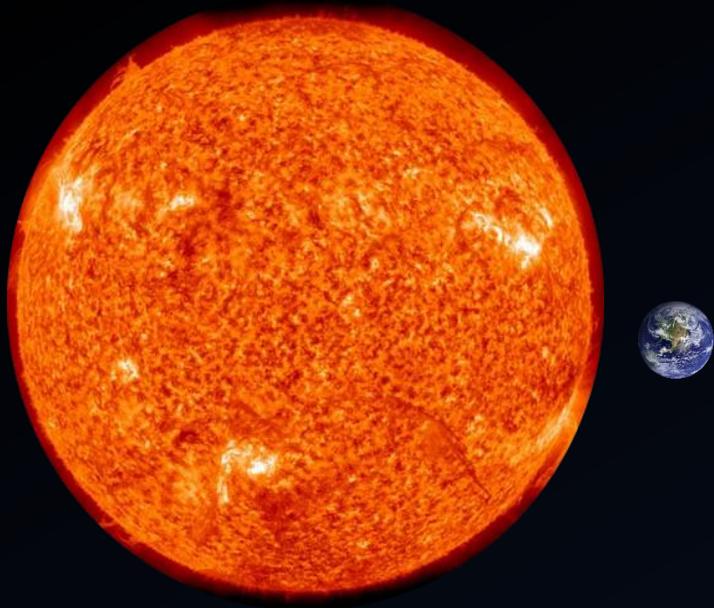
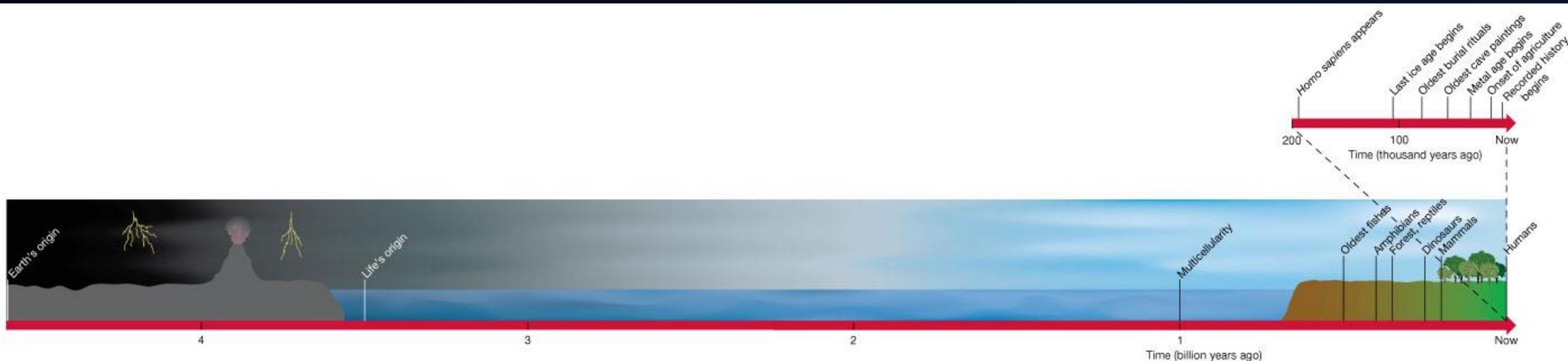


Атмосферы экзопланет

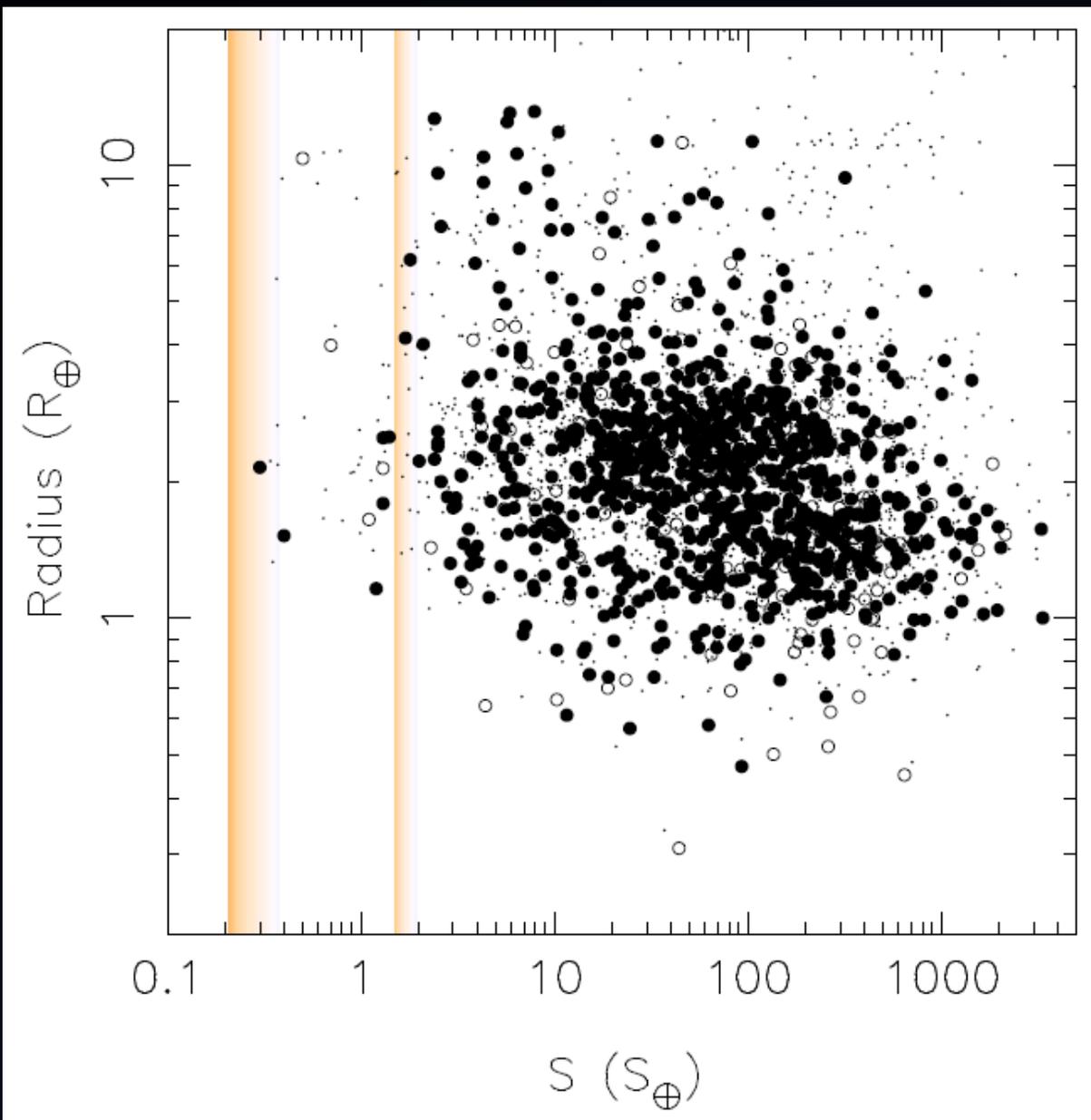
И ПОИСКИ ЖИЗНИ



Из 4 с лишним миллиардов лет истории Земли техническая цивилизация видна лишь последние 100. Для ученых с далеких звезд (далее 100 св. лет) мы все еще дикая, но обитаемая планета.



768 новых планет в 306 системах

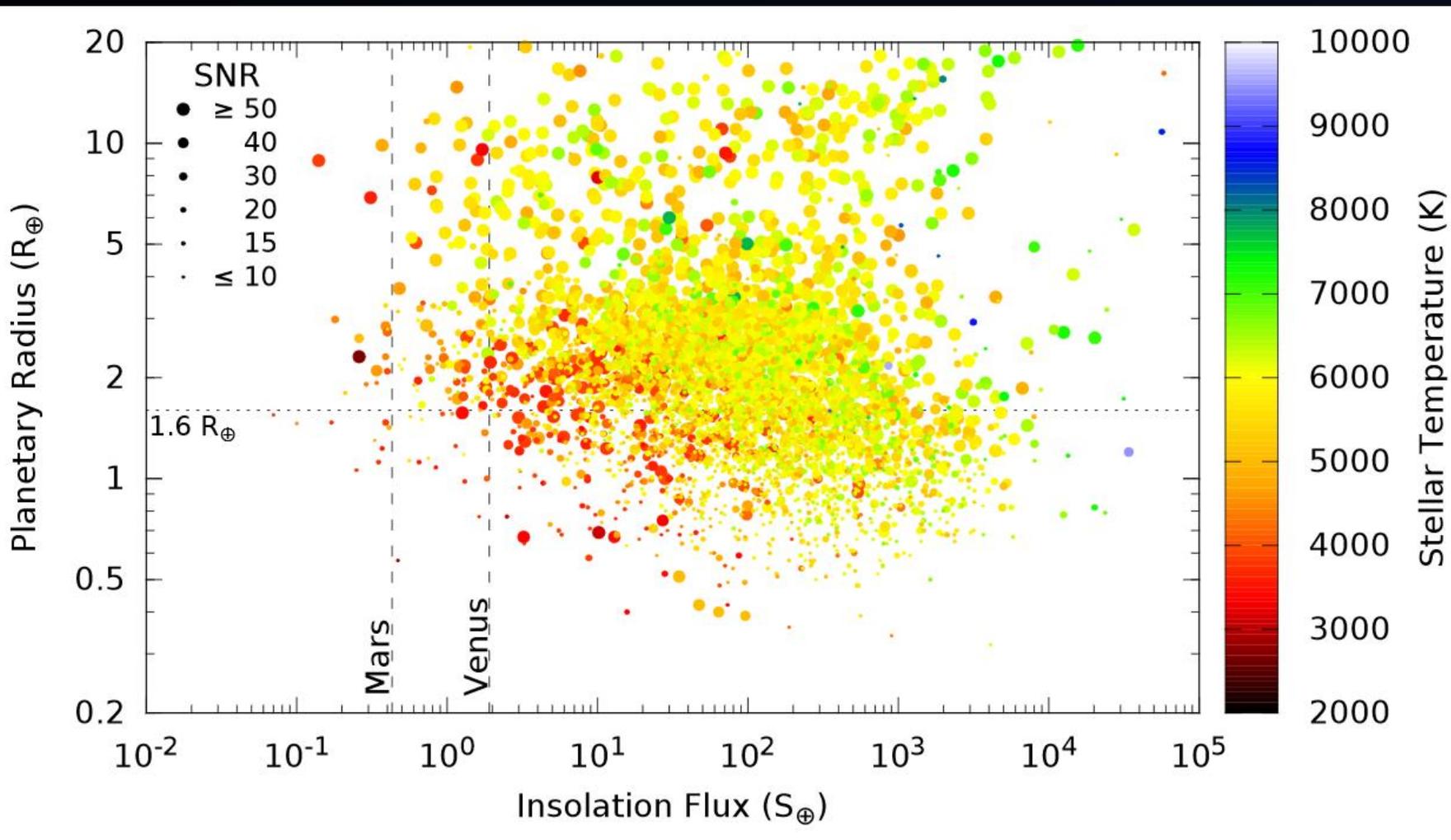


Постоянно растет число известных экзопланет.

На тот момент авторы почти что удвоили количество известных на момент публикации планет.

Новый каталог кандидатов Кеплера

По данным всех 4 лет работы до поломки (с 05.2009 по 05.2013)

