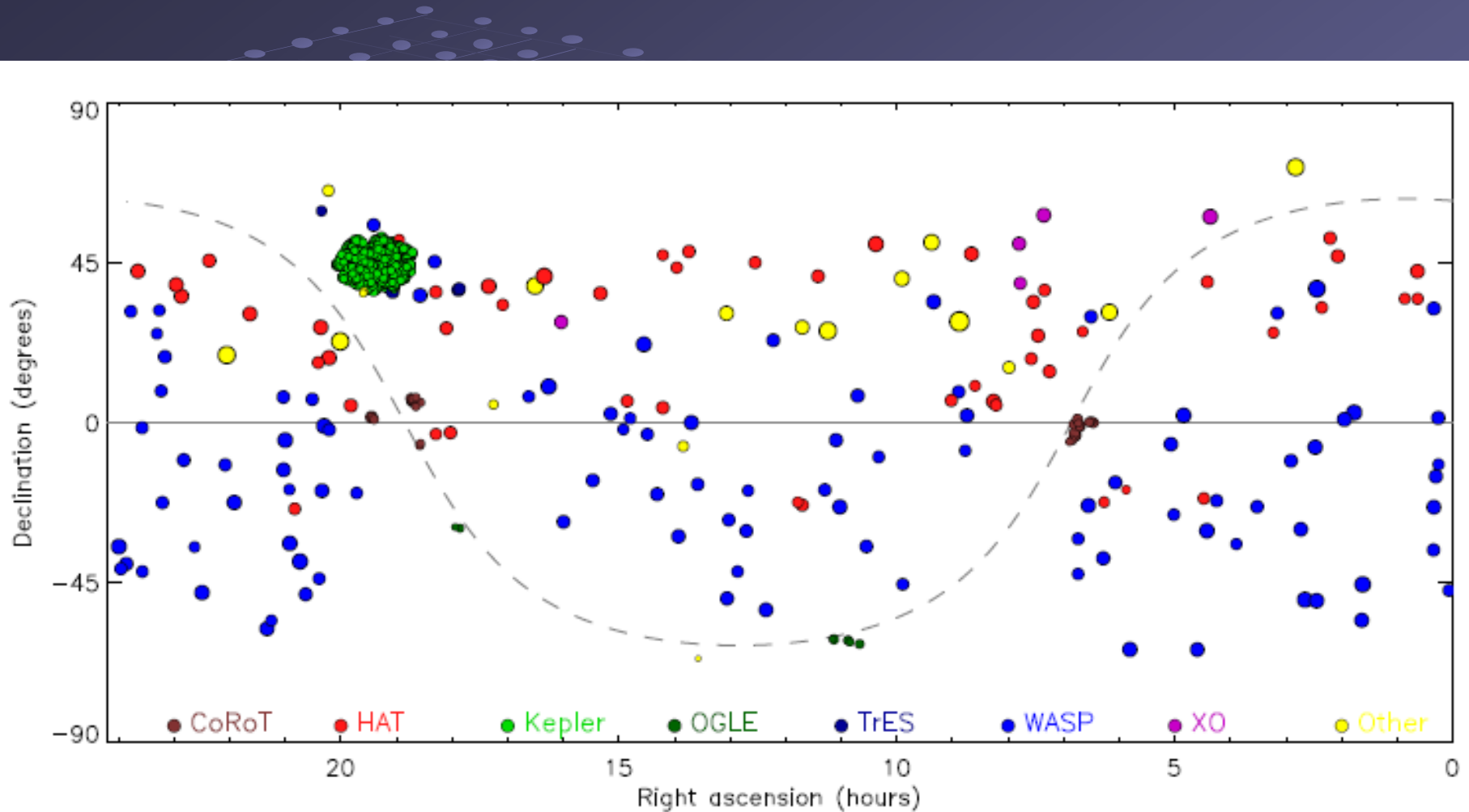


Monitoring of >150 000 stars



Поле зрения
~115 кв. градусов

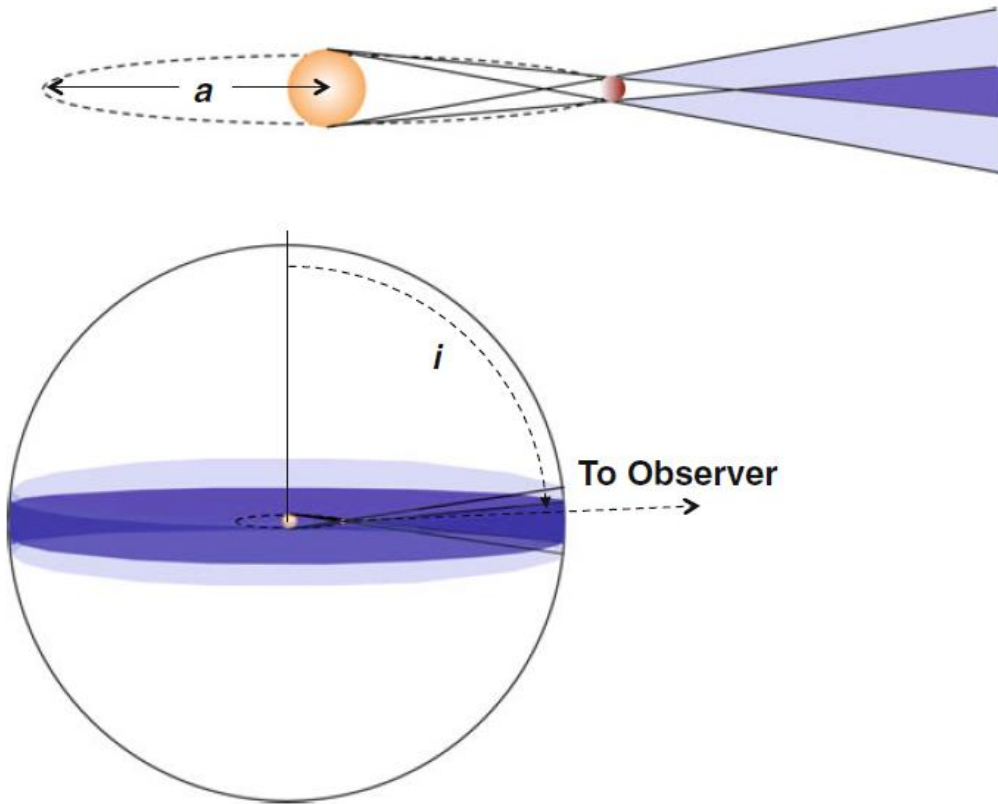
Транзитные планеты на небе



Вероятность транзита

Вероятность транзита составляет около 1%.

Она выше для планет ближе к звезде, планет большего размера, и для более крупных звезд.

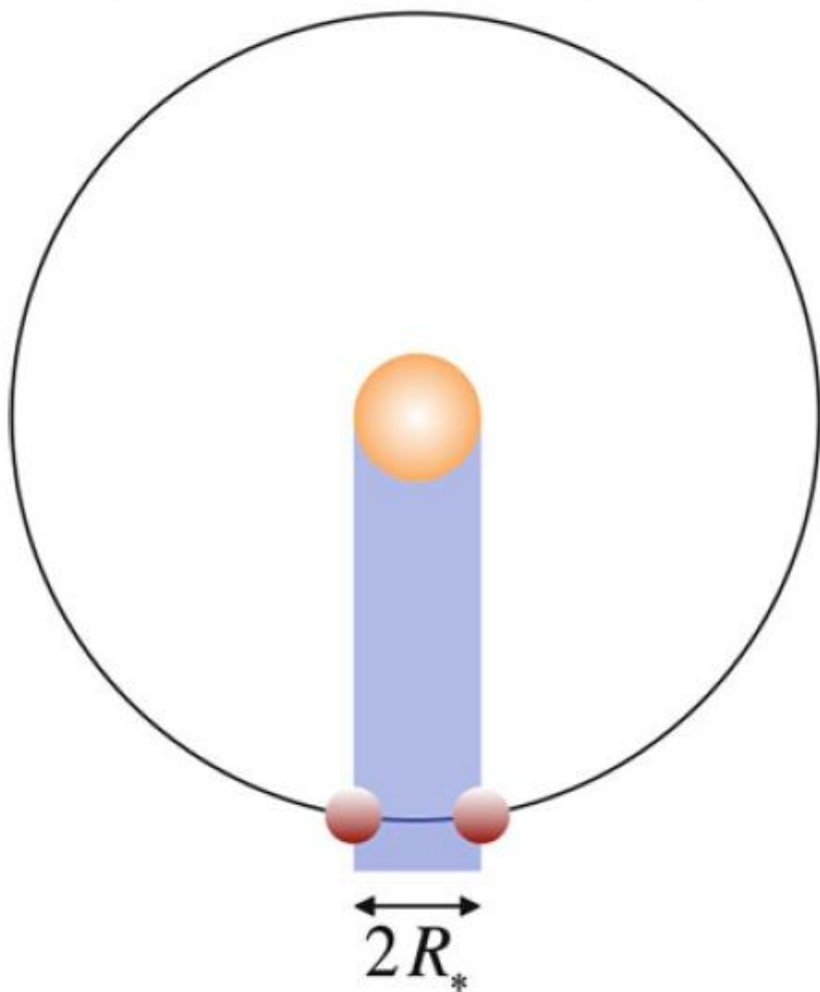


Andrew Cameron (in Bozza et al. 2016)

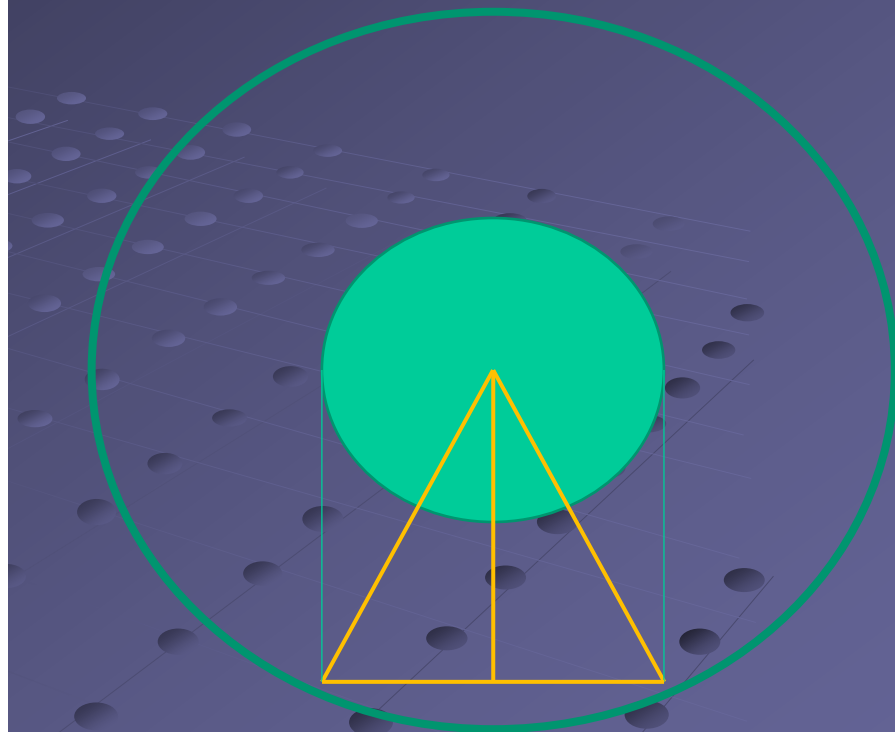
$$\Pr \left(\cos i < \frac{R_*}{a} \right) \simeq 0.0046 \left(\frac{R_*}{R_\odot} \right) \left(\frac{1 \text{ au}}{a} \right).$$

Длительность транзита

circumference = $2\pi a$



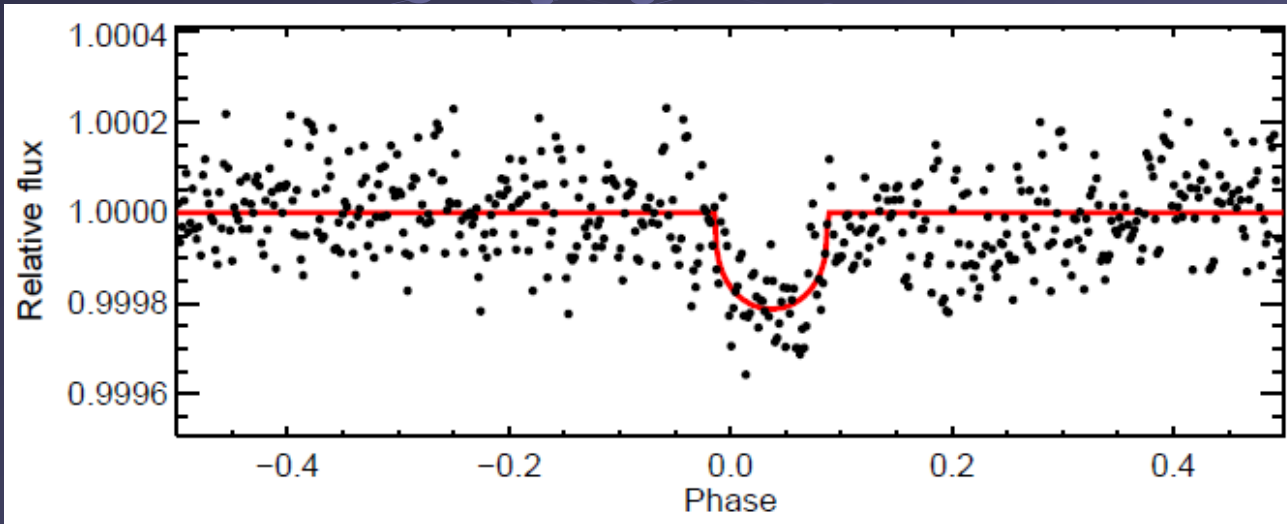
Andrew Cameron (in Bozza et al. 2016)



$$\frac{T}{P} = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \frac{R_*}{a}$$

$$\frac{T}{P} = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} R_* \left(\frac{4\pi^2}{GM_* P^2} \right)^{1/3}$$

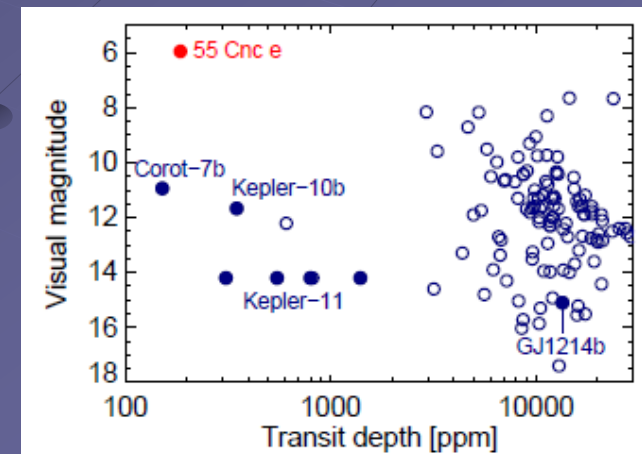
Планета у звезды, видимой невооруженным глазом



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



Небольшой канадский
спутник MOST



Кеплер-11



Вокруг 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

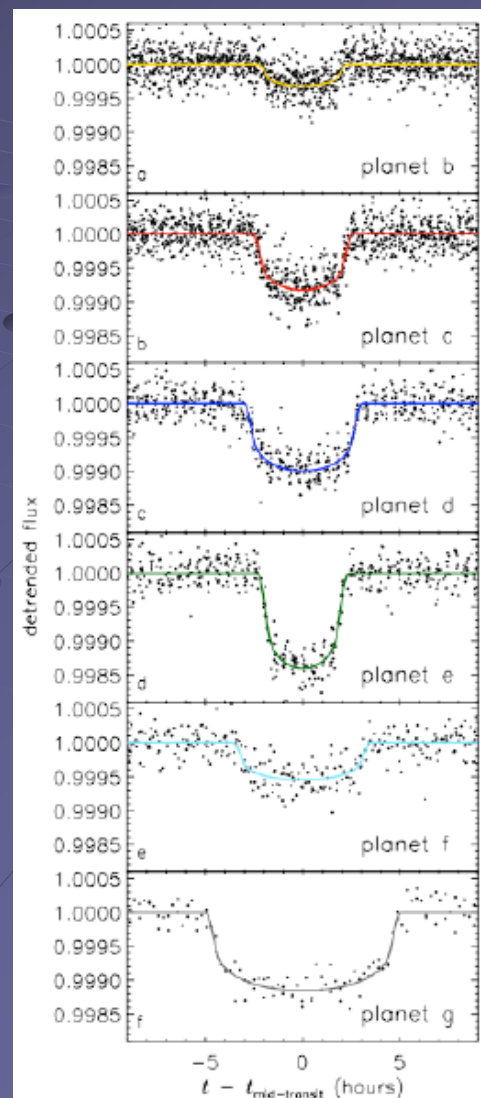
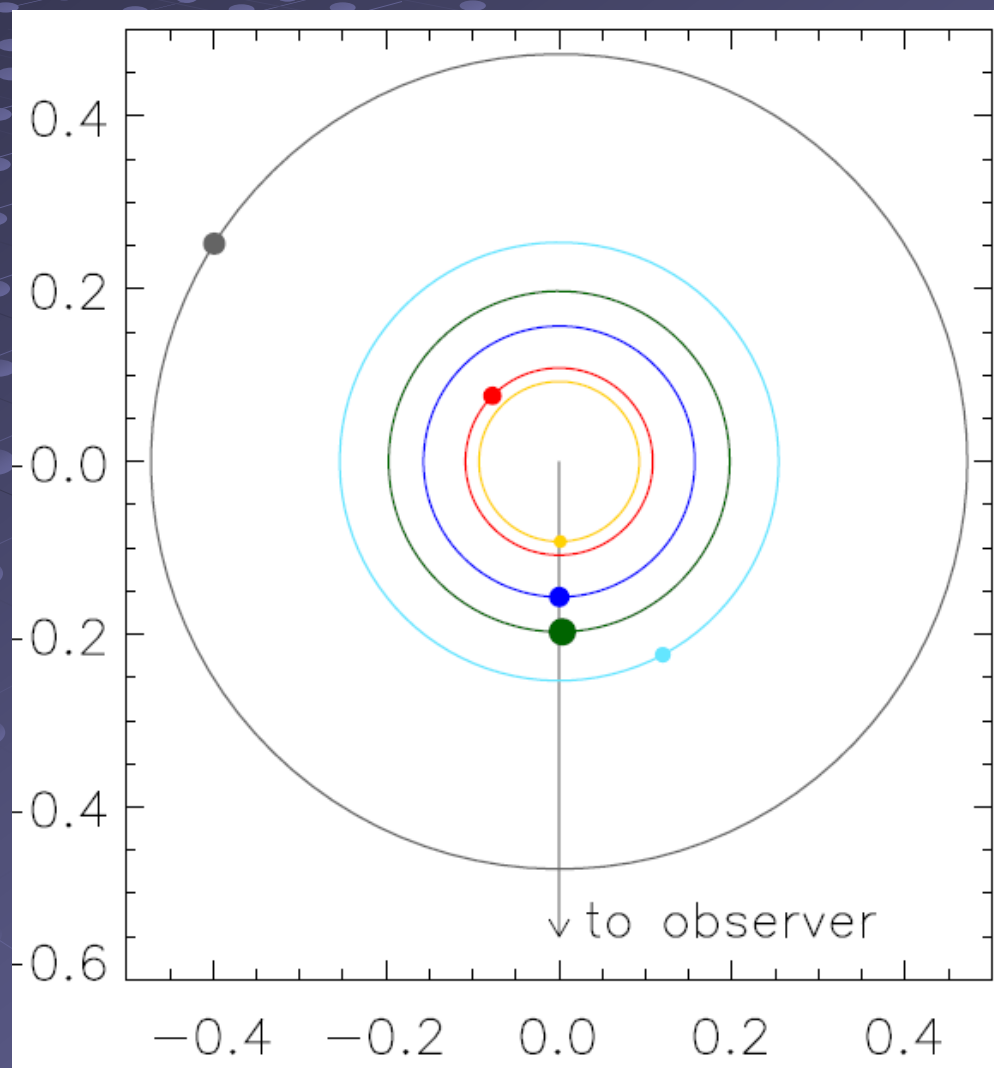
4-9

