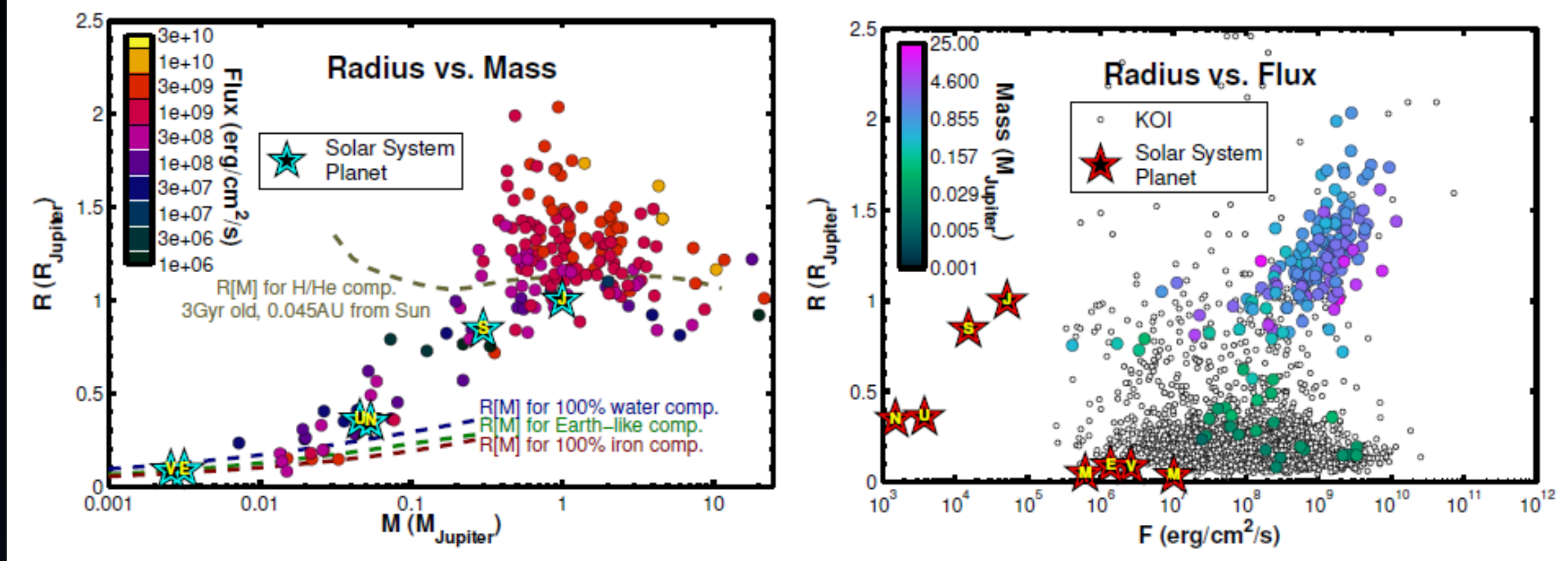


Экзопланеты: строение и эволюция

Размеры планет

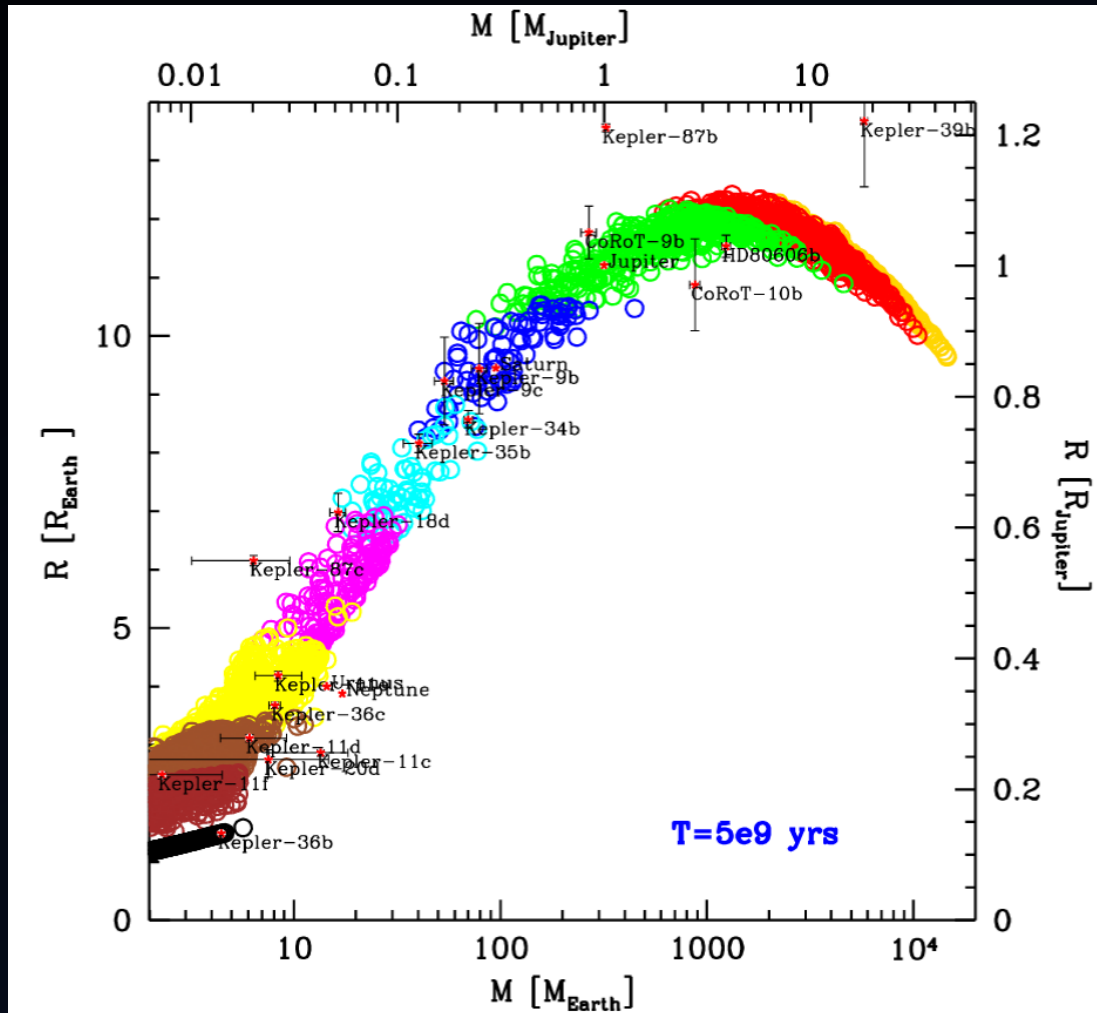


В принципе, по данным о массе и радиусе можно делать некоторые выводы о составе экзопланет. Хотя, как правило, будет несколько вариантов.

Размеры газовых планет зависят не только от состава, но и от:

