



Как открыть экзопланету

Сергей Попов

Экзопланеты

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

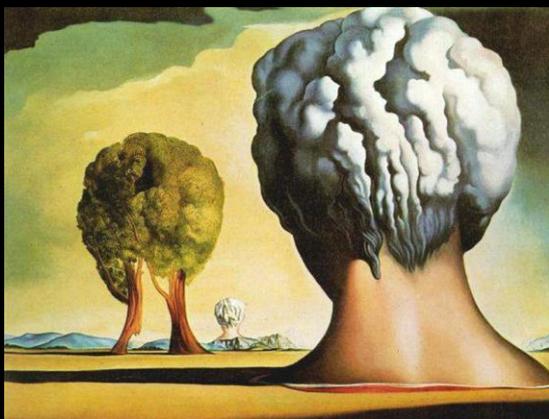
Сейчас специализированные наземные программы и спутники существенно увеличили число известных планет у других звезд.

На данный момент ~3800 планет (exoplanet.eu) плюс несколько тысяч кандидатов.

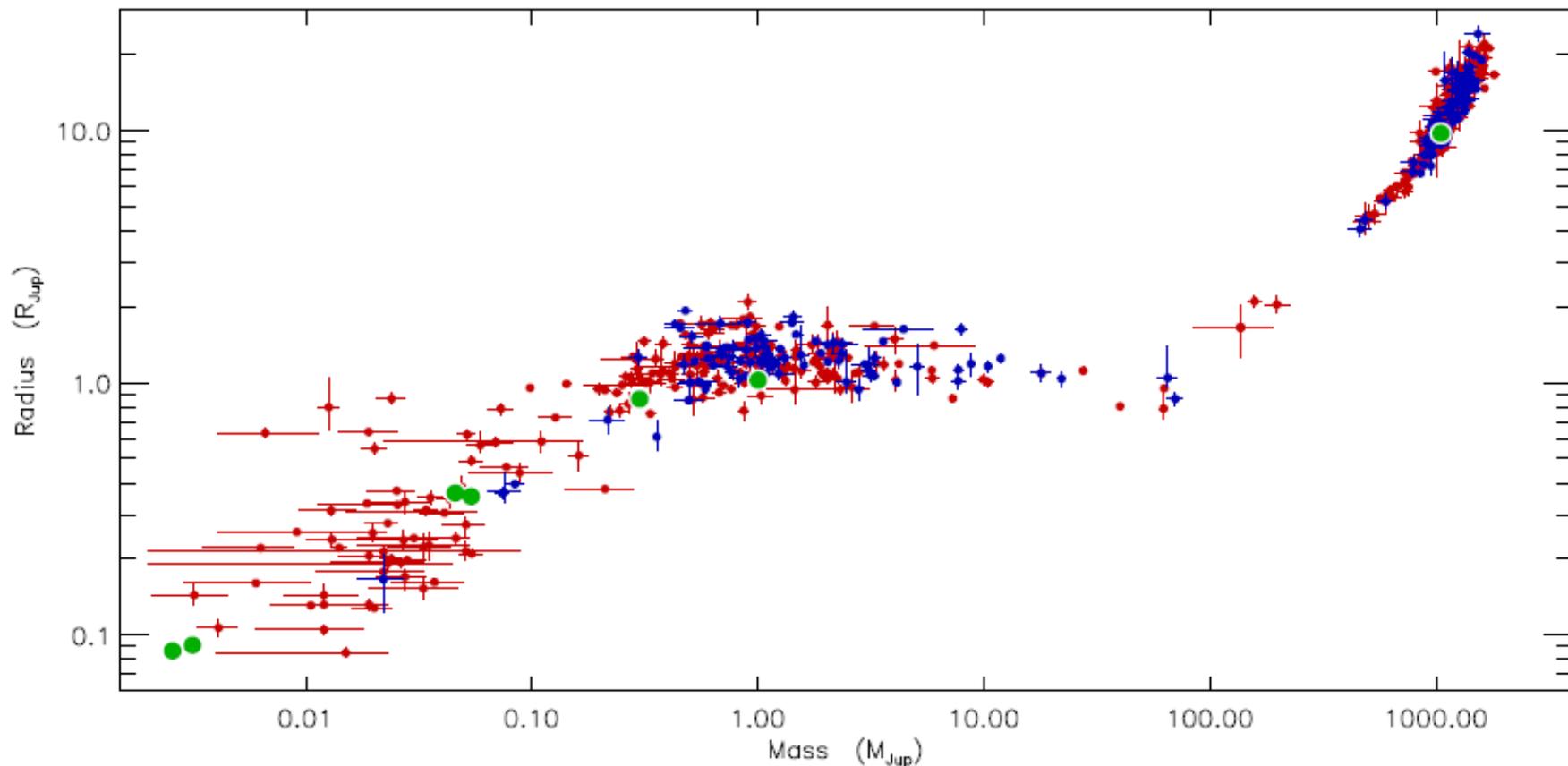


Область быстро развивается и с точки зрения новых наблюдений (и постройки приборов), и с точки зрения теории (т.к. оказалось, что многое мы не понимали или понимали не так).

В 2015 г. впервые экзопланетам присвоили имена!



Планеты и звезды



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

Какая экзопланета была открыта первой?

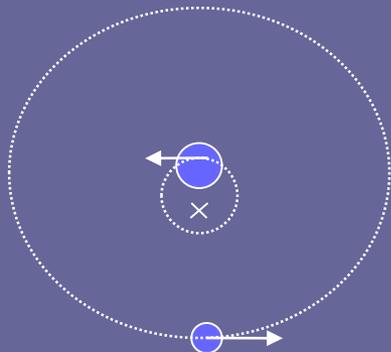
- Первая надежно подтвержденная планета, вращающаяся вокруг другой нормальной звезды (51 Пегаса), была открыта в 1995 году Майором и Кело. В результате конкурса имён МАС планета получила название Димидий (Dimidium)
- Однако еще в 1992 году надежнейшее обнаружение планеты было сделано Вольцшаном и Фрейлом, 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 сих пор масса оценена недостаточно точно, чтобы сказать, планета это или бурый карлик.



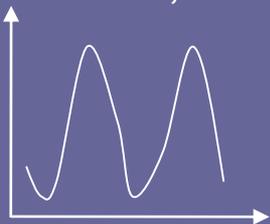
Как открывают?

1. Изменение лучевой скорости звезды (вращение вокруг общего центра масс системы звезда-планета). ~700 планет.
2. Прохождение планеты по диску звезды. >2700 планет (плюс тысячи кандидатов).
3. Микролинзирование. ~50 планет.
4. По таймингу (пульсары, белые карлики, двойные и планетные системы). >30 планет.
5. Прямые изображения. Десятки планет.
6. Выделение света планеты. Несколько планет.
7. Астрометрия. 1(?) планета

Лучевые скорости



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



Измеряем:

- Период
- Массу

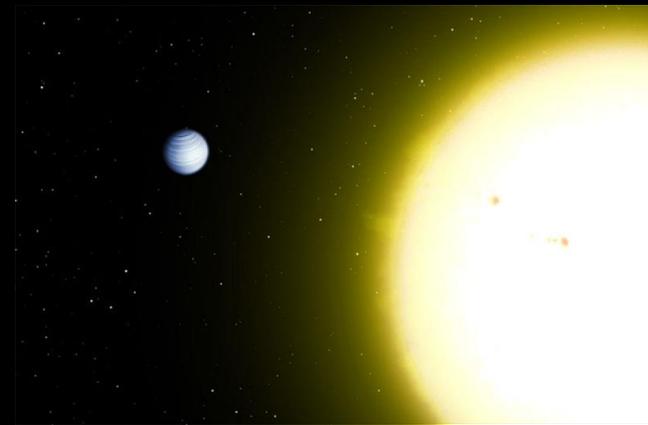
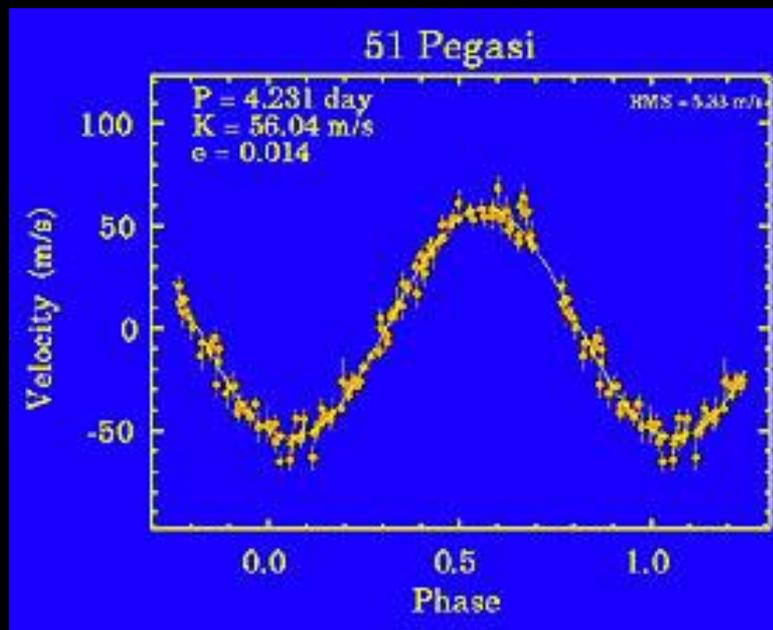