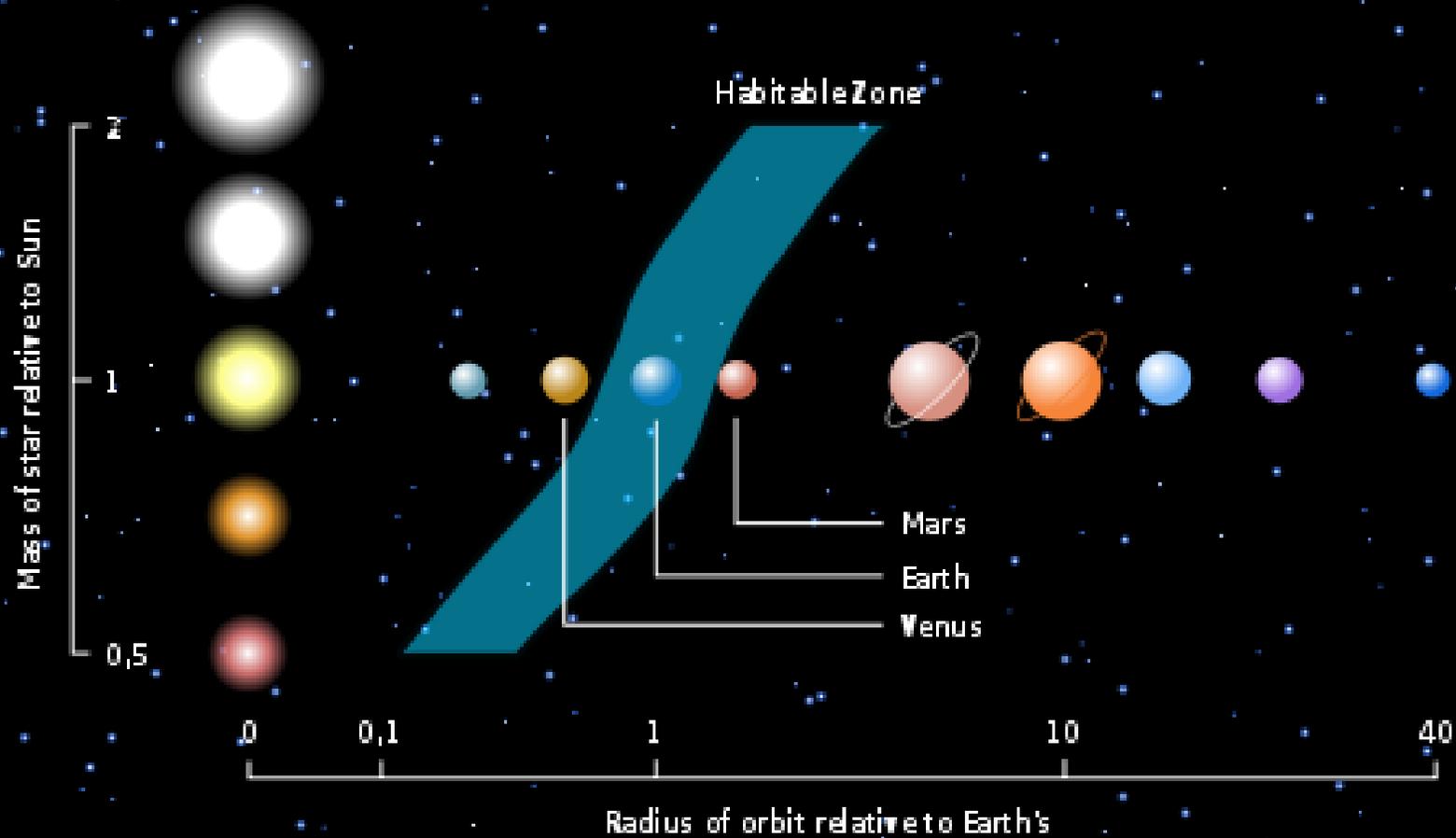


1512.06149

Почти 5000 кандидатов в экзопланеты

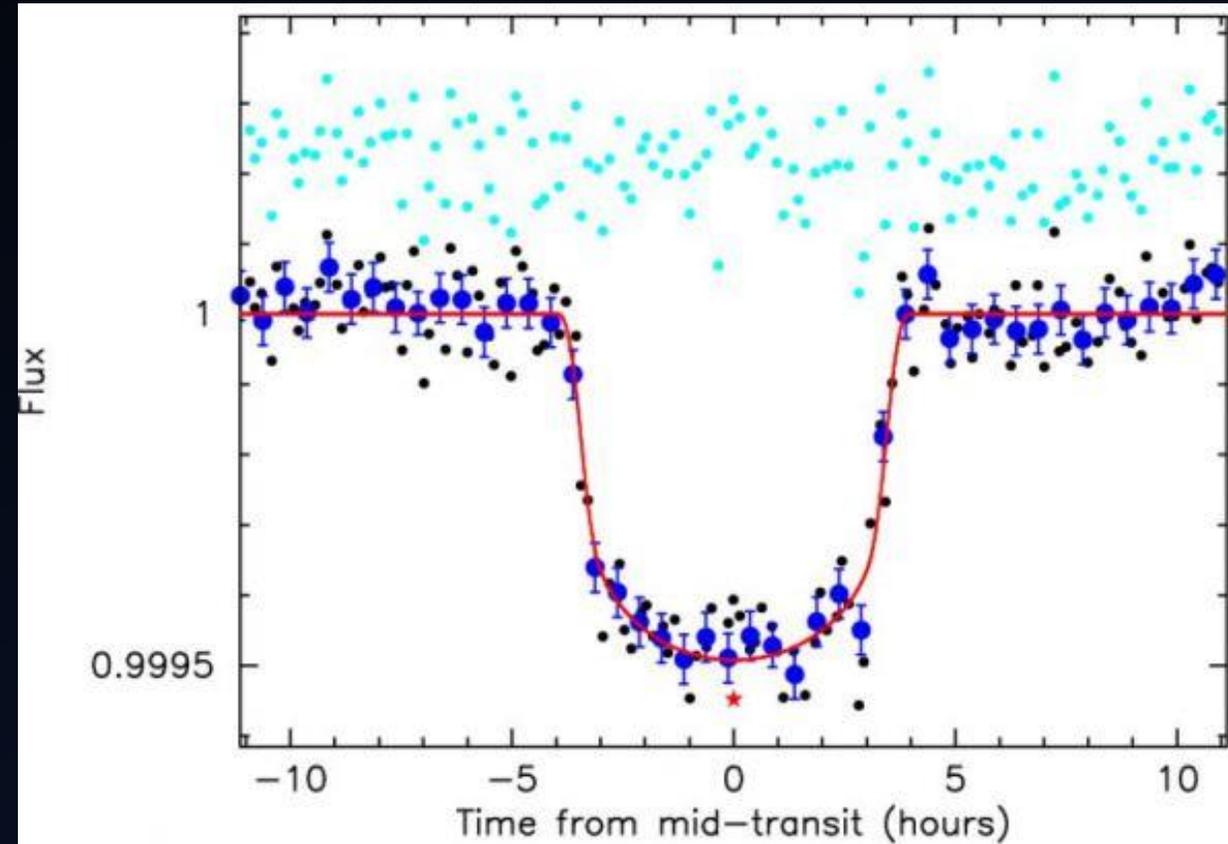
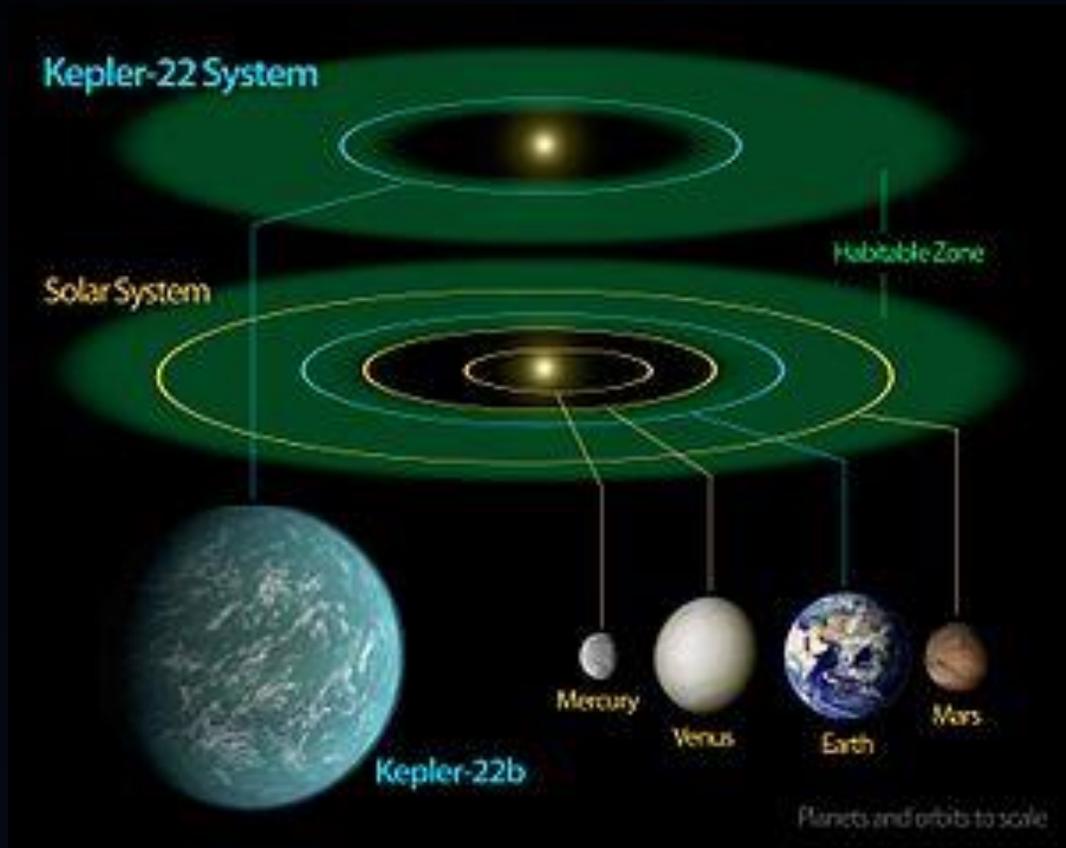
Зона обитаемости

Возможность существования жидкой воды



Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

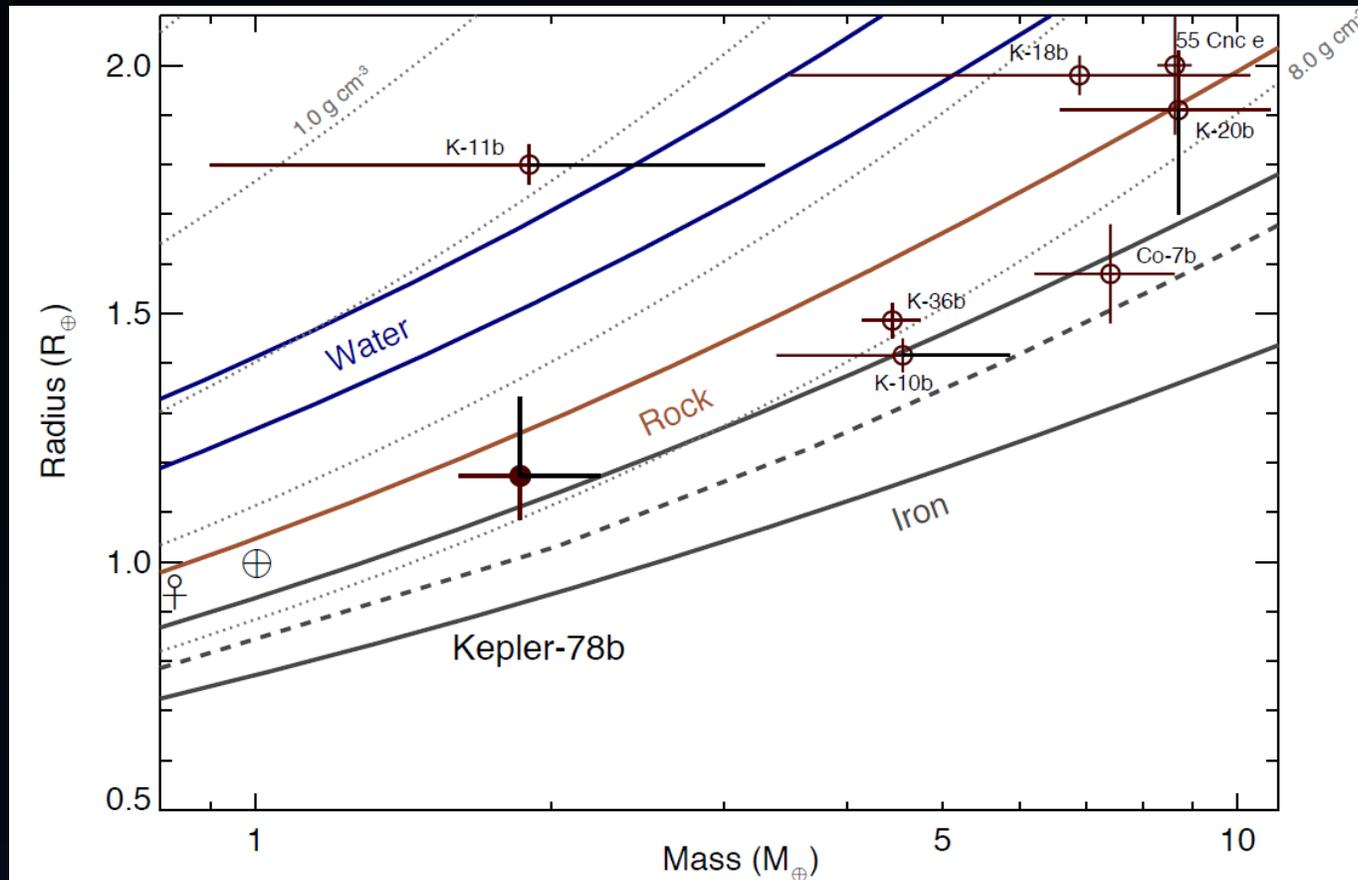
Планета Kepler-22b



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.

Похожая на Землю?

Kepler-78b



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

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

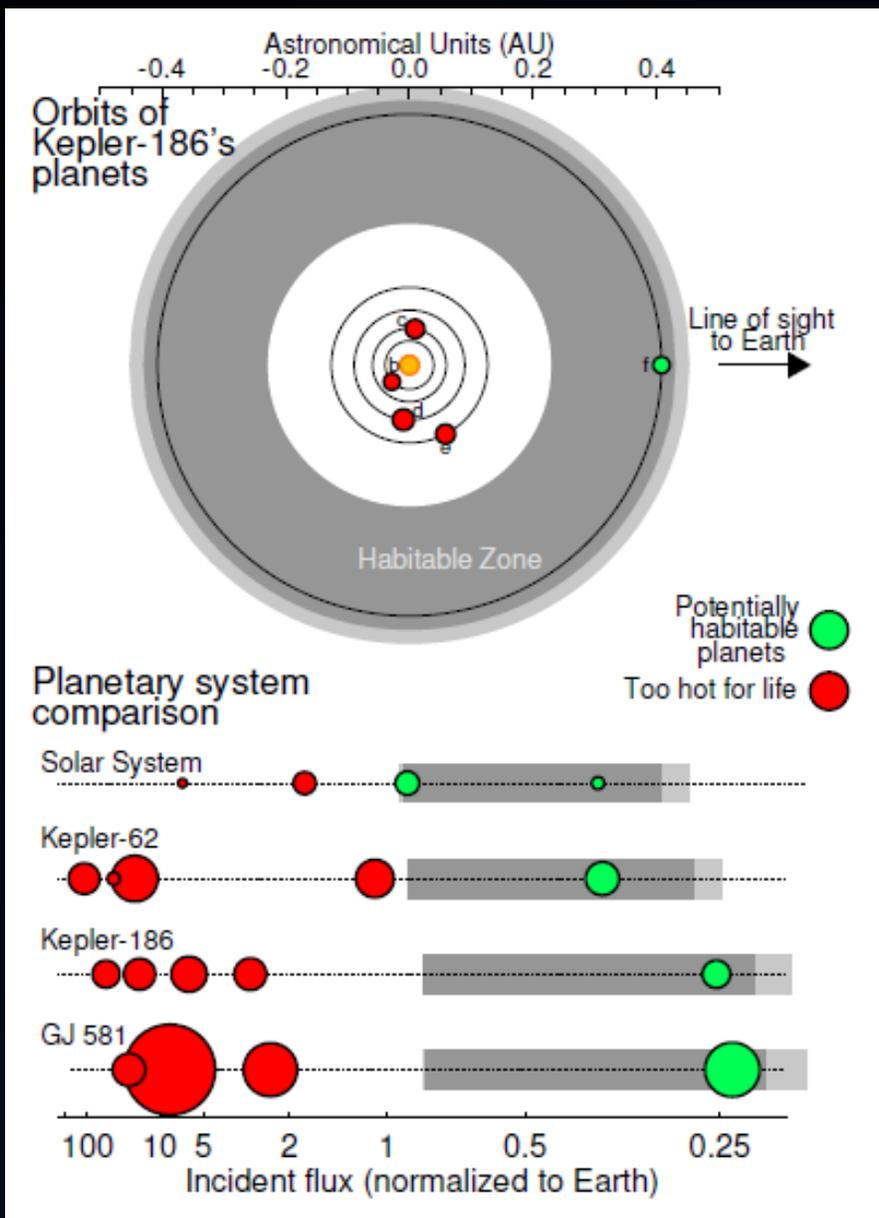
$R \sim 1.16 R_{\text{Earth}}$

Плотность $\sim 5.57 \text{ г/см}^3$

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

Радиус измерен по данным Kepler,
масса – по данным HARPS

Система Кеплер-186

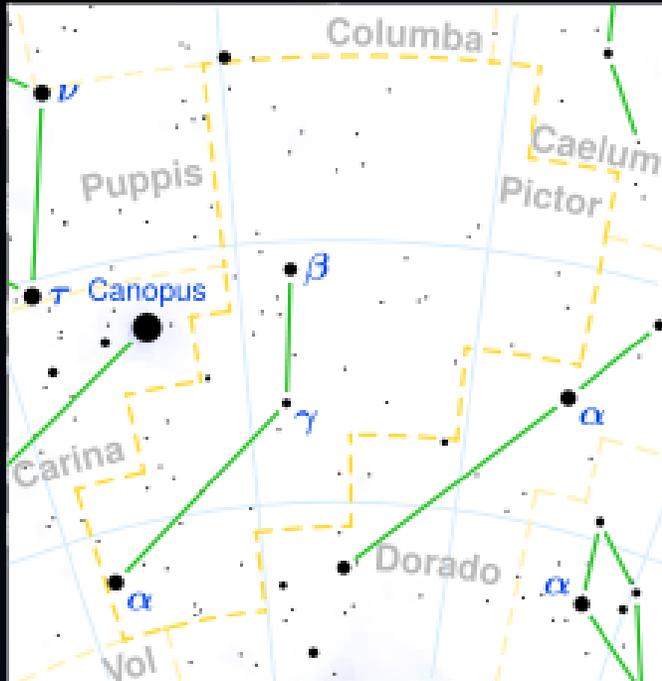


Пять планет вокруг красного карлика.
Все это небольшие планеты.

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

Планеты у звезды Каптейна

Звезда Каптейна



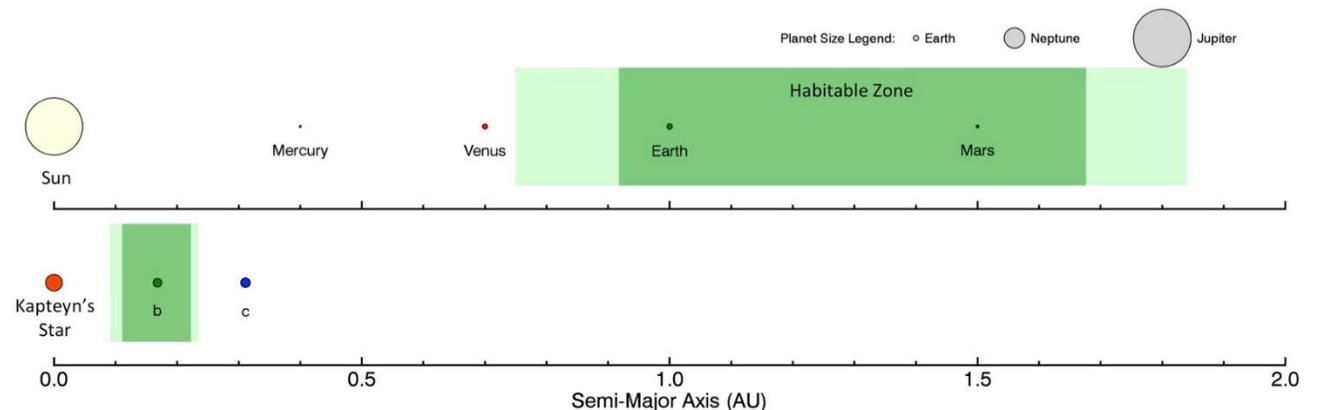
Звезда с очень большим собственным движением (второе место после Барнарда). Это звезда гало, поэтому у нее большая скорость.

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

Одна из них находится в зоне обитаемости.