7-11

1-5

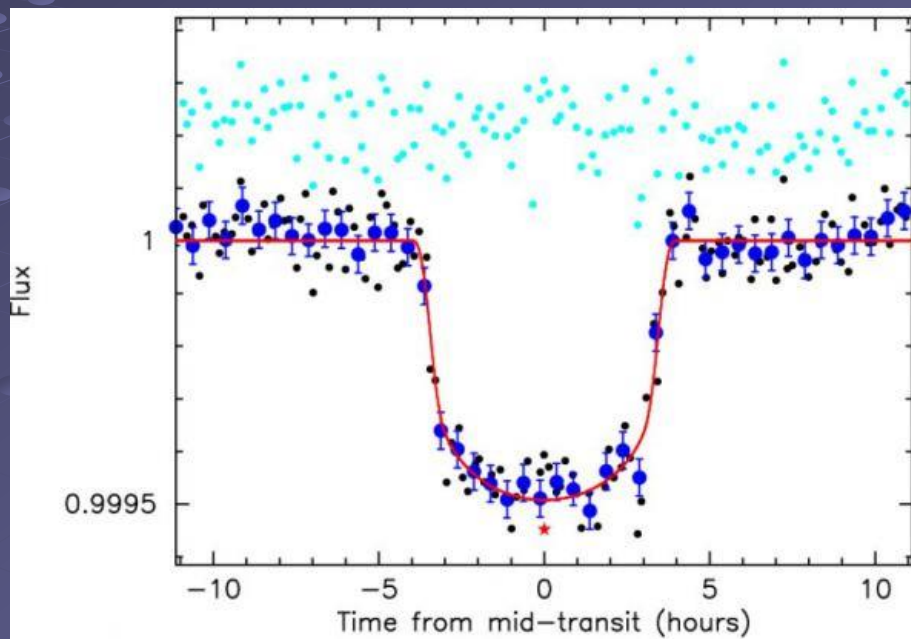
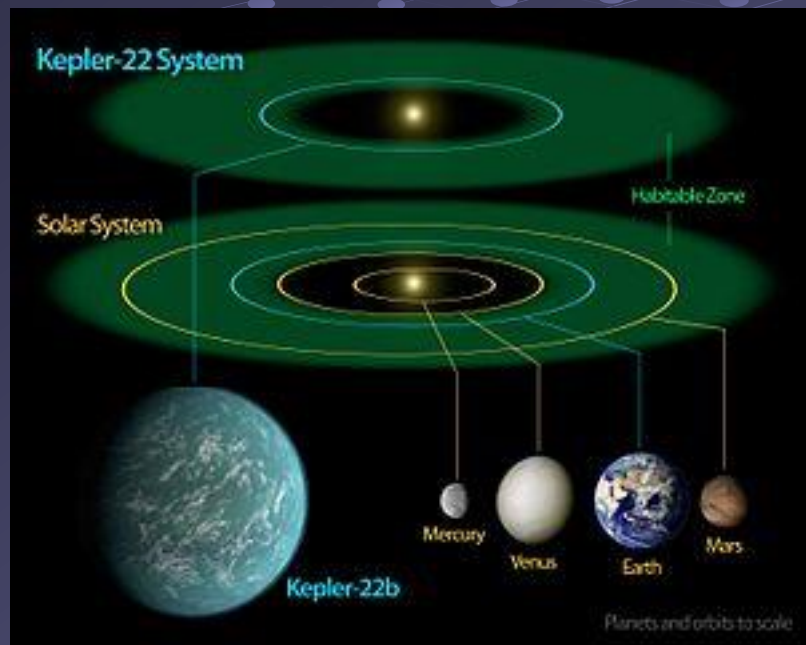
<300

1102.0291



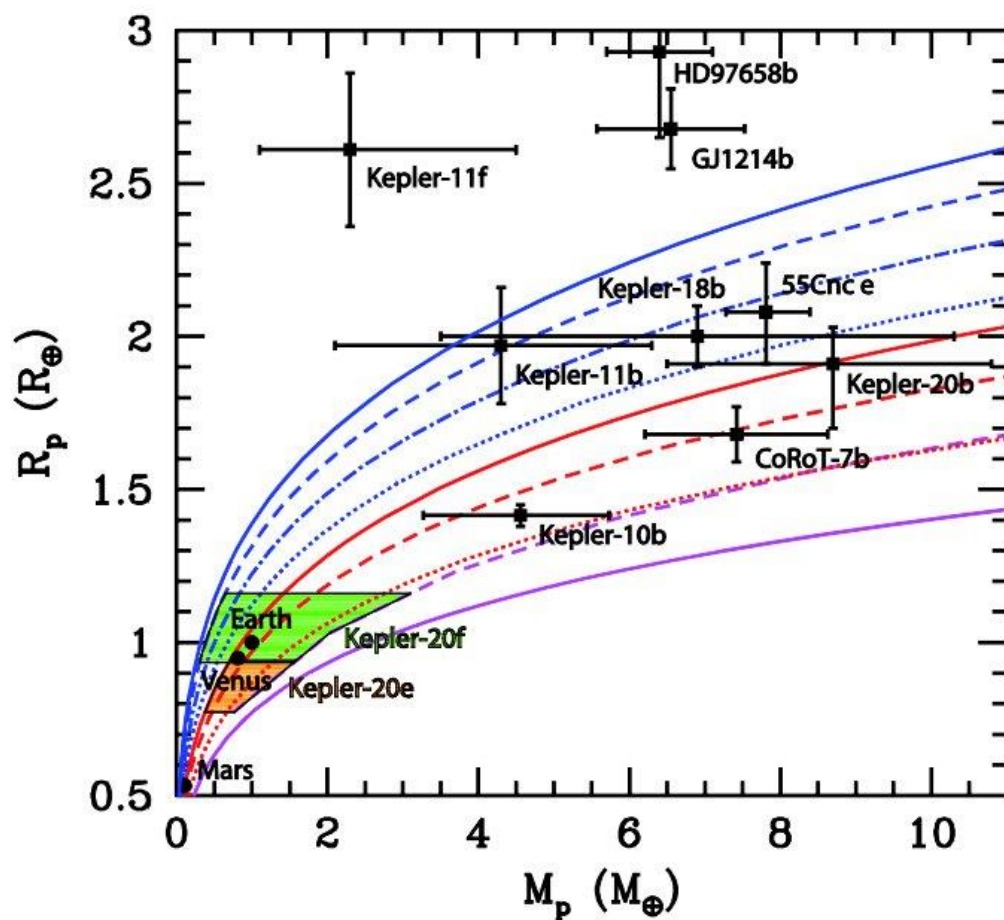
Планета Kepler-22b

Первая надежная планета типа Земли в зоне обитаемости



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 обитаемости.

Маленькие планеты



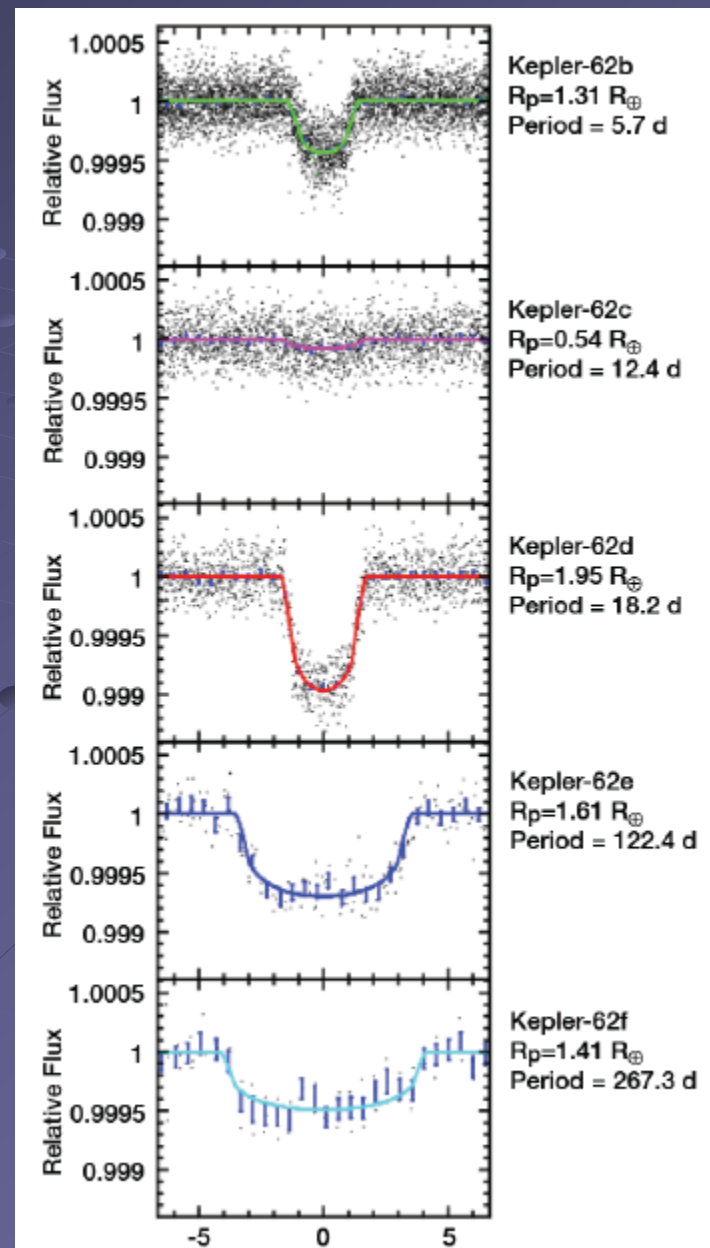
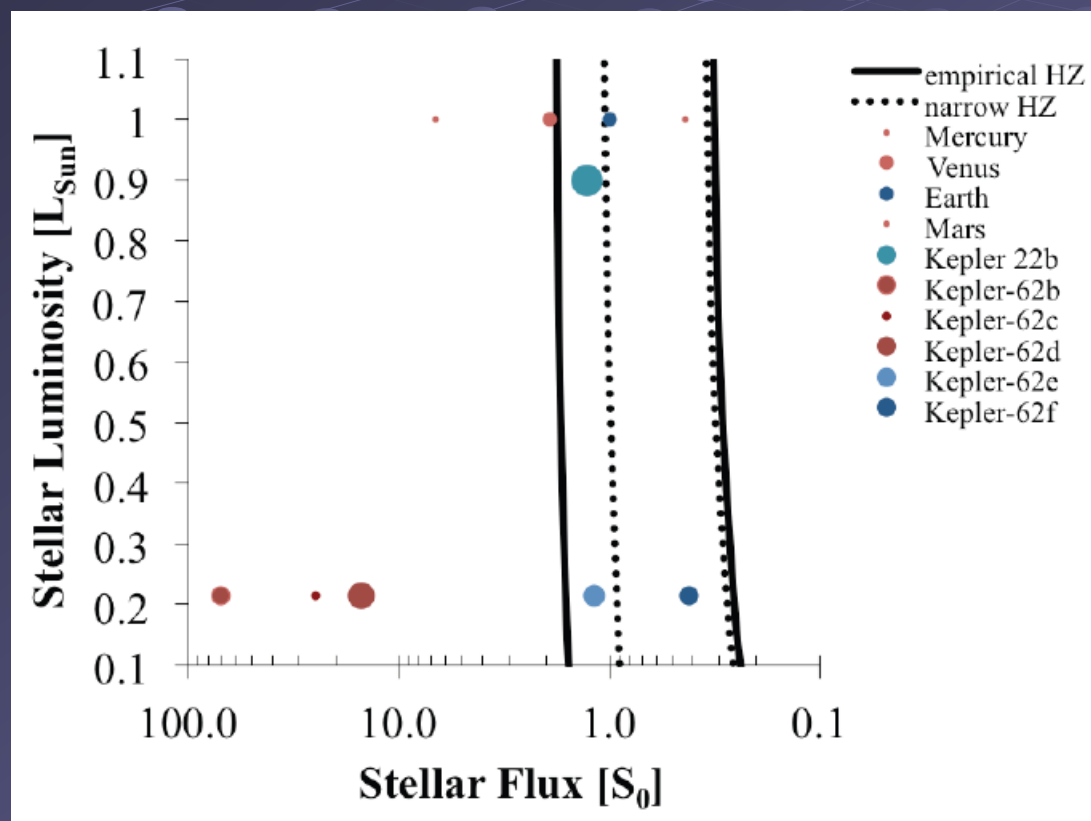
Система Кеплер-20.

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.

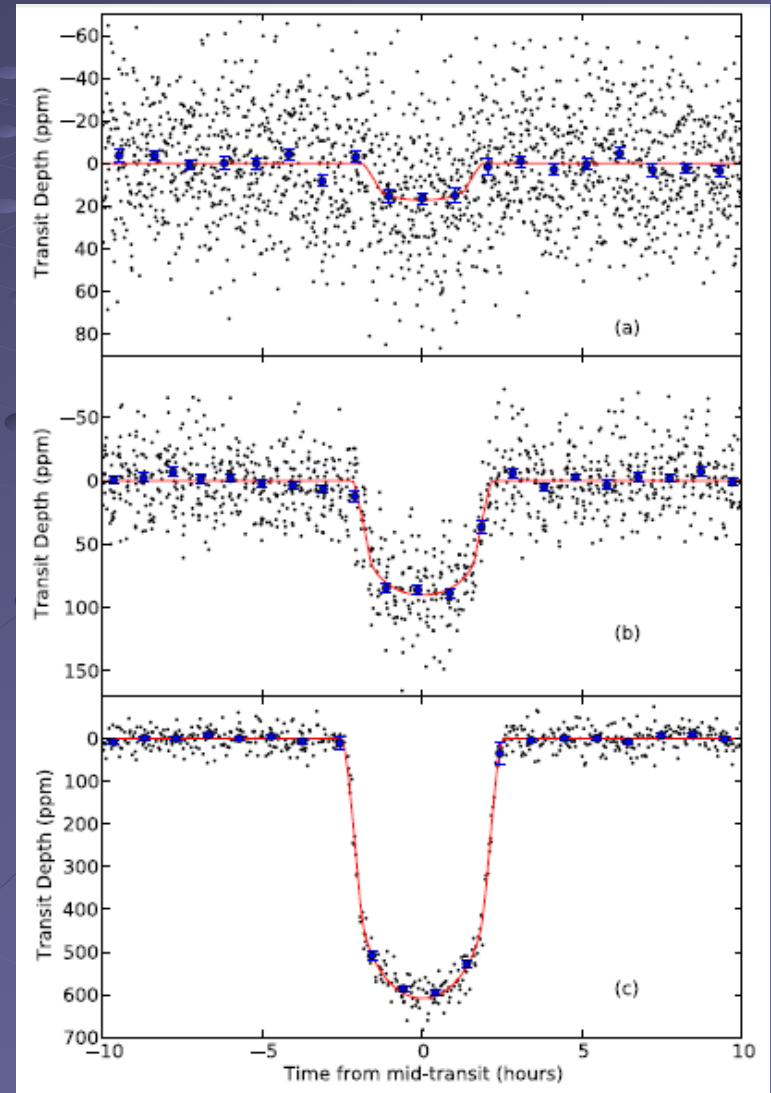
Kepler-62

Система пяти планет
с планетами с размером 1.4 и 1.6 земных
в зоне обитаемости



Планета с размером меньше меркурианского

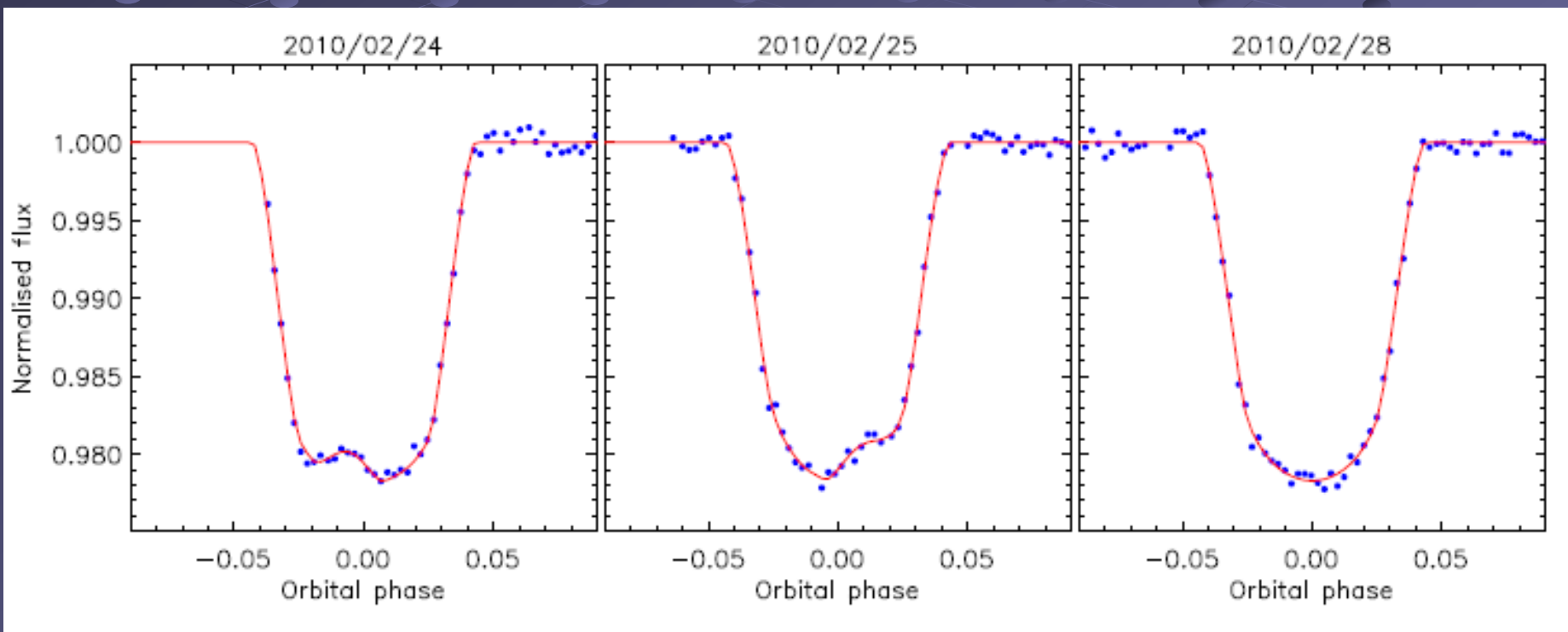
Кеплер-37 b -
это первая планета,
чей размер меньше,
чем у Меркурия.



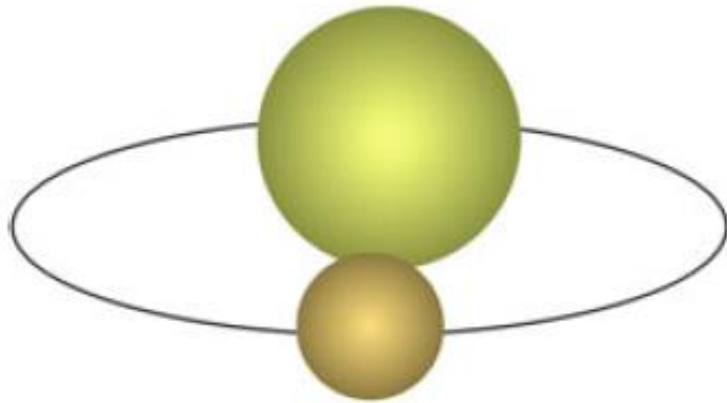
Как не перепутать с пятнами?

При поисках транзитных планет, особенно самых маленьких, сигнал от транзита можно перепутать с пятном. Поэтому важна и повторяемость событий, и форма кривой блеска.

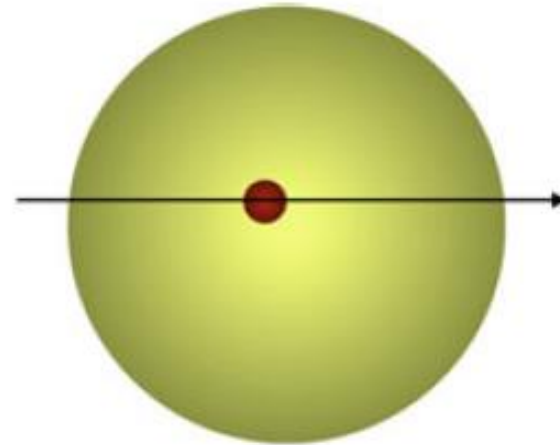
Срок жизни пятен на Солнце — от нескольких дней до нескольких месяцев.



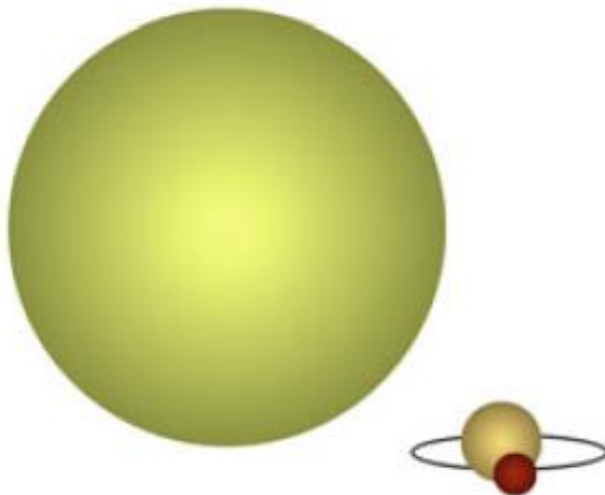
С чем еще можно перепутать?