- возраста
- близости к звезде

Зависимость Масса-Радиус

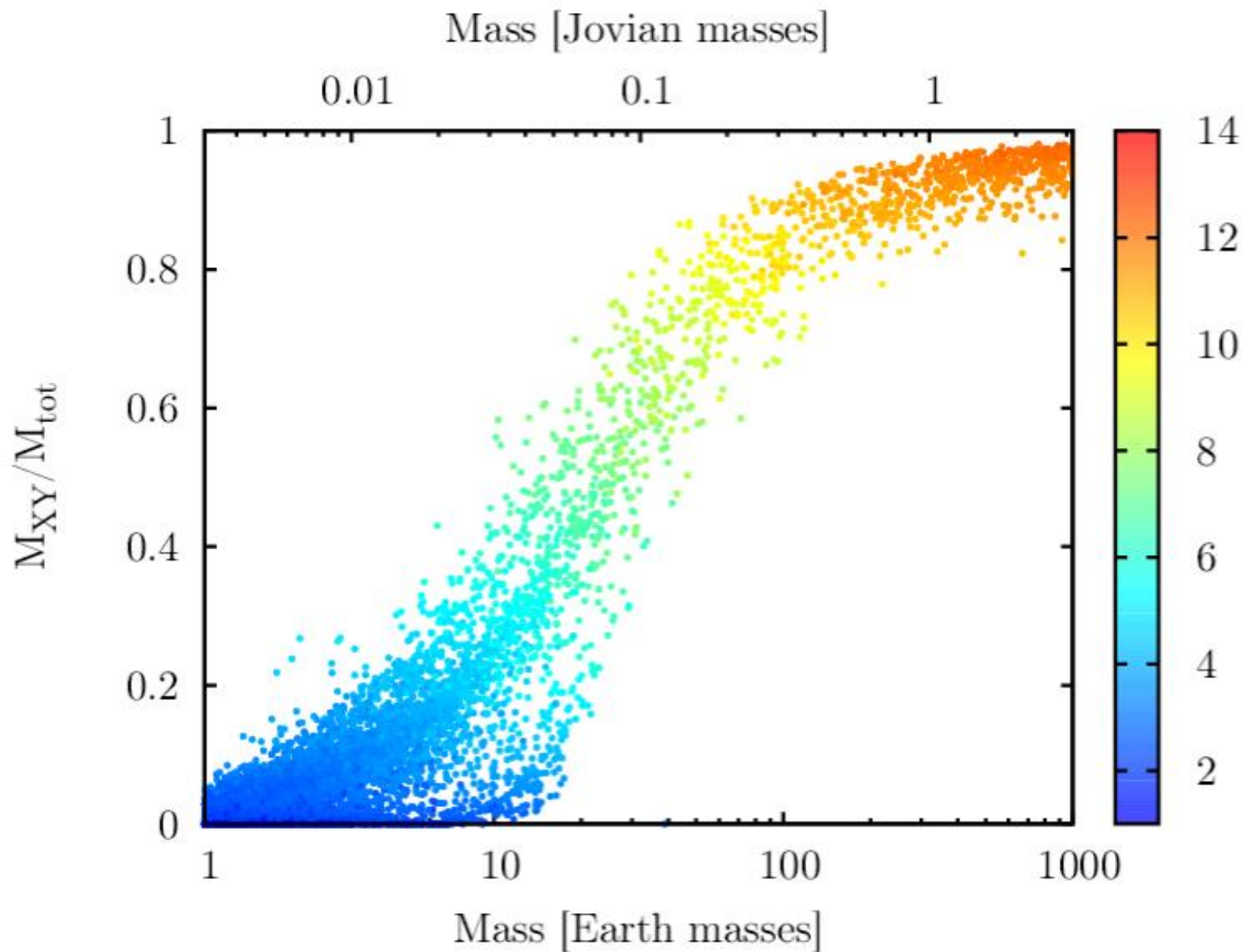


Показаны результаты моделирования и результаты наблюдений.

Цвет кодирует долю легких элементов (водорода и гелия).

Возраст планет – 5 млрд лет.