Inner Solar System and Kapteyn's Star

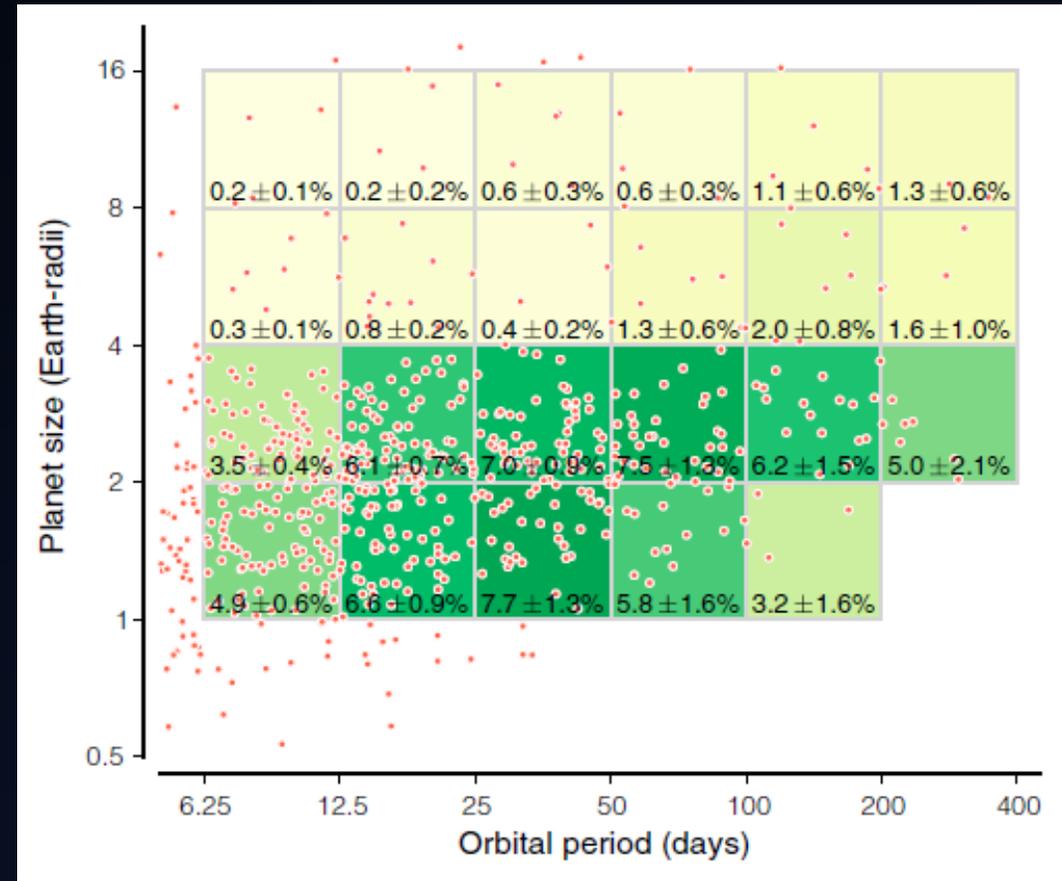
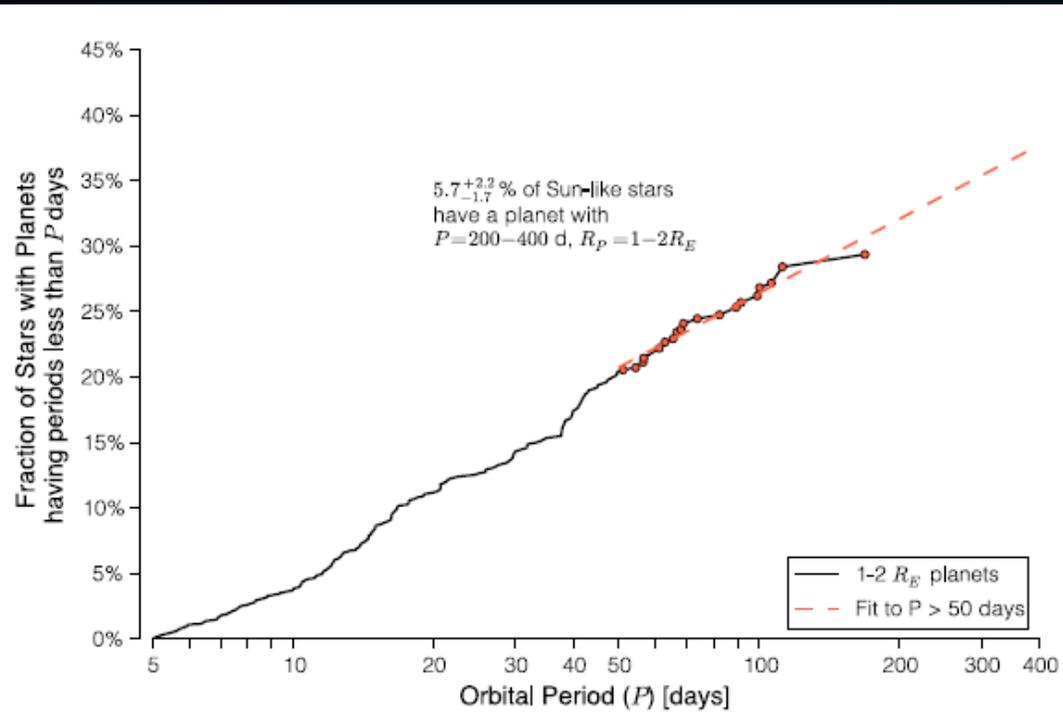


Stars Magnified x10, Planets Magnified x100

Credit: PHL @ UPR Arcibo

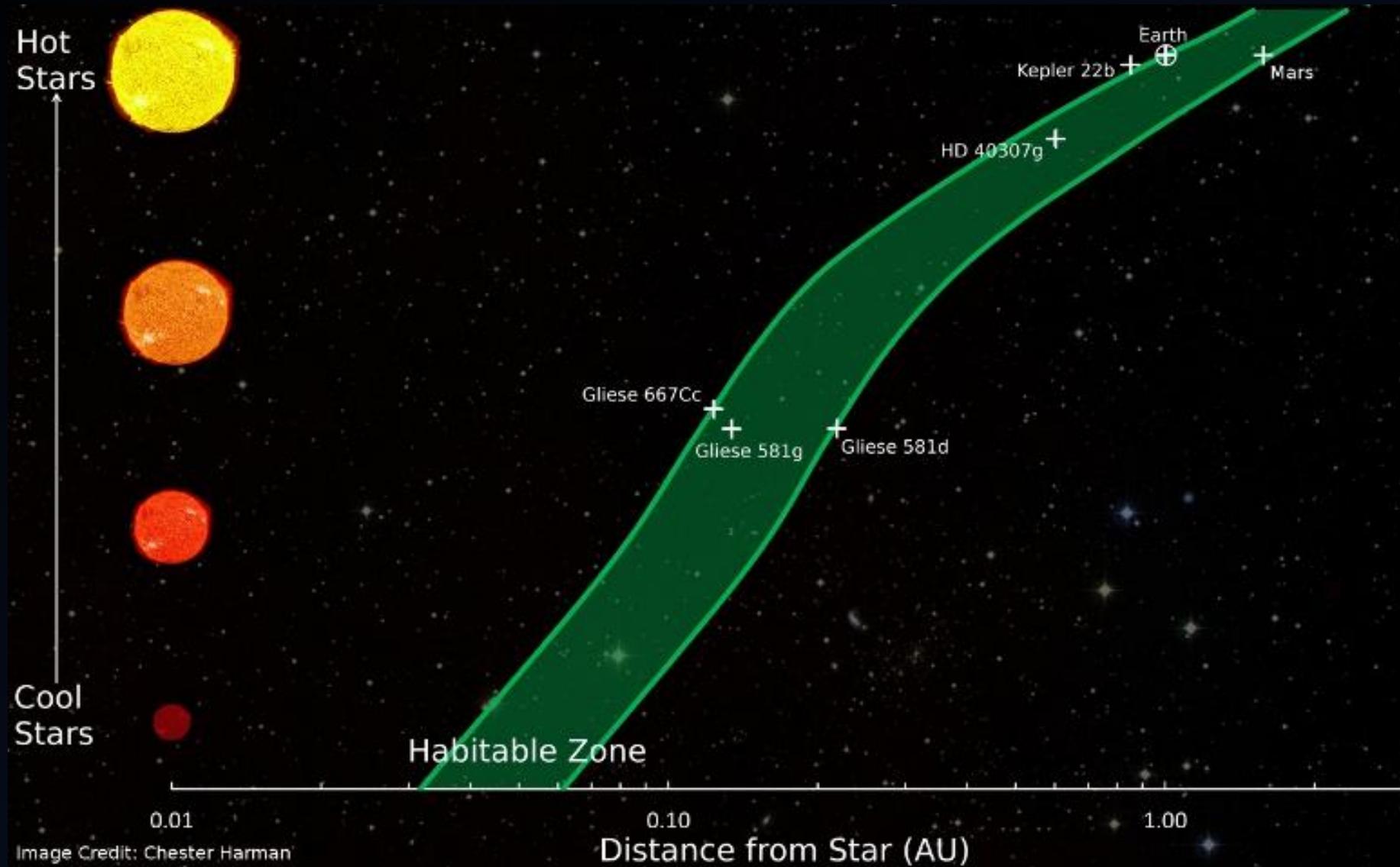
Планеты типа Земли у звезд типа Солнца

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



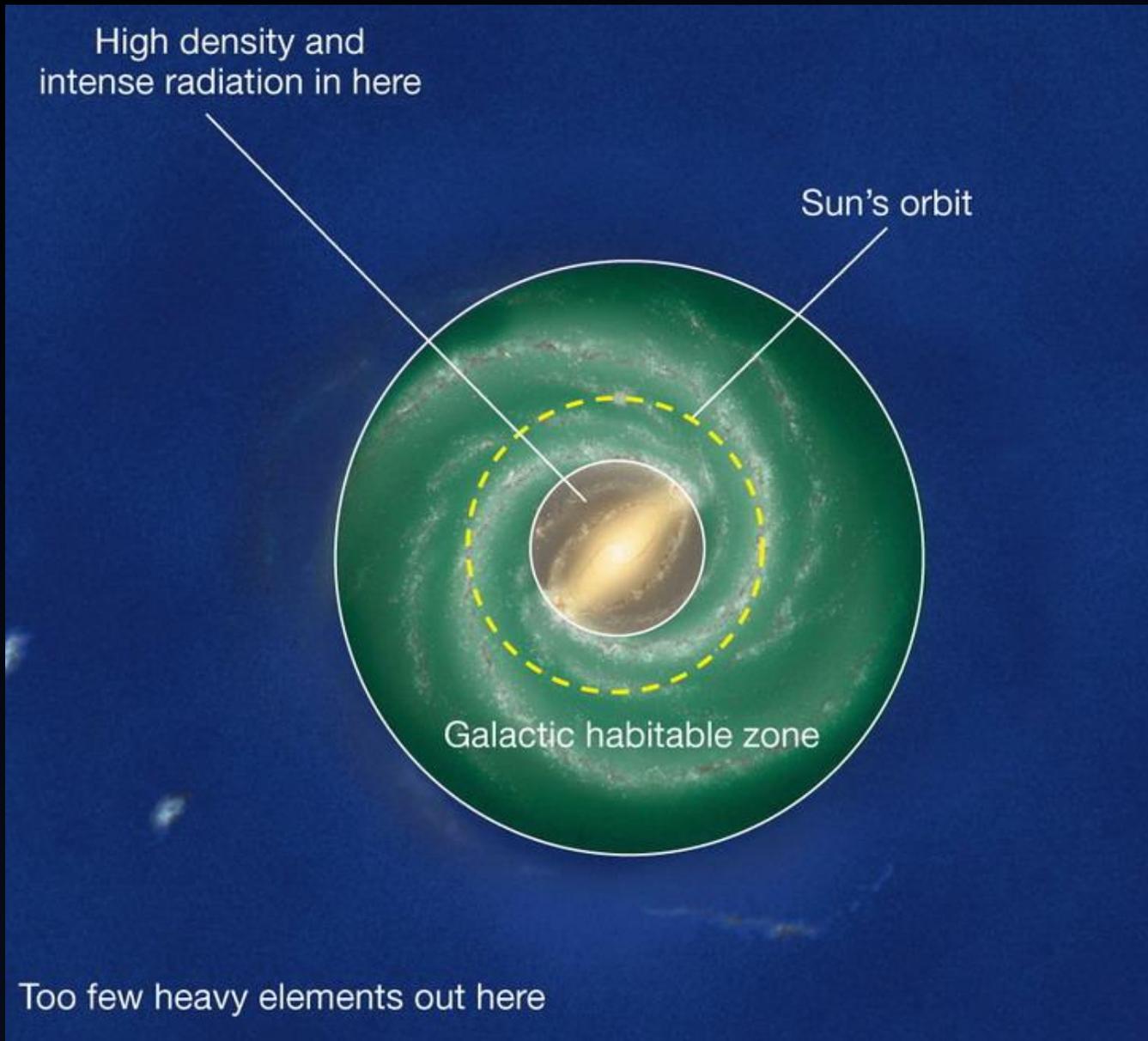
3.5-7.5% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли с орбитальными периодами 200-400 дней.

Маленькие планеты в зонах обитаемости



Сейчас известно несколько небольших планет в зонах обитаемости

Галактическая зона обитаемости



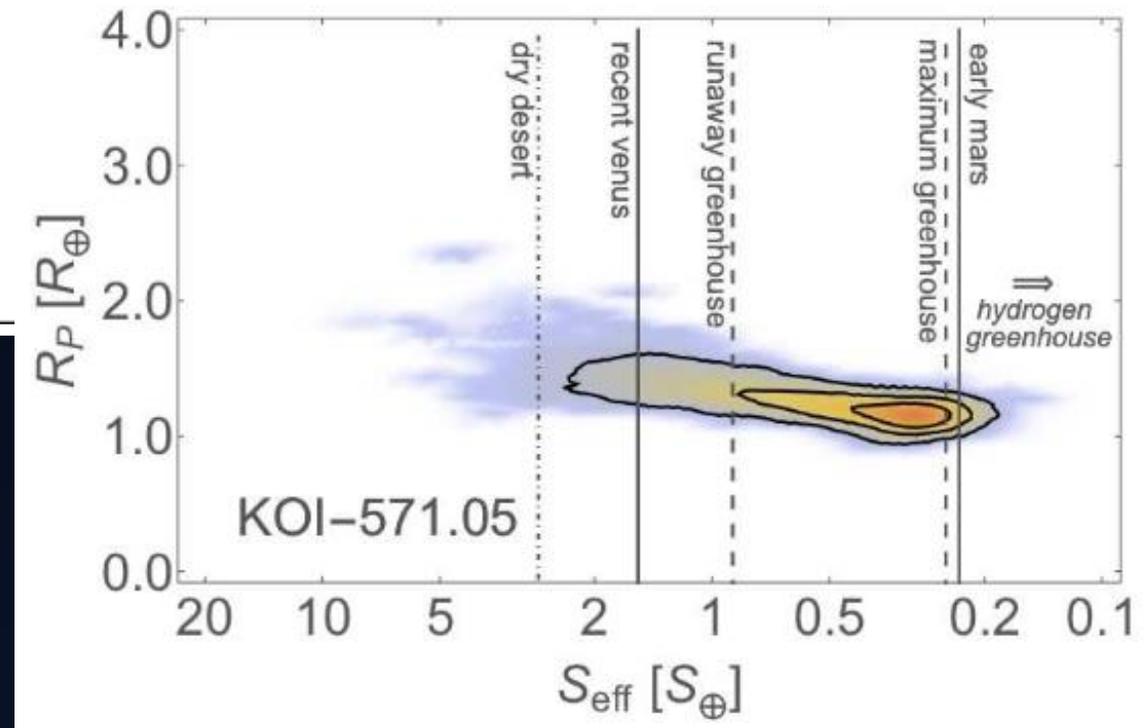
Примерно от 4 до 10 кпк от центра.
Но определение очень нечеткое,
особенно для внешней границы.

Задачи:

- а) создать условия
(тяжелые элементы)
- б) не разрушить
(приливы, сверхновые и т.п.)

Маленькие планеты

Star	Age (Gyr)	M_{\star} (M_{\odot})	R_{\star} (R_{\odot})	$\log g$ (cm s^{-2})	ρ_{\star} (g cm^{-3})	L_{\star} (L_{\odot})	M_V (mag)	M_{K_s} (mag)	Distance (pc)
KOI-0571	$4.0^{+0.6}_{-0.6}$	$0.544^{+0.024}_{-0.021}$	$0.523^{+0.023}_{-0.021}$	$4.736^{+0.020}_{-0.019}$	$5.29^{+0.54}_{-0.39}$	$0.055^{+0.011}_{-0.006}$	$9.01^{+0.24}_{-0.24}$	$5.41^{+0.14}_{-0.15}$	172^{+13}_{-10}
KOI-1422	$4.2^{+3.4}_{-1.6}$	$0.454^{+0.033}_{-0.035}$	$0.426^{+0.038}_{-0.027}$	$4.833^{+0.025}_{-0.041}$	$7.94^{+1.34}_{-1.08}$	$0.027^{+0.008}_{-0.004}$	$10.12^{+0.25}_{-0.35}$	$6.07^{+0.20}_{-0.23}$	226^{+28}_{-18}
KOI-2529	$3.0^{+7.7}_{-0.3}$	$0.729^{+0.033}_{-0.029}$	$0.697^{+0.028}_{-0.023}$	$4.619^{+0.015}_{-0.028}$	$3.03^{+0.24}_{-0.25}$	$0.199^{+0.039}_{-0.025}$	$6.98^{+0.25}_{-0.24}$	$4.36^{+0.11}_{-0.11}$	618^{+34}_{-30}
KOI-3255	$2.9^{+7.5}_{-0.3}$	$0.707^{+0.033}_{-0.027}$	$0.680^{+0.026}_{-0.024}$	$4.629^{+0.015}_{-0.026}$	$3.18^{+0.25}_{-0.25}$	$0.173^{+0.035}_{-0.022}$	$7.20^{+0.26}_{-0.24}$	$4.45^{+0.11}_{-0.11}$	417^{+24}_{-21}
KOI-3284	$4.4^{+0.8}_{-0.7}$	$0.544^{+0.041}_{-0.061}$	$0.520^{+0.038}_{-0.061}$	$4.740^{+0.059}_{-0.029}$	$5.52^{+1.53}_{-0.77}$	$0.044^{+0.017}_{-0.012}$	$9.55^{+0.54}_{-0.44}$	$5.50^{+0.41}_{-0.25}$	145^{+20}_{-23}
KOI-4005	$7.2^{+3.6}_{-3.9}$	$0.884^{+0.044}_{-0.038}$	$0.866^{+0.076}_{-0.040}$	$4.514^{+0.035}_{-0.073}$	$1.89^{+0.30}_{-0.20}$	$0.581^{+0.153}_{-0.070}$	$5.46^{+0.21}_{-0.27}$	$3.69^{+0.12}_{-0.12}$	693^{+66}_{-20}
KOI-4087	$1.3^{+0.6}_{-0.2}$	$0.575^{+0.043}_{-0.047}$	$0.559^{+0.029}_{-0.054}$	$4.706^{+0.049}_{-0.016}$					
KOI-4427	$3.6^{+2.6}_{-1.3}$	$0.526^{+0.040}_{-0.062}$	$0.505^{+0.038}_{-0.065}$	$4.751^{+0.067}_{-0.030}$					
KOI-4622	$1.9^{+0.5}_{-0.4}$	$0.572^{+0.049}_{-0.053}$	$0.550^{+0.038}_{-0.054}$	$4.715^{+0.047}_{-0.024}$					
KOI-4742	$2.9^{+8.1}_{-0.2}$	$0.609^{+0.030}_{-0.026}$	$0.598^{+0.023}_{-0.024}$	$4.673^{+0.018}_{-0.021}$					
KOI-4745	$3.2^{+7.5}_{-0.4}$	$0.738^{+0.033}_{-0.029}$	$0.706^{+0.028}_{-0.024}$	$4.614^{+0.016}_{-0.029}$					



12 планет.
 Все в зонах обитаемости.
 9 достаточно невелики,
 чтобы быть железно-каменными.