Первая надежная экзопланета у нормальной звезды

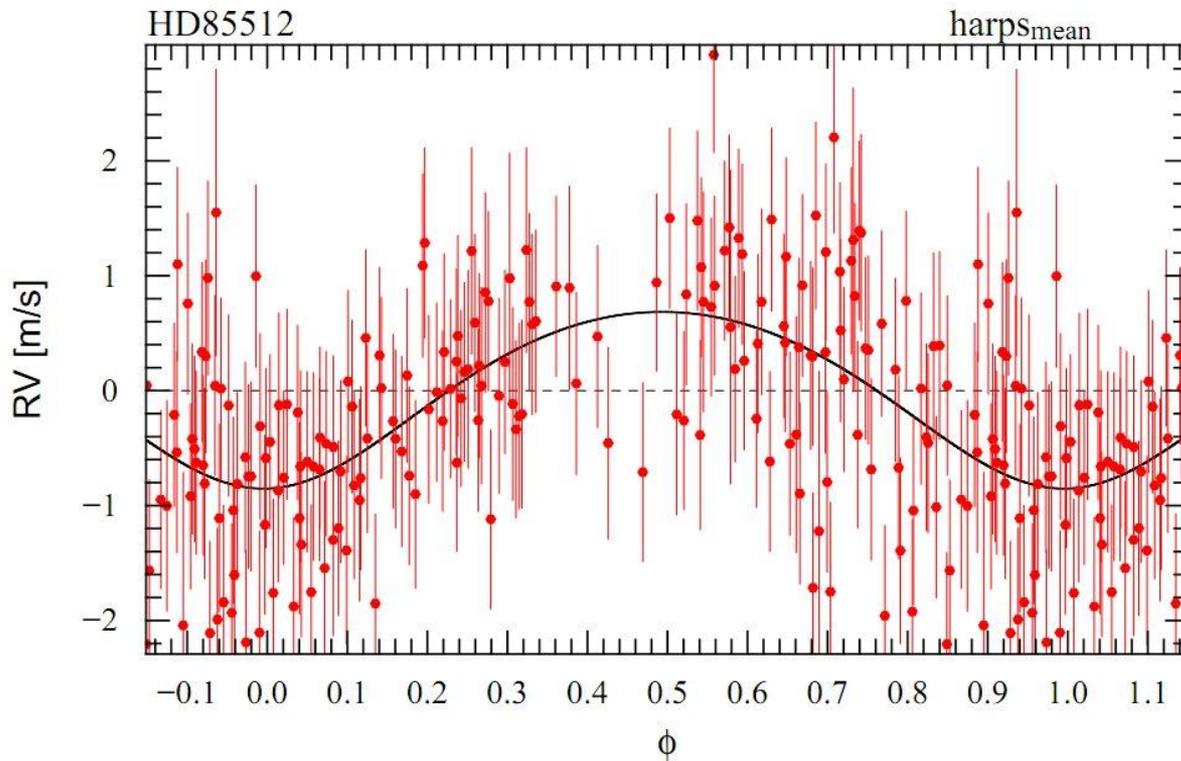
51 Пегаса



Michel Mayor и Didier Queloz 1995 год



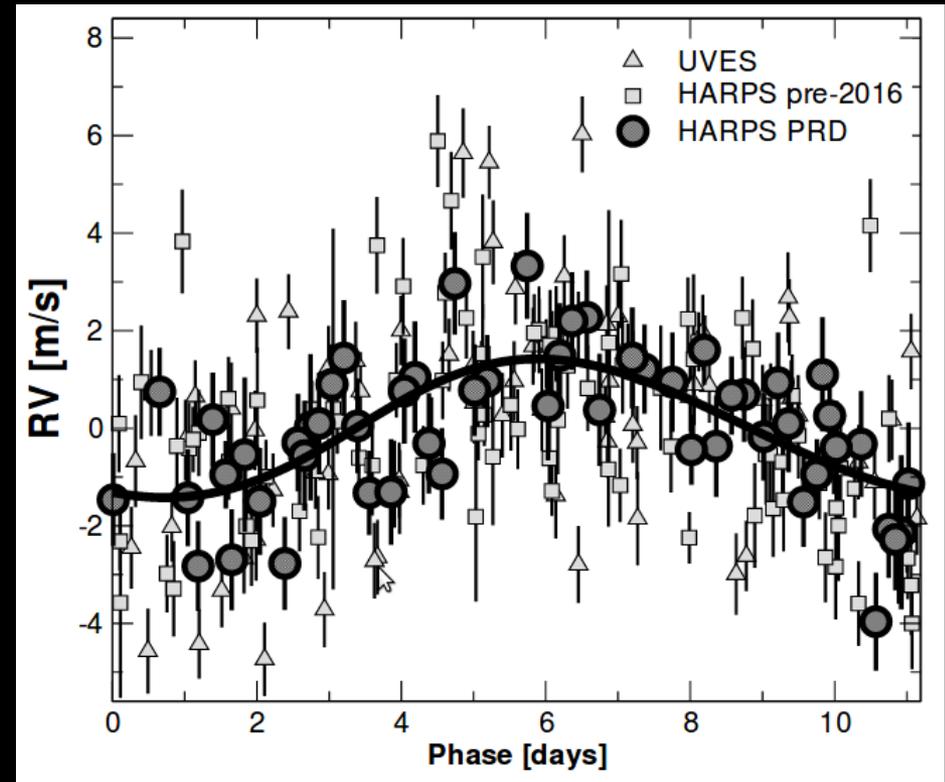
Первые открытия легких планет



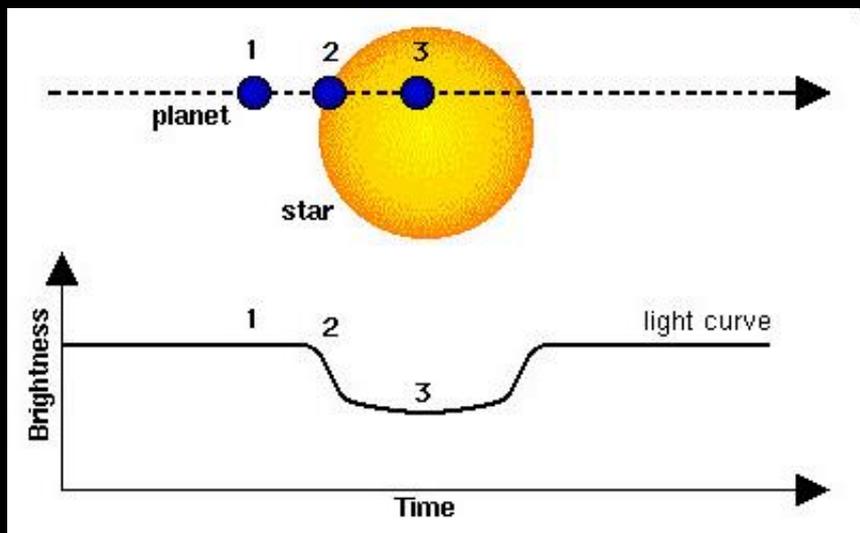
Маломассивная планета на самой границе зоны обитаемости. Открыта по данным HARPS. Это наземный проект. Измеряется масса, т.к. наблюдается изменение лучевой скорости звезды.

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!

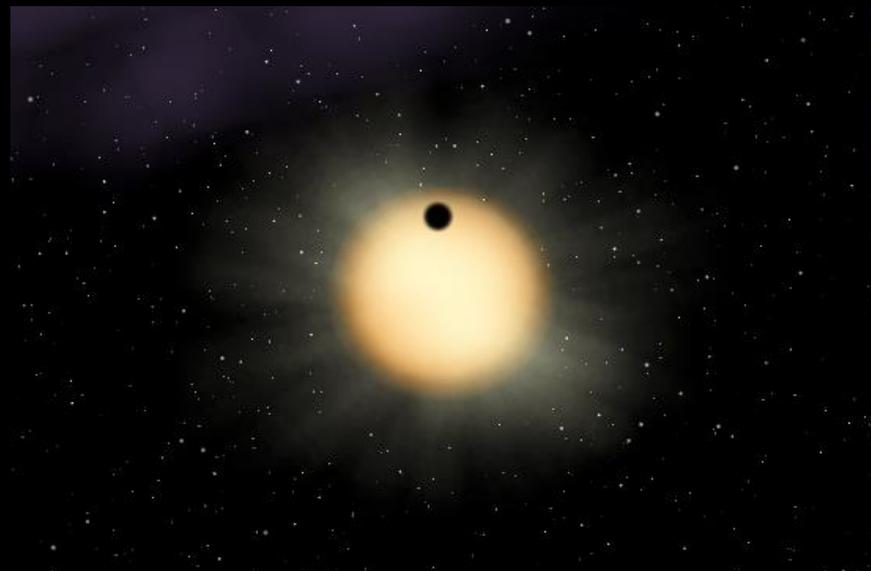


Транзитные экзопланеты



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

Измеряем период и радиус.



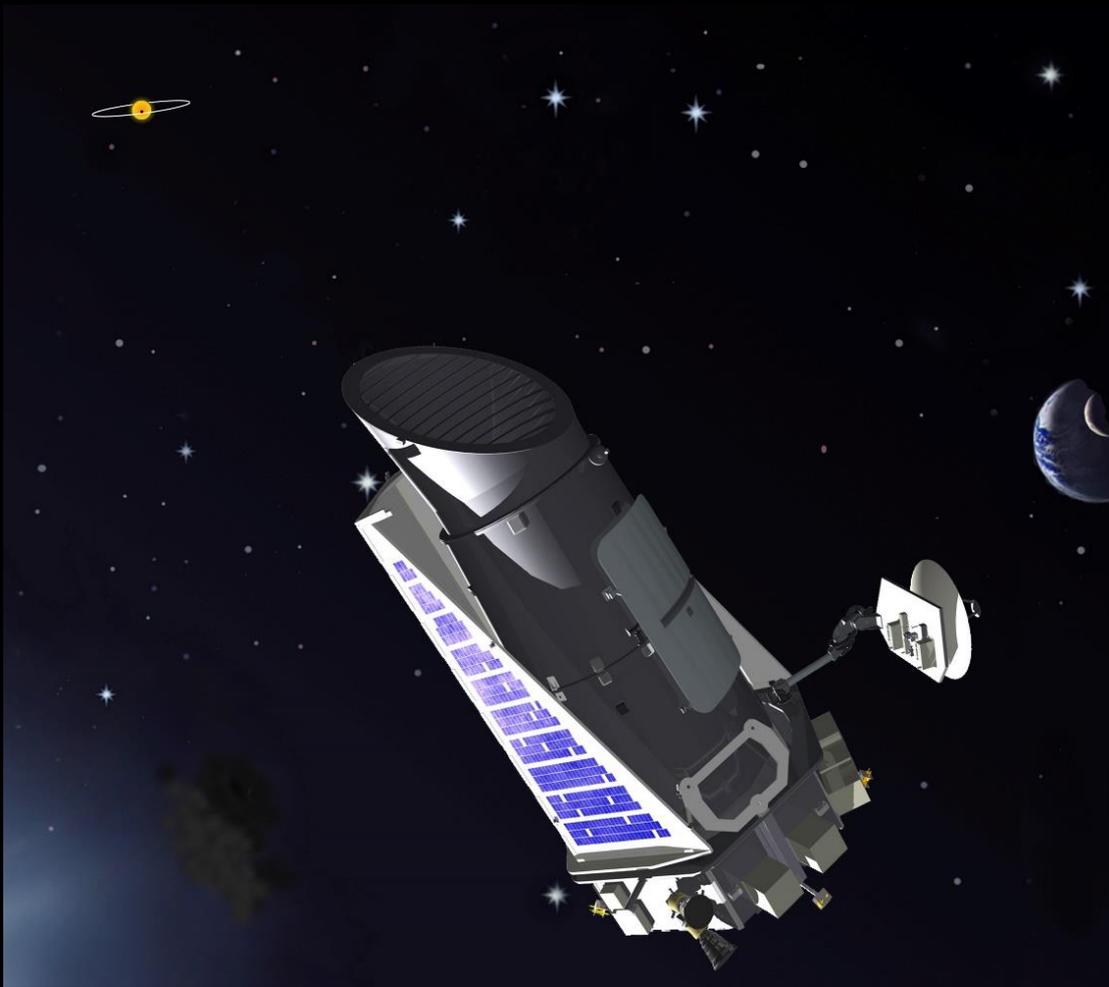
Сейчас известны
тысячи транзитных планет
и тысячи кандидатов

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

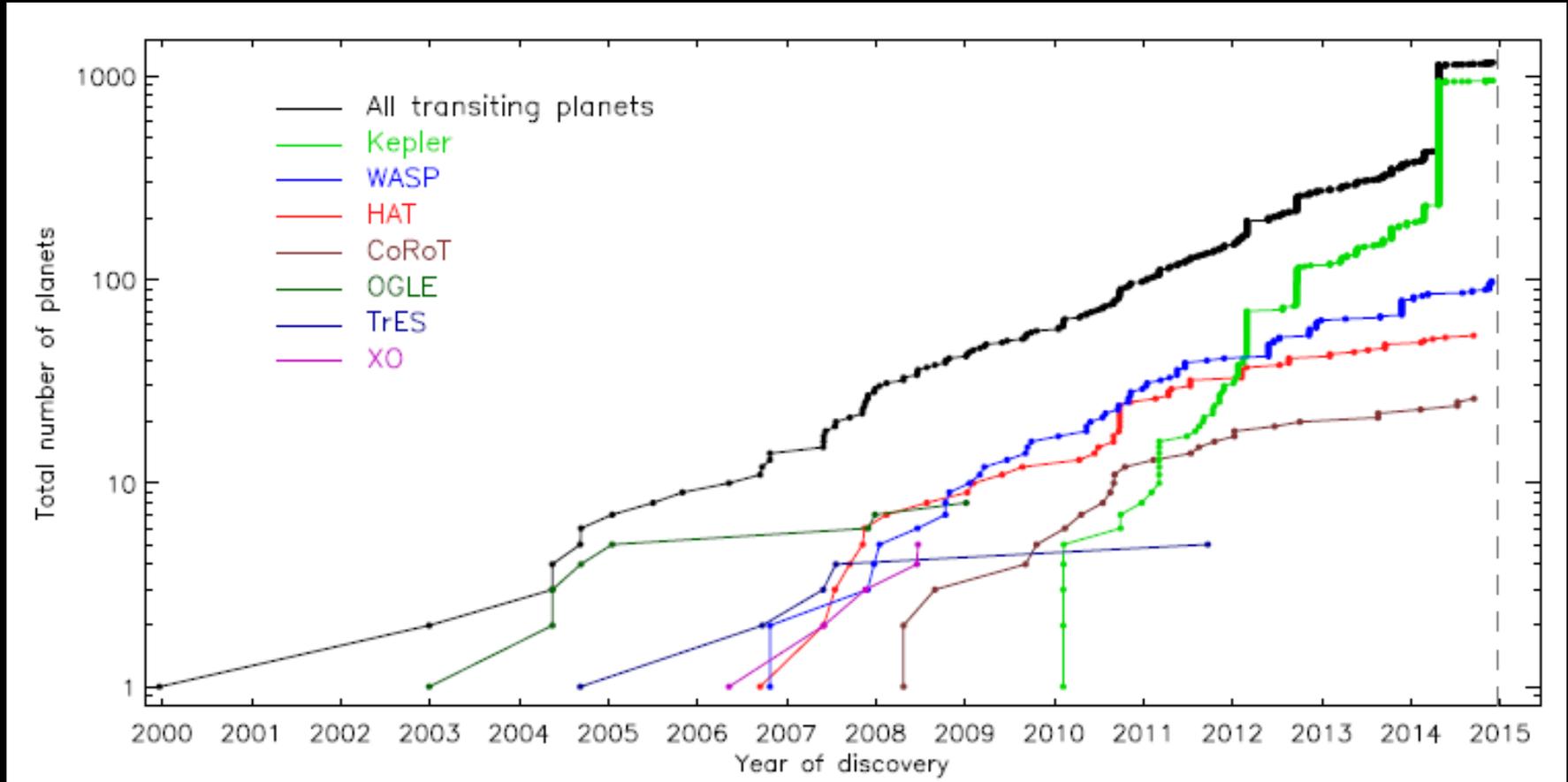
<http://exoplanet.eu>

<http://www.astronet.ru/db/msg/1391325>

Kepler и CoRoT



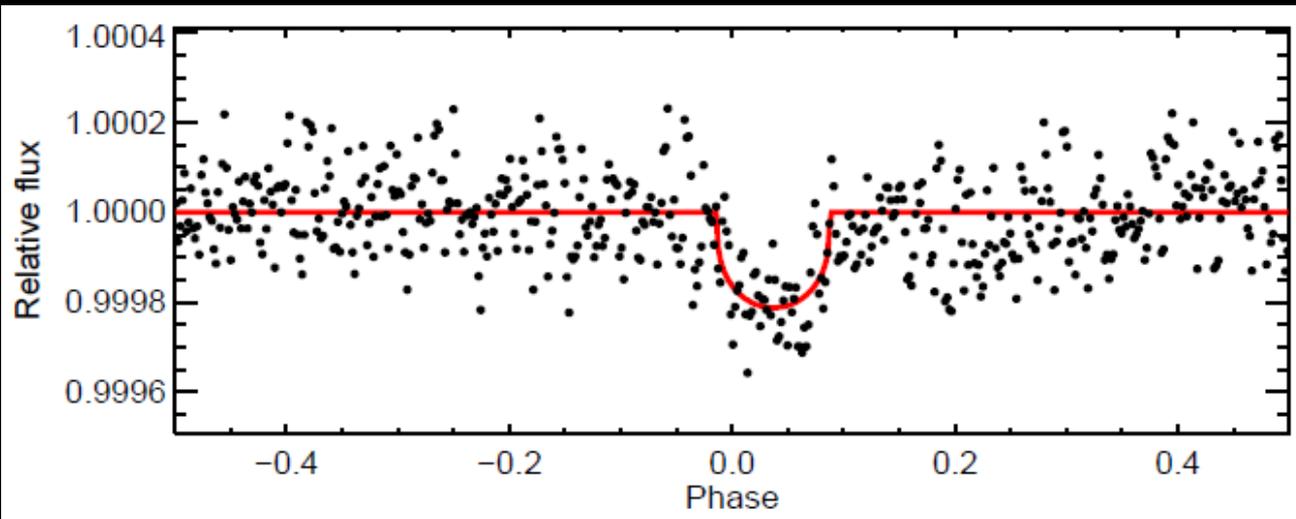
Темп открытия транзитных планет



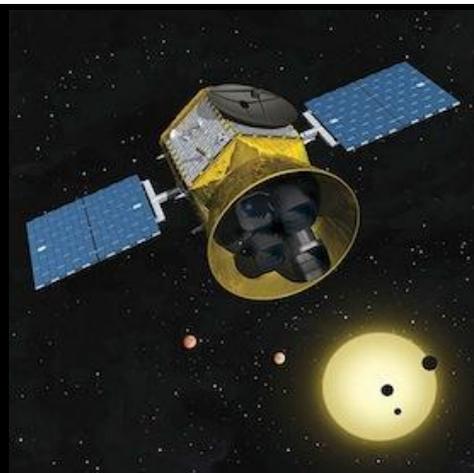
14.11.5517

Сейчас работают наземные установки, плюс есть огромный архив Кеплера.