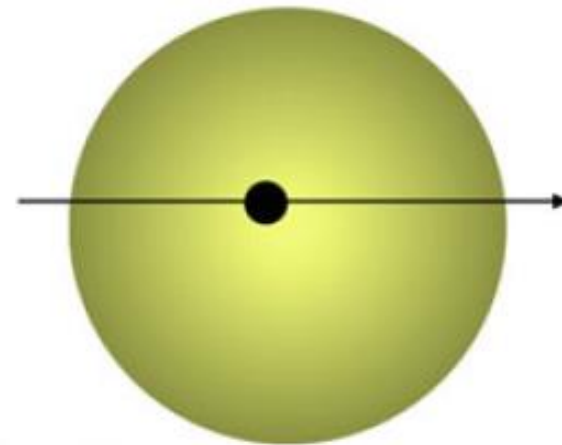
Grazing stellar binaries



Transiting red/brown dwarfs



Blended stellar binaries



Planets

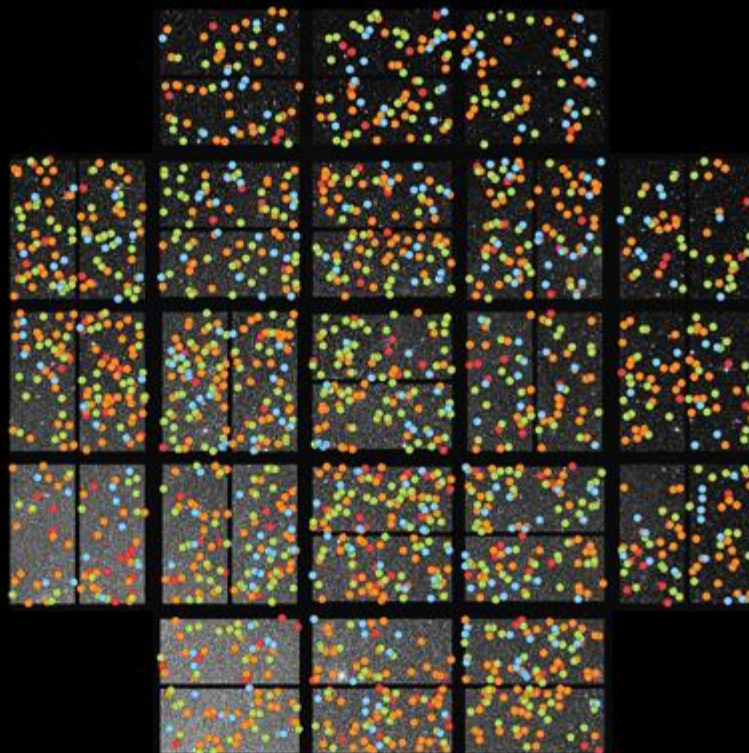
Список кандидатов – 2013

>11000 звезд
>18000 планет

Locations of Kepler Planet Candidates

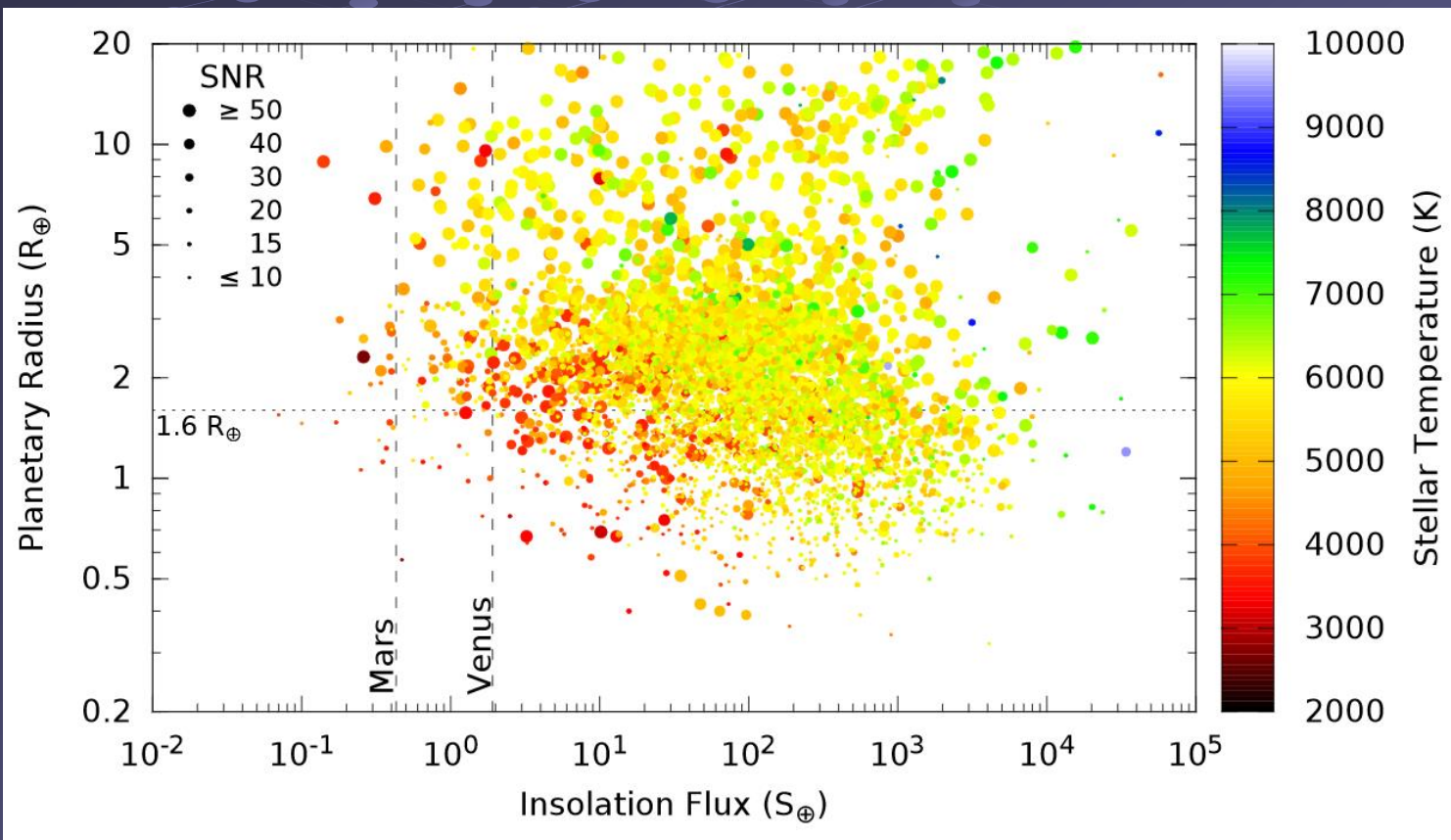
As of January 7, 2013

- Earth-size
- Super-Earth size
1.25 - 2.0 Earth-size
- Neptune-size
2.0 - 6.0 Earth-size
- Giant-planet size
6.0 - 22 Earth-size



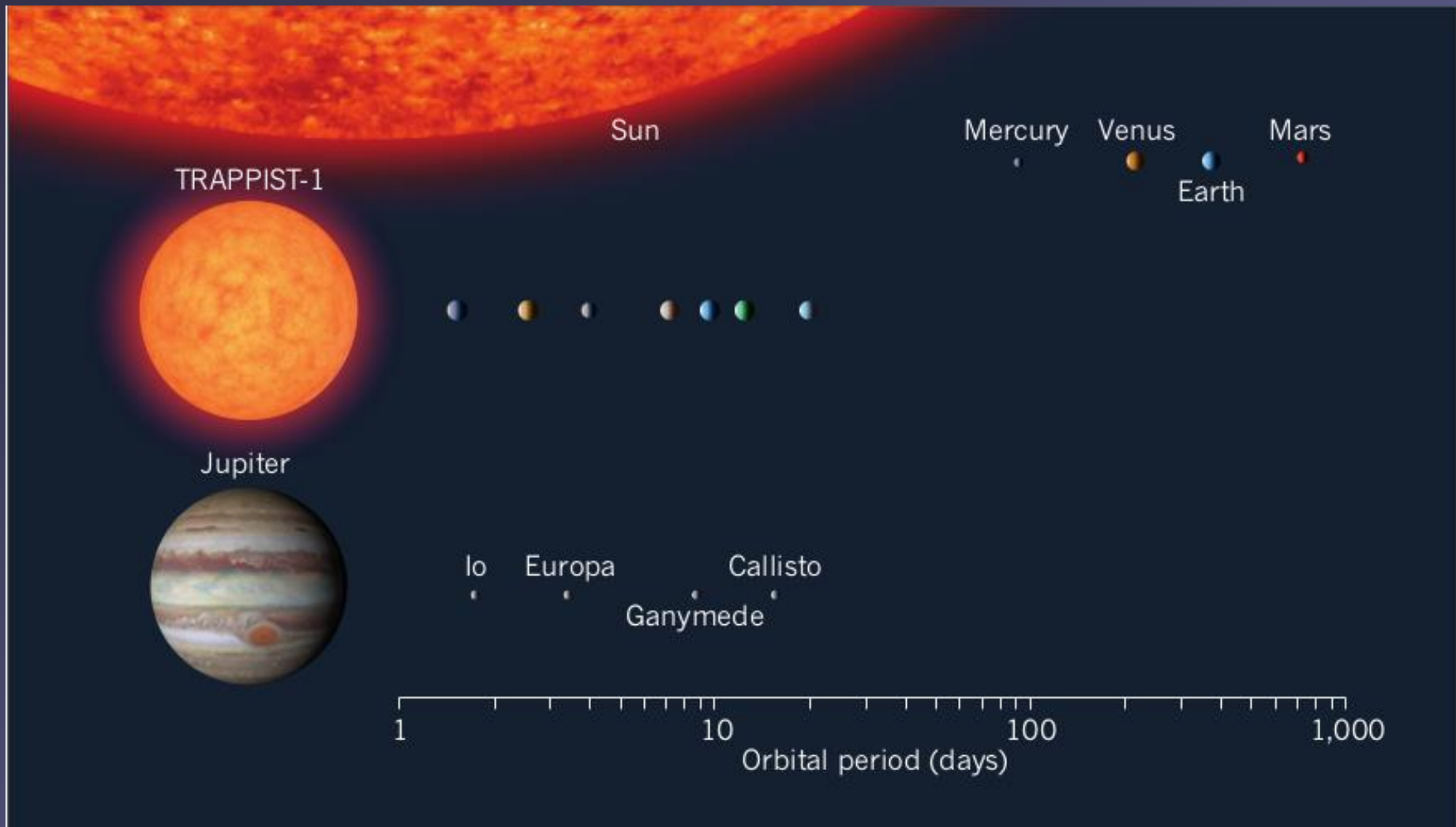
Новый каталог кандидатов Кеплера

По данным всех 4 лет работы до поломки (с мая 2009 по май 2013)



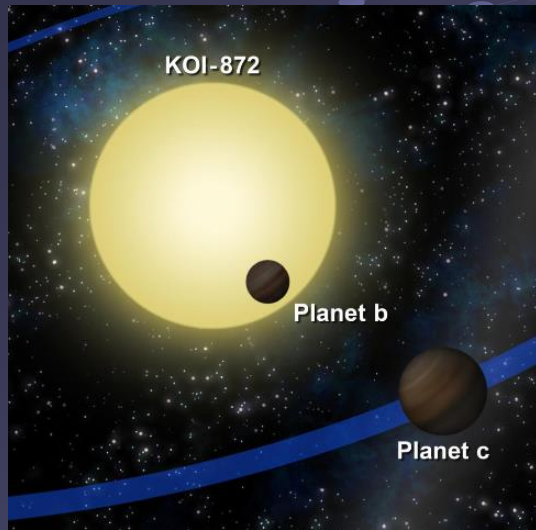
Почти 5000
КАНДИДАТОВ
В ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Система TRAPPIST-1: 7 землеподобных планет



Радиусы планет в радиусах Земли: 1.09, 1.06, 0.77, 0.92, 1.04, 1.13, 0.76

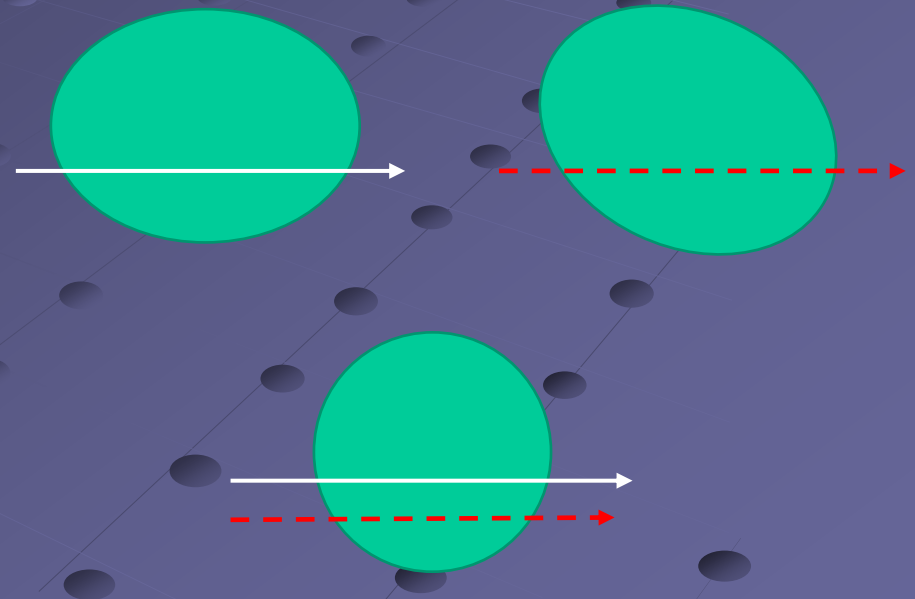
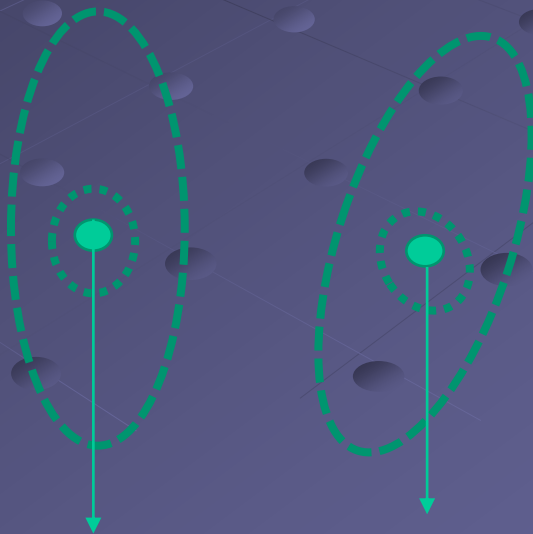
Изменения моменты и длительности транзита



Transit timing variations (TTV)

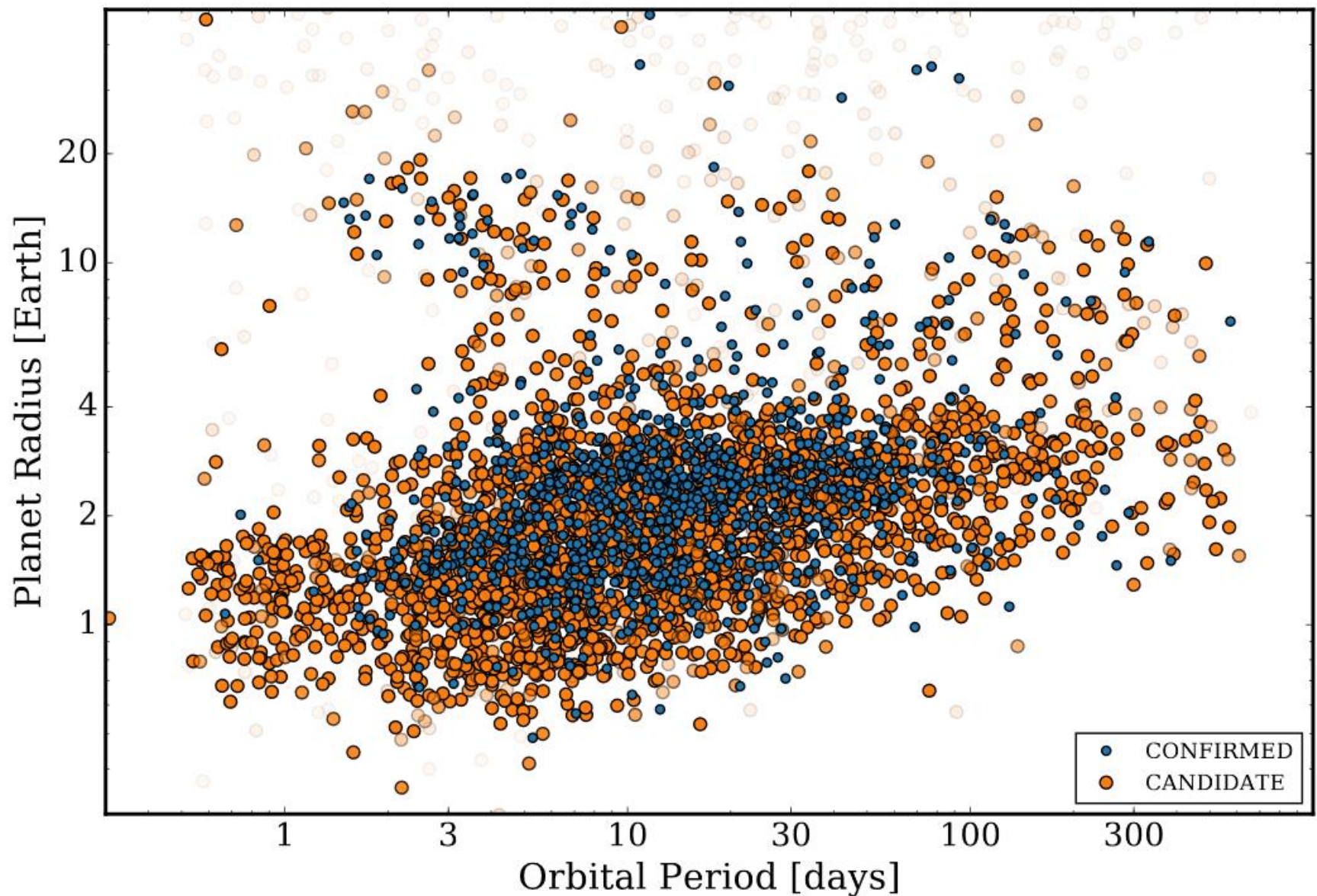
$$\delta t_1 = P_1 \frac{m_2}{m_0} f_{12}(\alpha_{12}, \theta_{12}),$$
$$\delta t_2 = P_2 \frac{m_1}{m_0} f_{21}(\alpha_{12}, \theta_{21}),$$

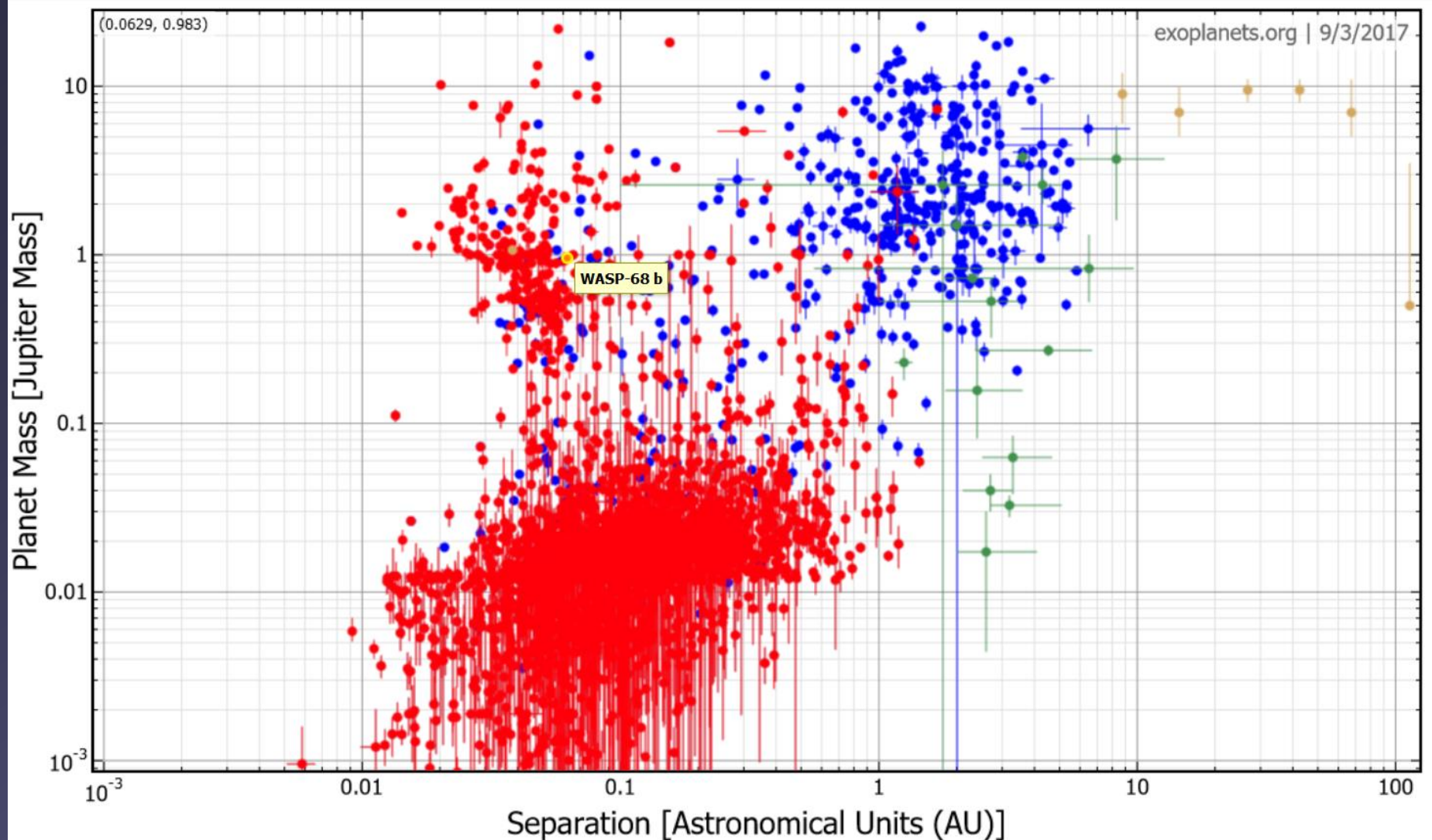
1706.09849



Transit duration variations (TDV)