1501.01101

Маленькая планета у звезды G2

В основном земноподобные планеты обнаруживают у слабых звезд (например, у красных карликов).

1507.06723

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_potentially_habitable_exoplanets

Kepler's Small Habitable Zone Planets

Planets enlarged 25x compared to stars

G Stars



Kepler-452b (Earth)

K Stars

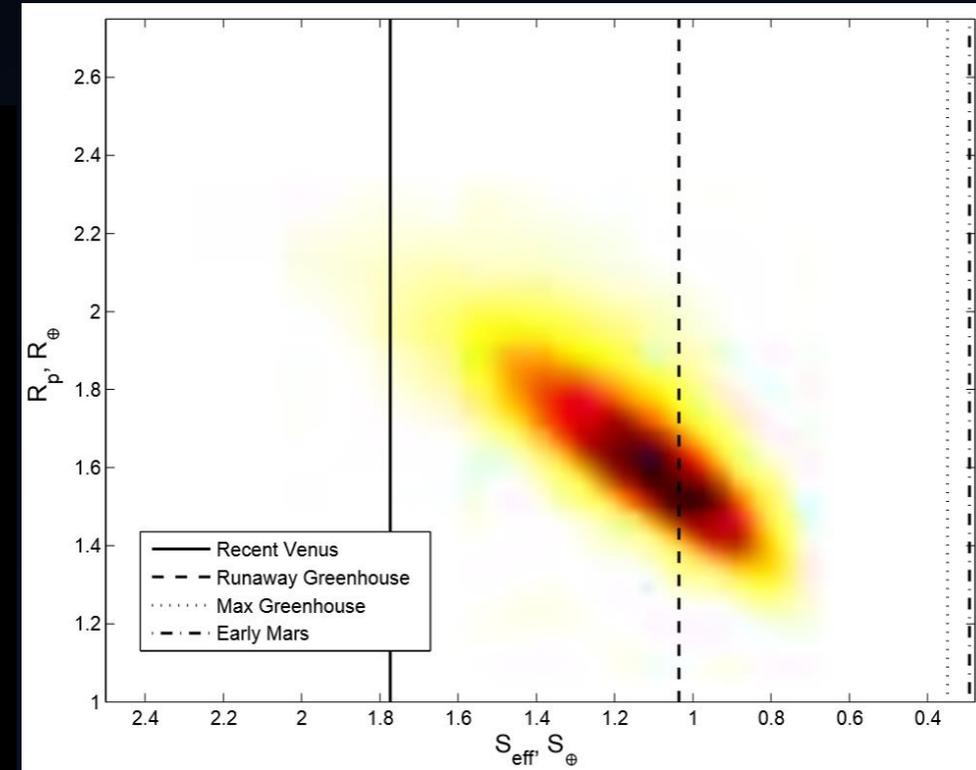


Kepler-442b 155c 235e 62f 62e 283c 440b

M Stars



Kepler-438b 186f 296e 296f

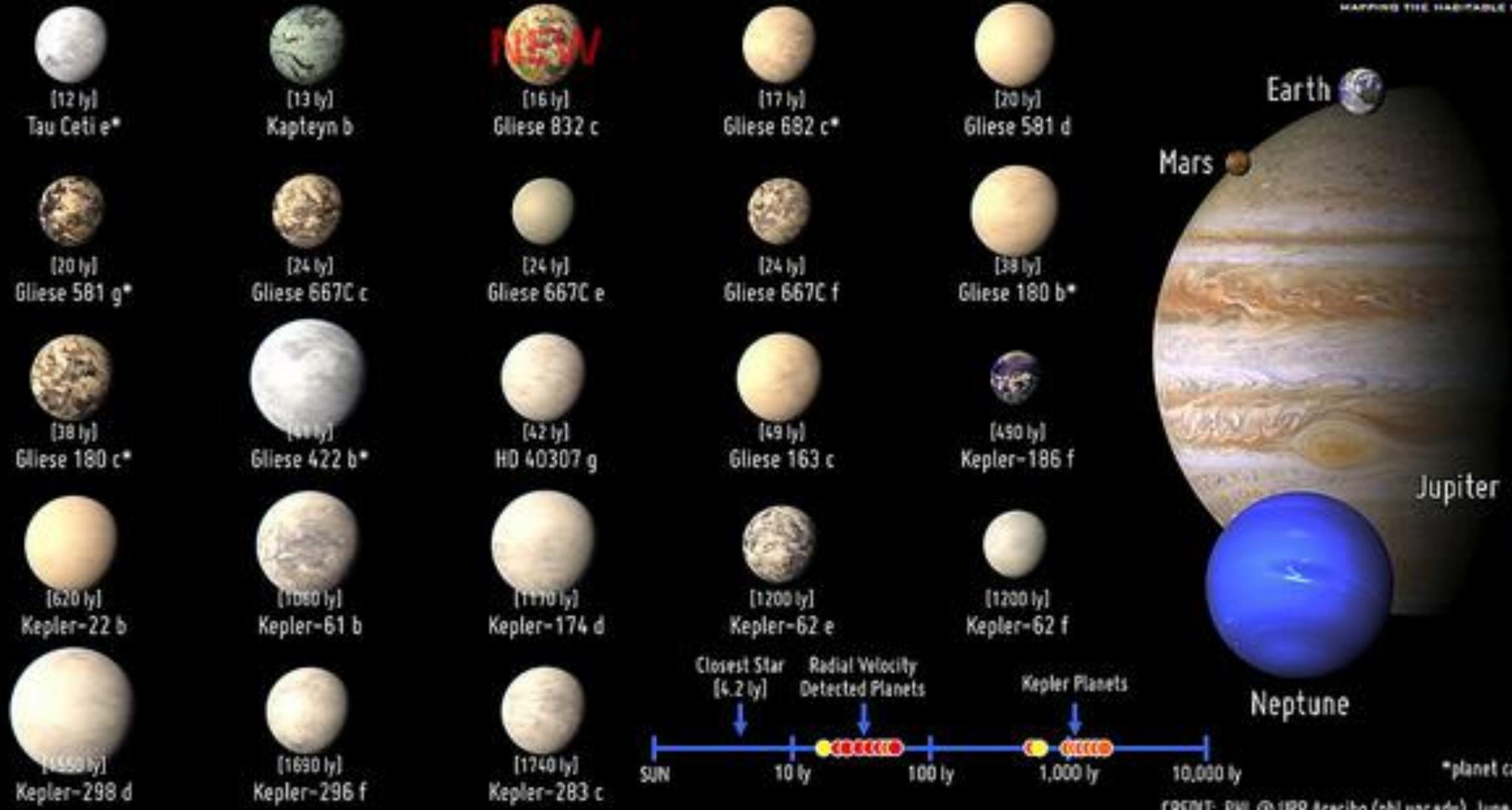


Планета имеет радиус 1.6 земного.
Возраст звезды около 6 млрд. лет.

Current Potentially Habitable Exoplanets



Ranked by Distance from Earth in Light Years (ly)

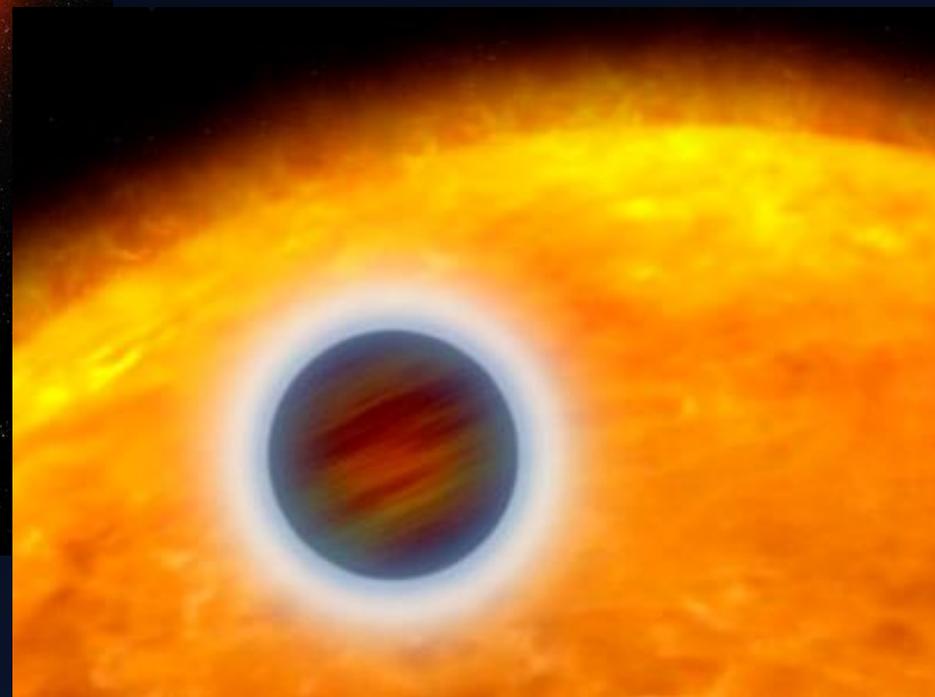
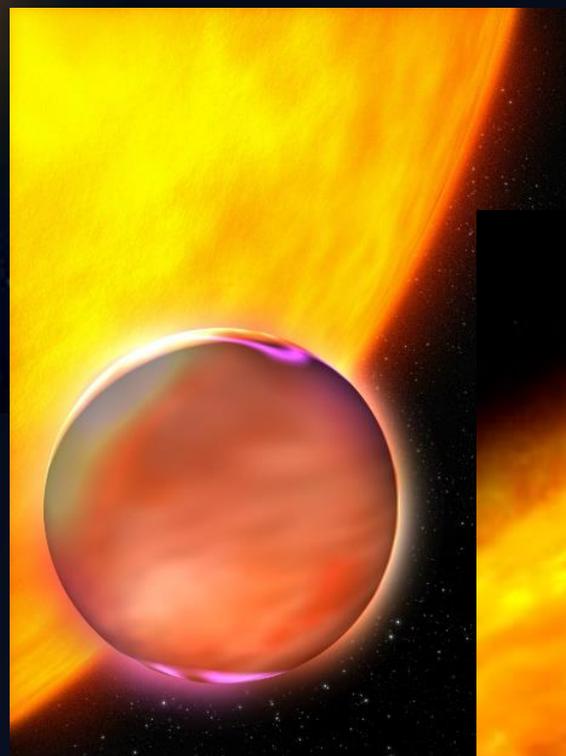


*planet candidates

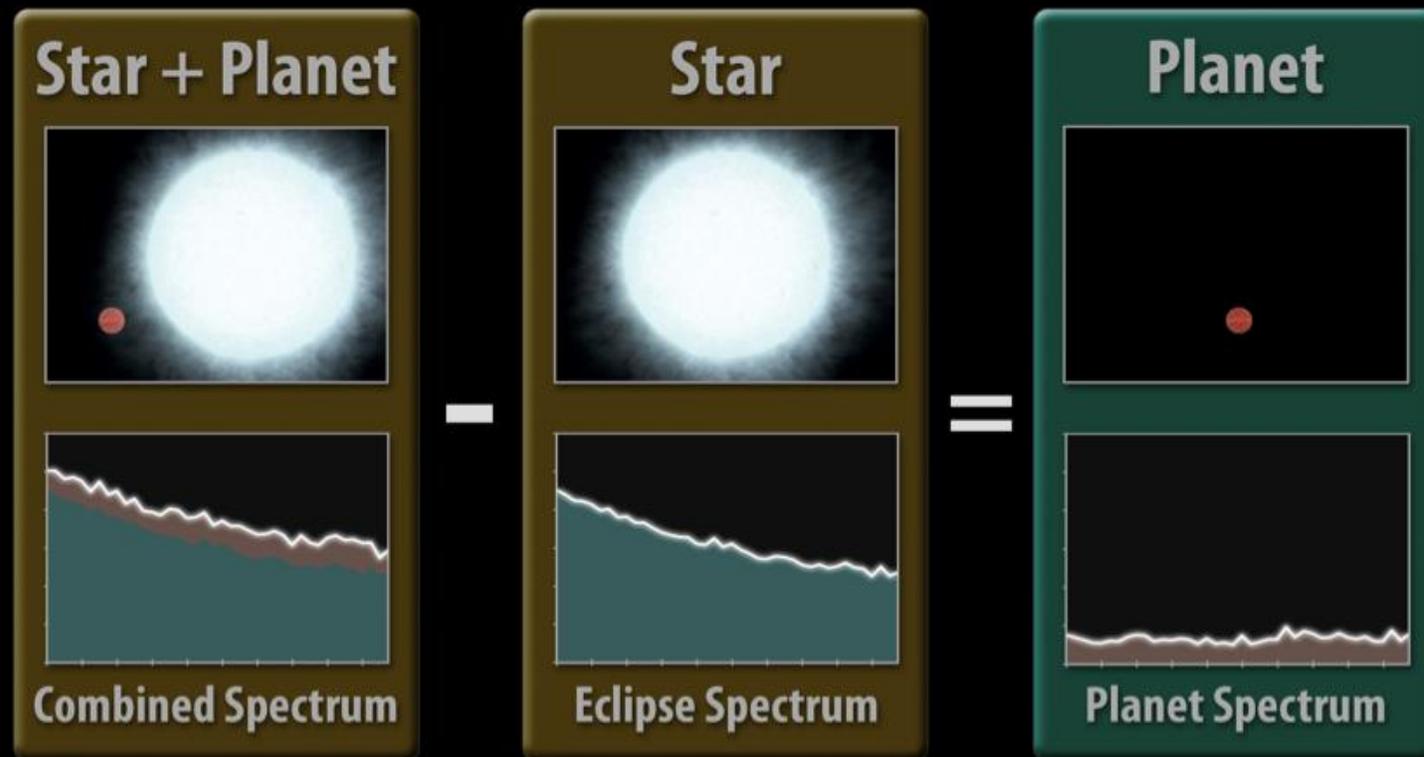
Атмосферы экзопланет



Есть несколько возможностей для получения спектров атмосфер экзопланет.