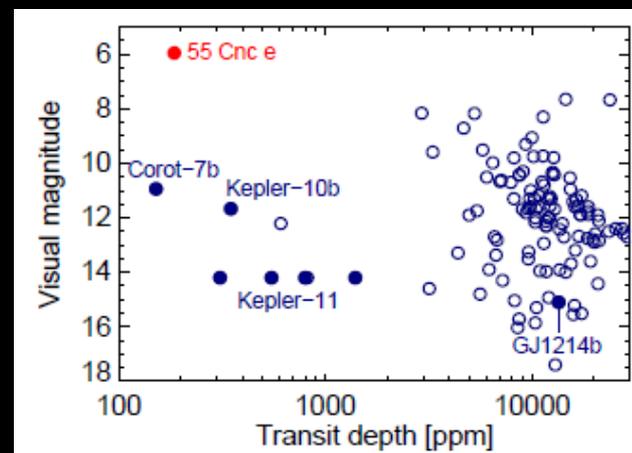
Планета у звезды, видимой невооруженным глазом



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



Небольшой канадский
спутник MOST



Шесть транзитных планет!

Kepler-11

Массы
(в земных)

2-6

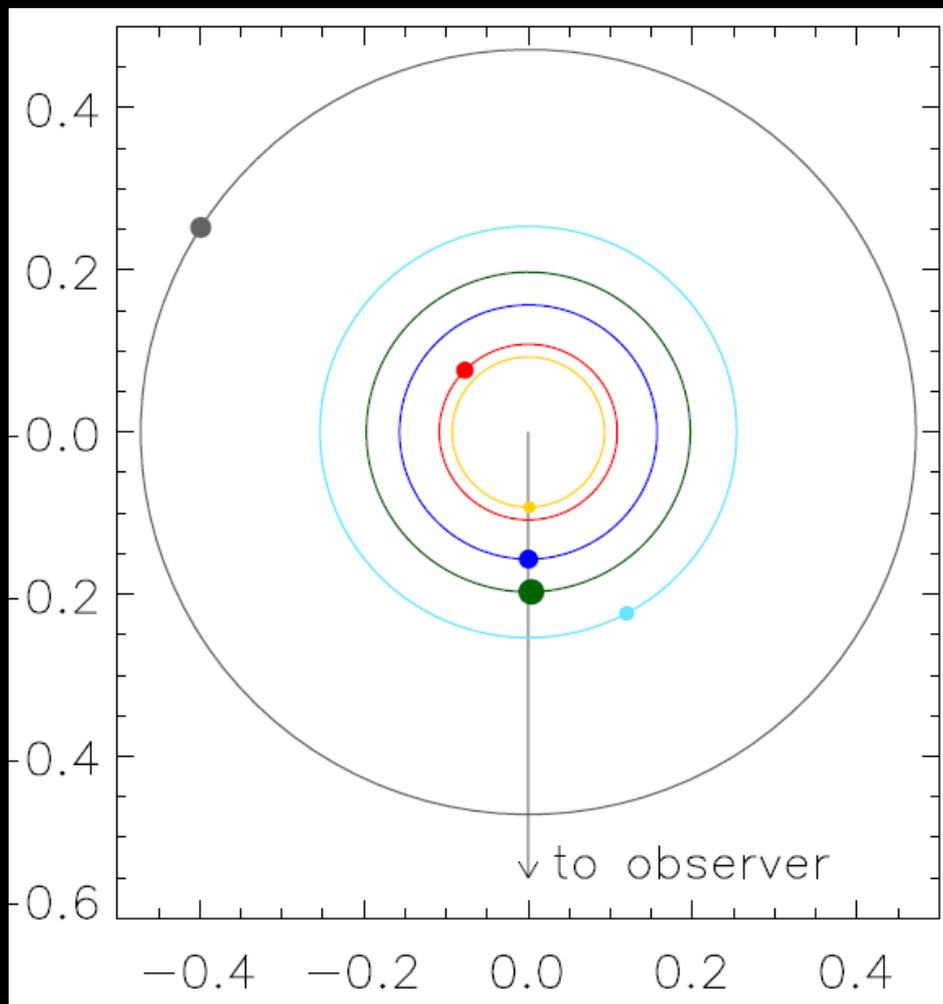
7-18

4-9

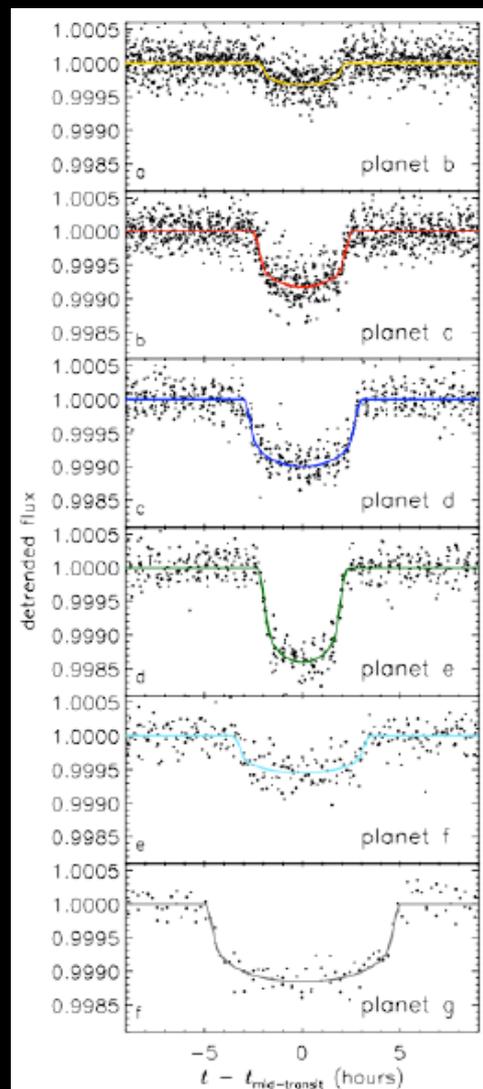
7-11

1-5

<300

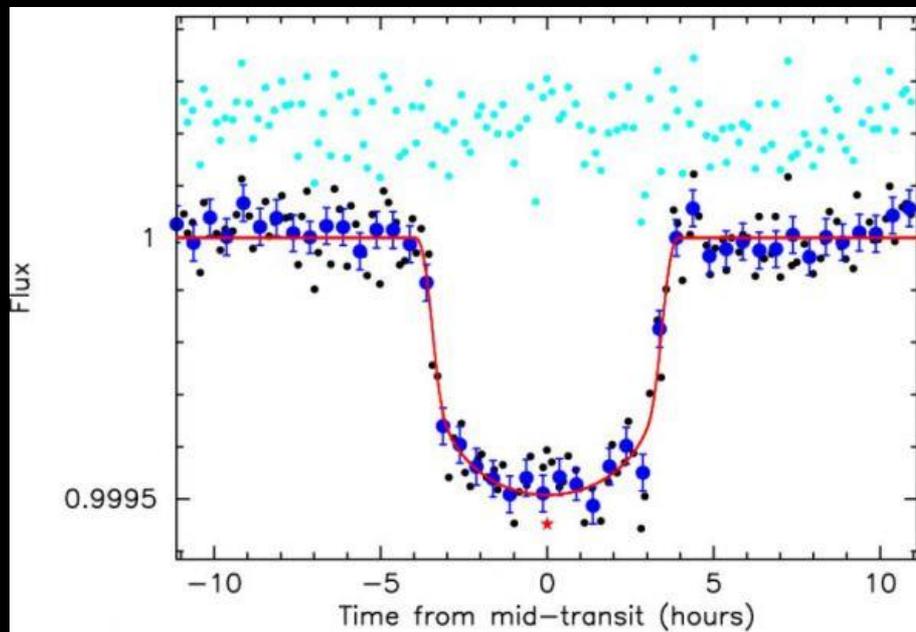


1102.0291



Планета Kepler-22b

Первая надежная планета типа Земли в зоне обитаемости

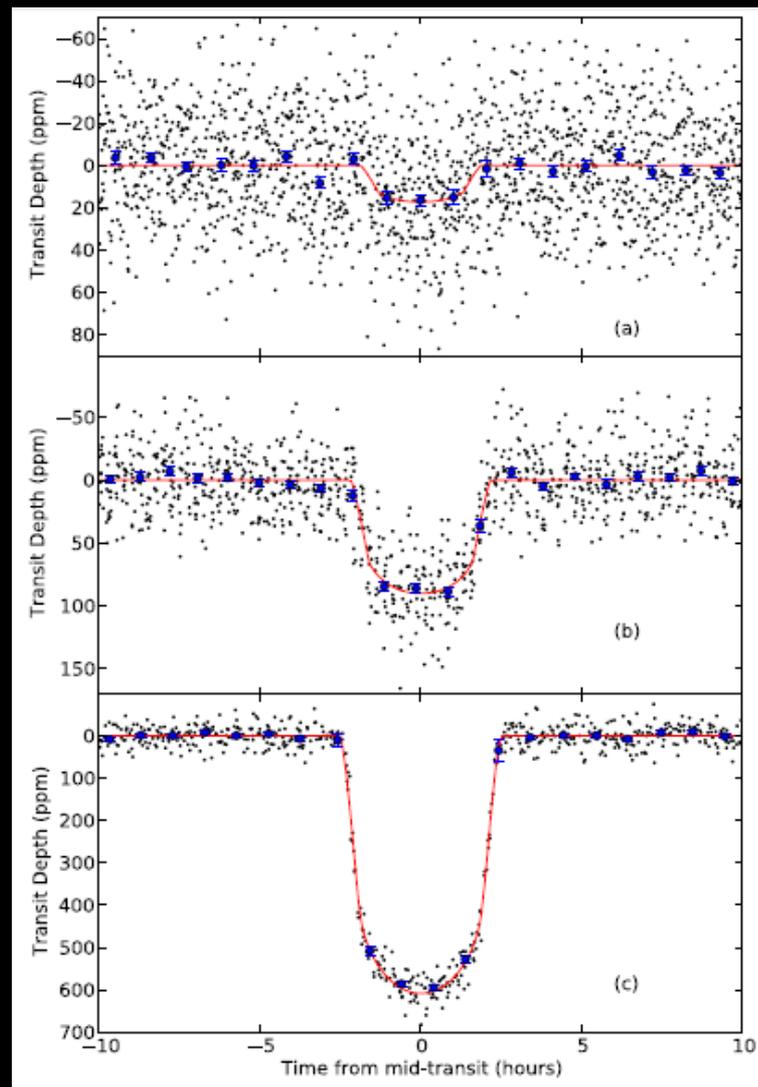


1112.1640

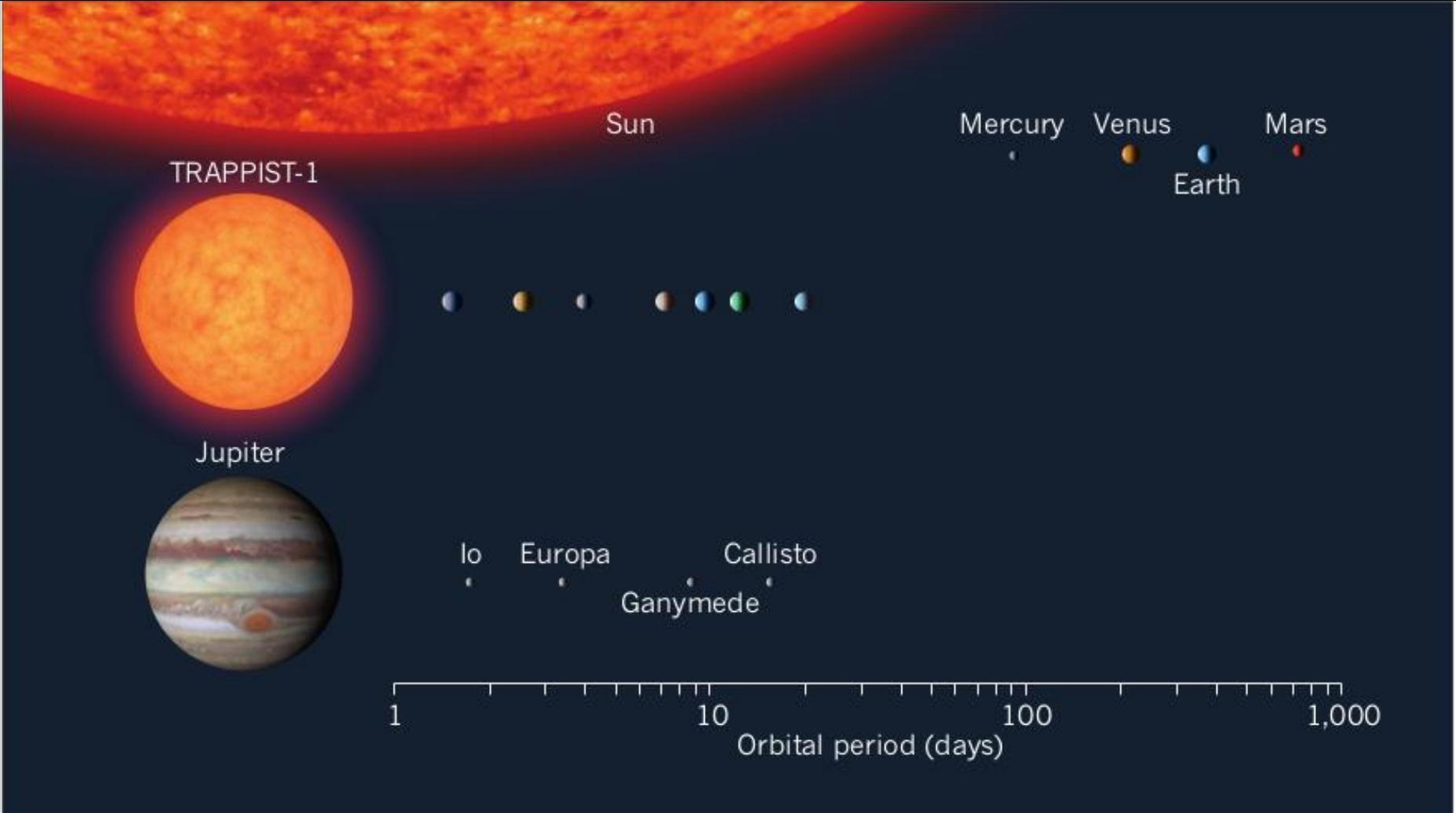
Транзитная планета у близкой звезды типа Солнца (класс G5)
Радиус 2.25-2.5 земных. Для массы пока есть только верхний предел.
Орбитальный период 290 дней.