Проверка кандидатов

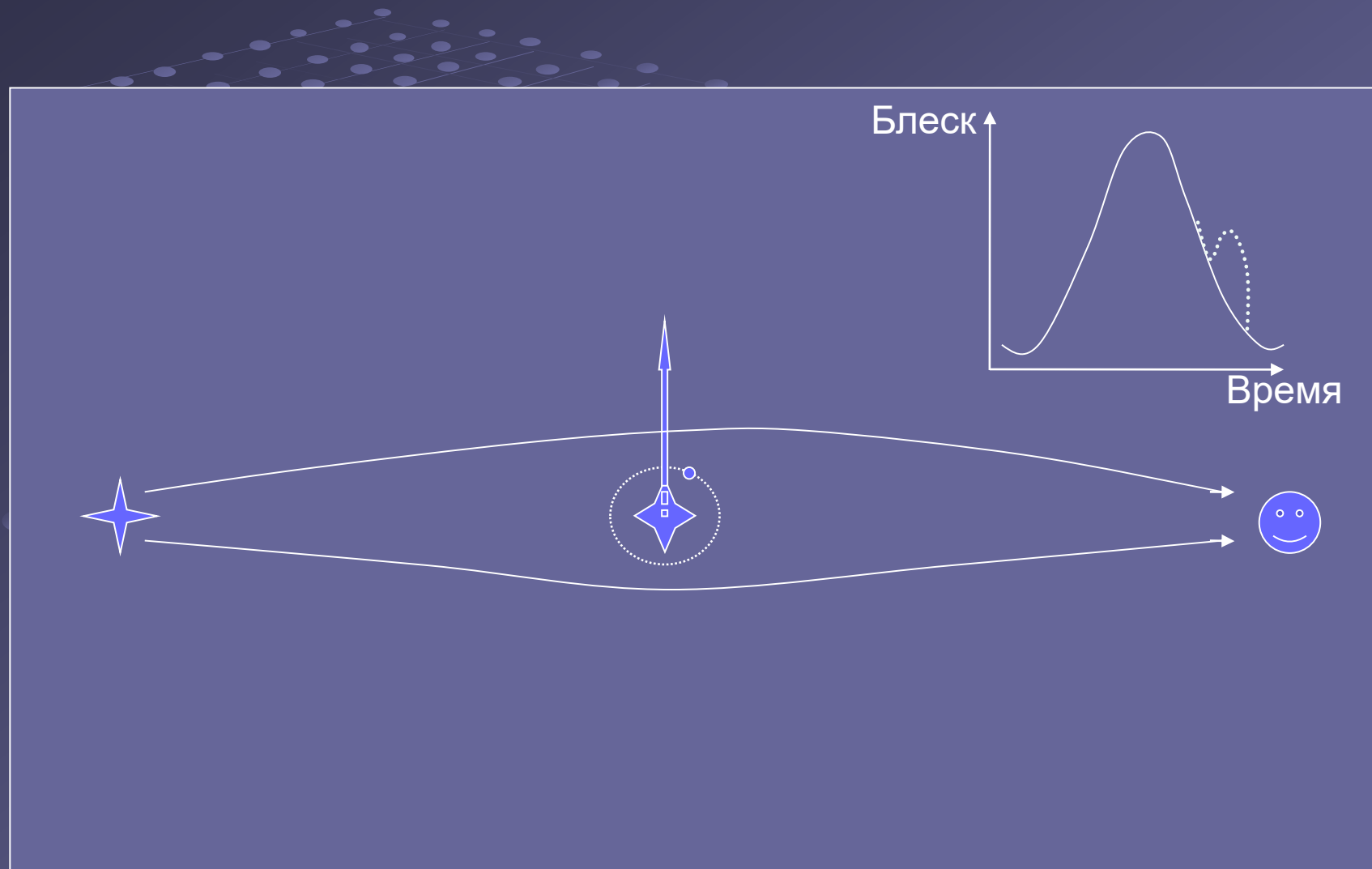




<http://exoplanets.org/plots>

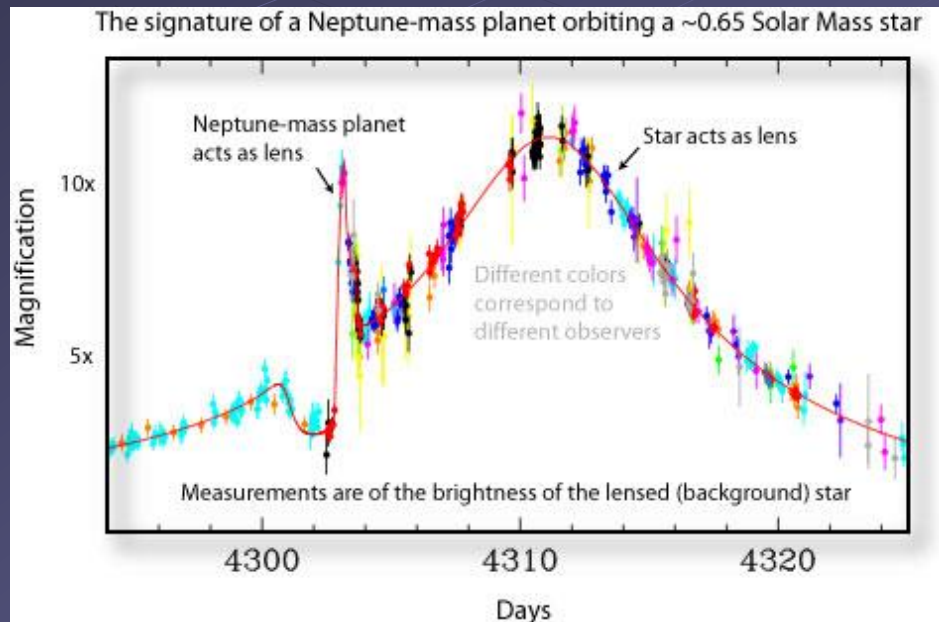
Синий	– лучевые скорости,
Красный	– транзиты
Зеленый	– линзирование
Оранжевый	– прямые изображения

Микролинзирование

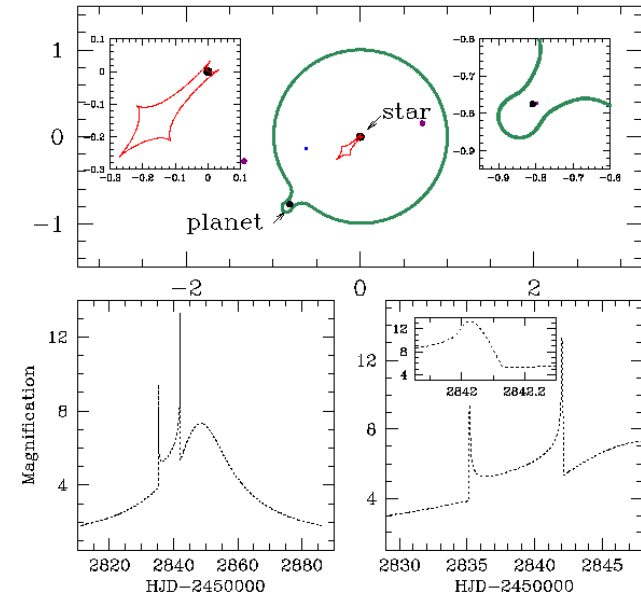


Детектирование экзопланет методом микролинзирования

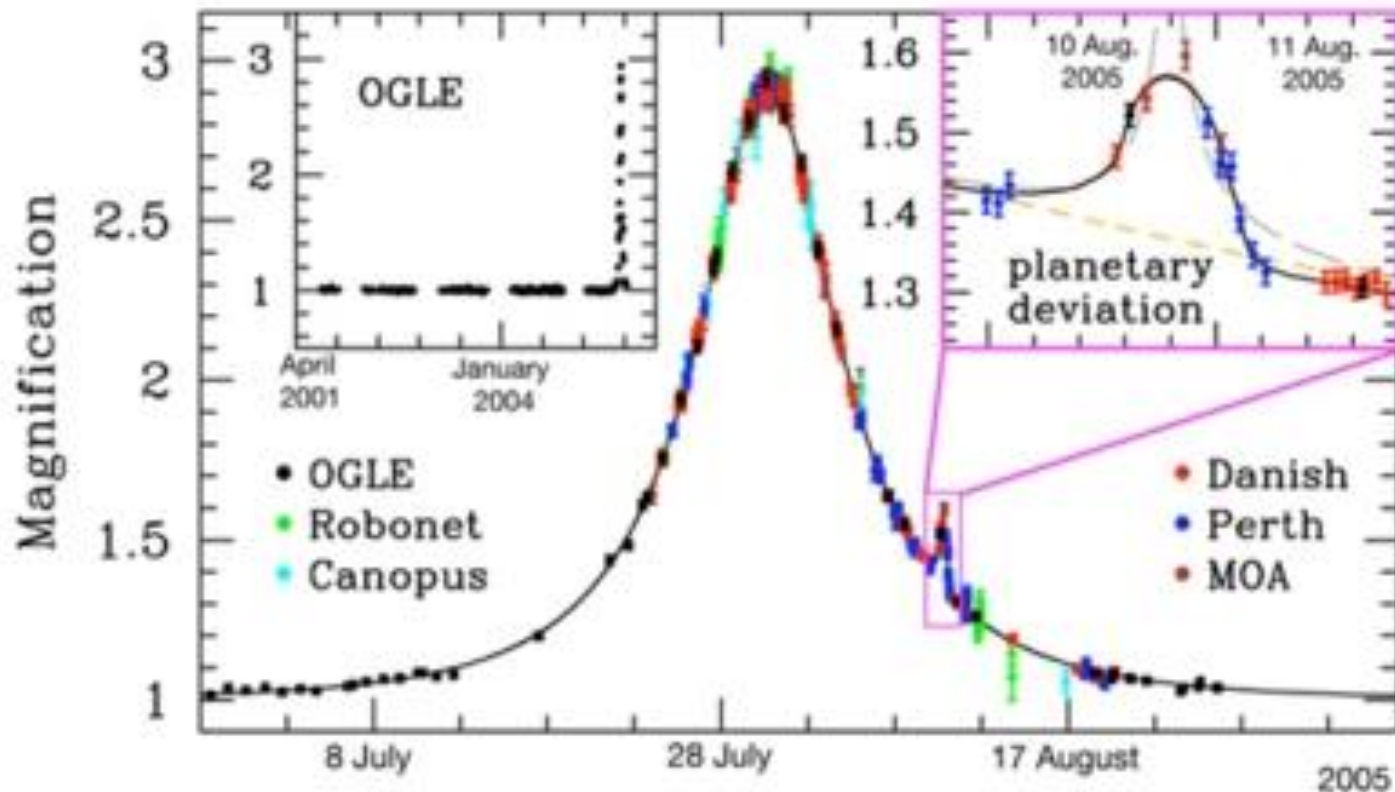
- Чувствительность к планетам малых масс (до $0.1 M_{\text{earth}}$)
- Чувствительность к широким орбитам (1-4 а.е.)
- Обнаружение одиночных планет



См. обзор в Bennet 0902.1761

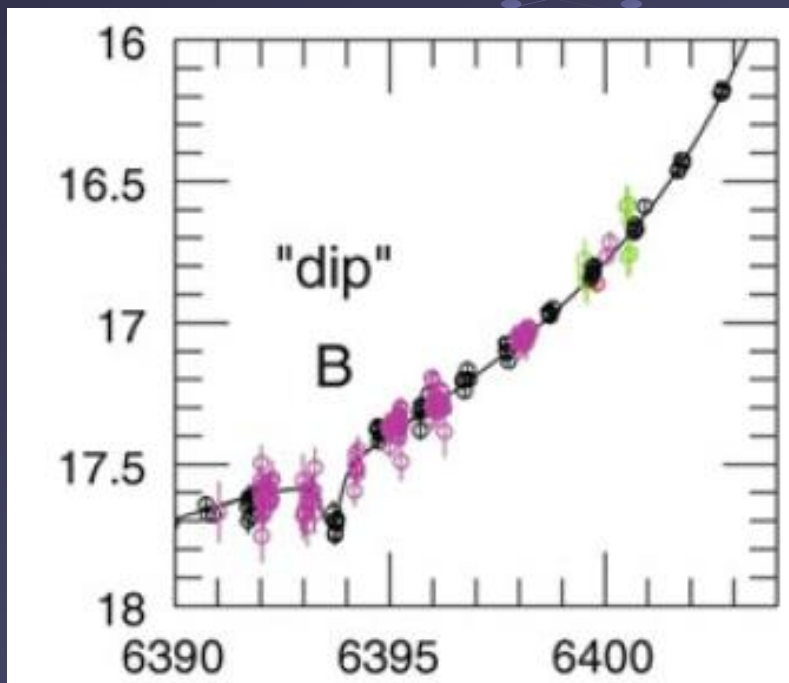


Дополнительный пик



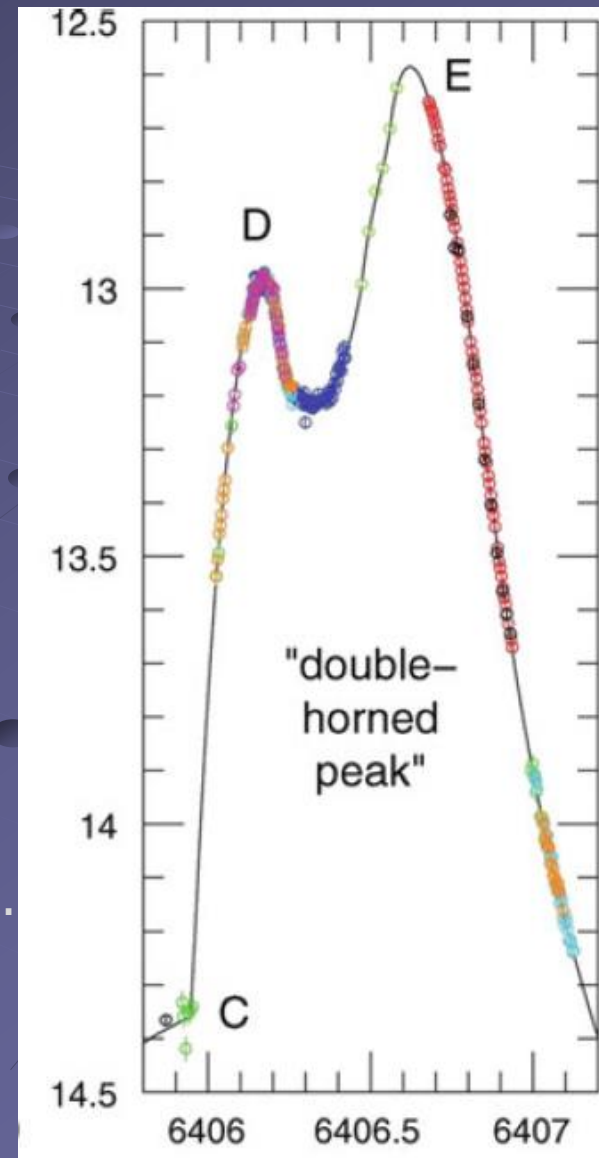
Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

Провалы в кривой блеска

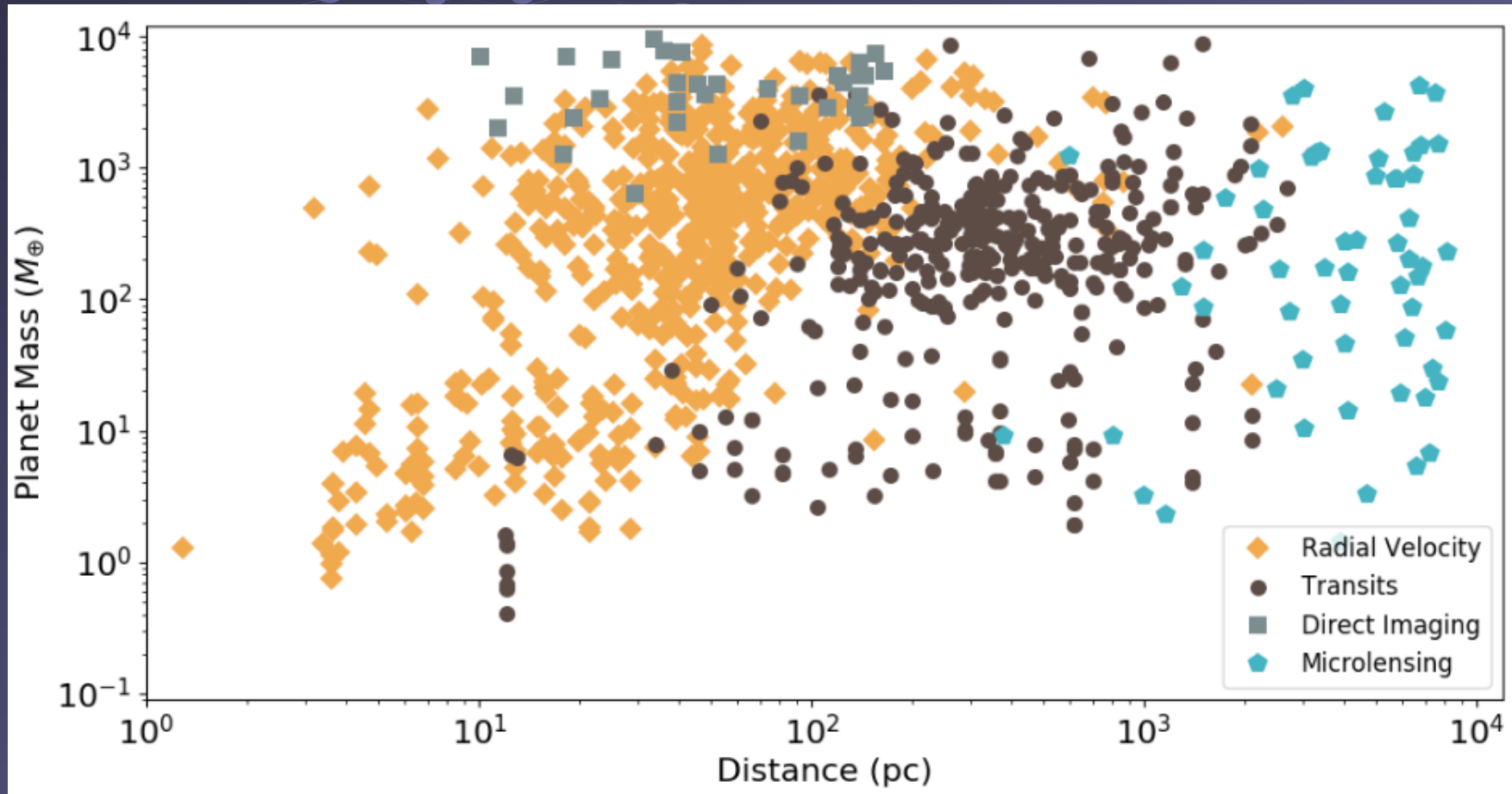


Andrew Gould (in Bozza et al. 2016)

Планета земной массы в двойной.
Планета вращается вокруг
красного карлика (1 а.е.),
который вращается вокруг
другой звезды (15 а.е.).



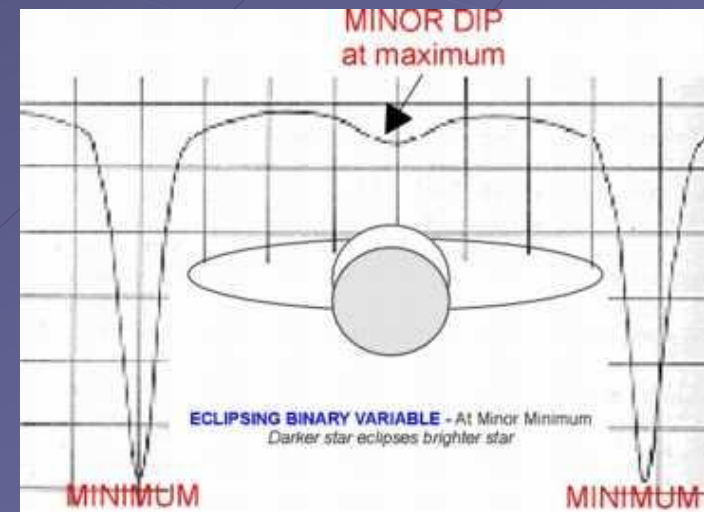
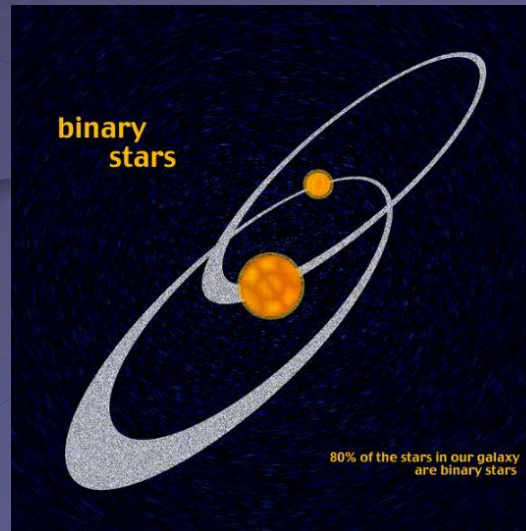
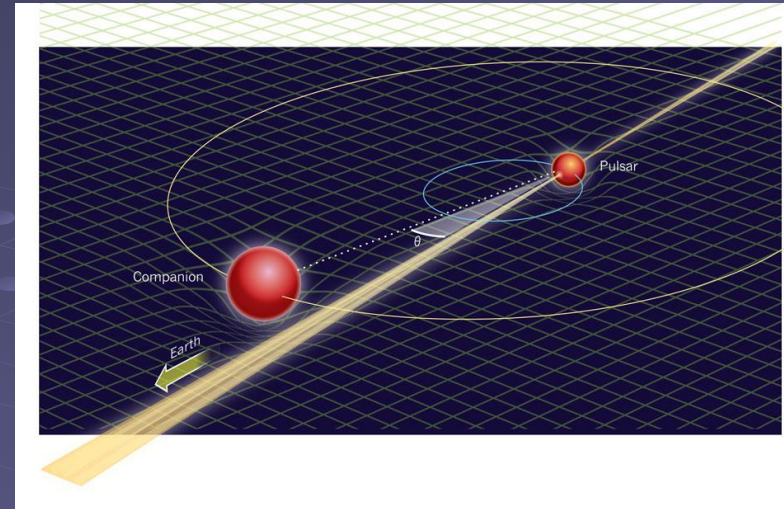
Линзирование работает при больших расстояниях



Есть даже линзирование для планет в других галактиках!

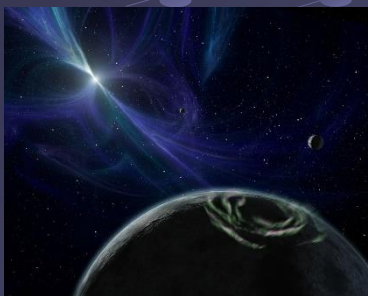
Тайминг

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.