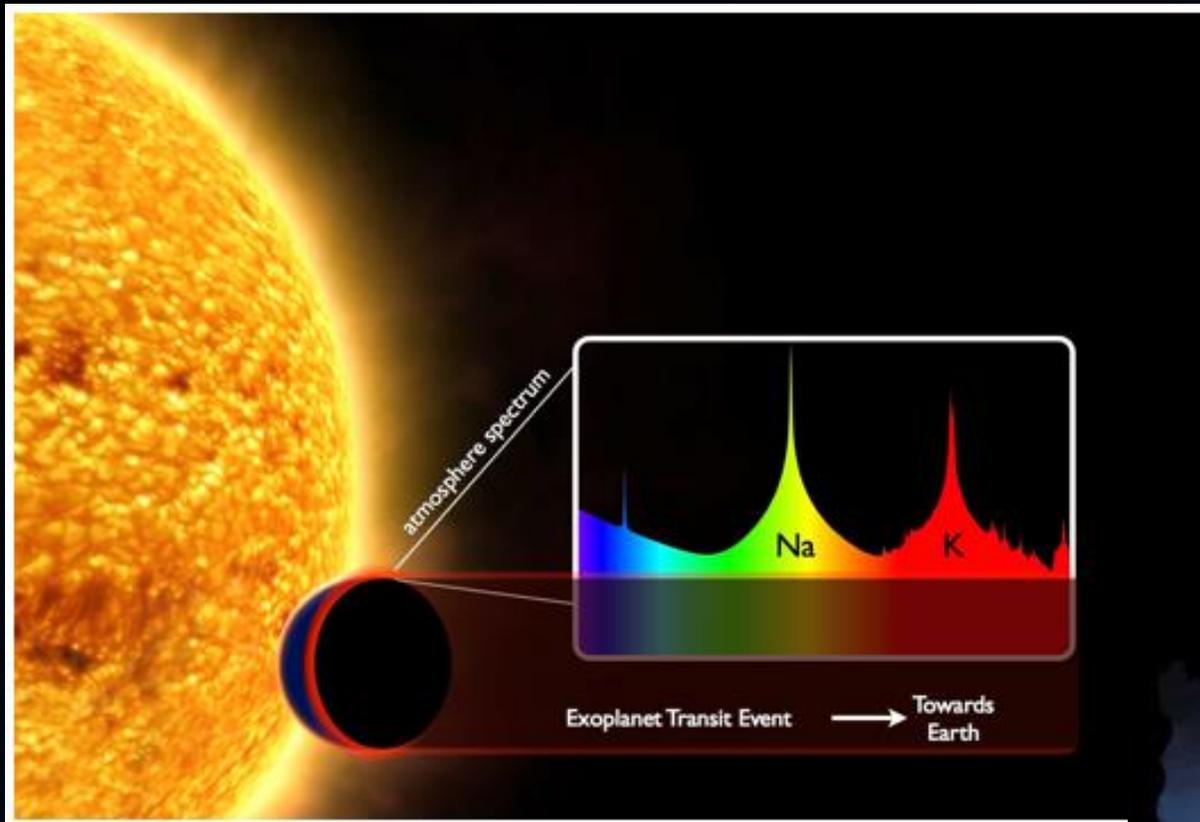


Спектр планеты

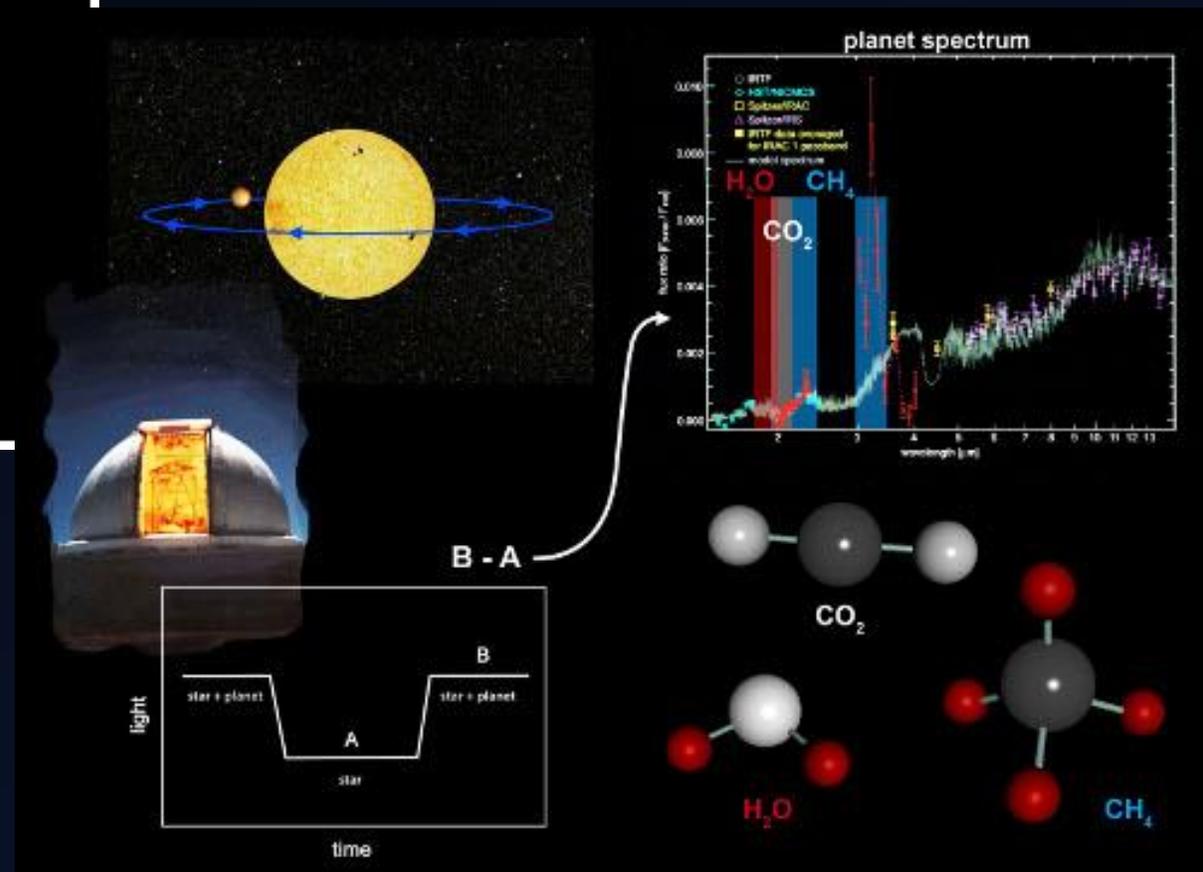


Isolating a Planet's Spectrum

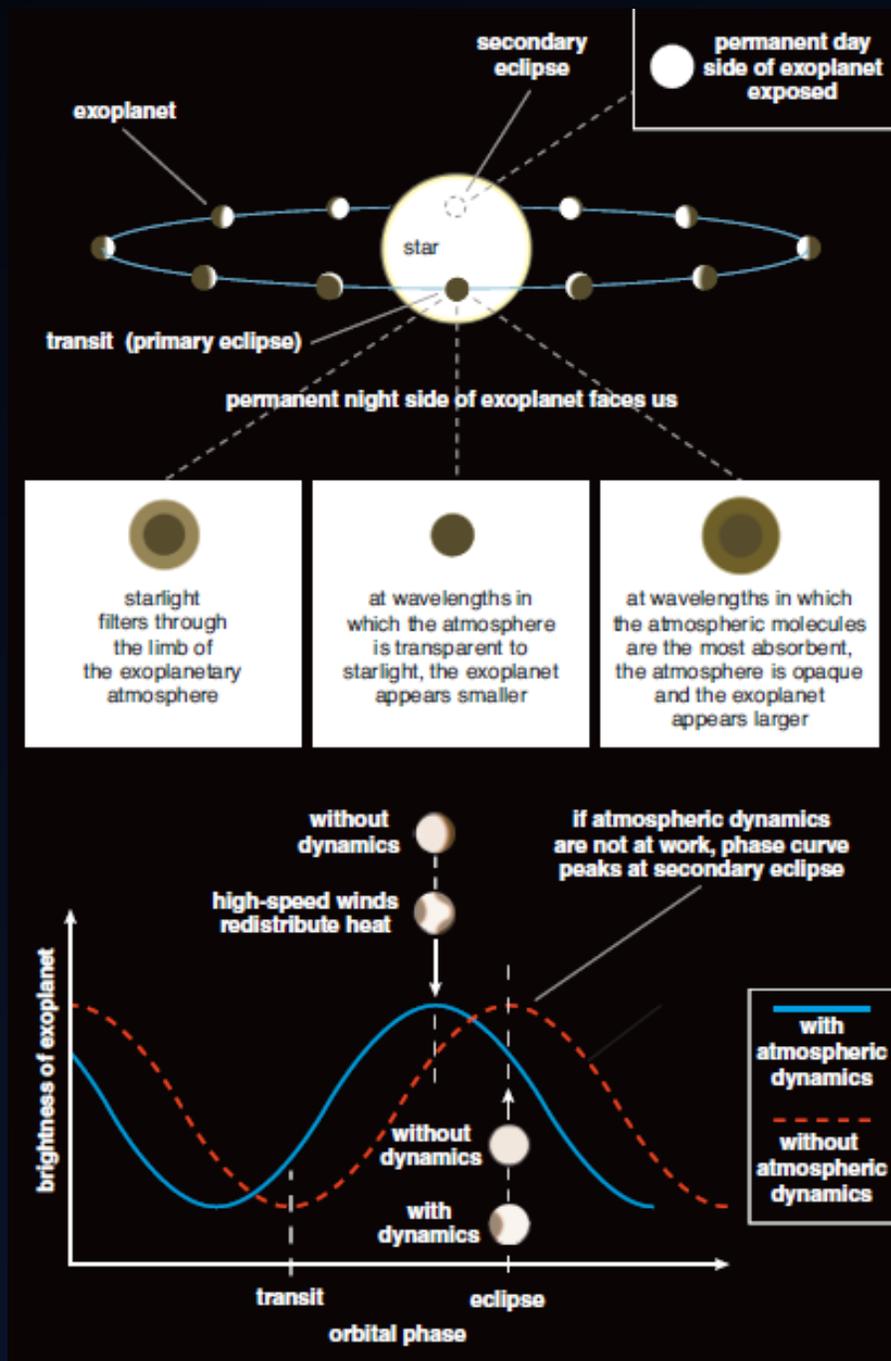
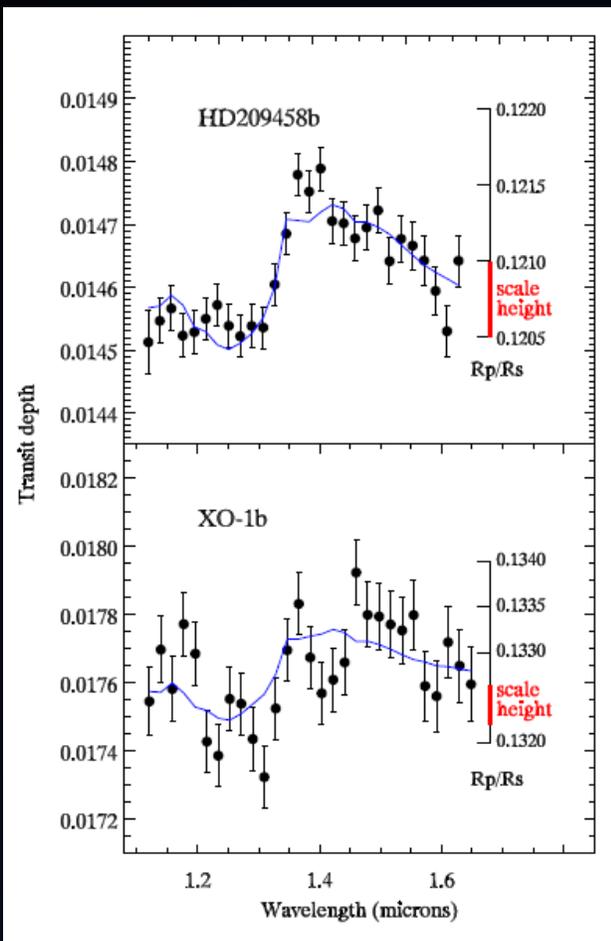
Спектры «напросвет» и прямые



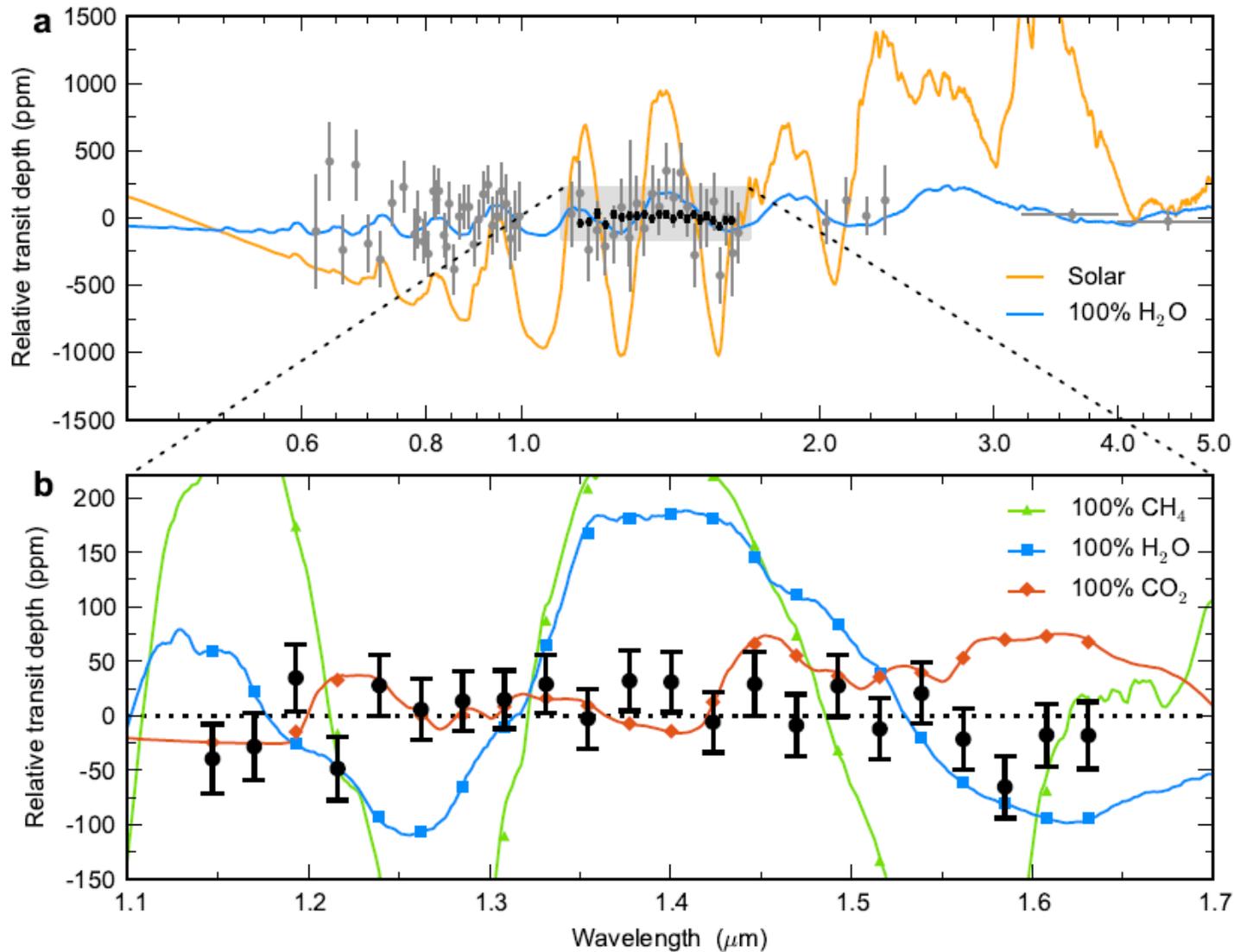
Иногда получают спектр дневной стороны планеты, а иногда изучают атмосферу «напросвет», когда планета проходит между звездой и нами.



Наблюдения транзита на разных длинах волн позволяет определить свойства атмосферы, т.к. какие-то волны атмосфера пропускает хорошо – там размер планеты меньше, какие-то плохо – там размер больше.



Сверхземля GJ 1214b

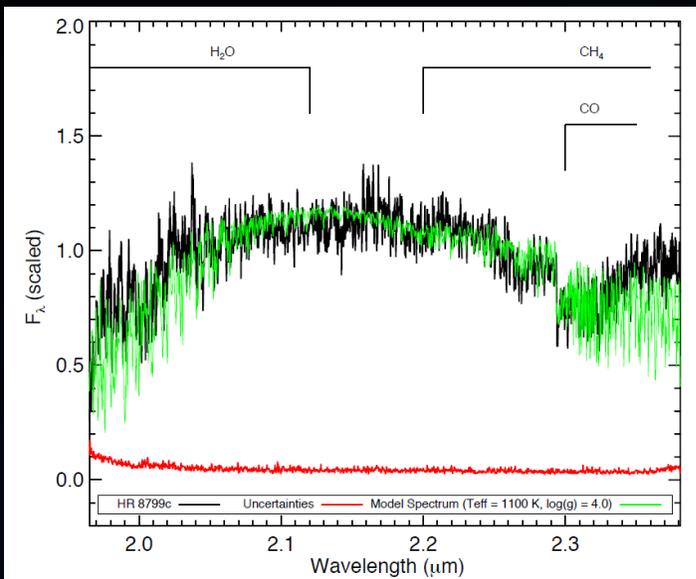


С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

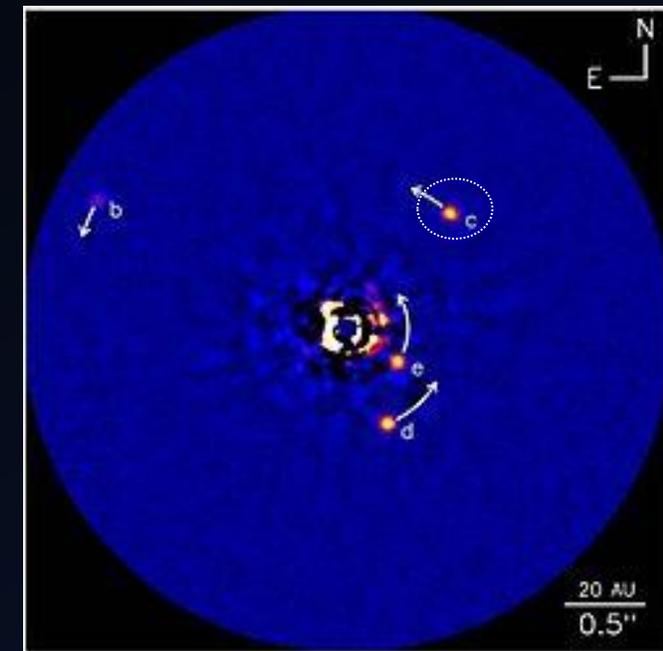
Это можно объяснить высокими облаками.