Планета находится в т.н. зоне обитаемости.

Планета с размером меньше меркурианского

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

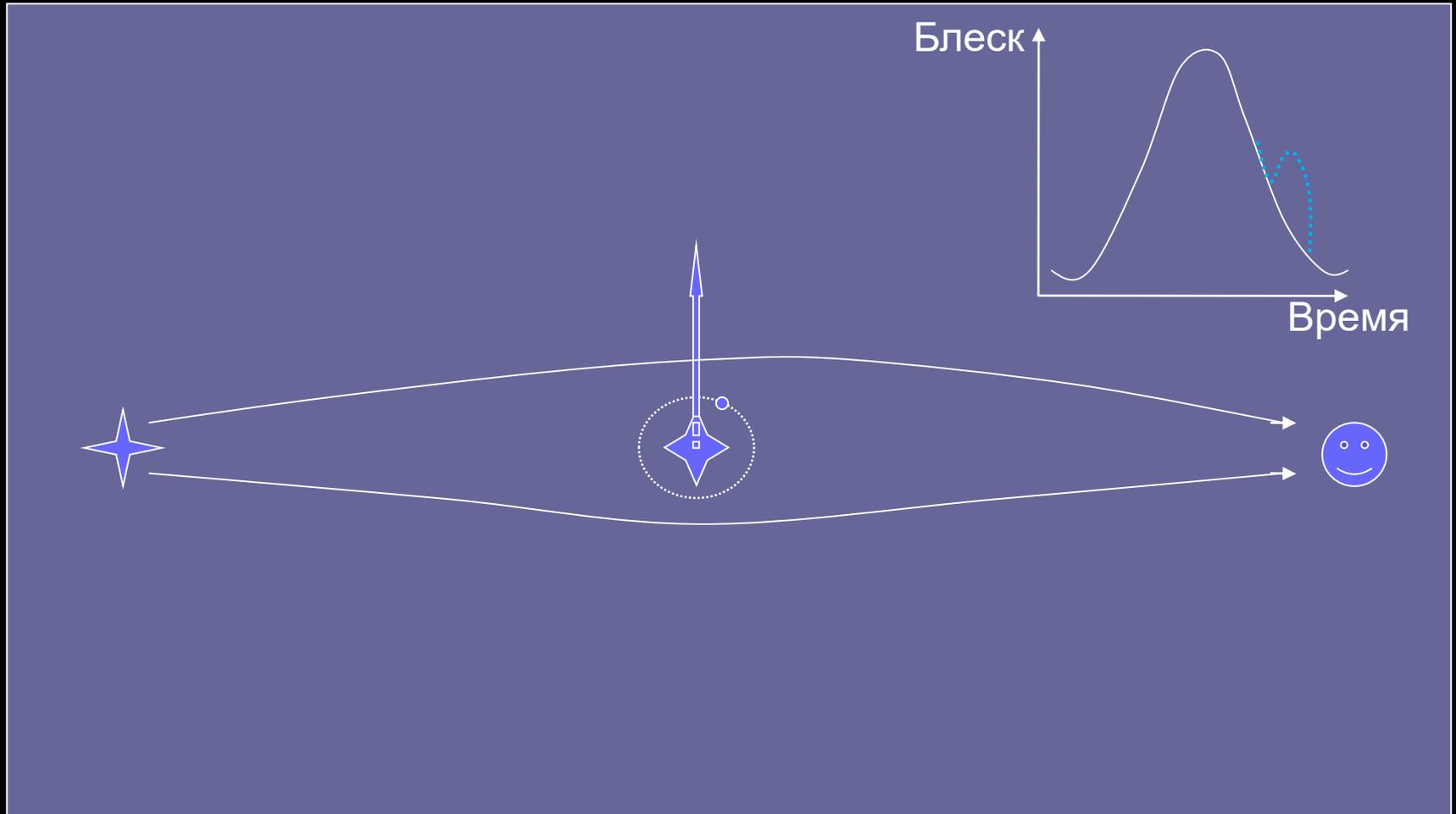


Система TRAPPIST-1: 7 землеподобных планет

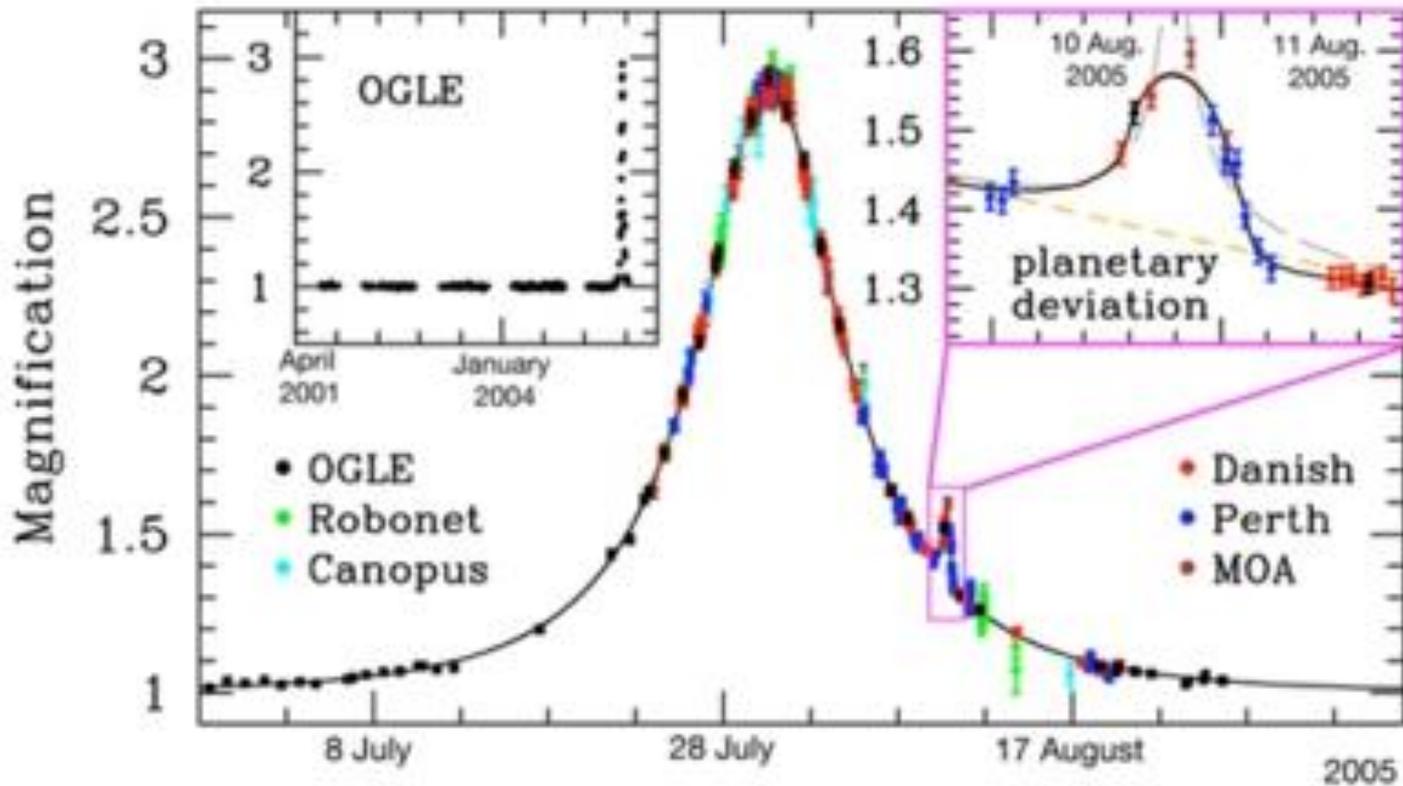


Радиусы планет в радиусах Земли: 1.09, 1.06, 0.77, 0.92, 1.04, 1.13, 0.76

Микролинзирование



Дополнительный пик



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

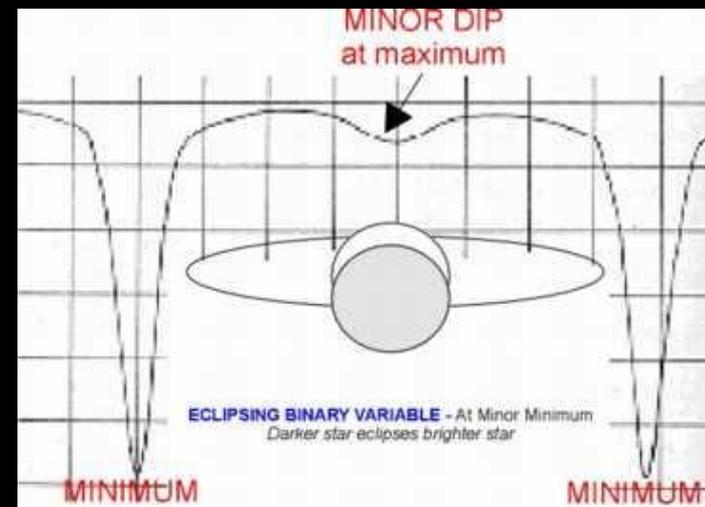
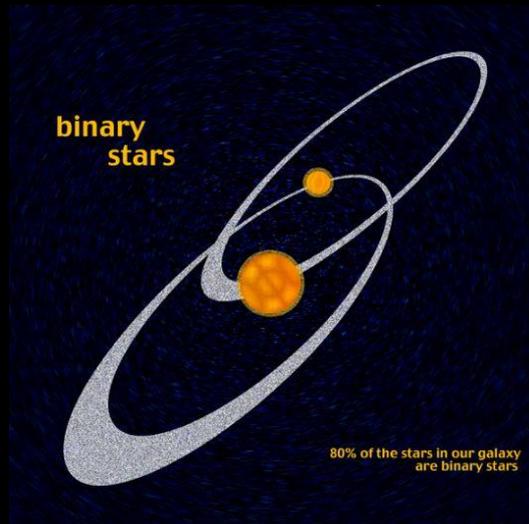
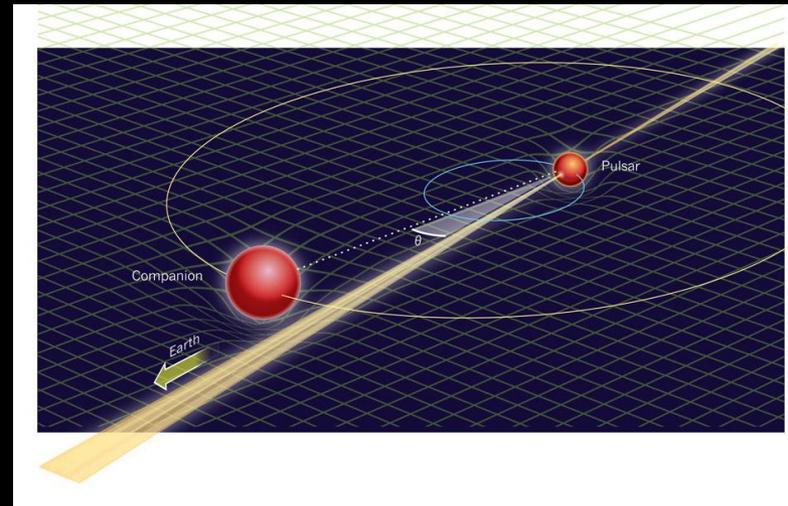
<http://www.eso.org/public/images/eso0603b/>

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.

Особое место занимает тайминг транзитов уже известных планет.