Планеты вокруг пульсара

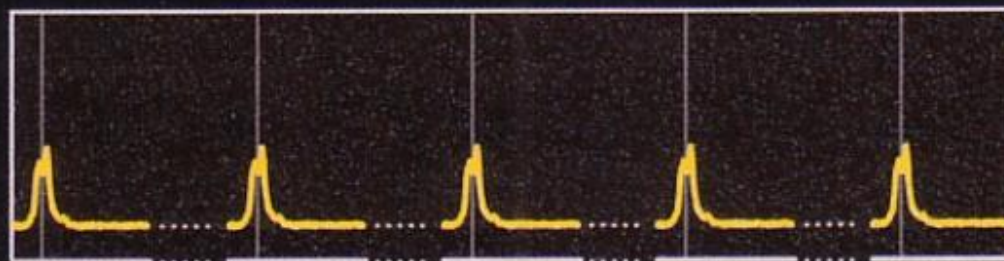
Wolszczan и Frail 1992 год
PSR B1257+12
Миллисекундный пульсар



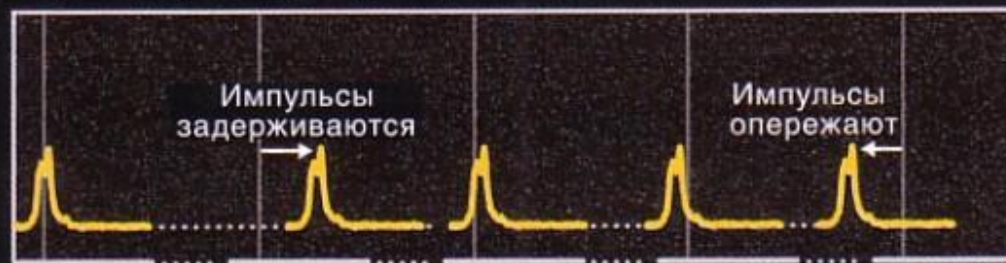
Обнаружено три легкие планеты

Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)
A (b)	$0.020 \pm 0.002 M_{\oplus}$	0.19	25.262 ± 0.003
B (c)	$4.3 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.36	66.5419 ± 0.0001
C (d)	$3.9 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.46	98.2114 ± 0.0002

Равномерный приход импульсов (нет планет)

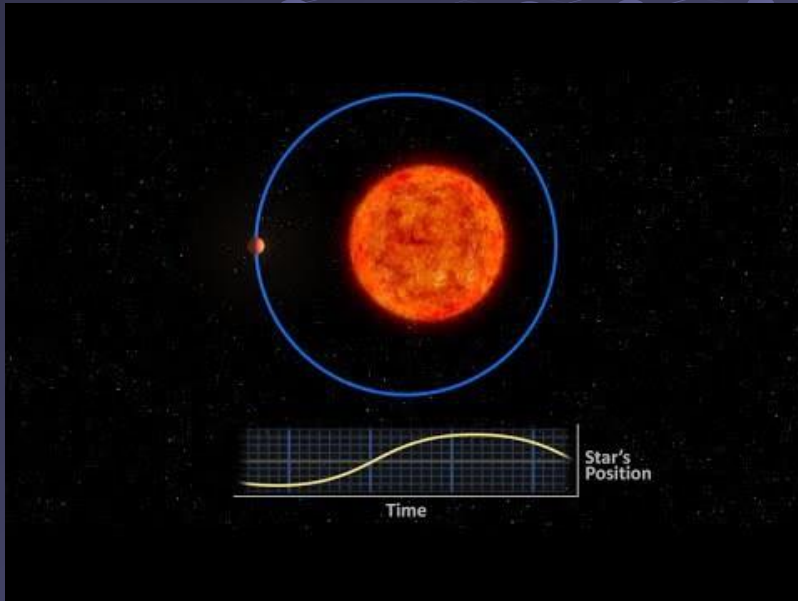


Неравномерный приход импульсов (есть планеты)



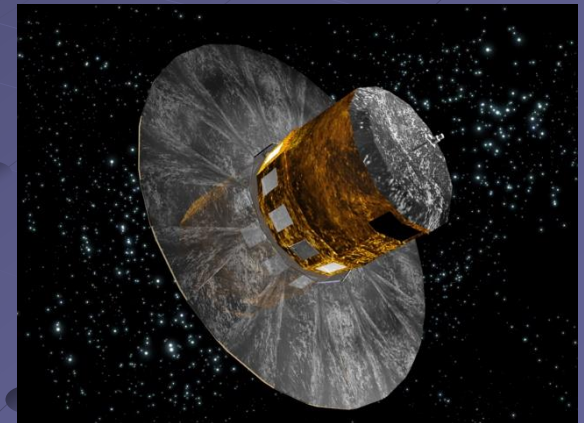
Эпоха (годы)

Астрометрическое детектирование



Это самый старый способ
поисков экзопланет.
Однако затем все «открытия»
были закрыты более точными
наблюдениями.

Мы не видим планету,
но можем измерить,
что меняется положение
звезды, т.к. она
вращается вокруг
центра масс системы.



Пока нет ни одной надежно
открытой этим способом
экзопланеты.
Но спутник GAIA должен
найти тысячи планет!

Первый надежный кандидат

Оказалось,
что это бурый карлик
с массой $28 M_{\text{Jup}}$.

Сейчас есть еще пара кандидатов
в объекты планетной массы
(см. 1010.4048)
и несколько бурых карликов.
Ждем результатов Gaia.

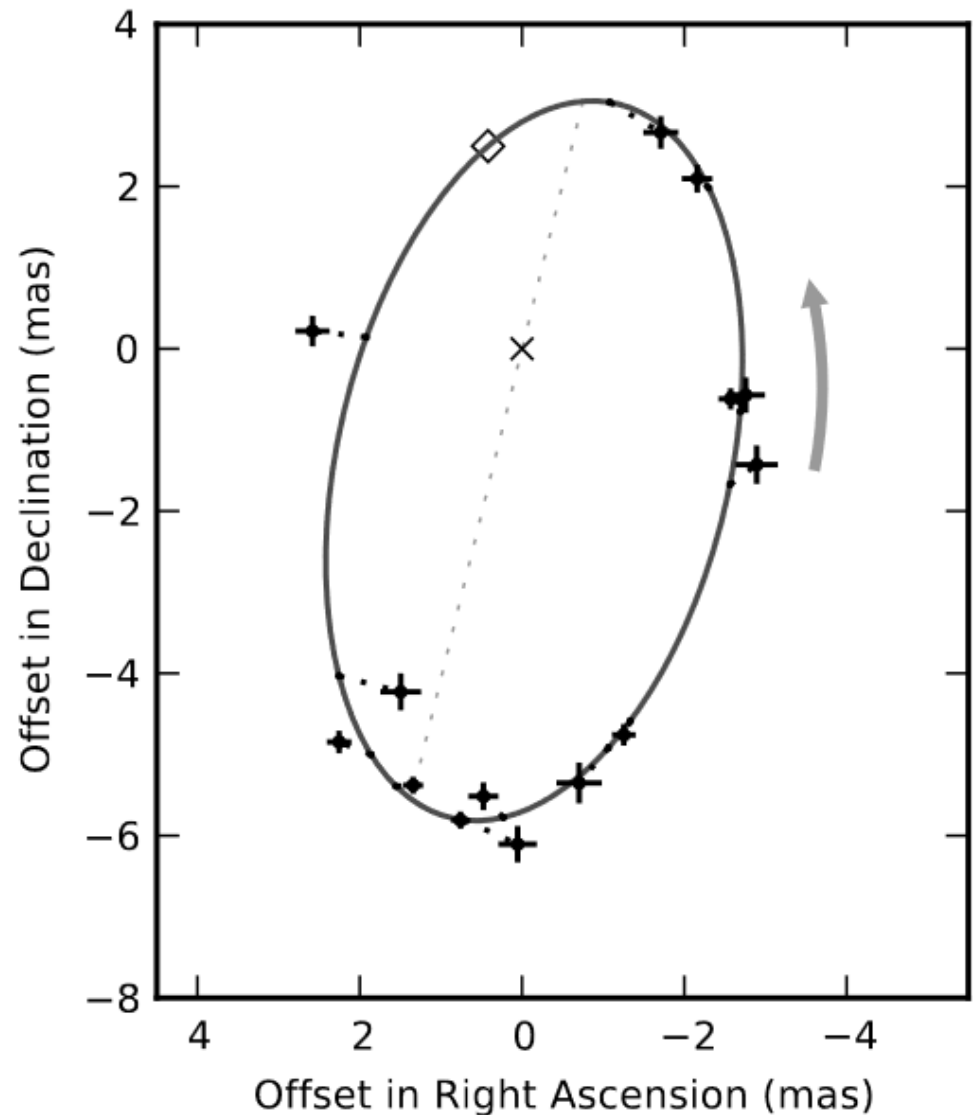
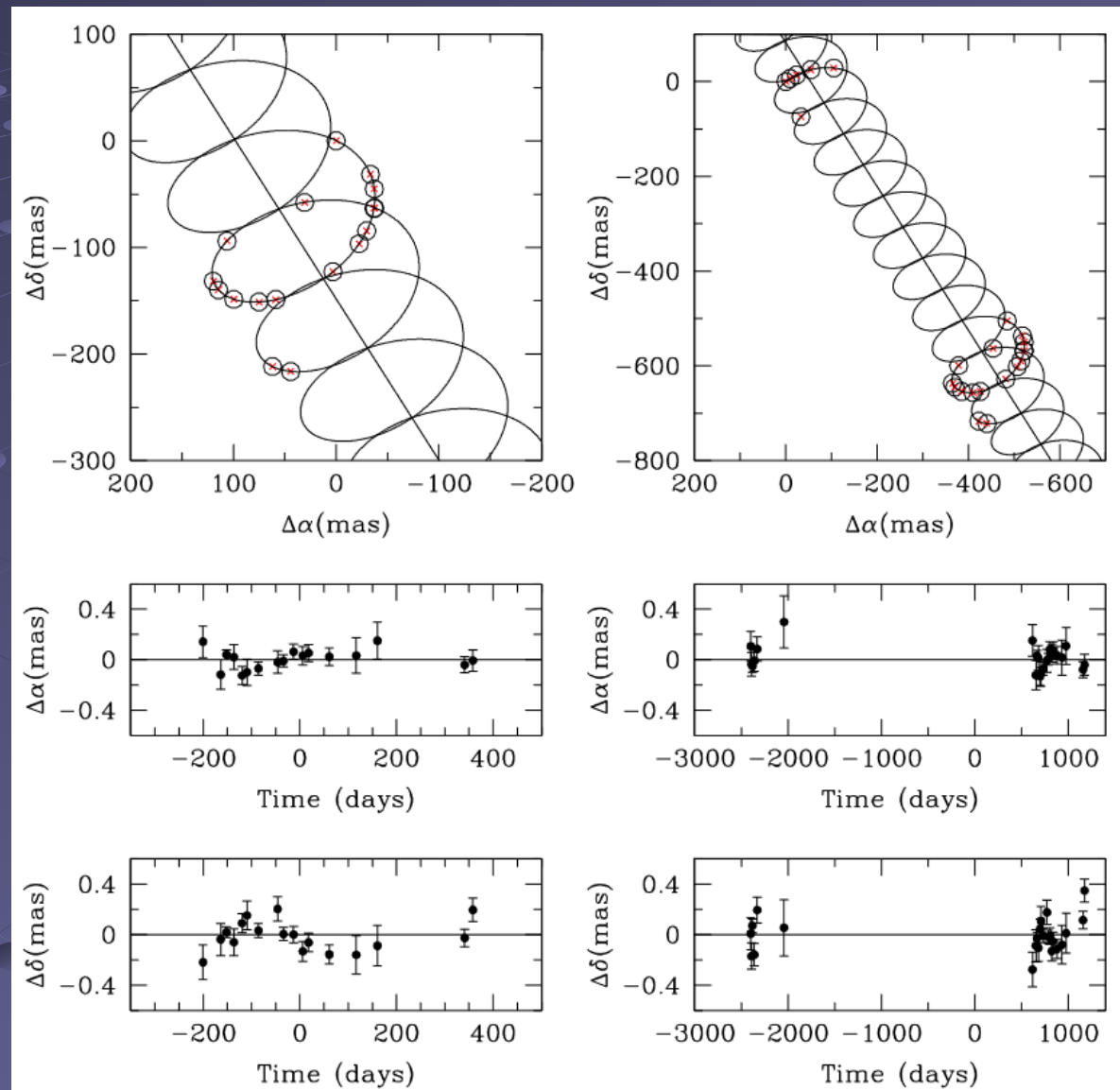


Fig. 15.— The barycentric orbit of the L1.5 dwarf DENIS-PJ082303.1-491201 caused by a 28 Jupiter mass companion in a 246 day orbit discovered through ground-based astrometry with an optical camera on an 8 m telescope (Sahlmann *et al.*, 2013a).

Астрометрия в радио!

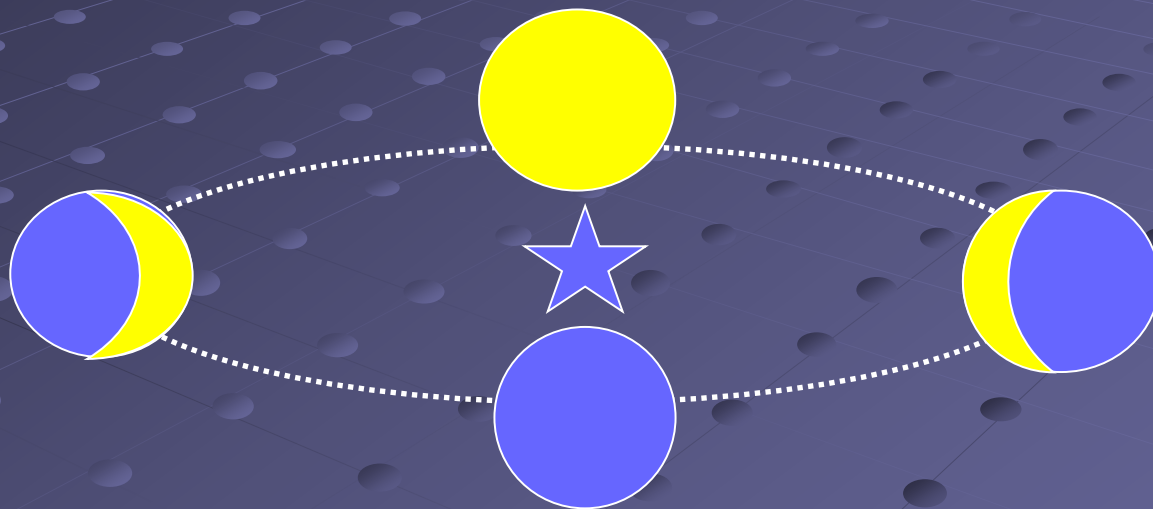
Планета с сатурнианской
массой в 0.3 а.е. от
красного карлика (M9).

Наблюдения на VLBA.



Изменение суммарного блеска

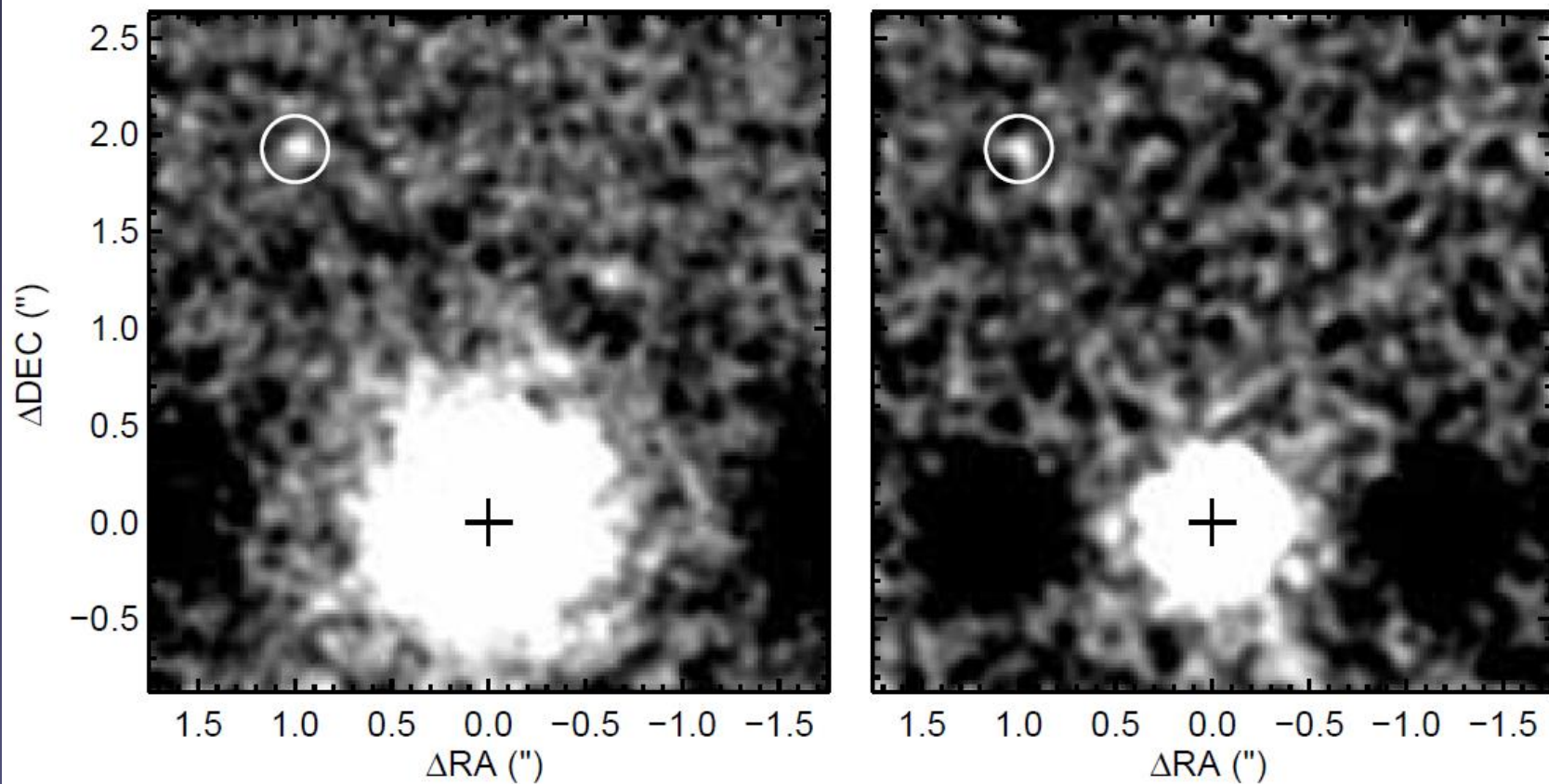
В процессе обращения вокруг звезды планета меняет фазы.
Поэтому планета будет менять блеск.
Отдельно планету не видно, но будет меняться суммарный блеск.
Периодичность сигнала позволяет его выделить.



Так были открыты планеты Kepler-70b и Kepler-70c.

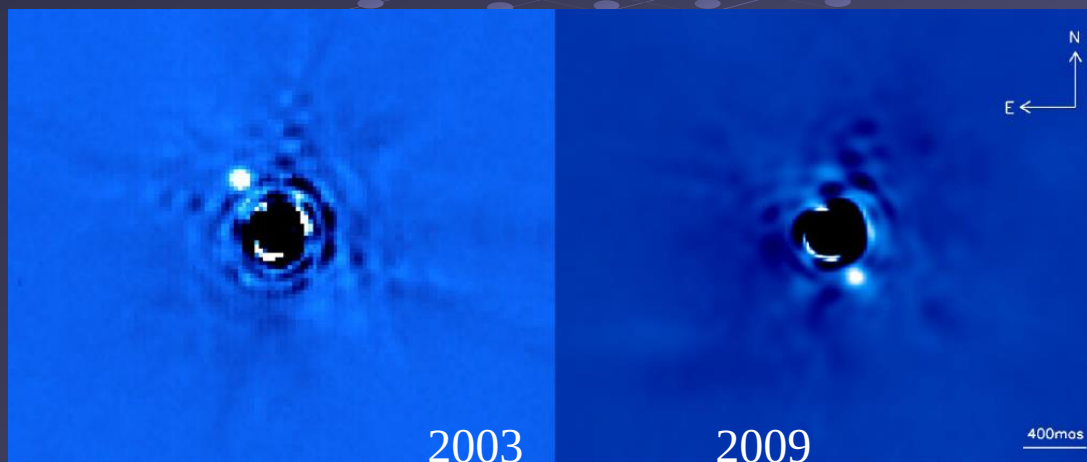
Прямое изображение планеты около молодой звезды типа Солнца (телескоп Gemini North, адаптивная оптика)

1RXS J160929.1-210524



arXiv: 1006.3070

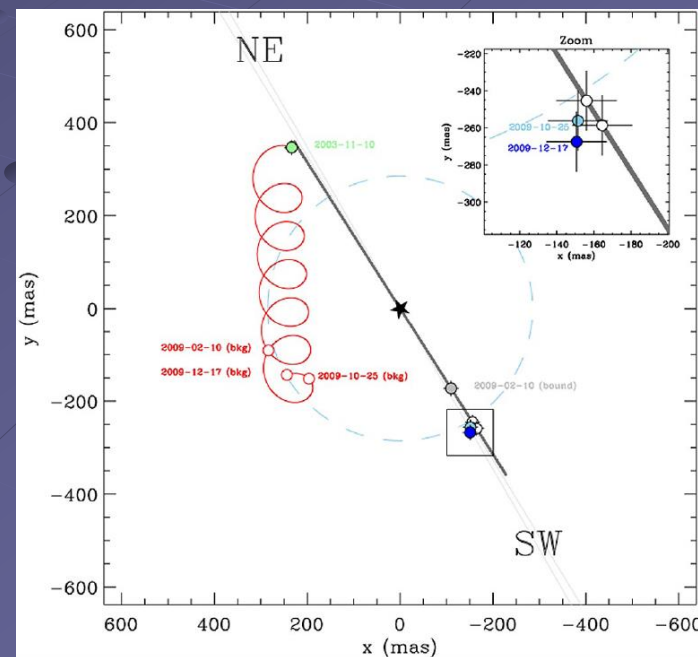
Планета около бета Живописца



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

Расстояние планеты от звезды около 9 а.е.