Вода и СО в спектре планеты



ИК-спектр HR 8799

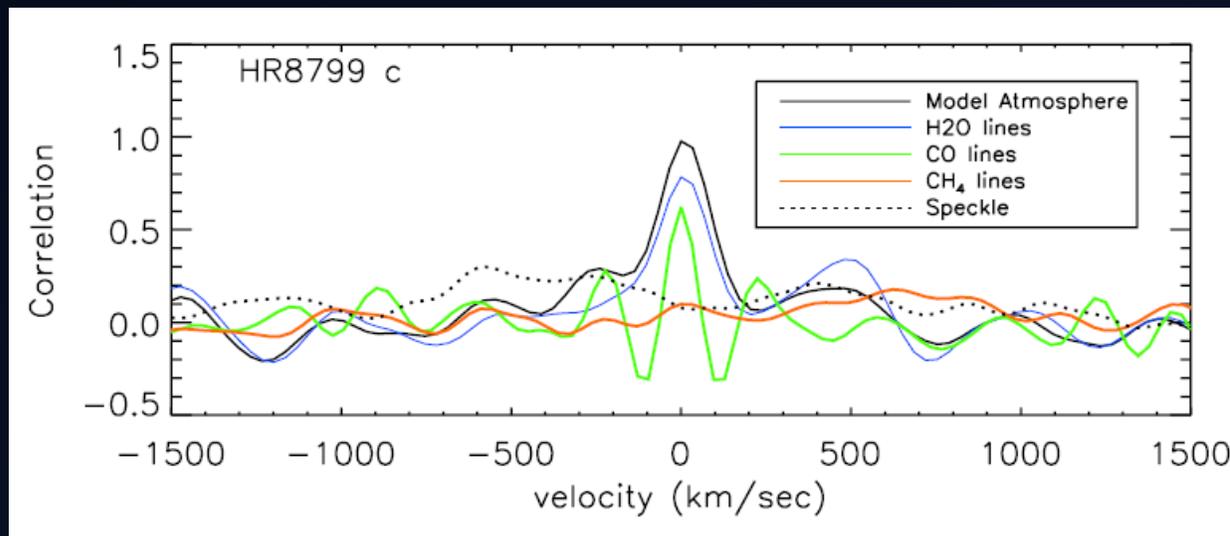
Детальная обработка показала наличие спектральных деталей, связанных с присутствием воды и монооксида углерода в атмосфере планеты HR 8799c.



HR 8799



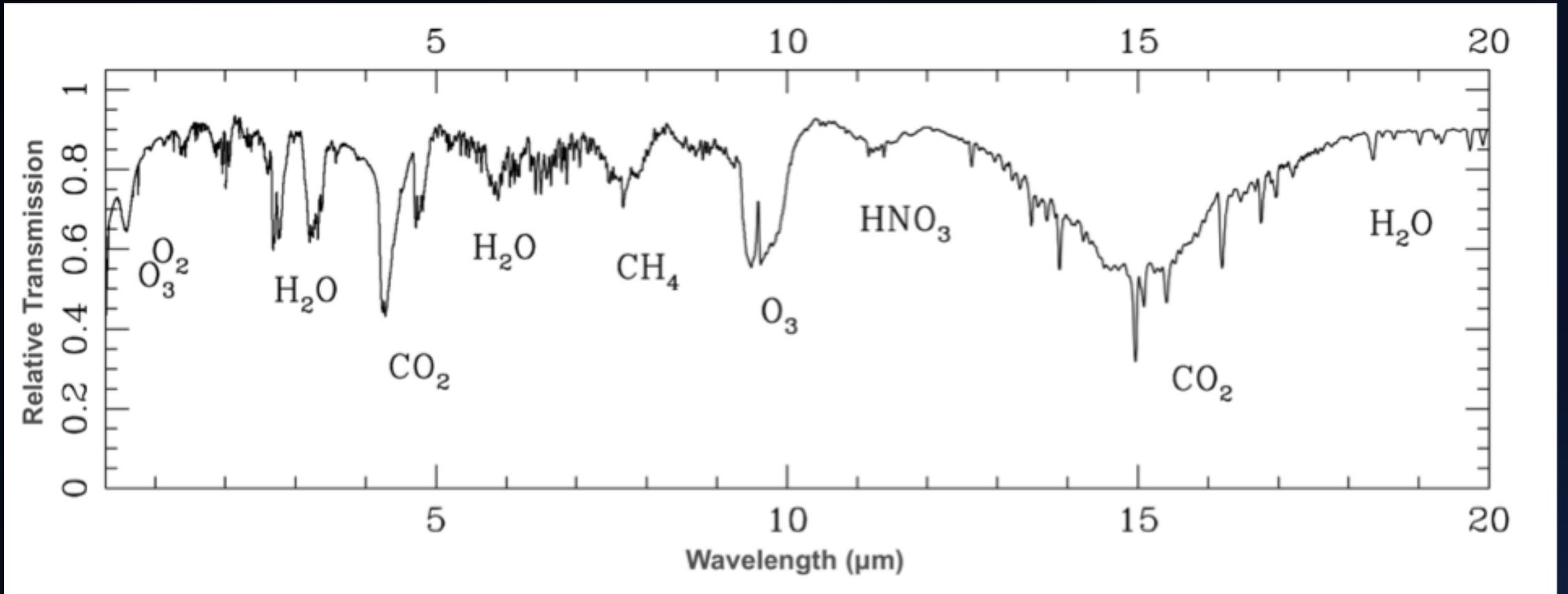
Наблюдения на Keck II



Биомаркеры

Спектр Земли с указанными биомаркерами:

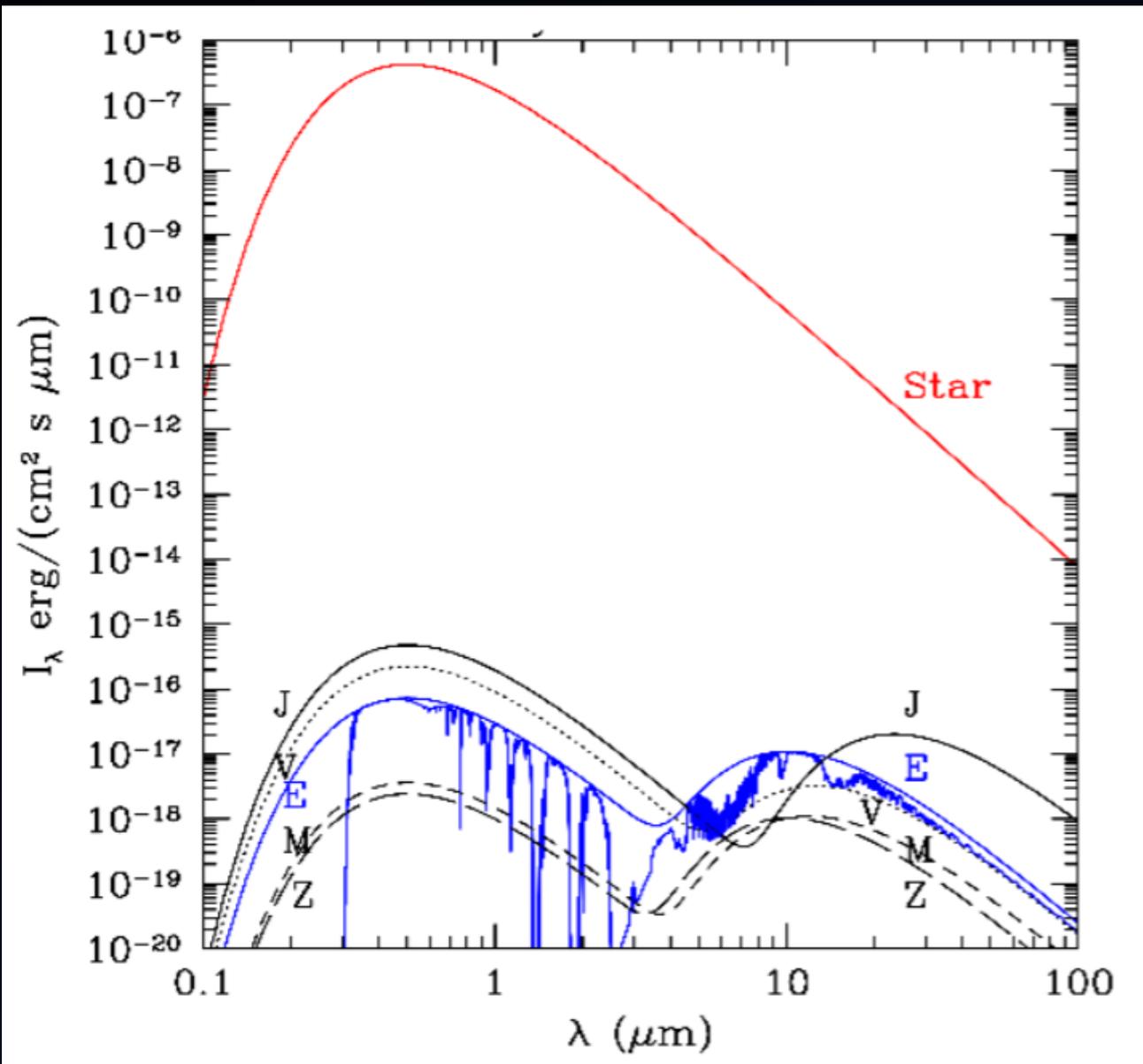
- кислород,
- озон,
- углекислый газ,
- метан,
- вода



Кислород на Земле

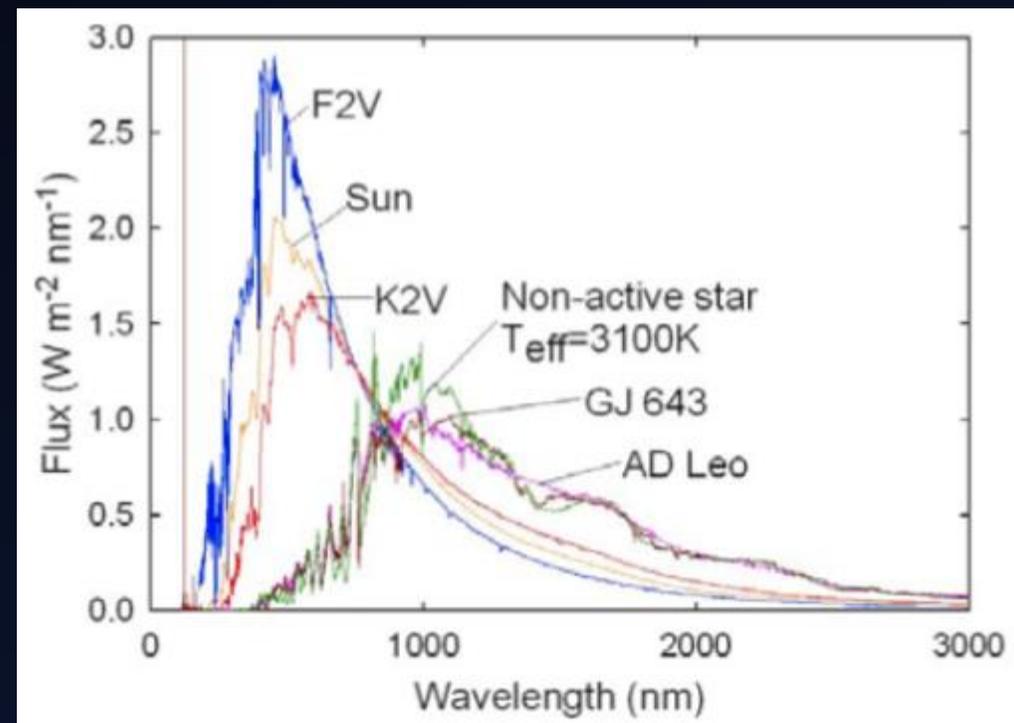


Солнце и планеты

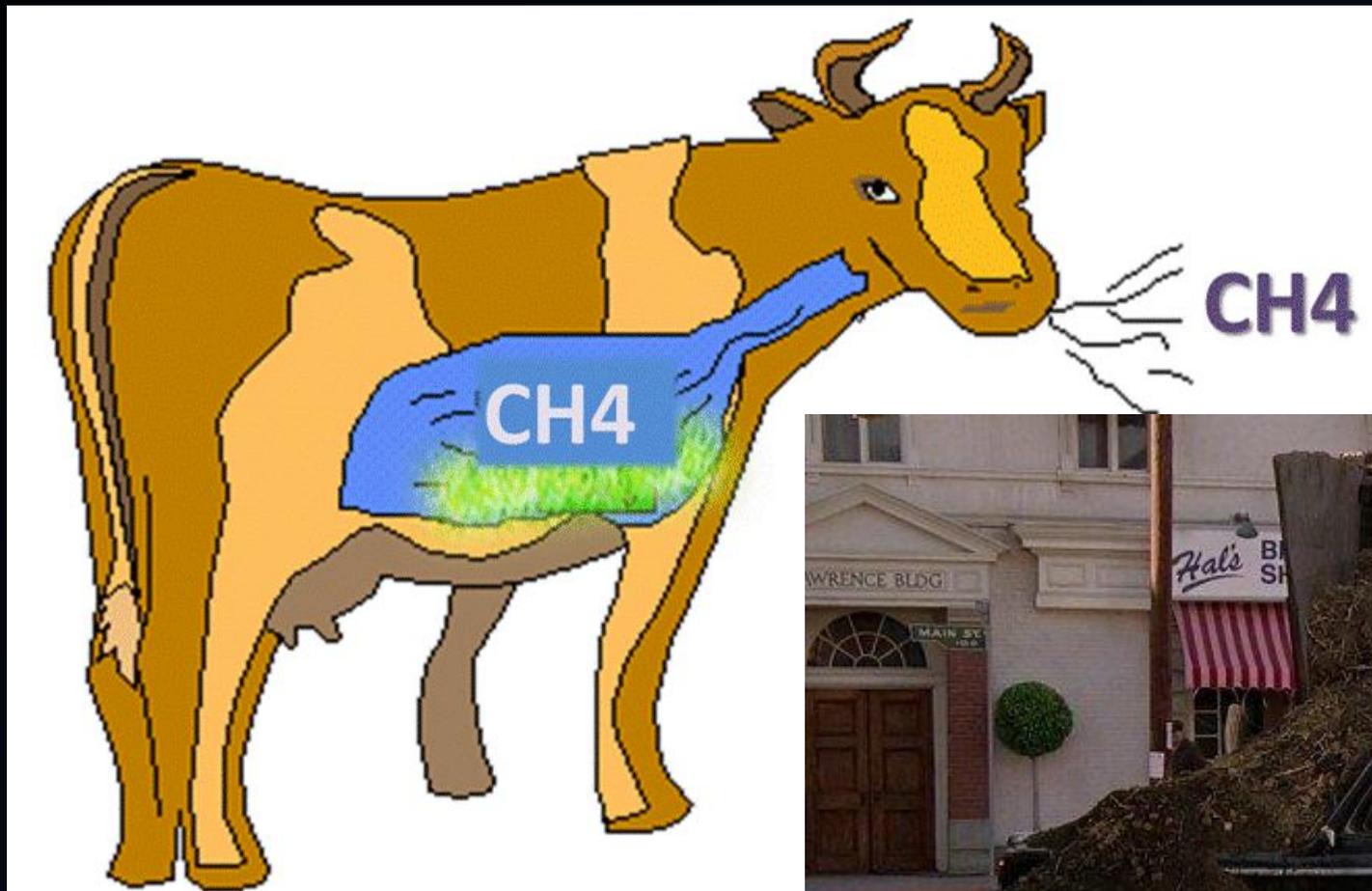


Выделение спектра планеты на фоне излучения звезды является трудной задачей.