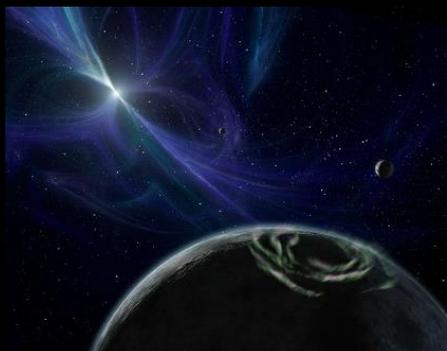


Планеты вокруг пульсара

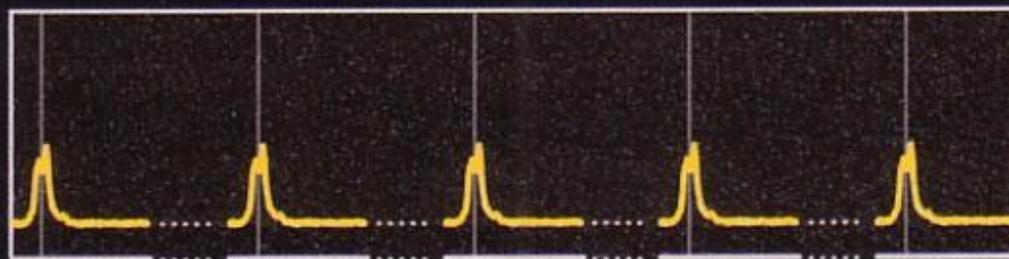
Wolszczan и Frail 1992 год
PSR B1257+12
Миллисекундный пульсар

Обнаружено три легкие планеты

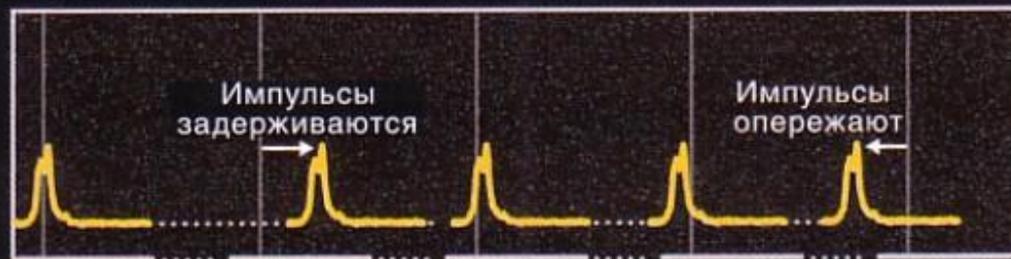
Companion (in order from star)	Mass	Semimajor axis (AU)	Orbital period (days)
A (b)	$0.020 \pm 0.002 M_{\oplus}$	0.19	25.262 ± 0.003
B (c)	$4.3 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.36	66.5419 ± 0.0001
C (d)	$3.9 \pm 0.2 M_{\oplus}$	0.46	98.2114 ± 0.0002



Равномерный приход импульсов (нет планет)



Неравномерный приход импульсов (есть планеты)

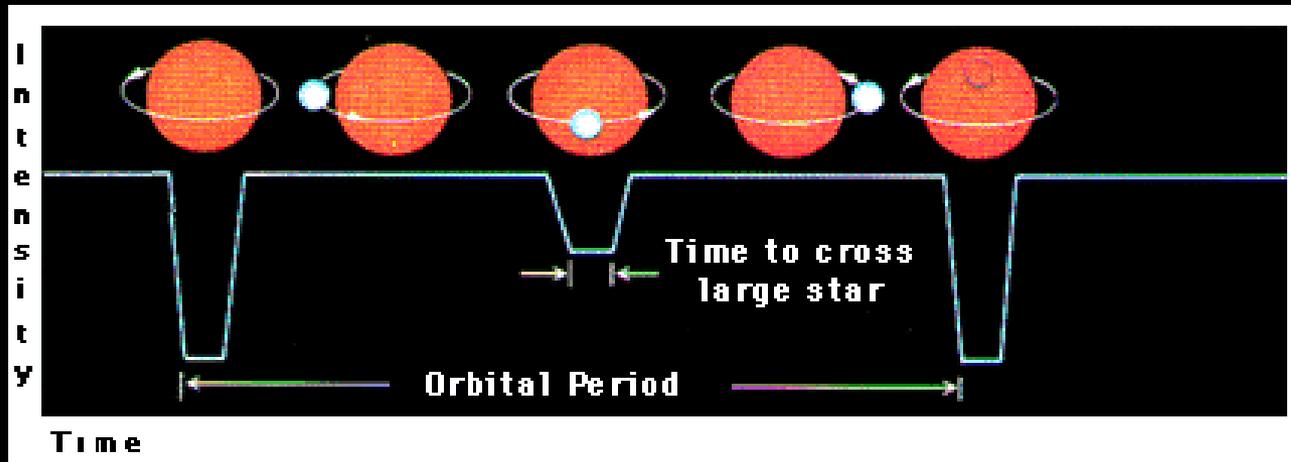


Эпоха (годы)

Тайминг двойных звезд

DP Льва, NN Змеи, NY Девы, RR Резца

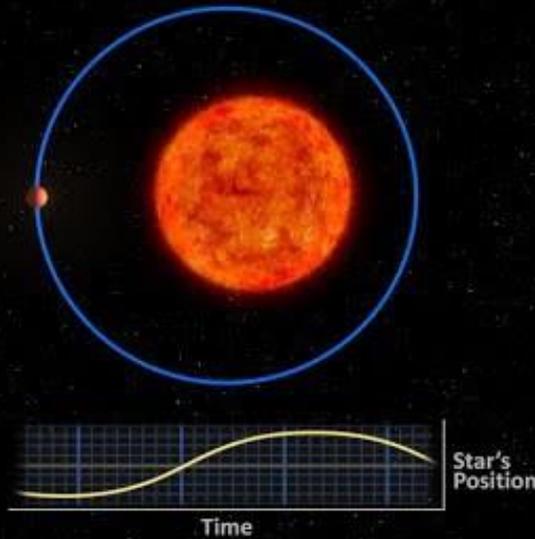
В основном это двойные системы с затмениями



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

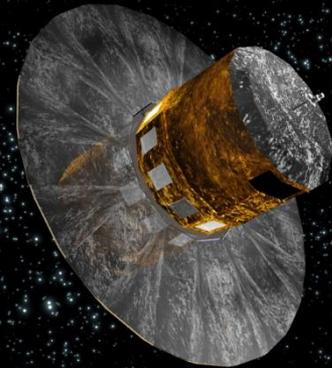
Преимущество в том, что такие открытия можно делать и на небольших наземных телескопах.

Астрометрическое детектирование



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

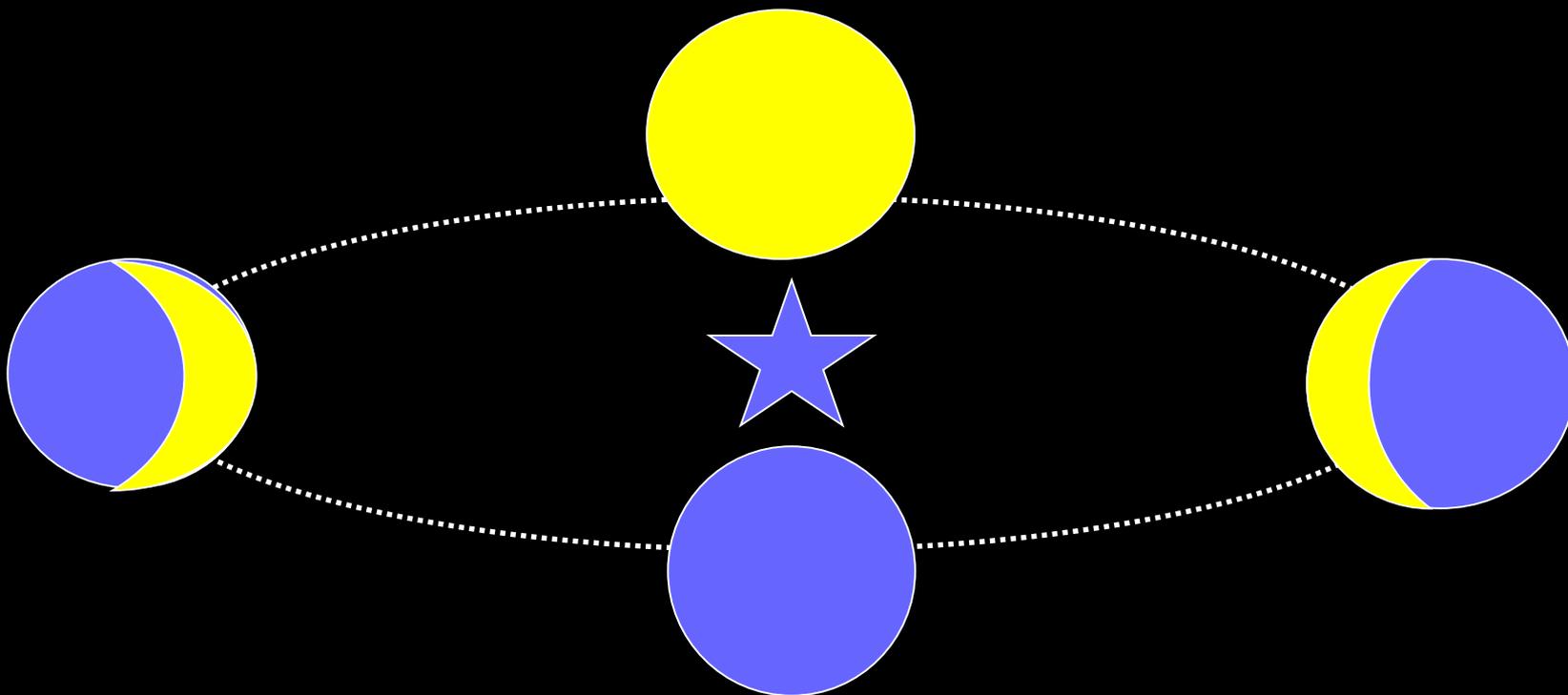
Мы не видим планету,
но можем измерить,
что меняется положение
звезды, т.к. она
вращается вокруг
центра масс системы.



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

Изменение суммарного блеска

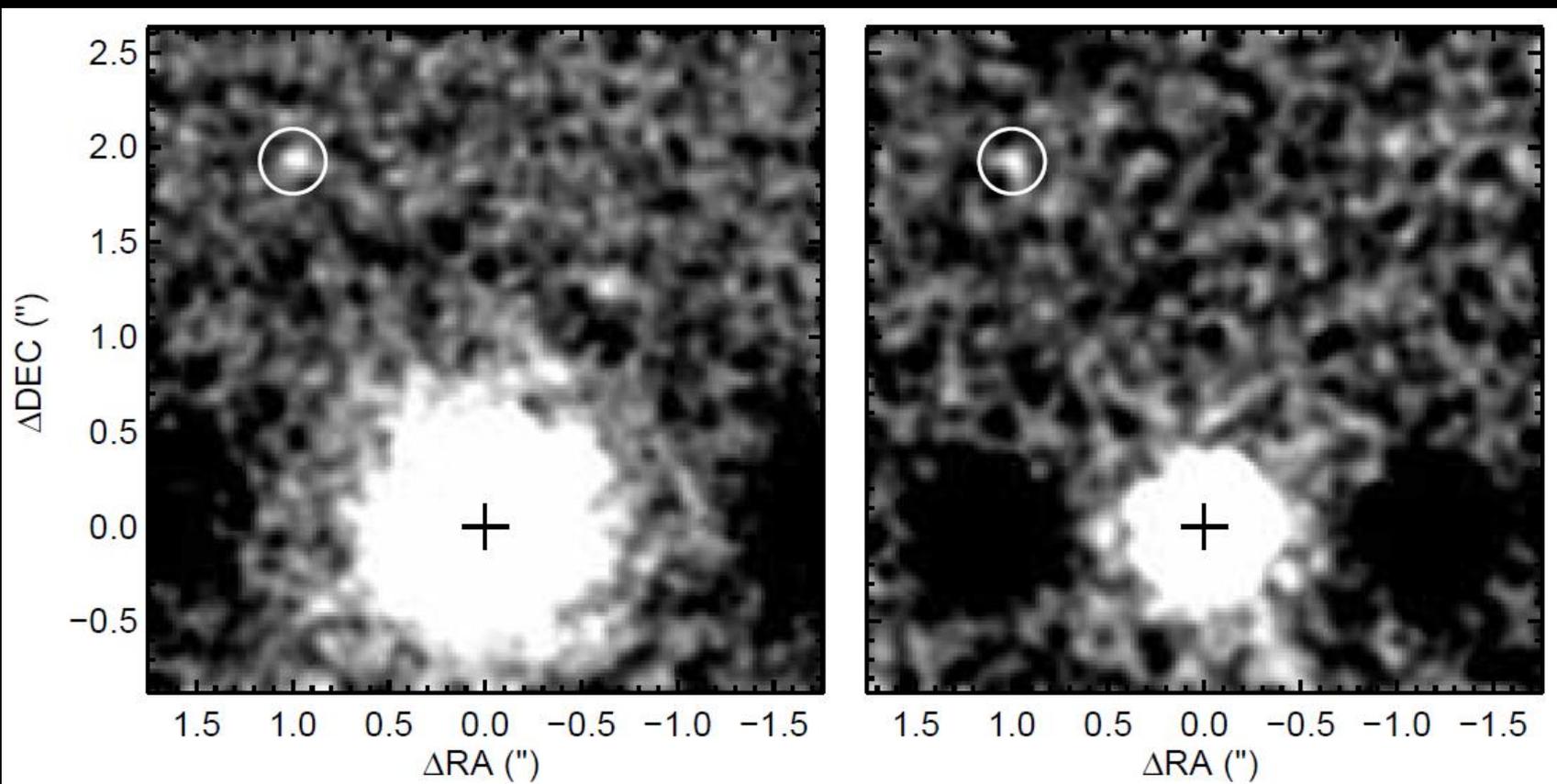
В процессе обращения вокруг звезды планета меняет фазы.
Поэтому планета будет менять блеск.
Отдельно планету не видно, но будет меняться суммарный блеск.
Периодичность сигнала позволяет его выделить.