Это одно из самых коротких расстояний для планеты, которую удалось увидеть непосредственно.

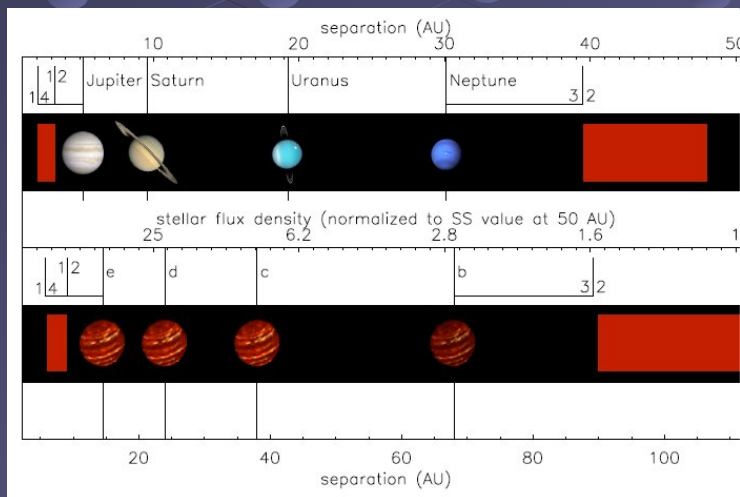


Изображение четвертой планеты вокруг HR 8799

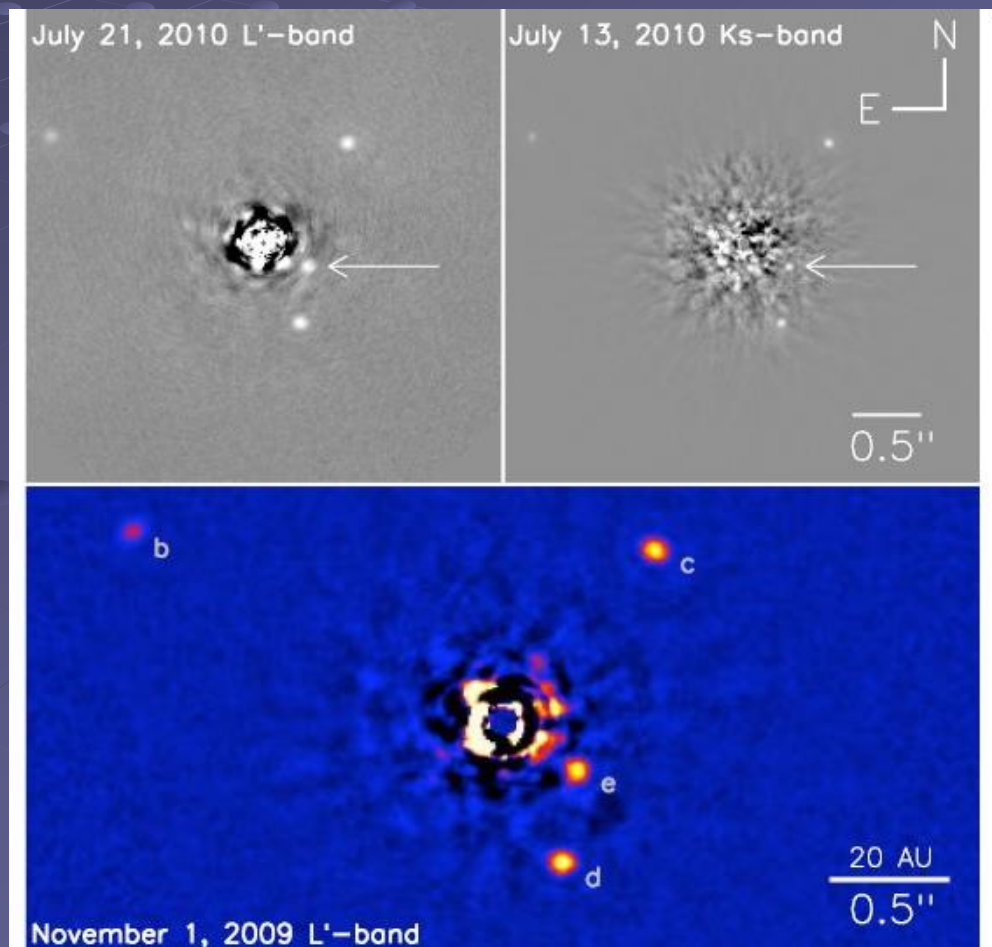
Кеск II

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

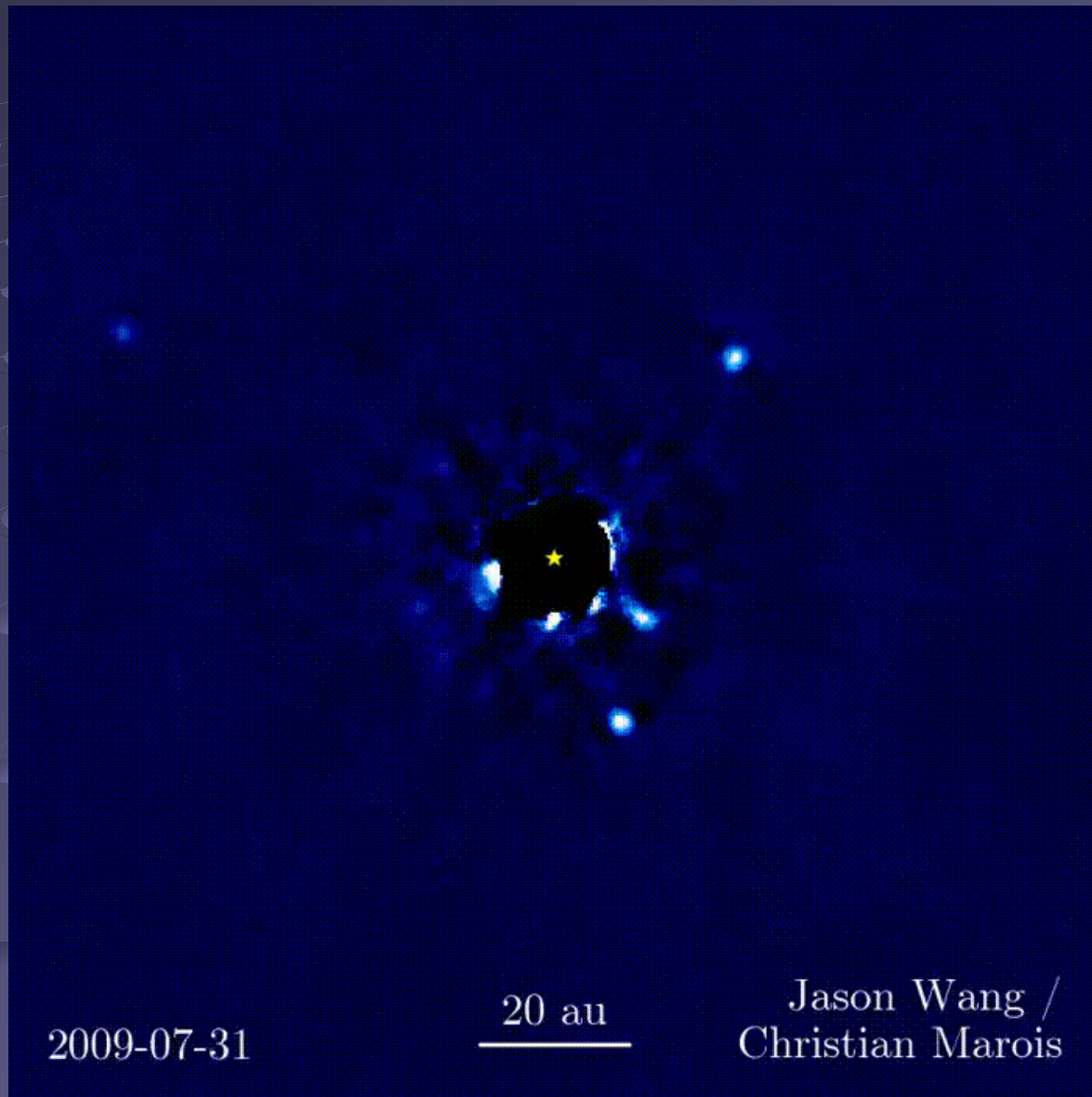
Похожа на Солнечную



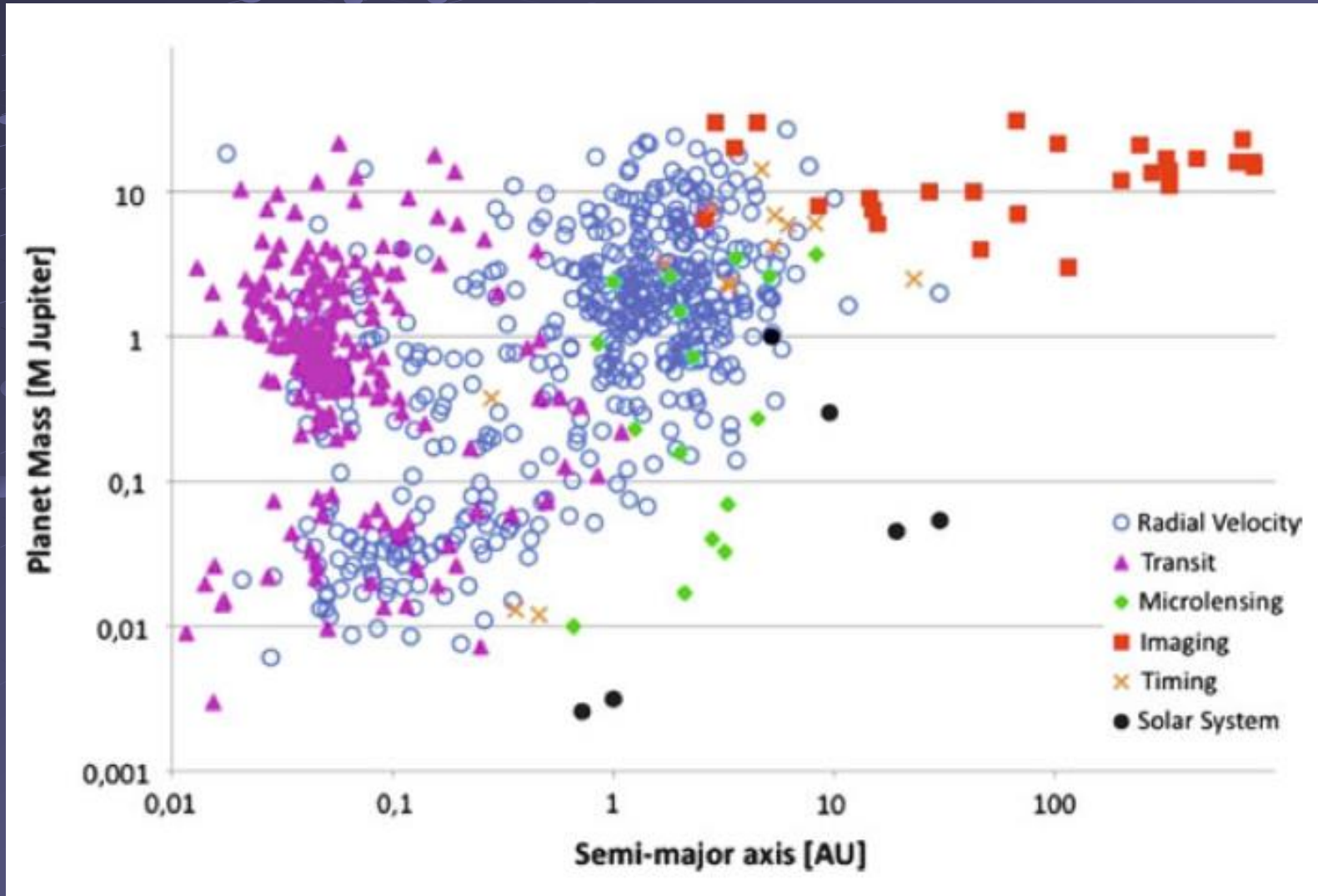
arXiv: 1011.4918



Движение планет вокруг звезды HR 8799



Получение изображений в сравнении с другими методами

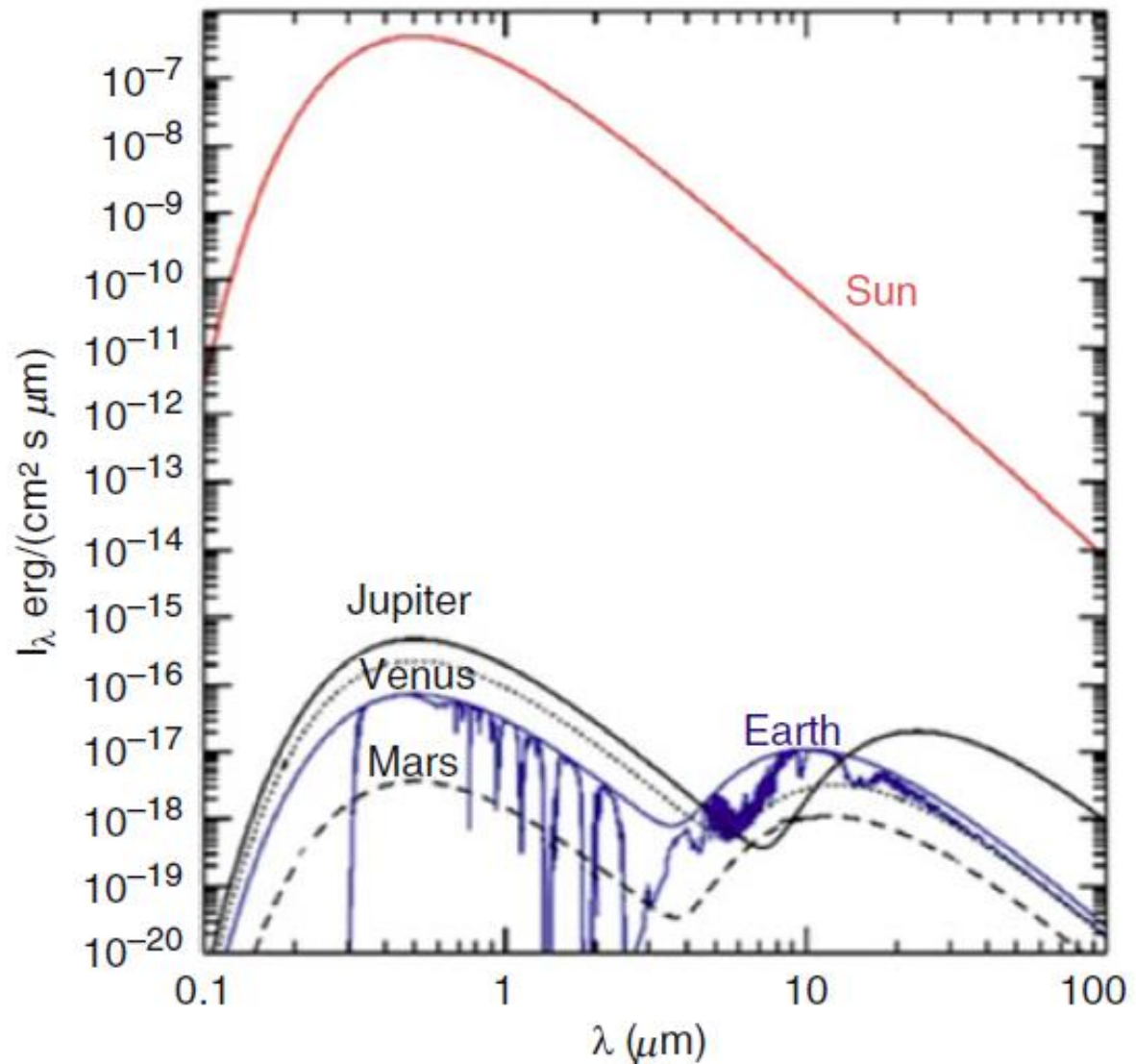


Riccardo Claudi (in Bozza et al. 2016)

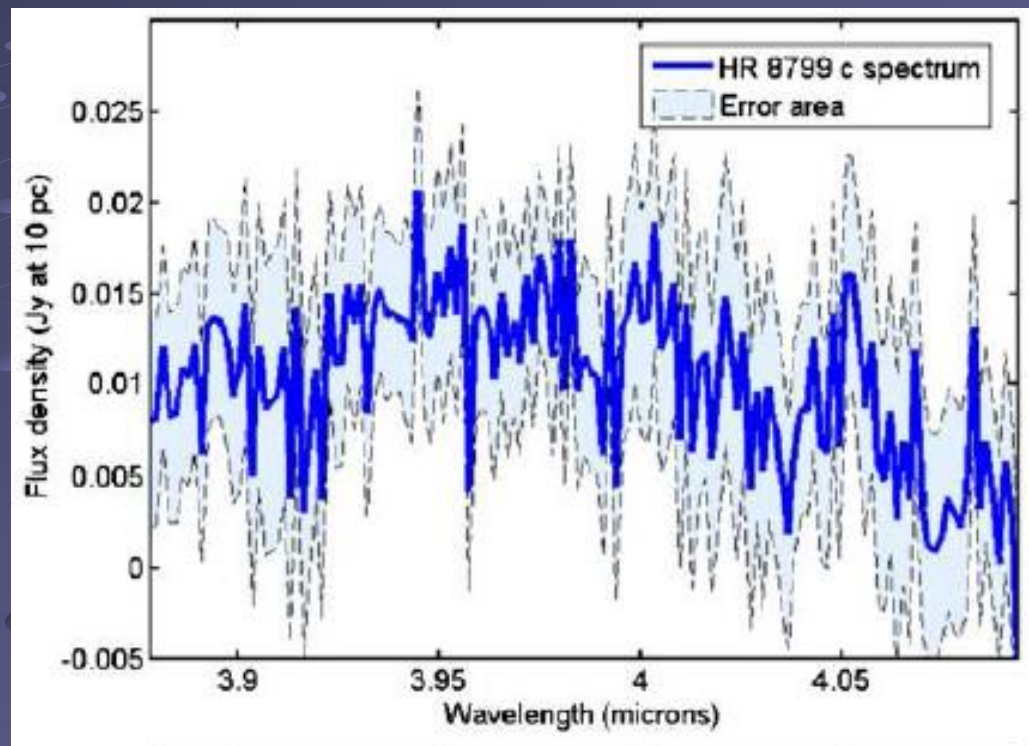
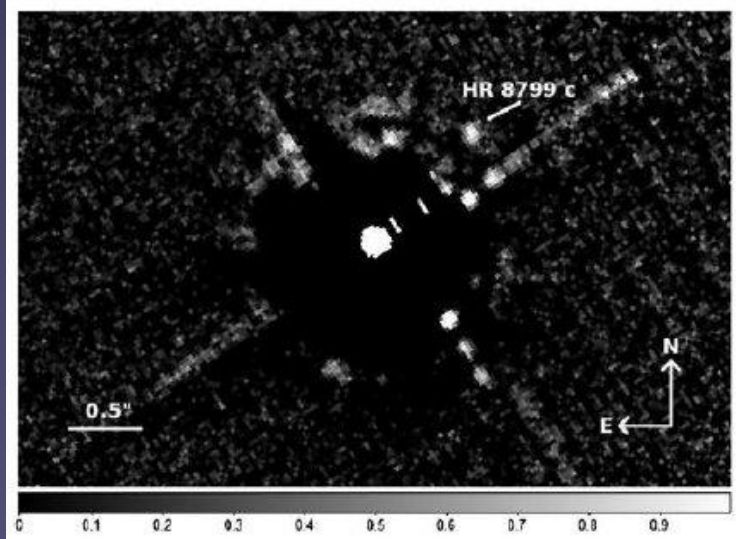
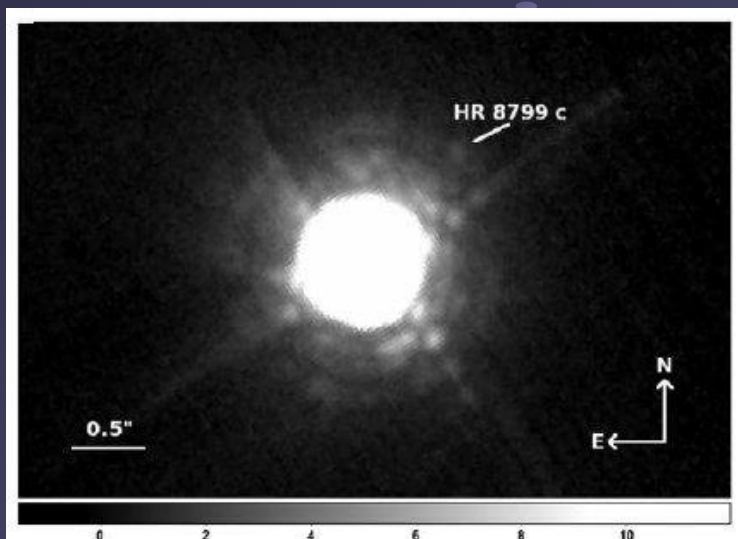
Солнечная система

Заметьте, насколько лучше видны планеты в ИК-диапазоне. Особенно, Юпитер на 20-30 микронах.

$$F_{p, \text{Vis}} = A(\lambda, t) \phi(t) \frac{R_p^2}{4a^2} B(\lambda, T_{\text{eff}}) R_{\star}^2,$$



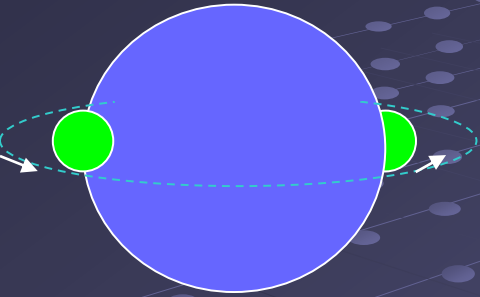
Спектр экзопланеты



В 2010 г. впервые напрямую (на VLT)
получен спектр экзопланеты.
«Сверх-юпитер» ($M \sim 10 M_J$, 38 а.е.).

arxiv:1001.2017

Тепловое излучение сверхземли



55 Cnc e

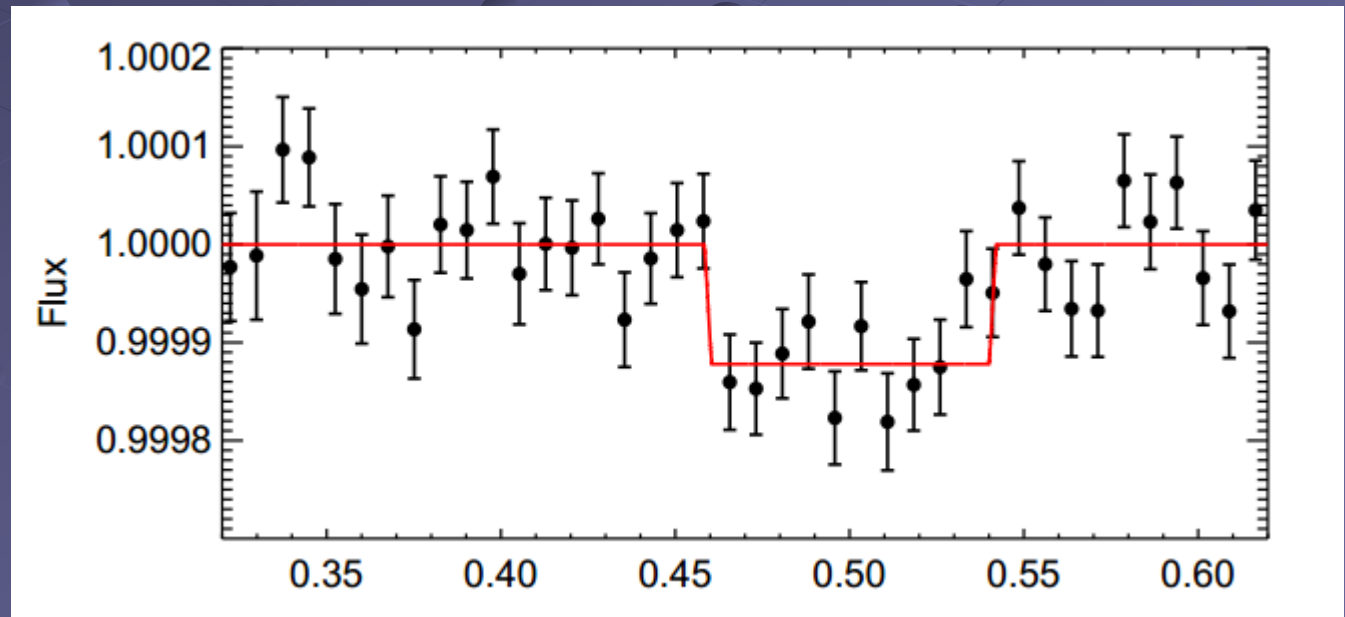
Масса планеты: 7-8 масс Земли

Расстояние от звезды: 0.016 а.е.