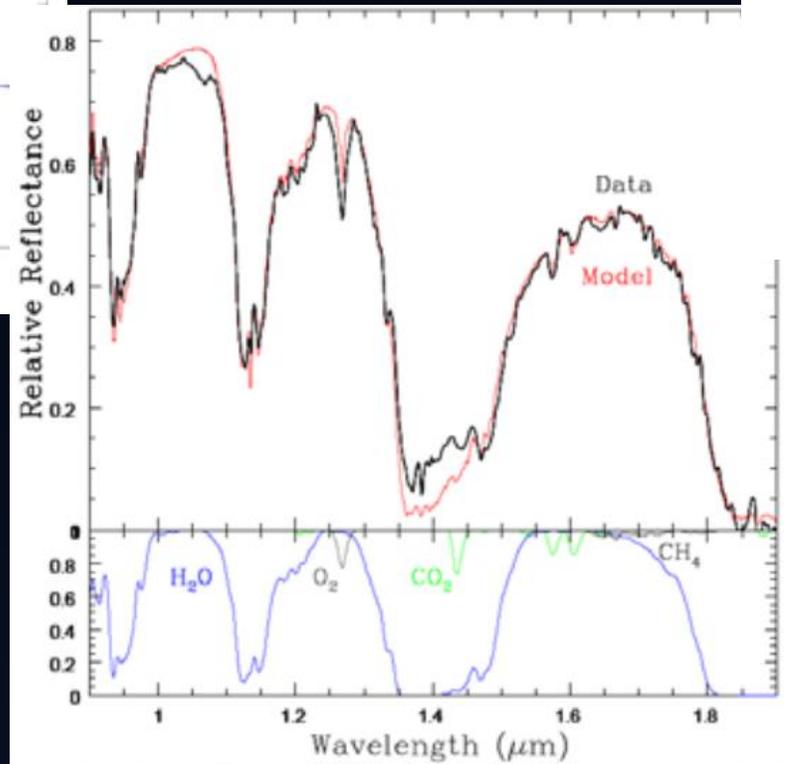
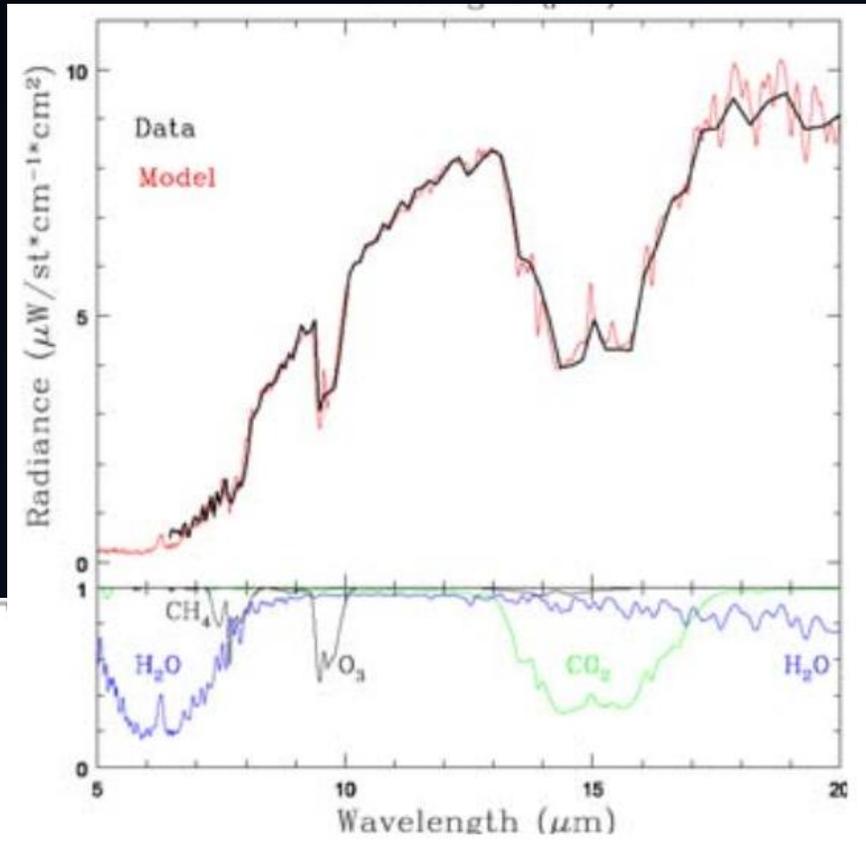
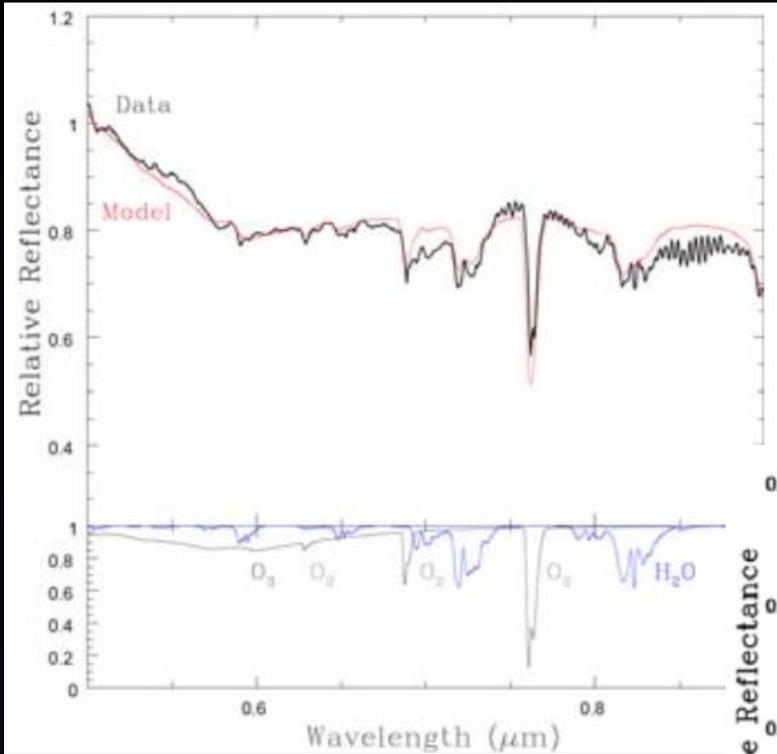
Спектры звезд различаются.



Происхождение метана на Земле



Спектр Земли



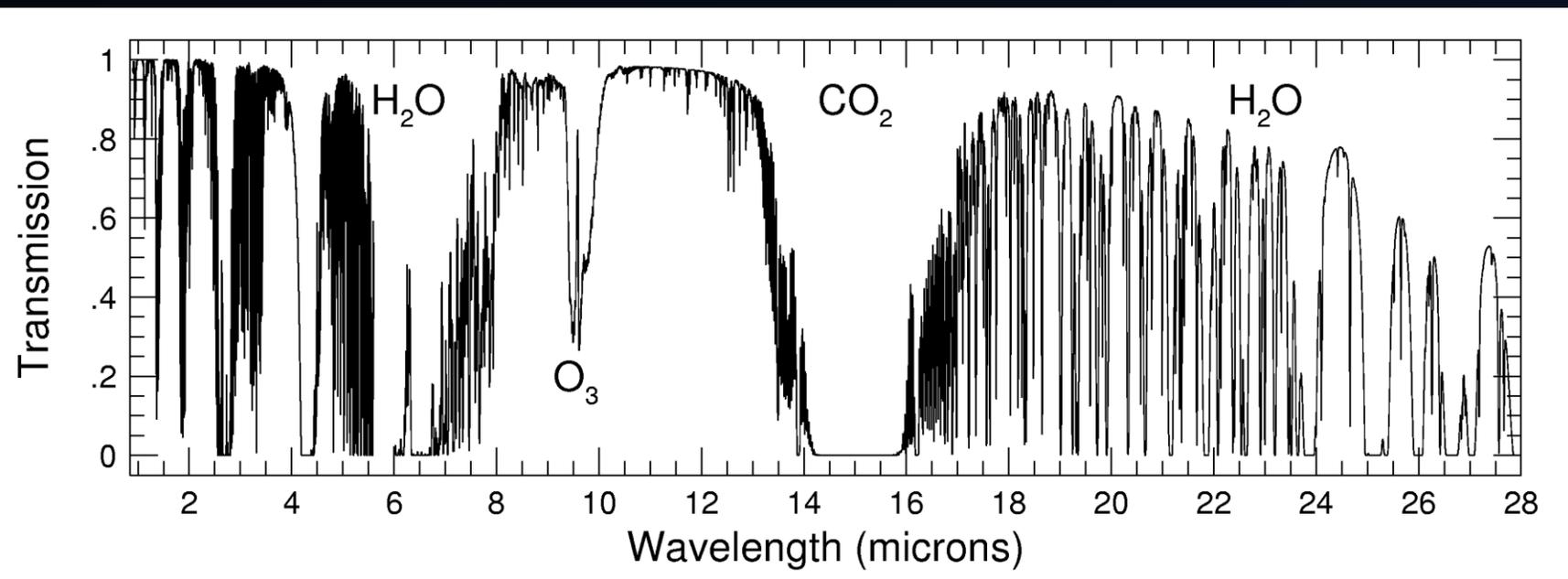
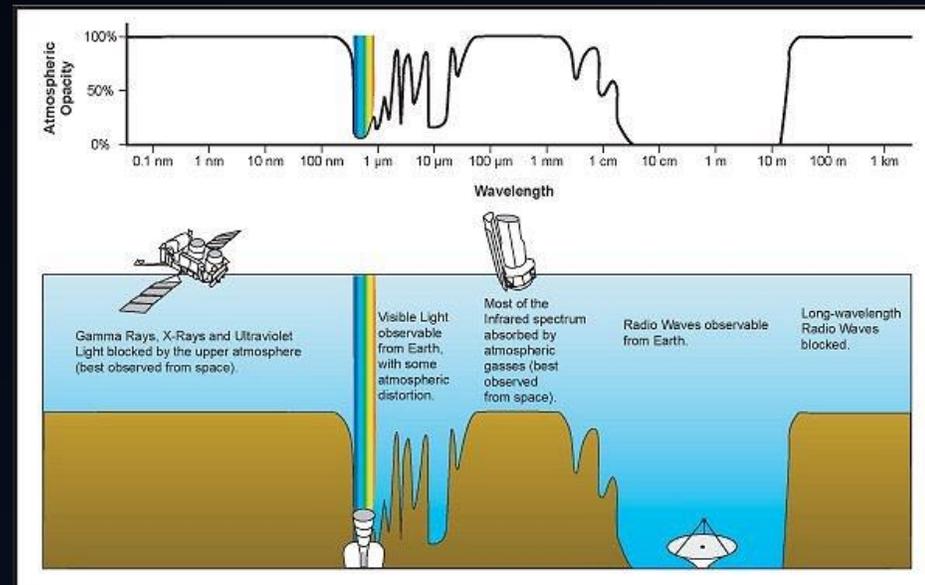
0906.2263

Прозрачность и яркость атмосферы Земли

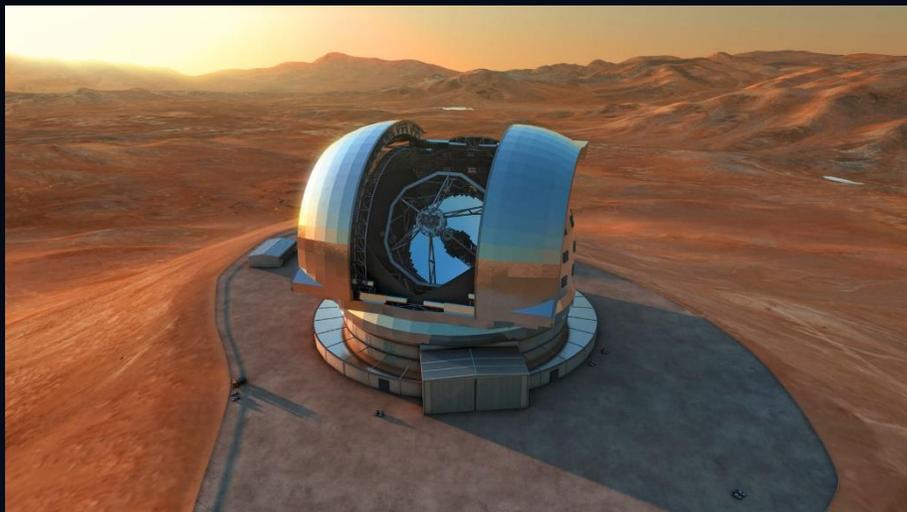
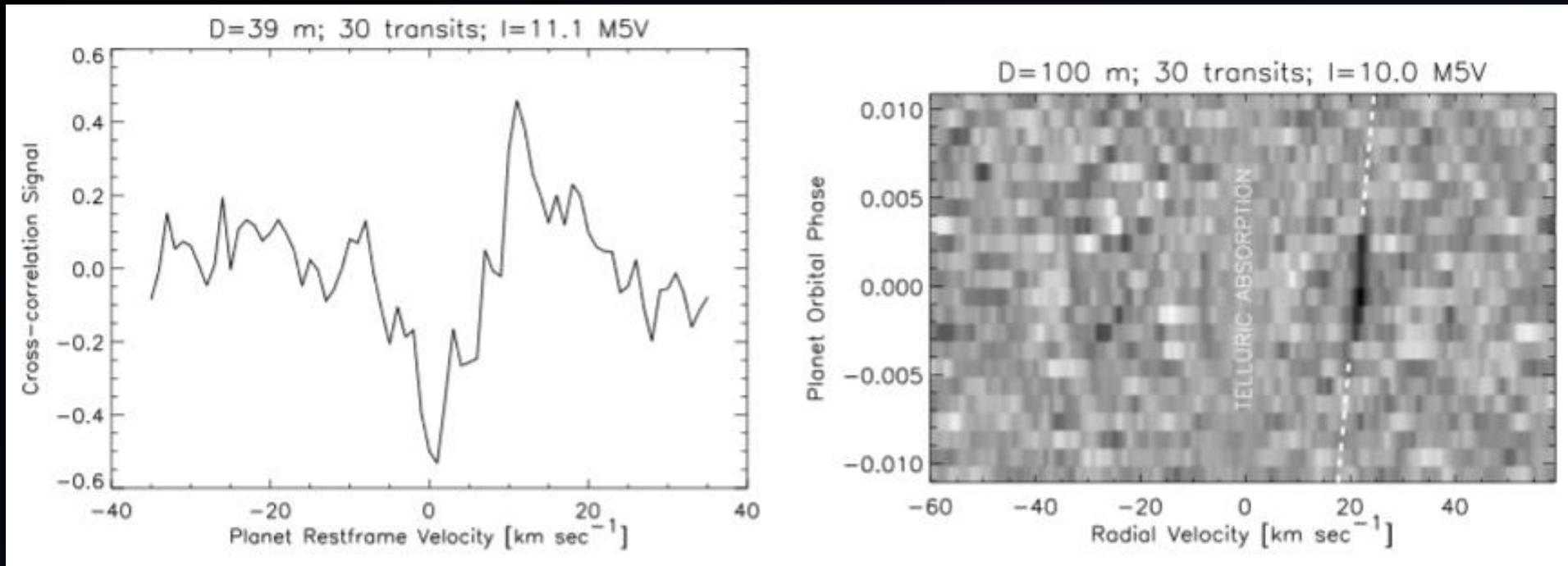
На длинах волн более 5 микрон атмосфера Земли мешает наблюдать.

Поэтому воду, метан, озон и углекислый газ придется искать из космоса.

А вот кислород O_2 можно наблюдать и с Земли, если есть большие телескопы.



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.

TESS

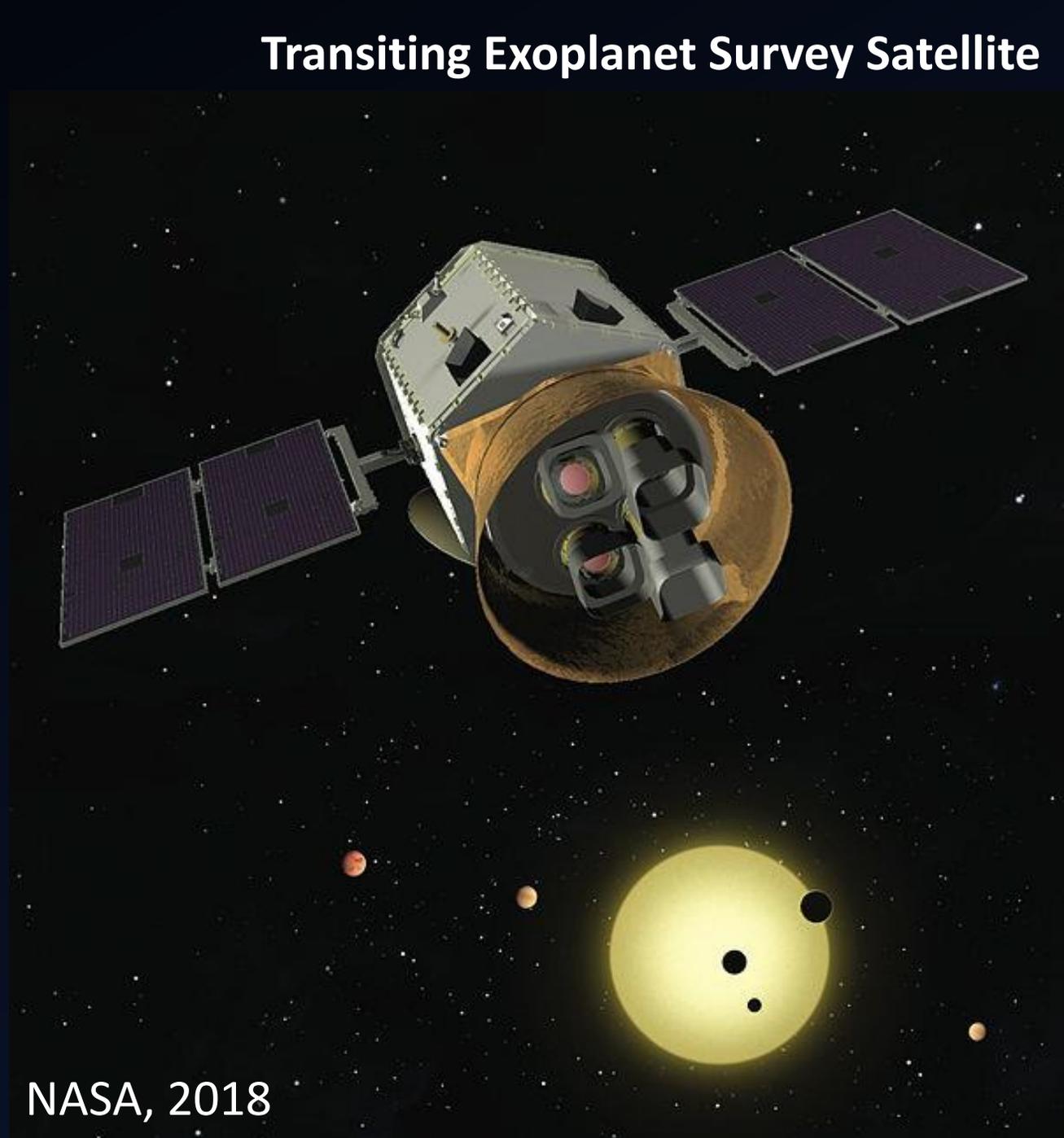
Поиск транзитных экзопланет у близких (ярких) звезд.

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

Примерно полмиллиона звезд типов G- и K-

За два года работы будет открыто несколько тысяч планет.