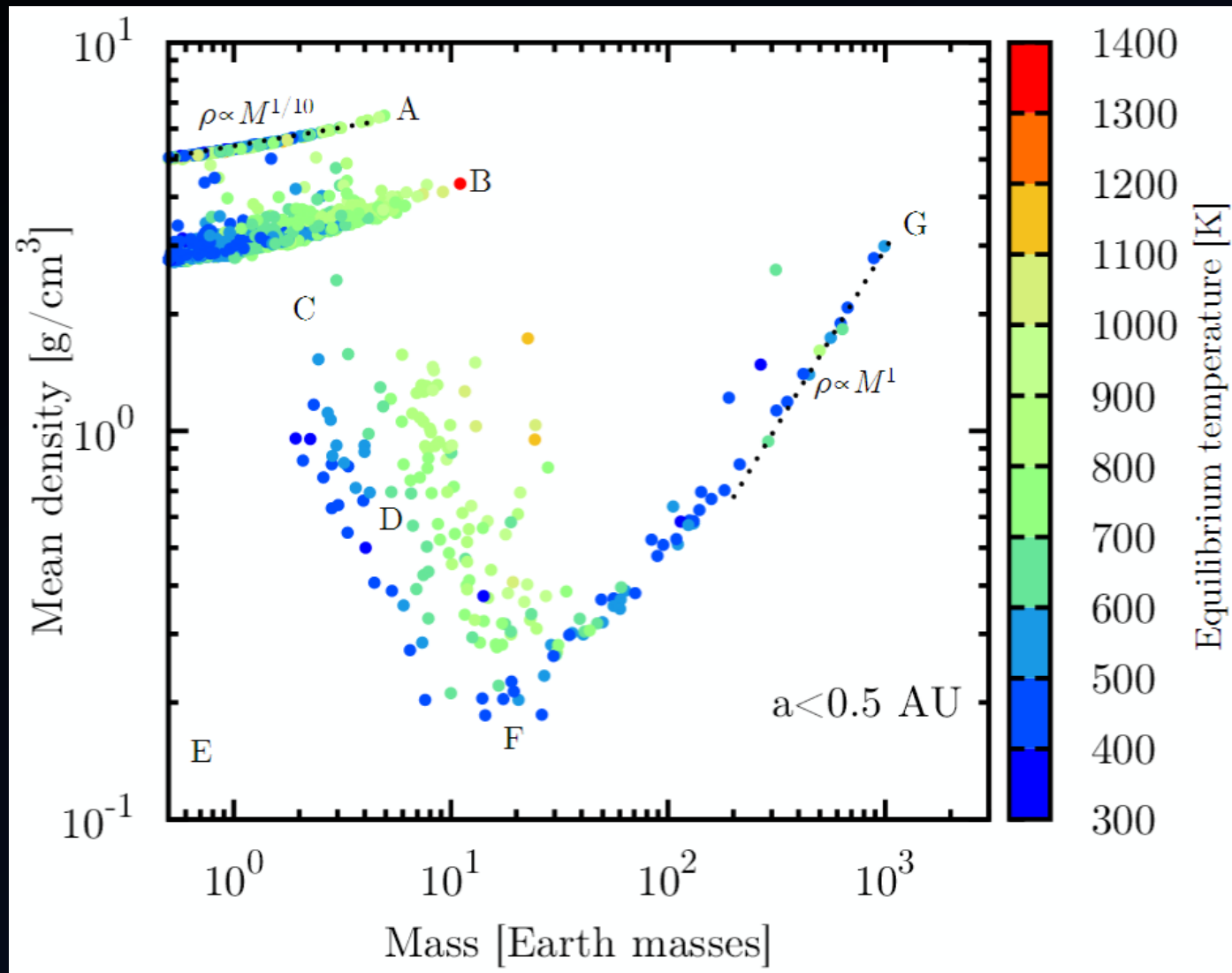
Доля легких элементов в полной массе



Результаты моделирования.

Смена наклона на $M=100M_{Earth}$ связана с изменением параметров аккреции газа во время формирования.

Плотность и масса



Результаты моделирования.

Возраст планет – 5 млрд лет.

A – твердые каменные.

B – твердые ледяные.

C – испаряющиеся.

D – маломассивные планеты с большими ядрами, но с заметное долей H/He.