Орбитальный период: 0.74 дня

Наблюдения
затмений
на Спитцере

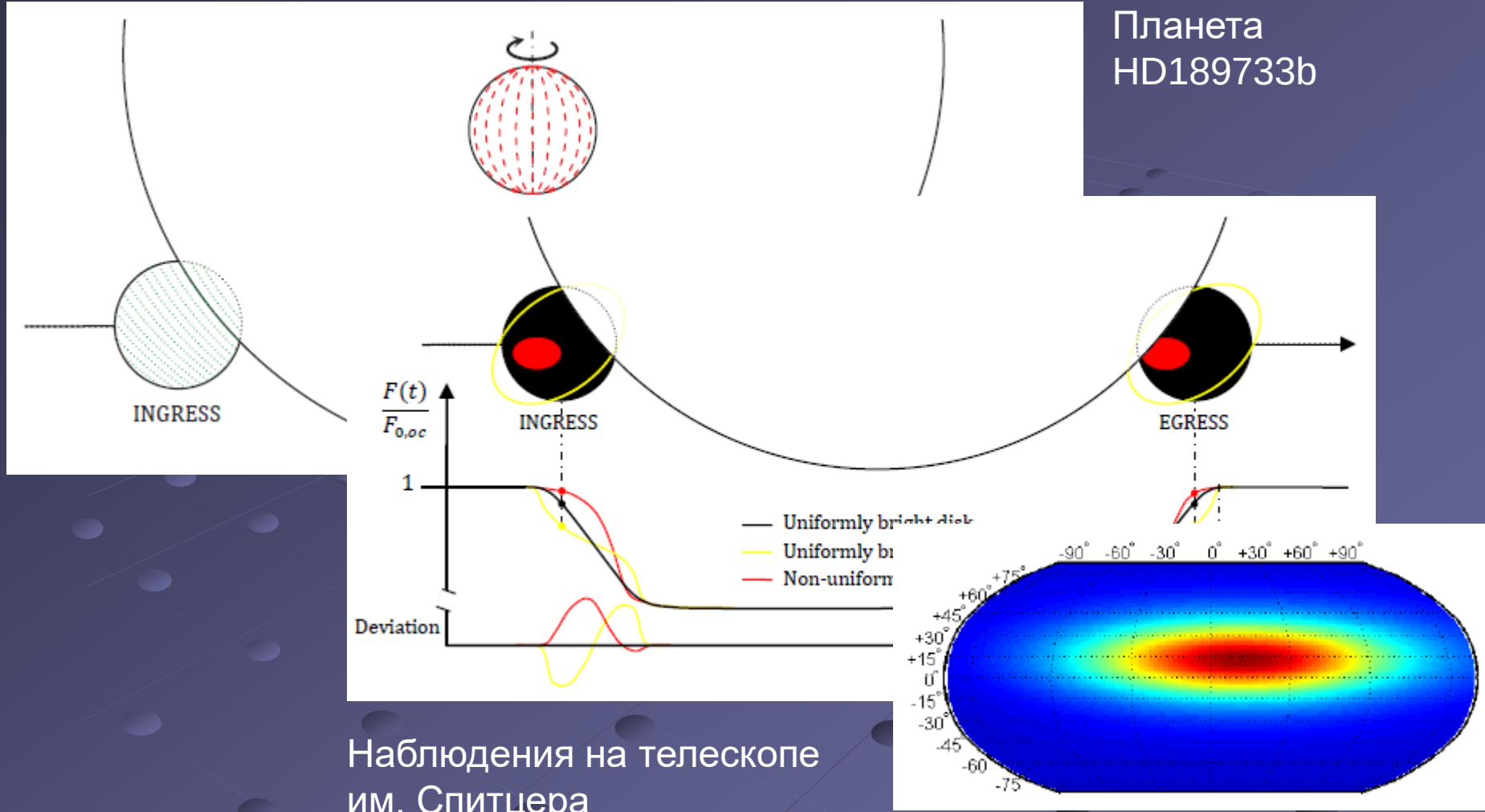
Наблюдения позволили определить температуру
на планете: 2000-2600K



1205.1766

Сканирование диска планеты

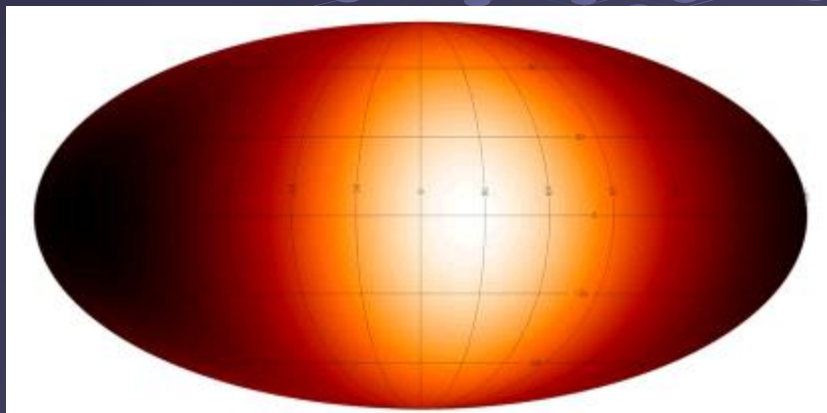
Планета
HD189733b



Наблюдения на телескопе
им. Спитцера

1202.3829

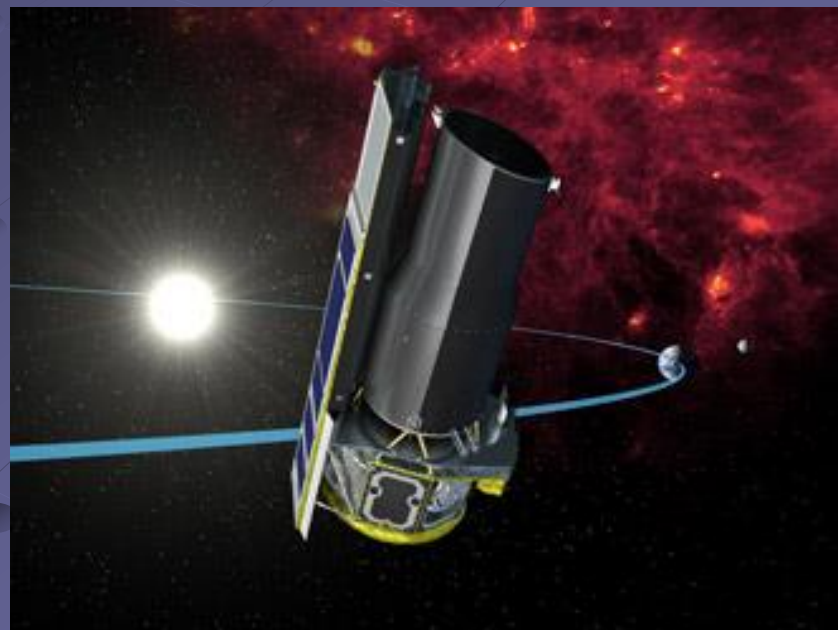
Карта экзопланеты HD 189733b



По данным о затмениях удалось построить карту экзопланеты.

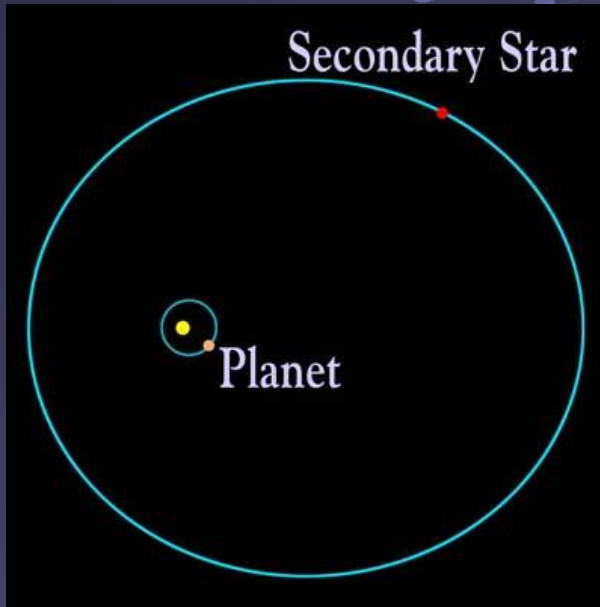
Инфракрасная космическая обсерватория имени Спитцера.

Горячее пятно в экваториальной области.



Планеты у двойных звезд

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



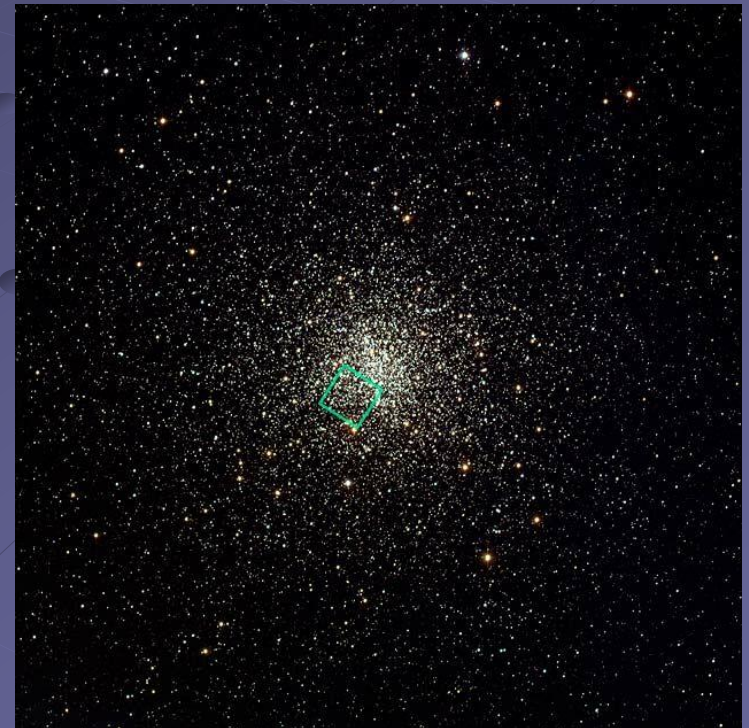
[1 AU = distance between Earth and Sun]

Вокруг пульсара

PSR B1620-26

Пульсар (нейтронная звезда) в паре с белым карликом. Вокруг этой пары крутится планета с массой 2.5 массы Юпитера.

Предполагается, что планета со звездой были захвачены нейтронной звездой в двойной системе. Партнер нейтронной звезды был вышвырнут. Затем оставшаяся звезда превратилась в белого карлика, и сформировалась наблюдаемая сейчас система.

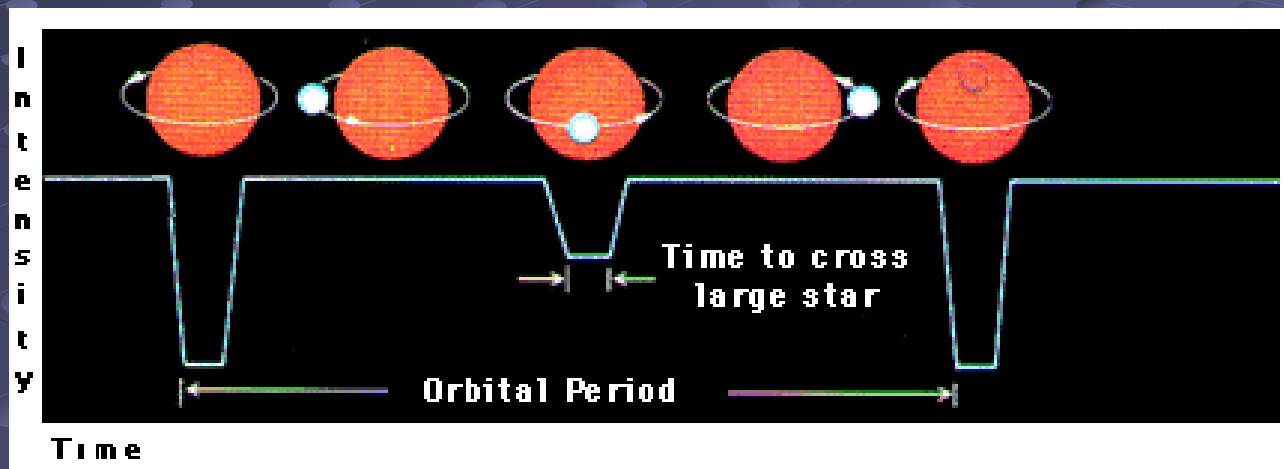


Шаровое скопление M4

Тайминг двойных звезд

DP Льва, NN Змеи, NY Девы, RR Резца

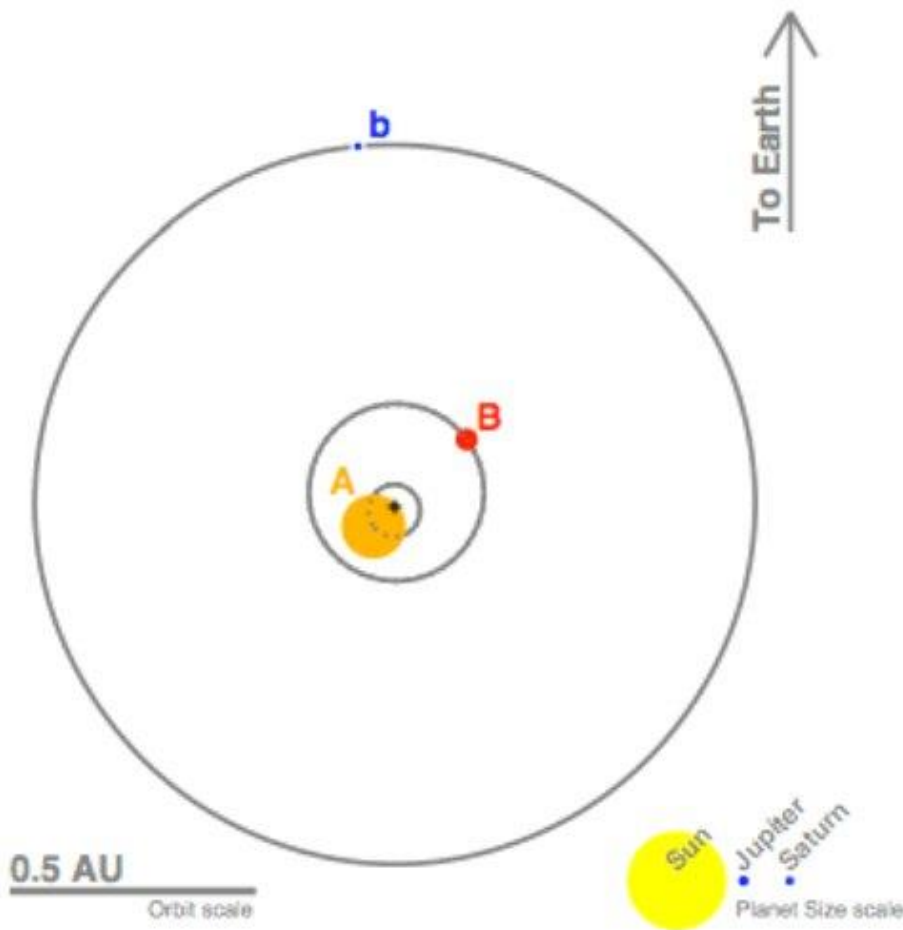
В основном это двойные системы с затмениями



Наблюдая нерегулярности в затмениях, можно обнаружить наличие третьего тела и определить его характеристики.

Преимущество в том, что такие открытия можно делать и на небольших наземных телескопах.

Kepler-16: планета Татуин

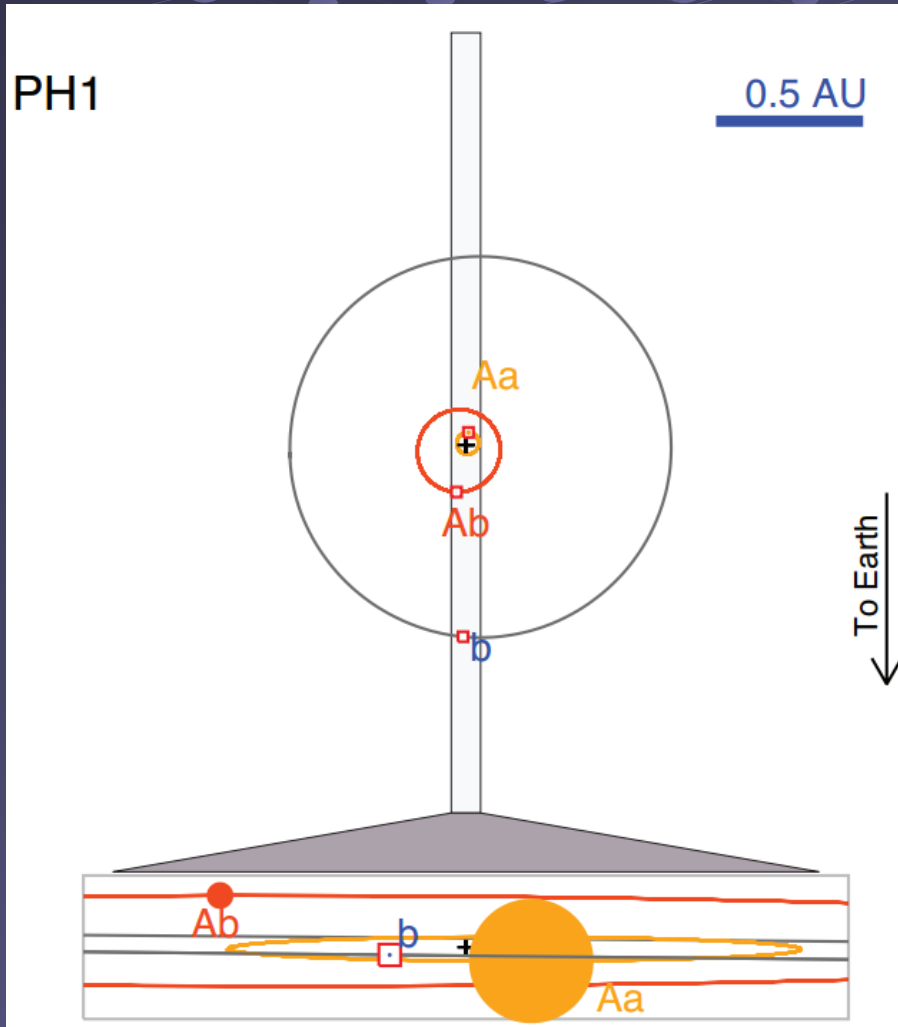


Транзитная планета вокруг двойной. Звезды имеют массы 0.2 и 0.7 масс Солнца и орбитальный период 41 день. Планета вращается в плоскости, и ее период 230 дней.

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.