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

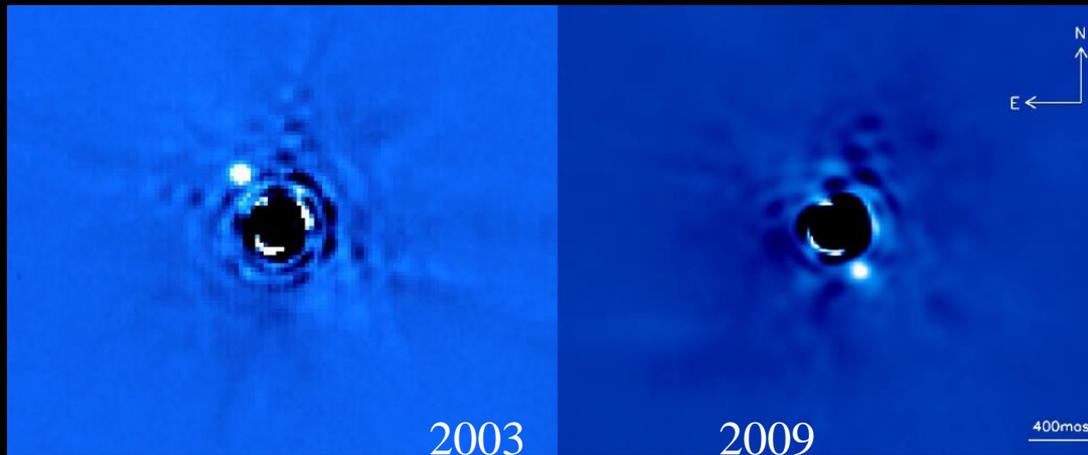
Прямое изображение планеты
около молодой звезды типа Солнца
(телескоп Gemini North, адаптивная оптика)

1RXS J160929.1-210524



arXiv: 1006.3070

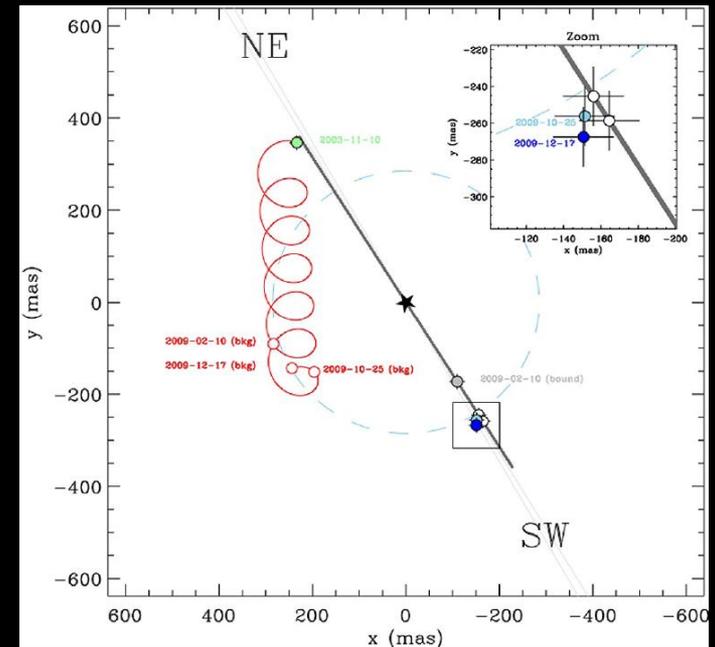
Планета около бета Живописца



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.