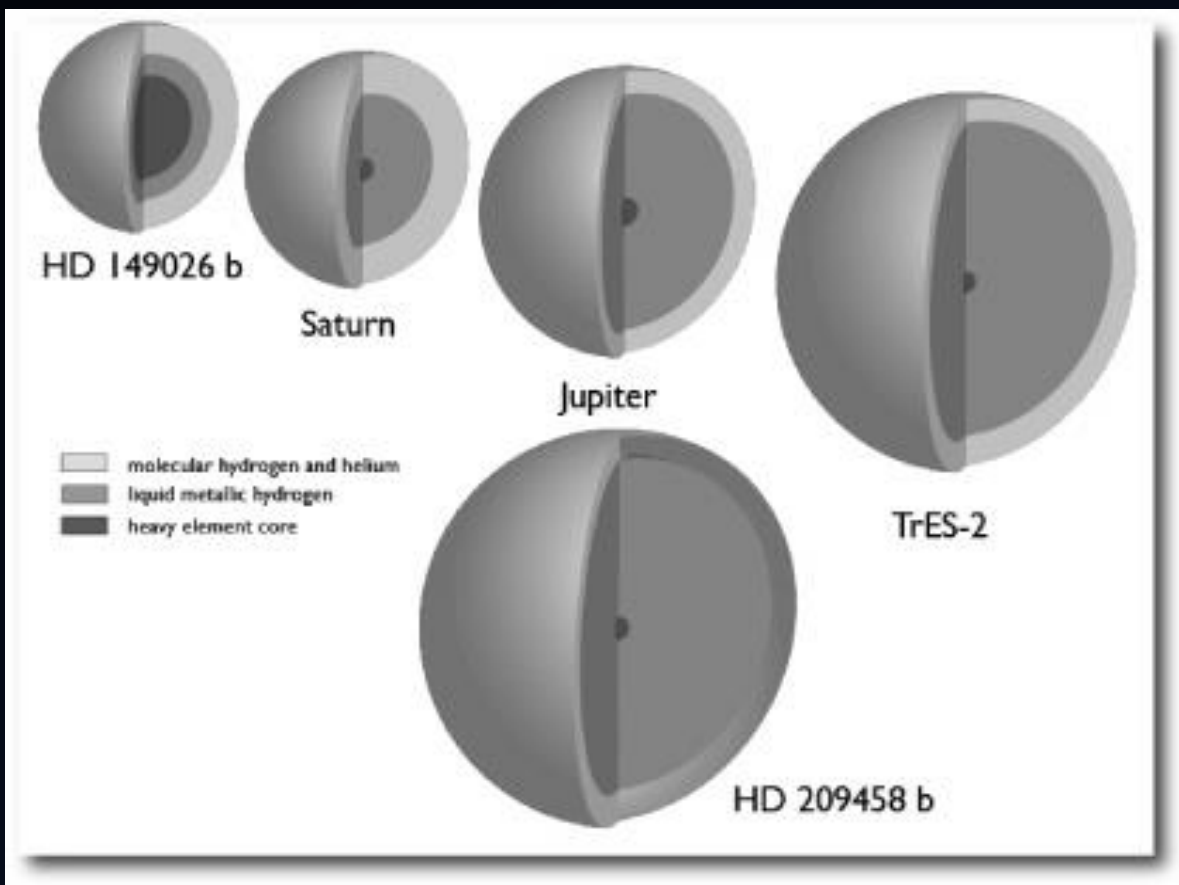
E – запрещенная зона (испар.)

F – переход к гигантам.

G – планеты-гиганты.

Загадочный горячий сатурн

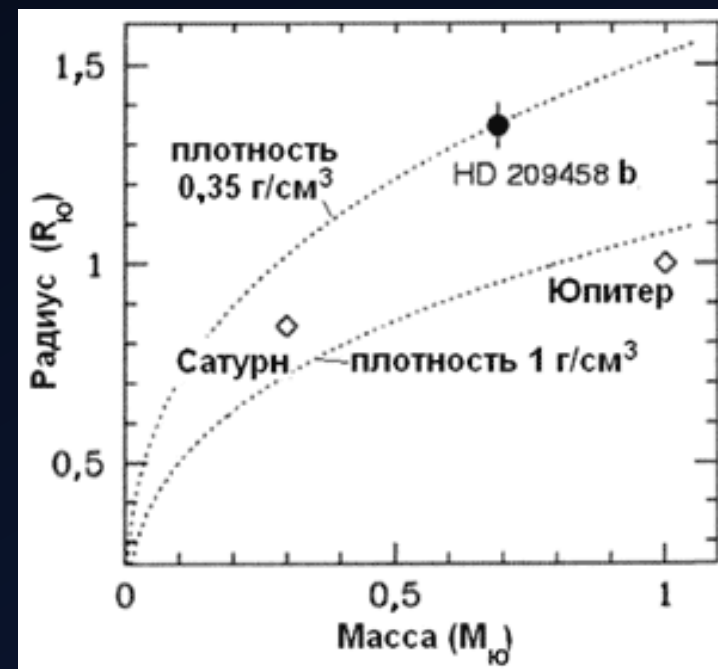
HD 149026 – горячая, но маленькая.
На 20% тяжелее Сатурна,
но на 22% меньше по размеру.