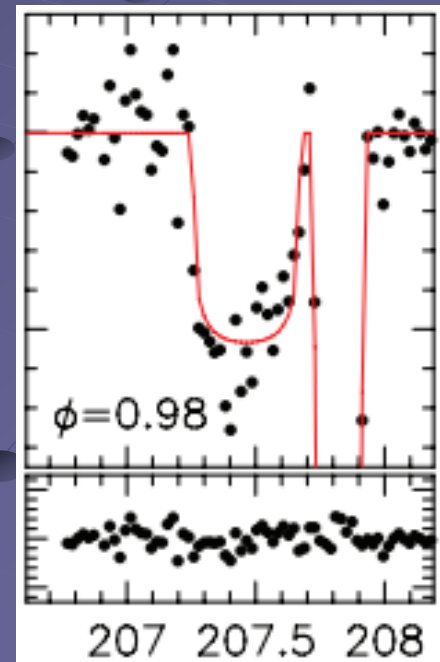
Вообще же около 12% кратных звезд имеют планеты (1204.4833).

Транзитная планета вокруг двойной в четверной системе



В рамках проекта Planet Hunters открыта любопытнейшая планета.

Она обращается вокруг двойной, Которая сама входит в систему из четырех звезд.



1210.3612

TESS

Transiting Exoplanet Survey Satellite

Поиск транзитных экзопланет у близких (ярких) звезд.

Ожидается, что будут открыты каменные планеты в зонах обитаемости, которые потом можно будет изучать на JWST.

Примерно полмиллиона звезд классов G и K

По результатам двух лет работы будет открыто несколько тысяч планет.

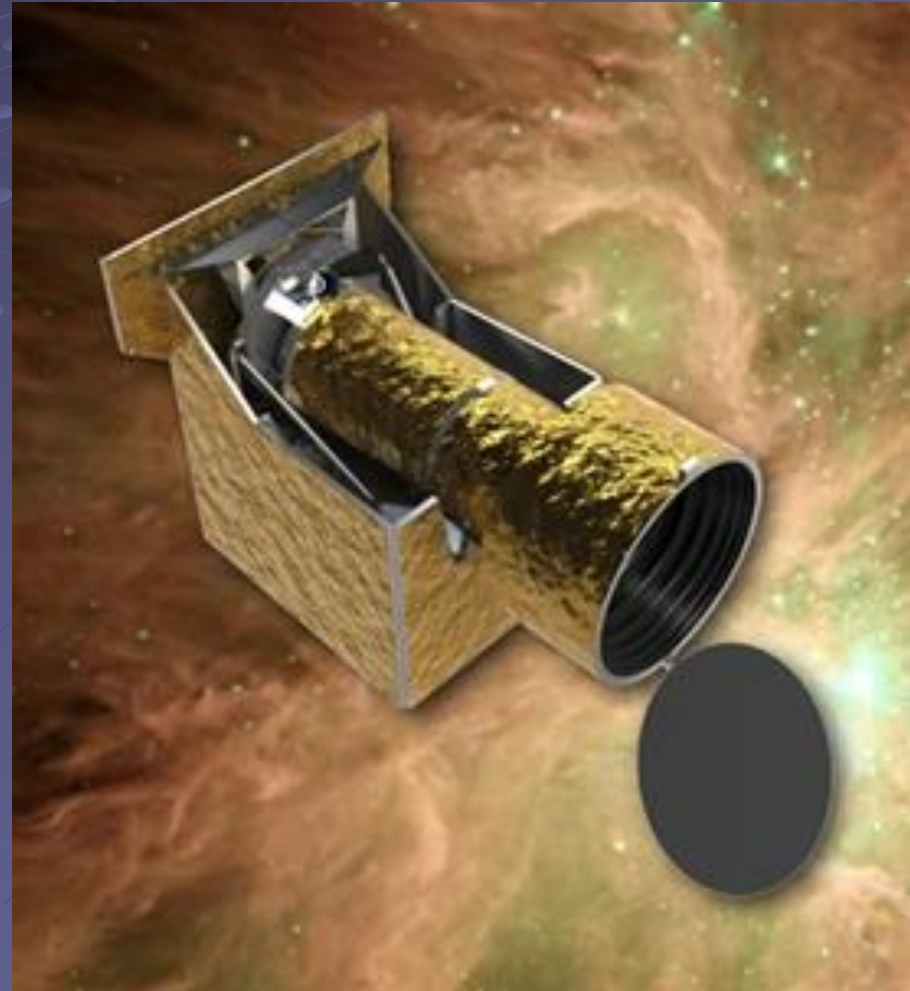
Основная программа выполнена, работа спутника продолжается.



CHEOPS

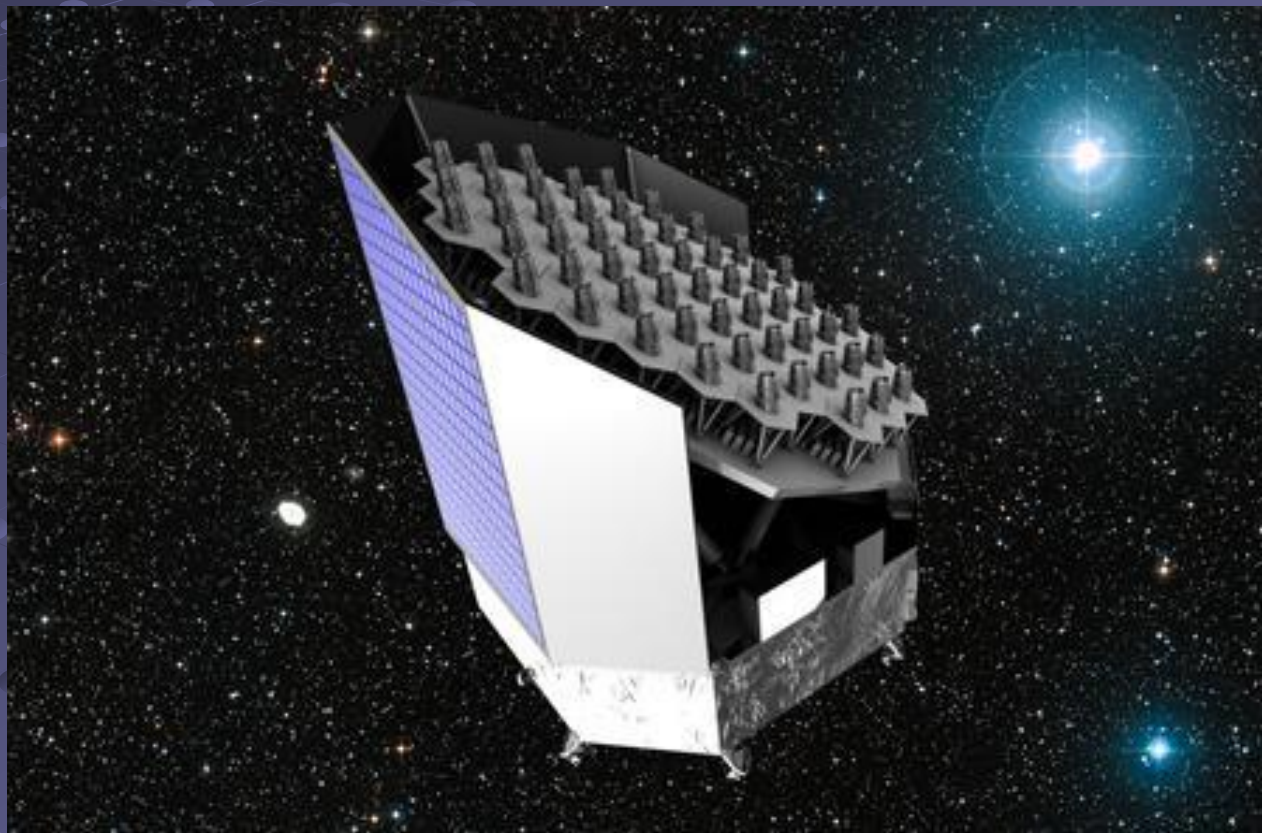
CHaracterising **ExO**Planets **Satellite**

Небольшой спутник для определения радиусов экзопланет у близких звезд, для которых с помощью наземных телескопов уже получены оценки массы.



PLATO

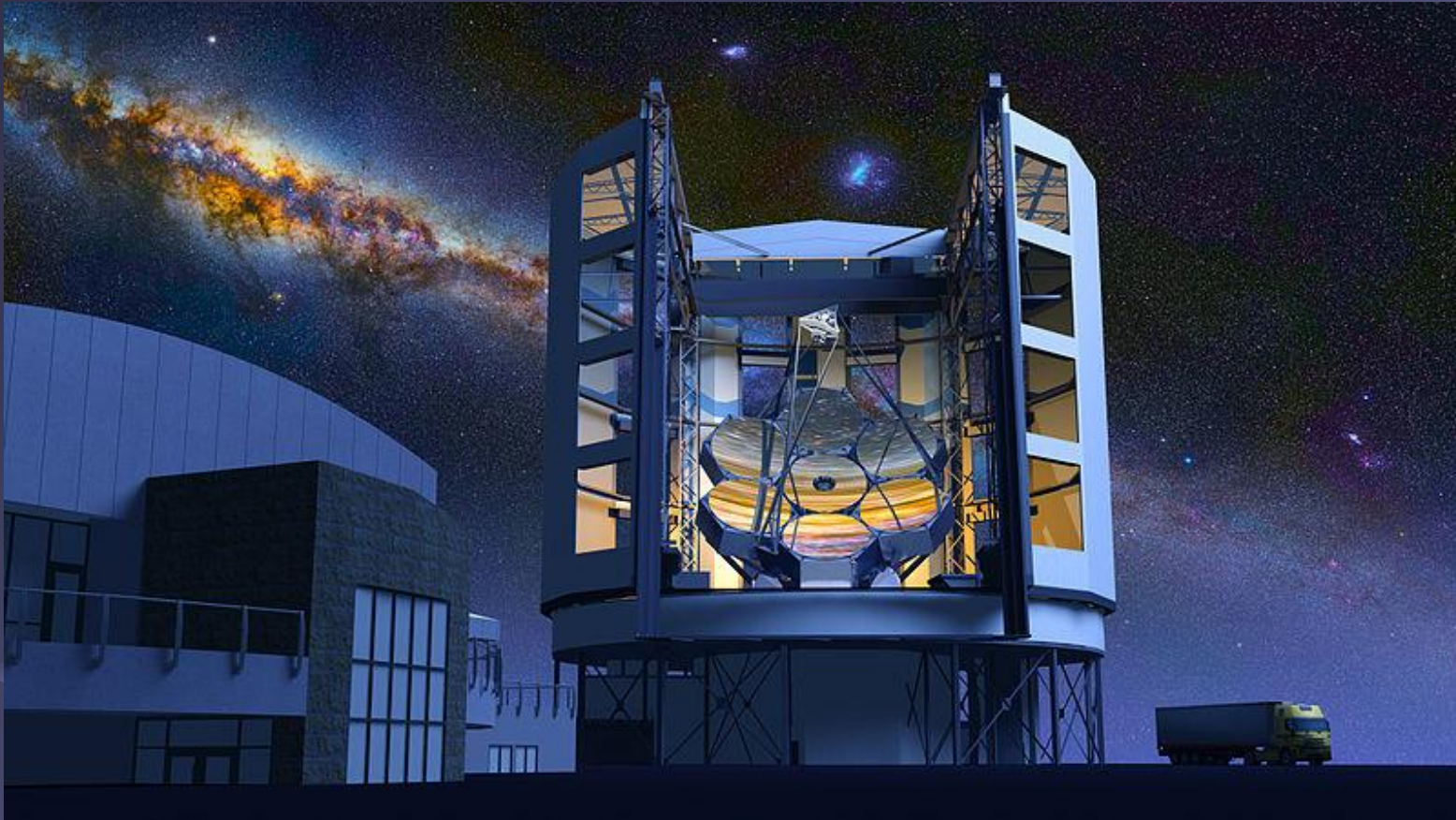
Planetary Transits and Oscillations of stars



С помощью 34 небольших телескопов
будет проведен поиск планет
типа Земли у миллиона звезд.

ESA, 2026

Giant Magellan Telescope



Эффективный размер – 22-24.5 метров.
Телескоп состоит из семи сегментов по 8.4 метра.
Обсерватория Las Campanas, Чили.
Большая международная коллаборация,
в основном – американские университеты.
Планируется завершить строительство в 2029 г.

Thirty Meter Telescope



Мауна Кеа. Гавайи.
Международная коллаборация.
Стоимость – более миллиарда долларов.

E-ELT

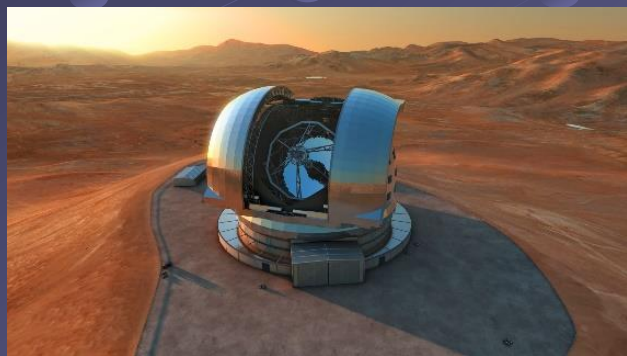
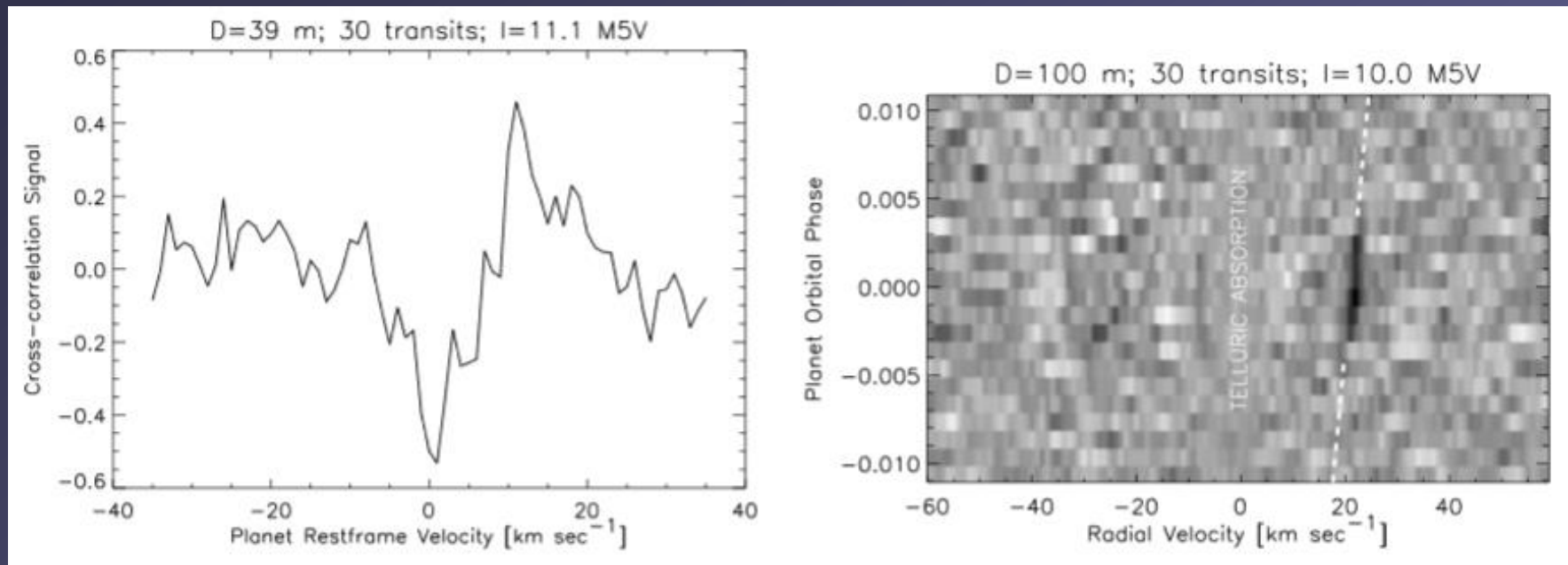
European Extremely Large Telescope

Этот инструмент сможет внести большой вклад в изучение экзопланет. Уже запланировано, что на нем будет стоять несколько специальных инструментов. Можно будет непосредственно регистрировать планеты земного размера. Для более крупных планет будет возможно получать хорошие спектры атмосфер.



Эффективный размер - почти 40 метров
Европейская южная обсерватория (ESO).
Пустыня Атакама, Чили.
Планируемые сроки первого света – 2025 г.

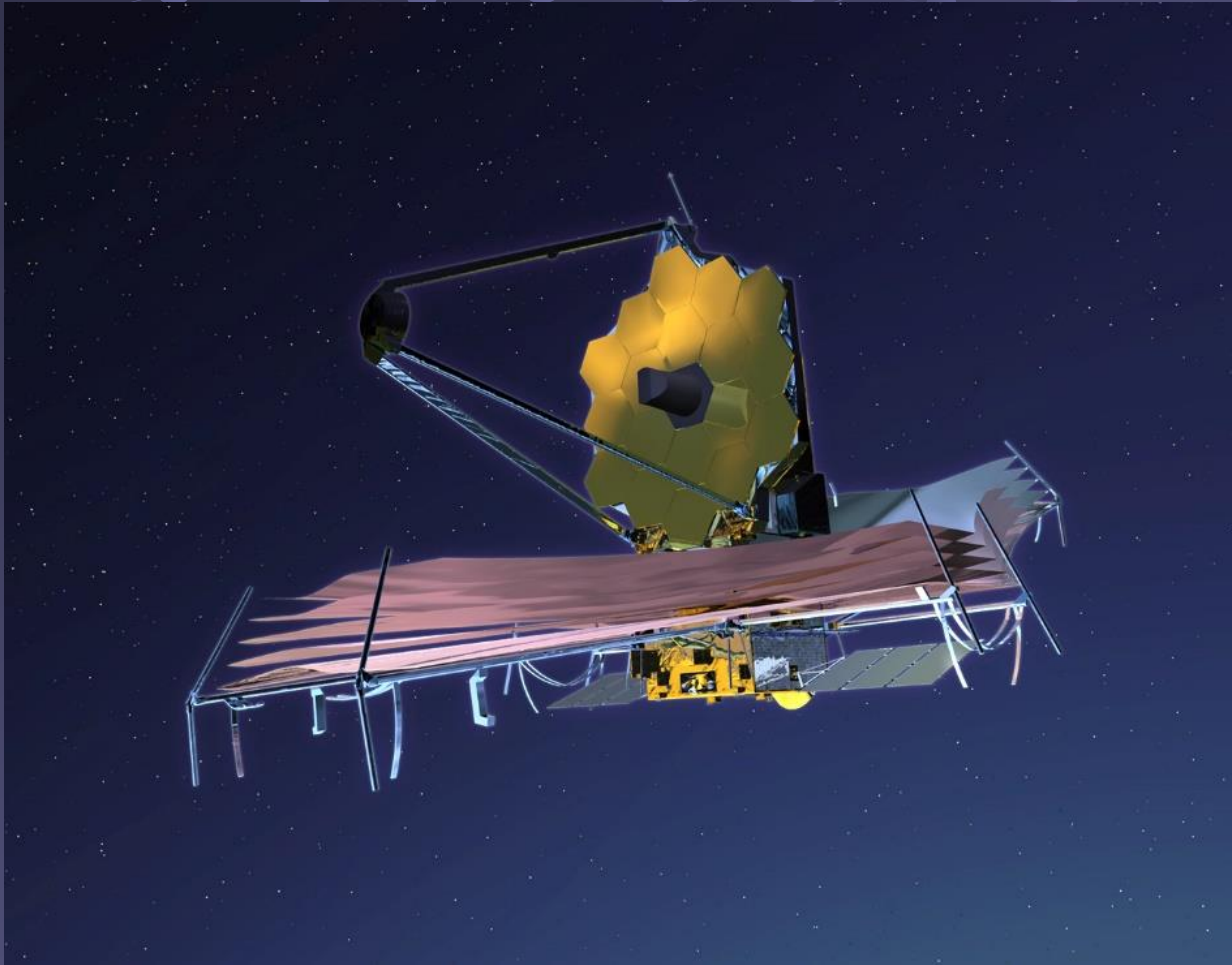
Будущие наблюдения на E-ELT



Несколько лет наблюдений на E-ELT позволят обнаружить кислород на планете типа Земли, вращающейся вокруг красного карлика.

А можно строить специальные телескопы для таких исследований.

James Webb Space Telescope (JWST)



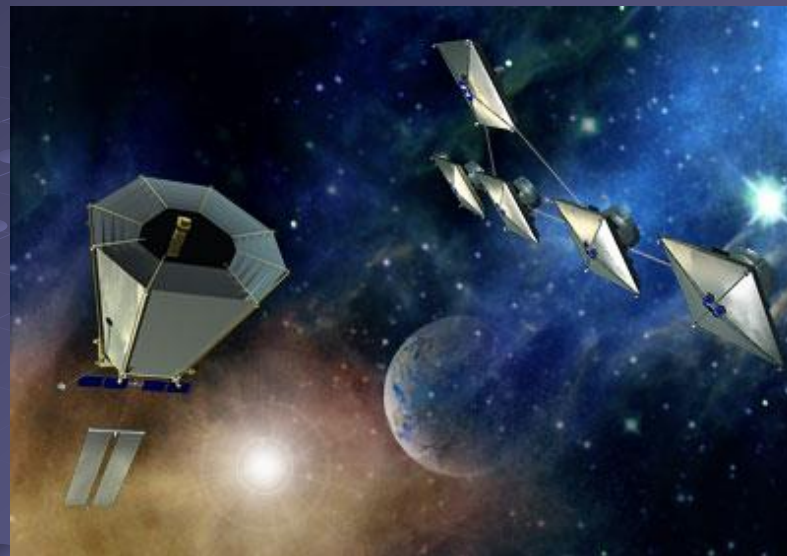
Космический телескоп
следующего поколения.

Инфракрасный диапазон.

Раскладывающееся зеркало
6.5 метра

Далекое будущее

Terrestrial Planet Finder



Космические коронографы и космические интерферометры для детального исследования атмосфер планет типа Земли в зонах обитаемости на орбитах вокруг планет типа Солнца в наших окрестностях.



Darwin