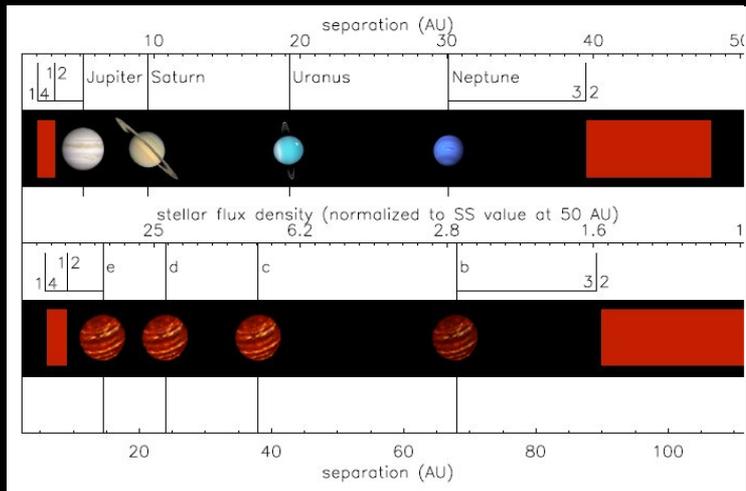


Изображение четырех планеты вокруг HR 8799

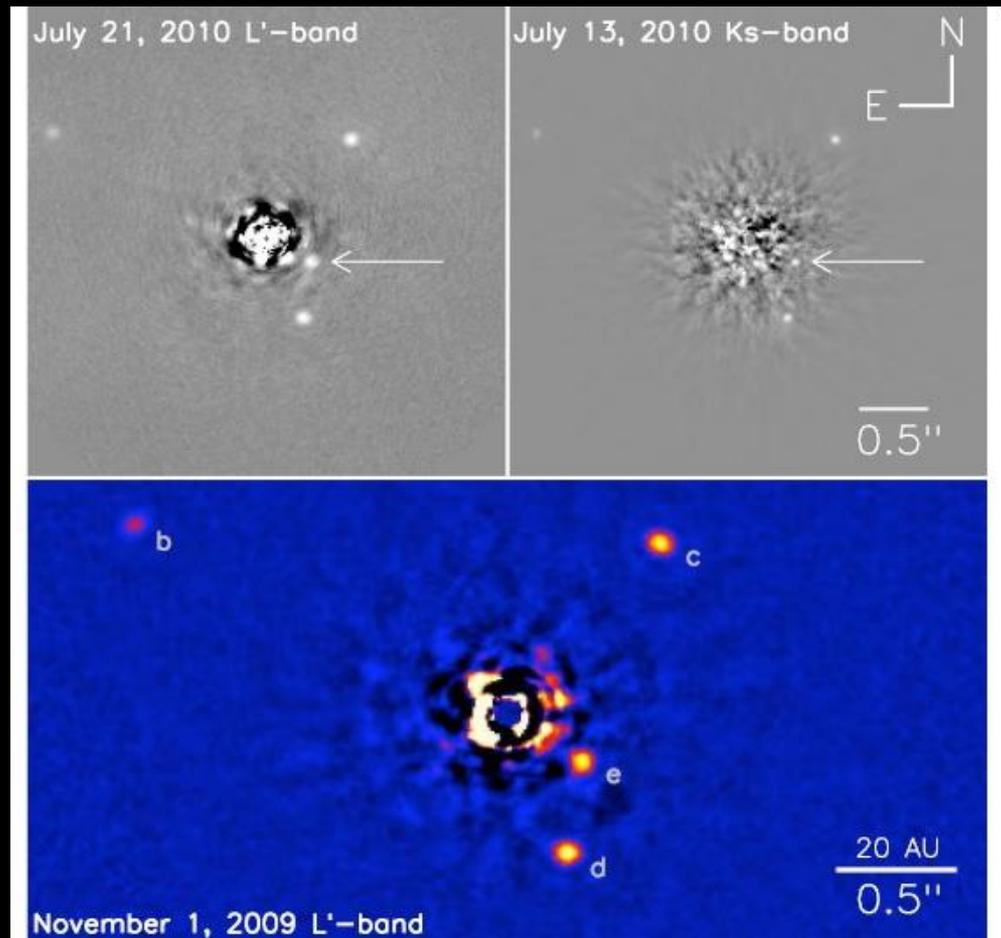
Keck II

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

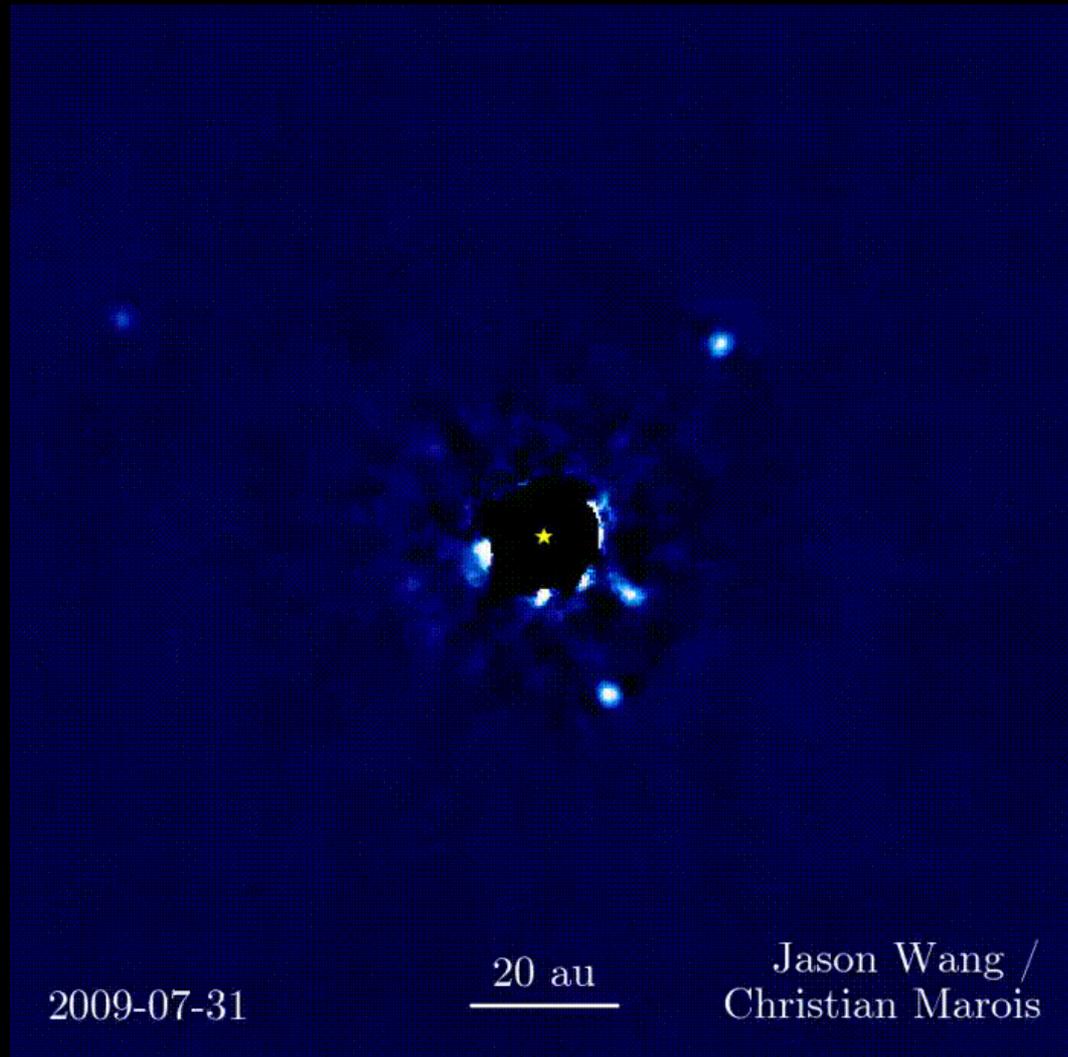
Похожа на Солнечную



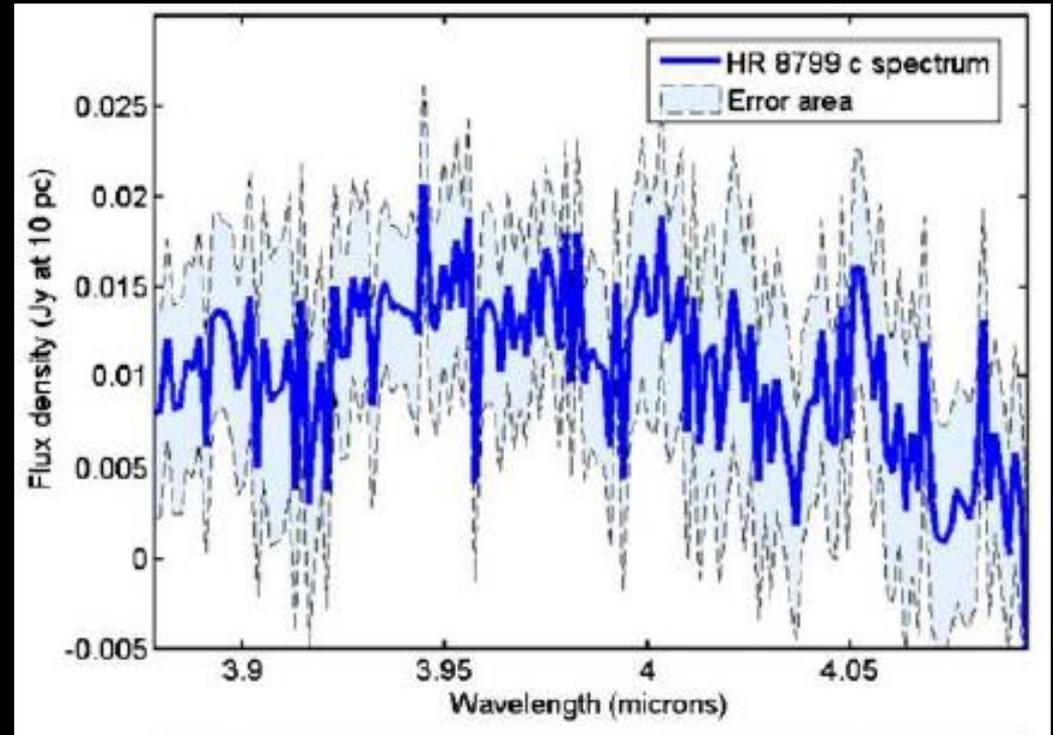
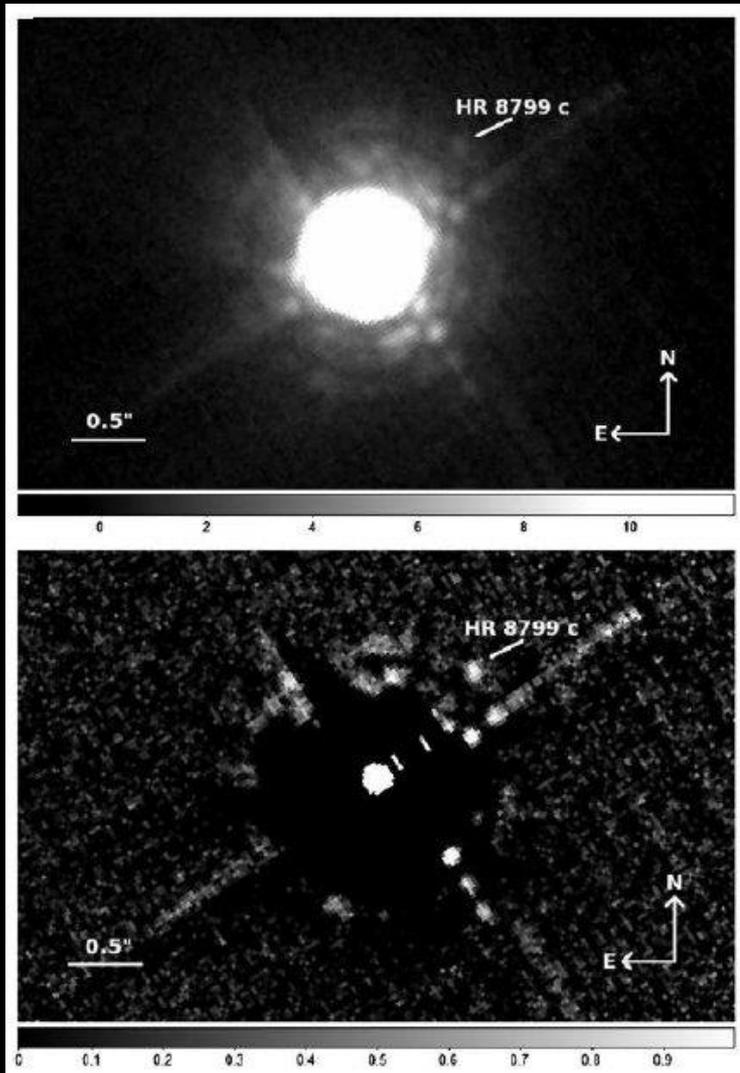
arXiv: 1011.4918



Движение планет вокруг звезды HR 8799



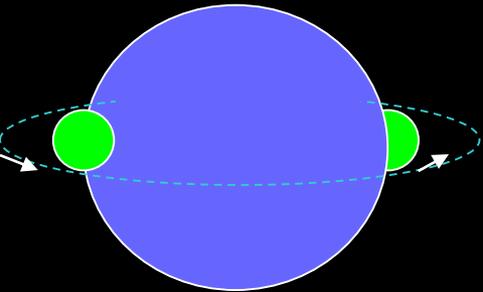
Спектр экзопланеты



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 Сnc e

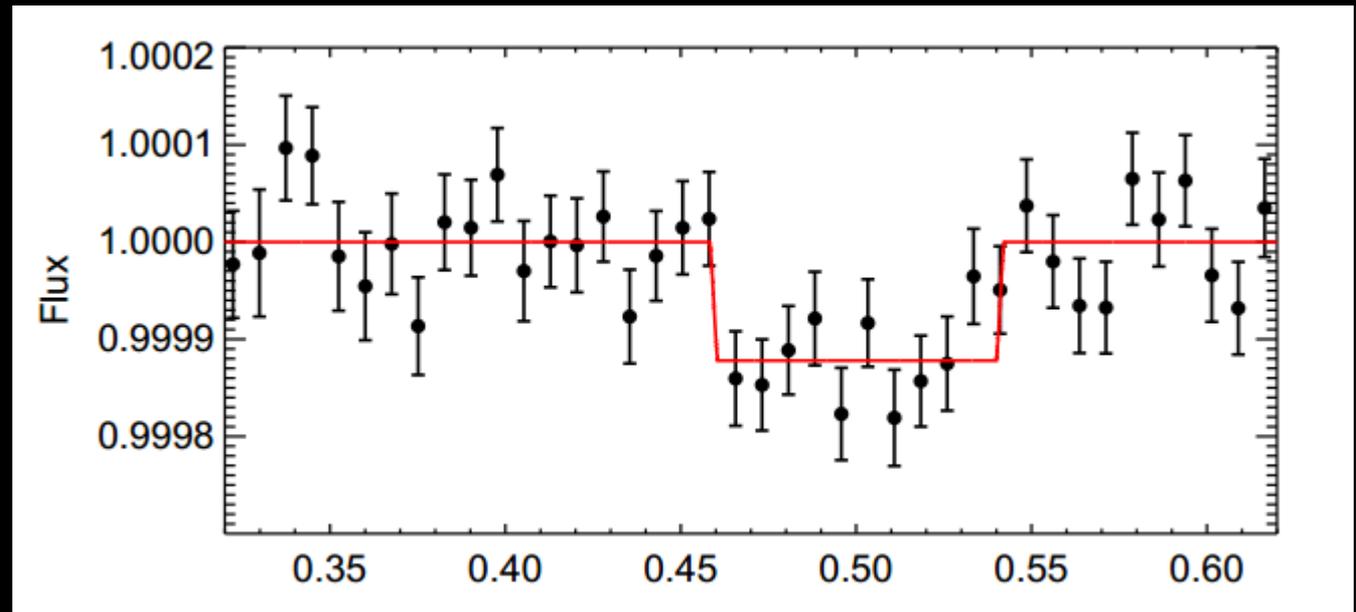
Масса планеты: 7-8 масс Земли

Расстояние от звезды: 0.016 а.е.

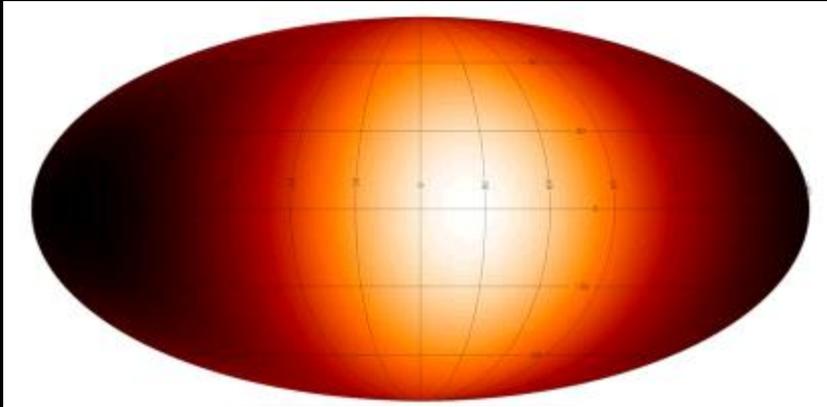
Орбитальный период: 0.74 дня

Наблюдения
затмений
на Спитцере

Наблюдения позволили определить температуру
на планете: 2000-2600К



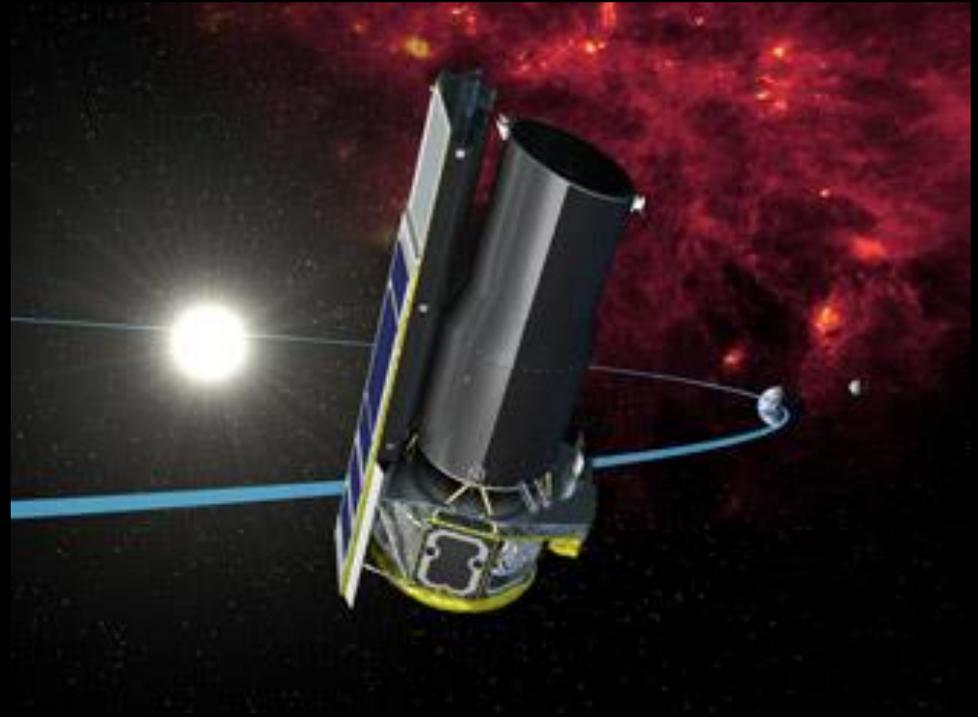
Карта экзопланеты HD 189733b



1202.1883

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

Горячее пятно в экваториальной области.



Одинокие планеты



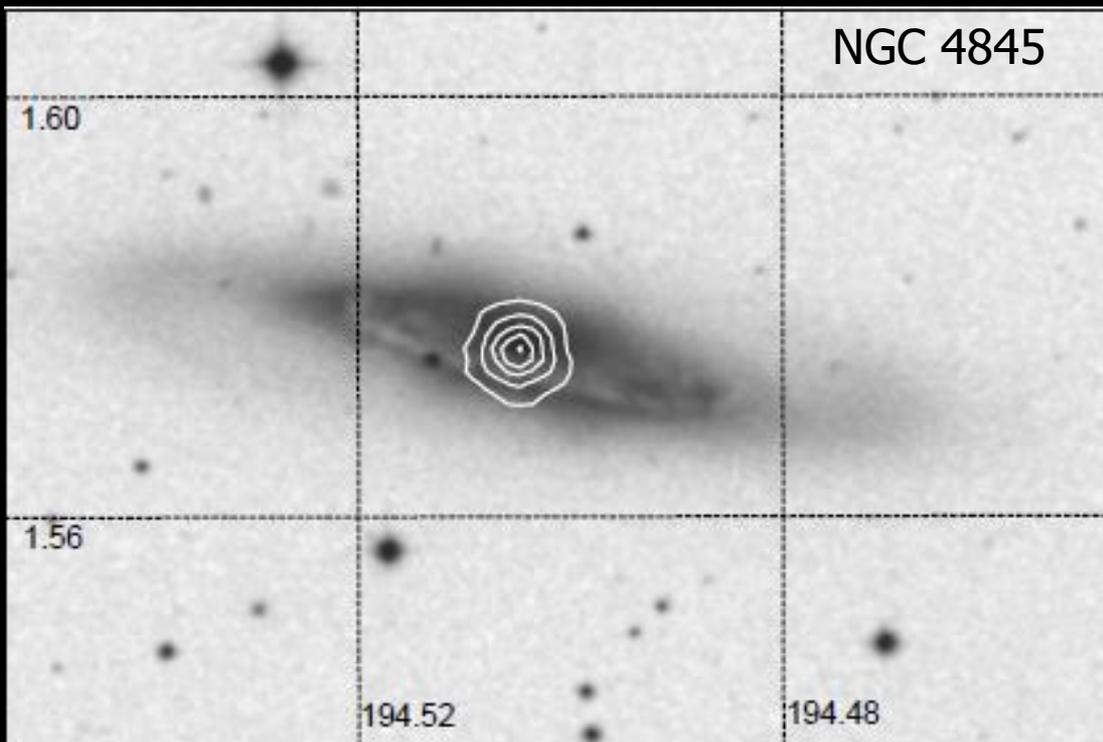
Во-первых, планеты могут покидать звездные системы:

- 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.

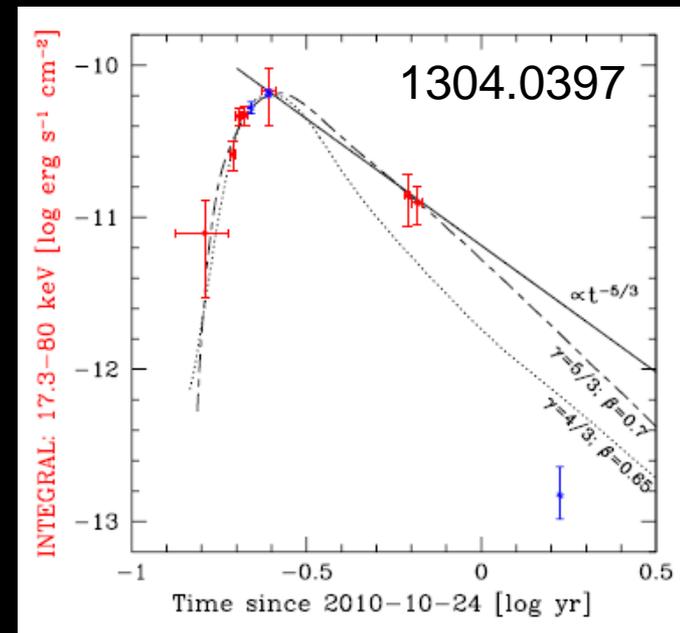


Приливное разрушение сверх-юпитера массивной черной дырой



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.