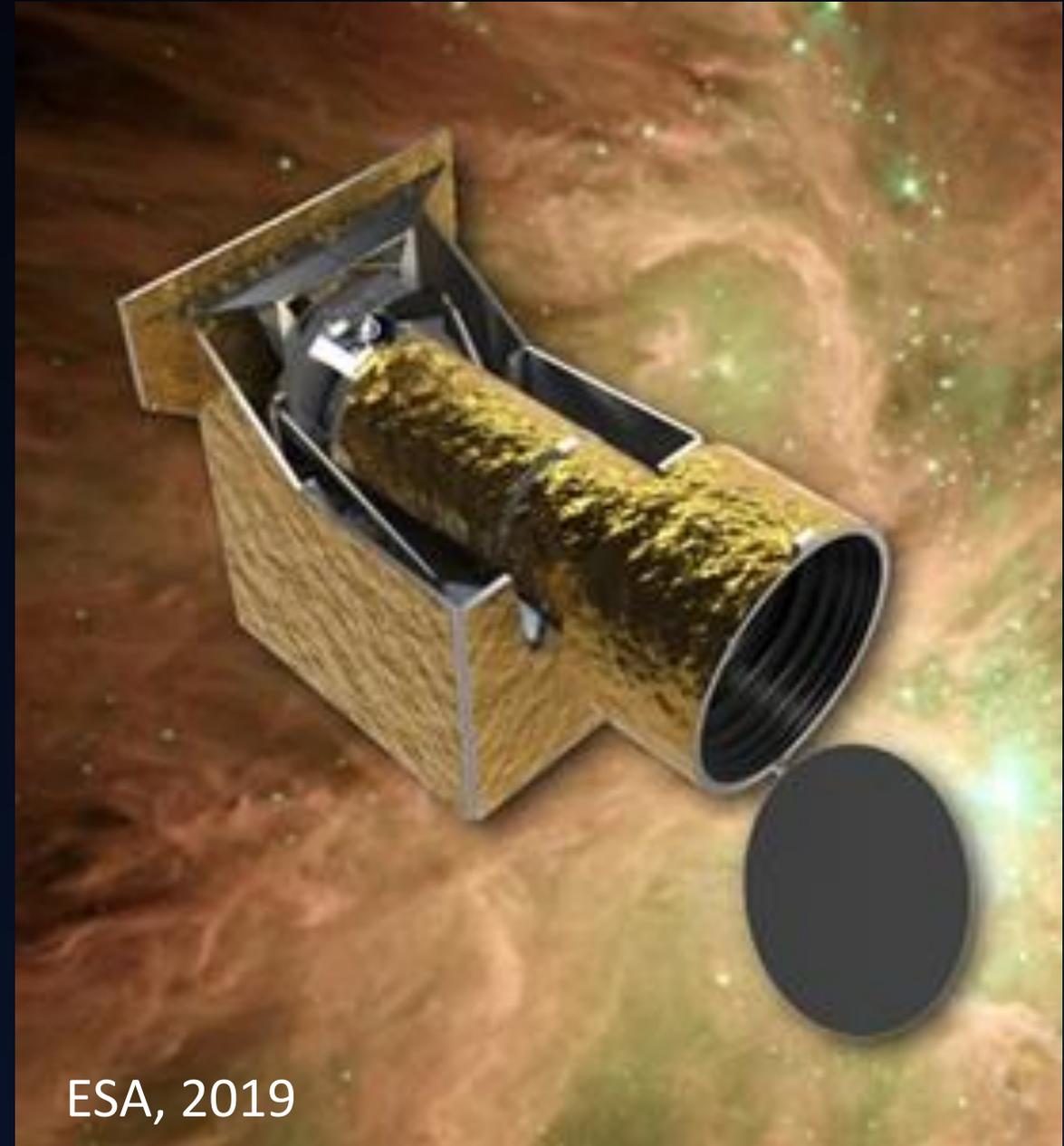
Transiting Exoplanet Survey Satellite



NASA, 2018

CHEOPS

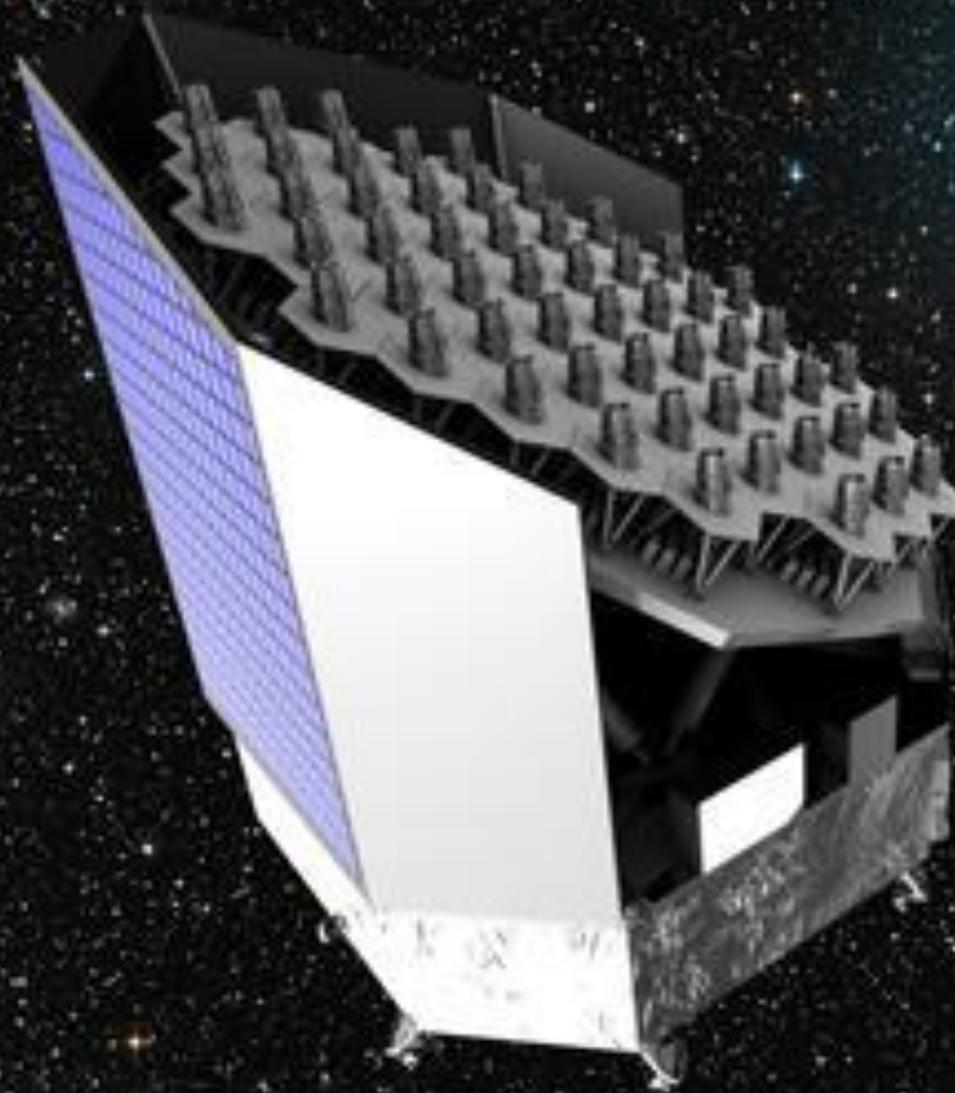
Небольшой спутник для определения радиусов экзопланет у близких звезд, для которых с помощью наземных телескопов уже получены оценки массы.



ESA, 2019

PLATO

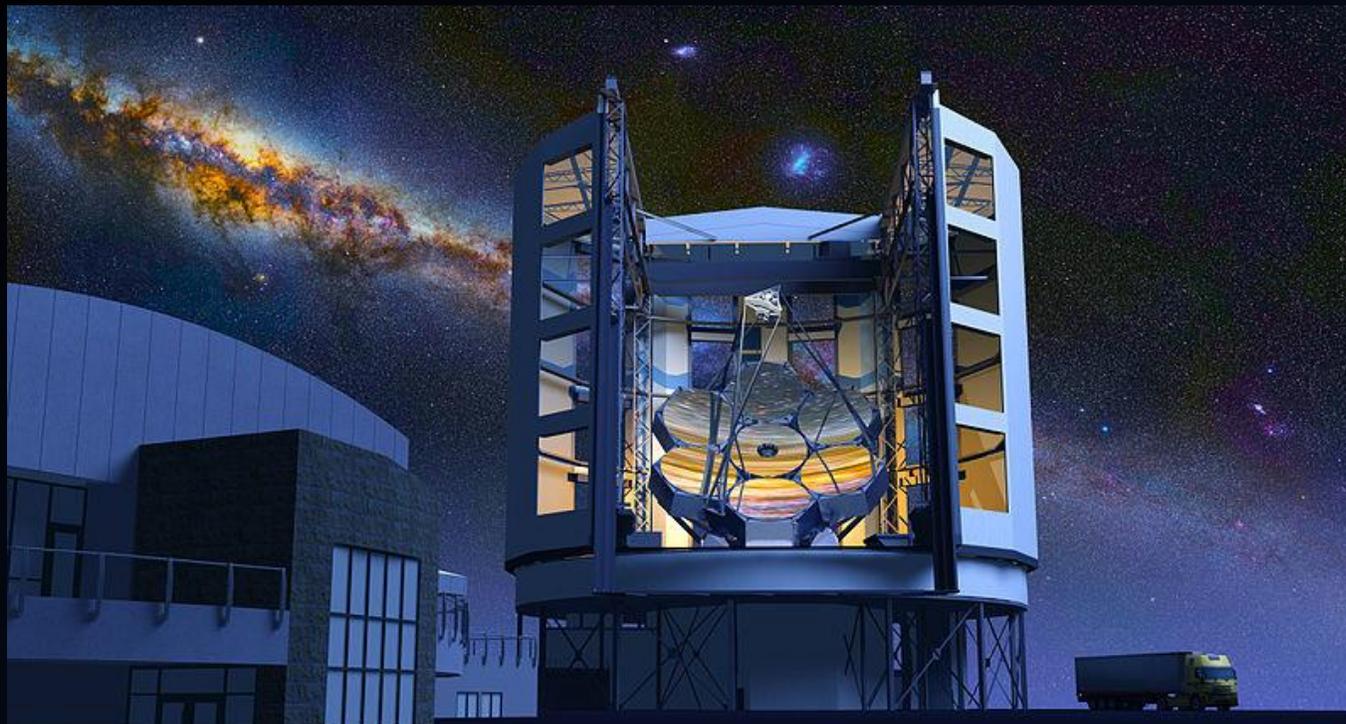
Planetary Transits and Oscillations of stars



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 2025 г.

Thirty Meter Telescope



Мауна Кеа. Гавайи.

Международная коллаборация.

Планируется начать наблюдения в 2027 г.

Стоимость – более миллиарда долларов.

E-ELT

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.

European Extremely Large Telescope

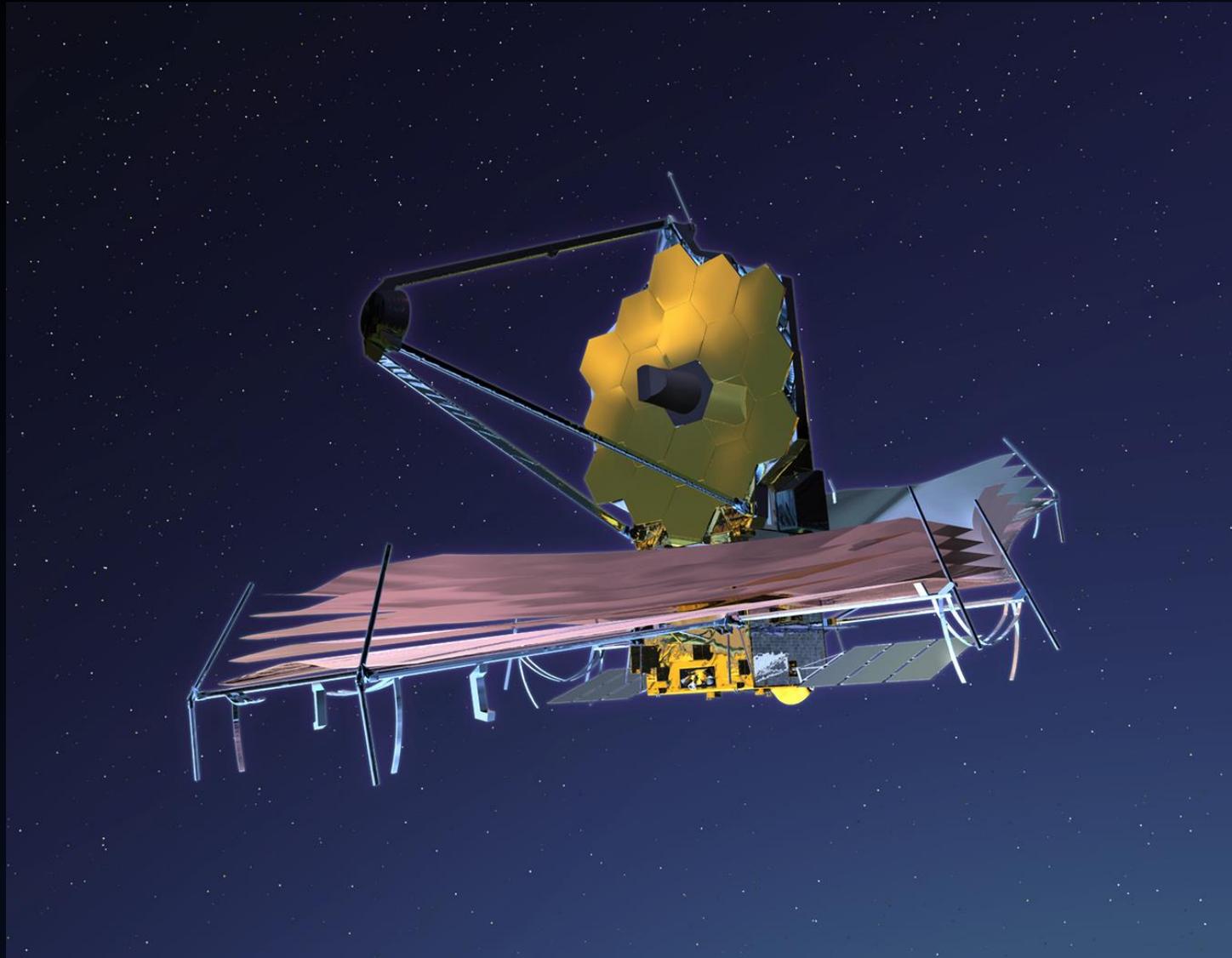


Эффективный размер - почти 40 метров
Европейская южная обсерватория (ESO).

Пустыня Атакама, Чили.

Планируемые сроки первого света – 2024 г.

James Webb Space Telescope (JWST)



Космический телескоп
следующего поколения.

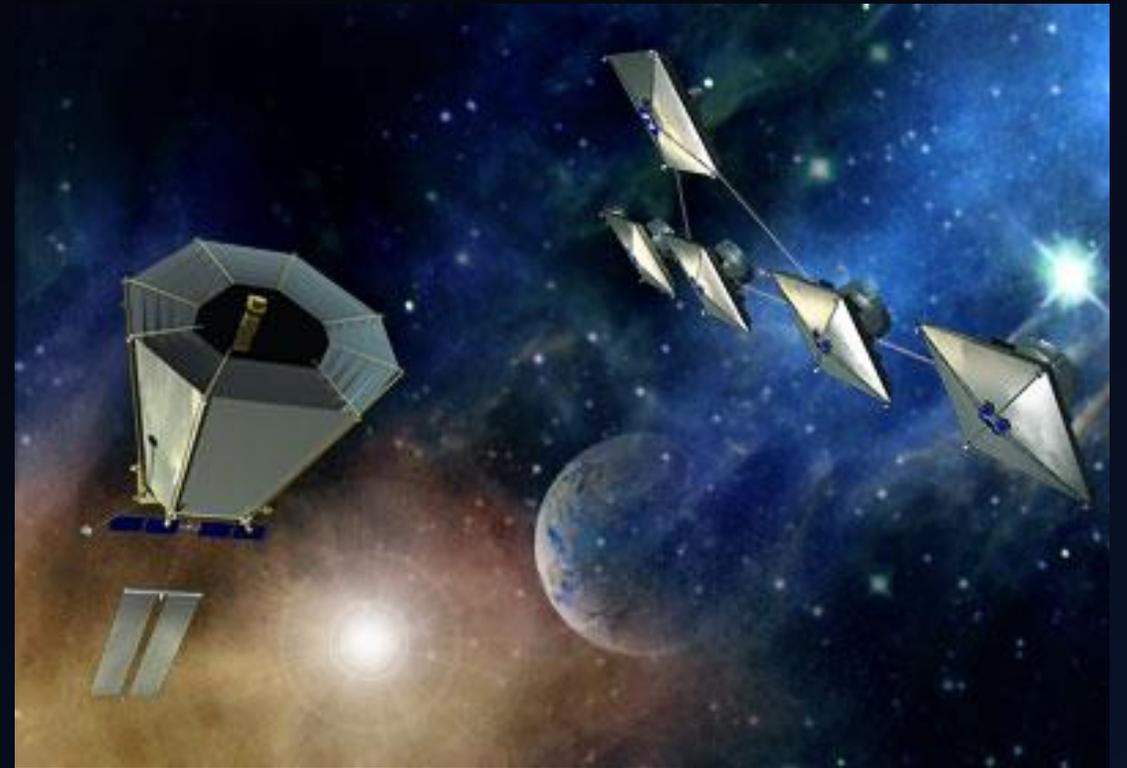
Ожидаемый запуск: 2021.

Инфракрасный диапазон.

Раскладывающееся зеркало
6.5 метра

Далекое будущее

Darwin



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.