TESS

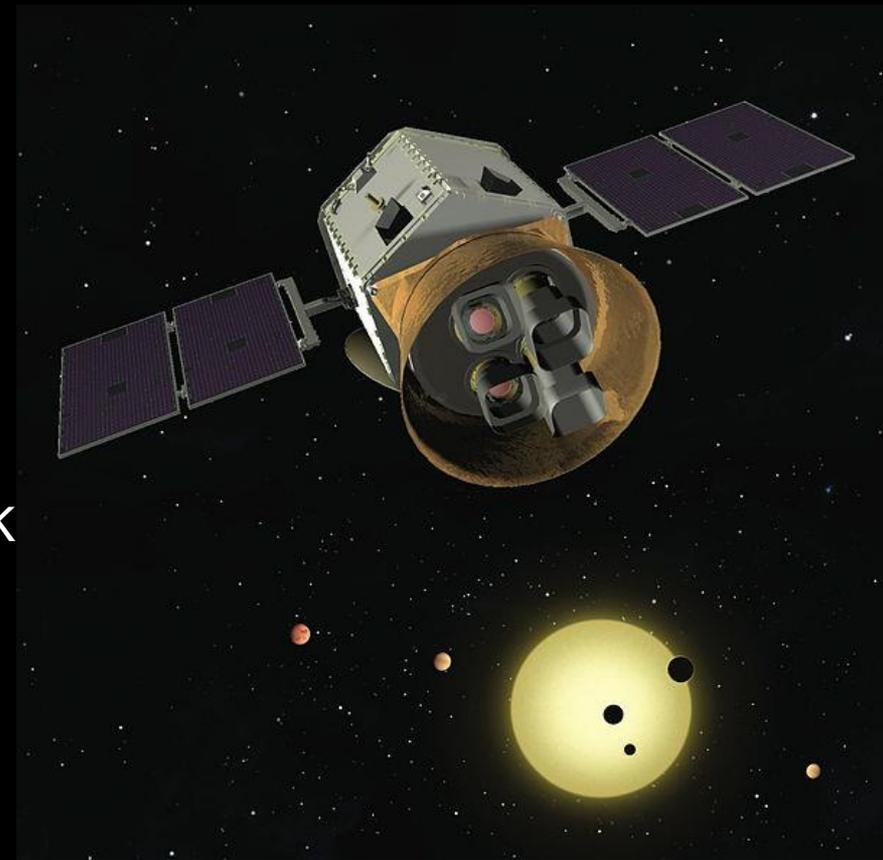
Transiting Exoplanet Survey Satellite

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

За два года работы будет открыто несколько тысяч планет.

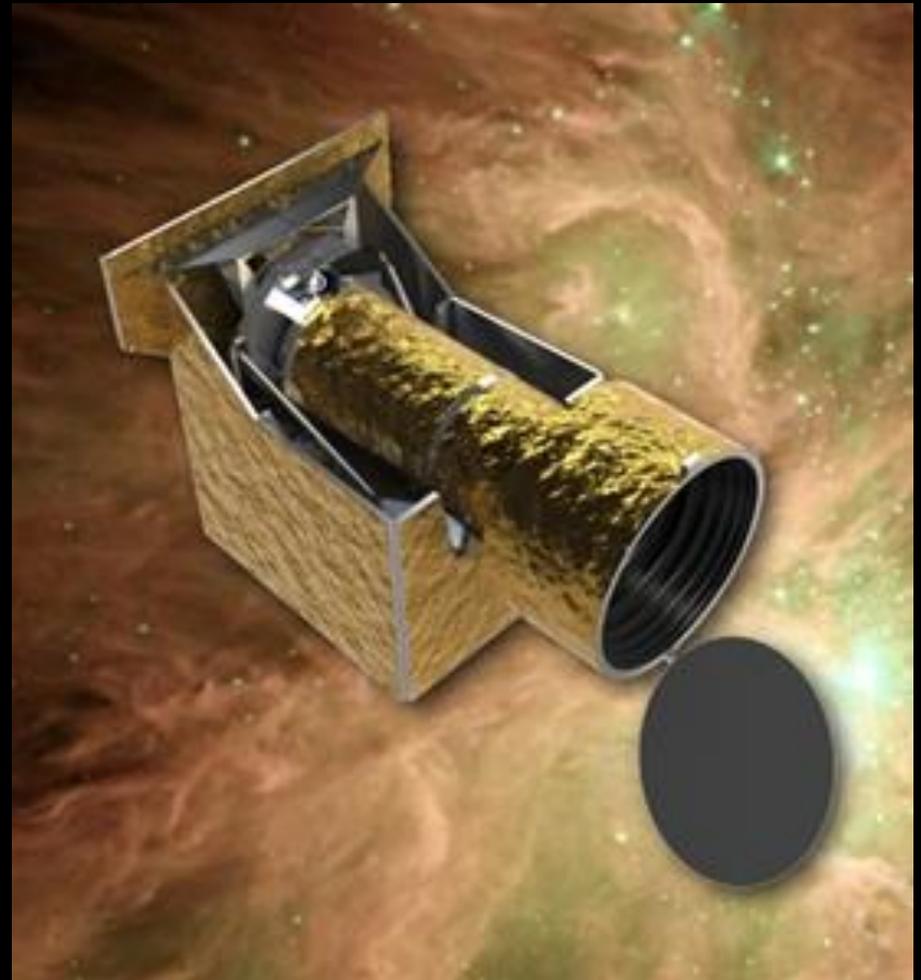


NASA, 2018

CHEOPS

CHaracterising ExOPlanets Satellite

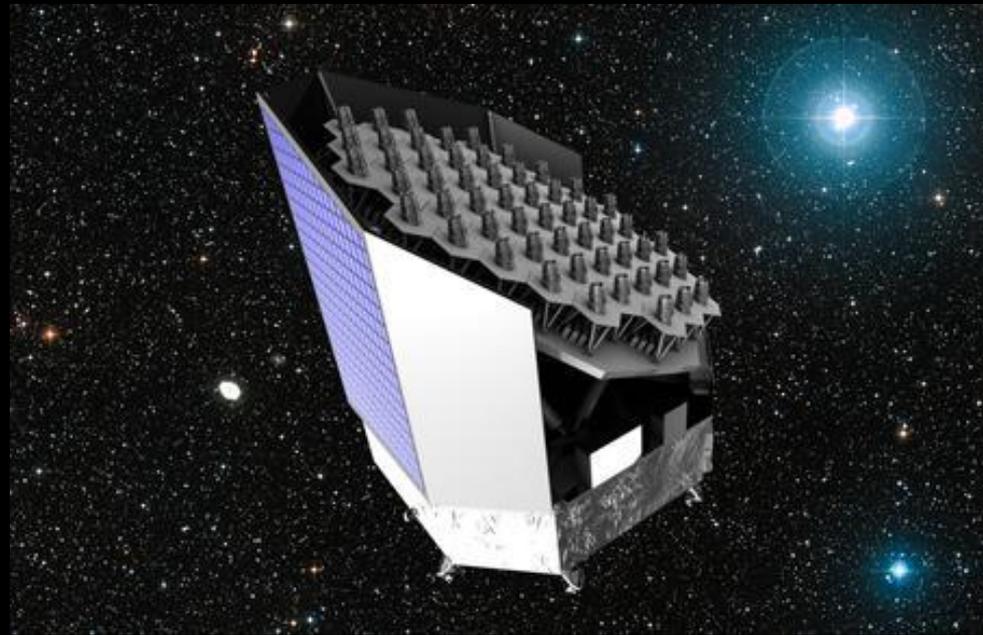
Небольшой спутник для определения радиусов экзопланет у близких звезд, для которых с помощью наземных телескопов уже получены оценки массы.



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 2020 г.

Thirty Meter Telescope



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

E-ELT

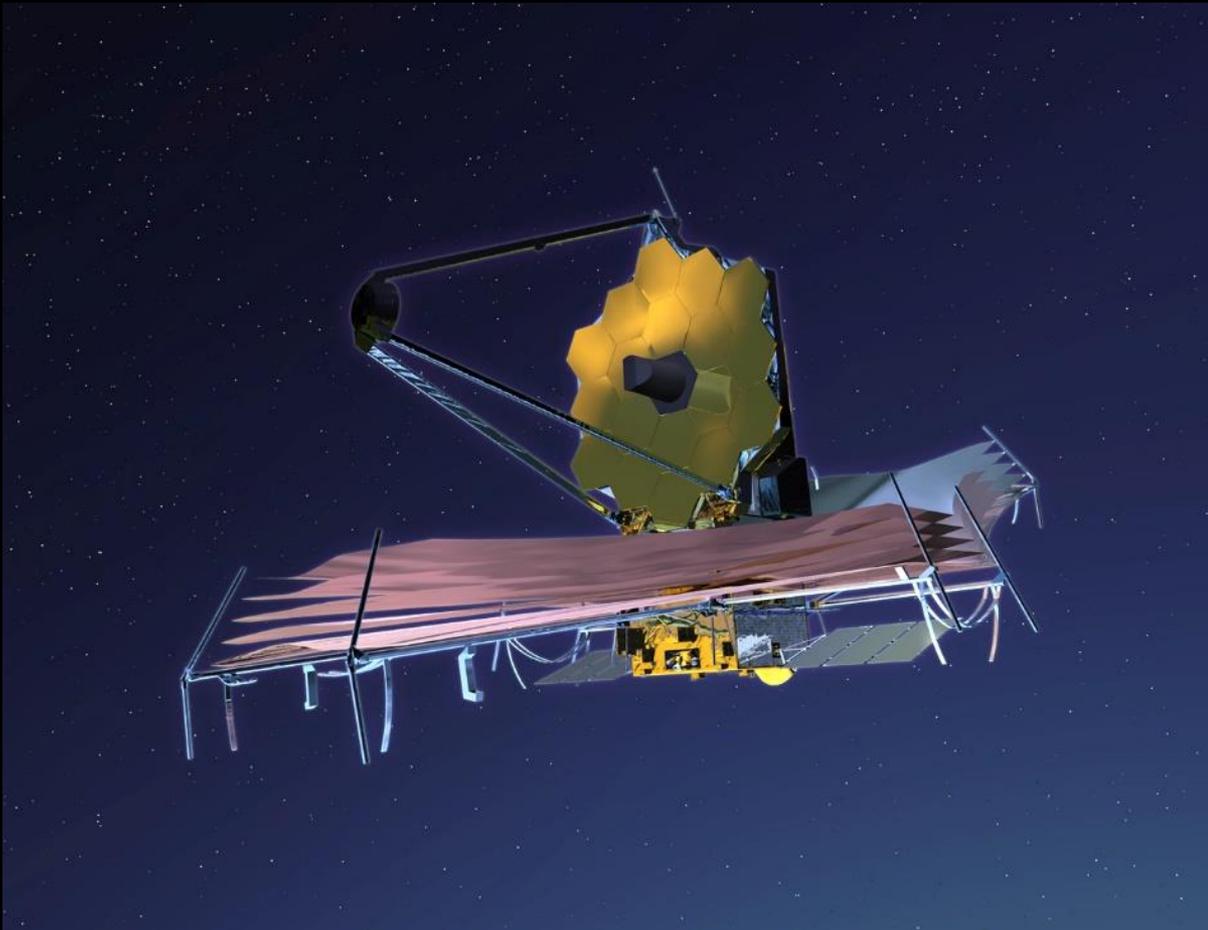
European Extremely Large Telescope

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 – 2022 г.

James Webb Space Telescope (JWST)



Космический телескоп
следующего поколения.

Ожидаемый запуск: 2018.

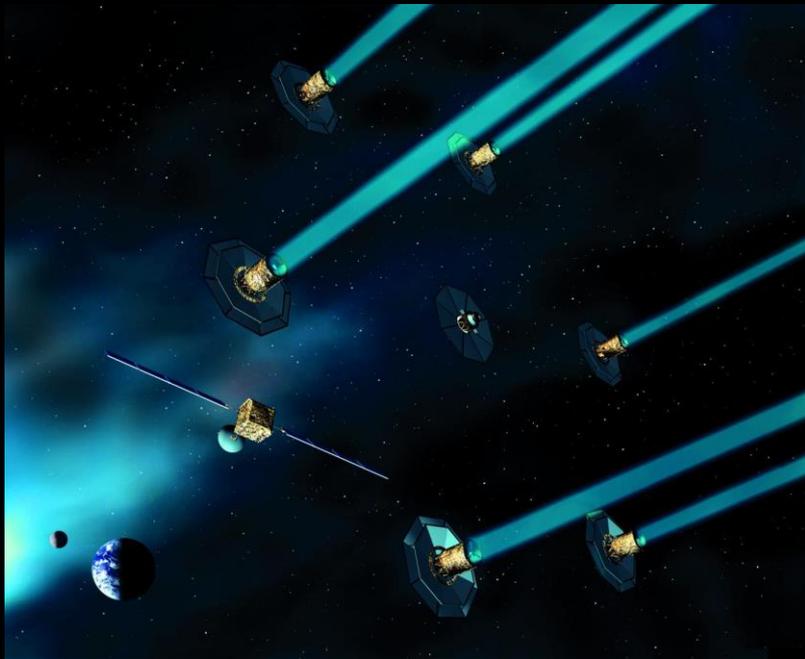
Инфракрасный диапазон.

Раскладывающееся зеркало
6.5 метра

Далекое будущее



Terrestrial Planet Finder



Darwin

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