В случае газовых планет мы не знаем, насколько большими у них могут быть ядра из тяжелых элементов (и вообще, у всех ли они имеются).

Ядра помогают объяснить тяжелые, но компактные планеты. Наоборот, ядра мешают объяснить сильно раздутые планеты.

HD 209458b –
слишком
раздутая.

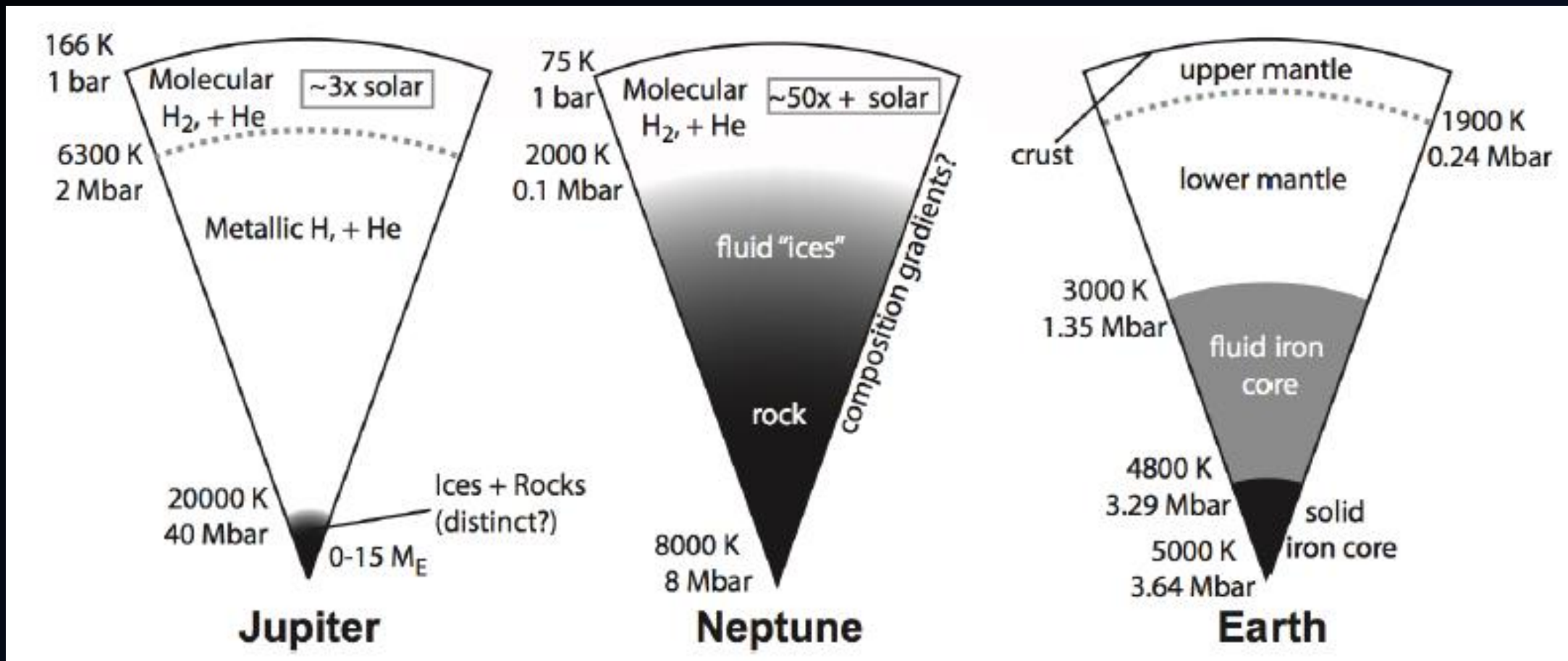


Три основных типа планет

Газовые гиганты
H/He

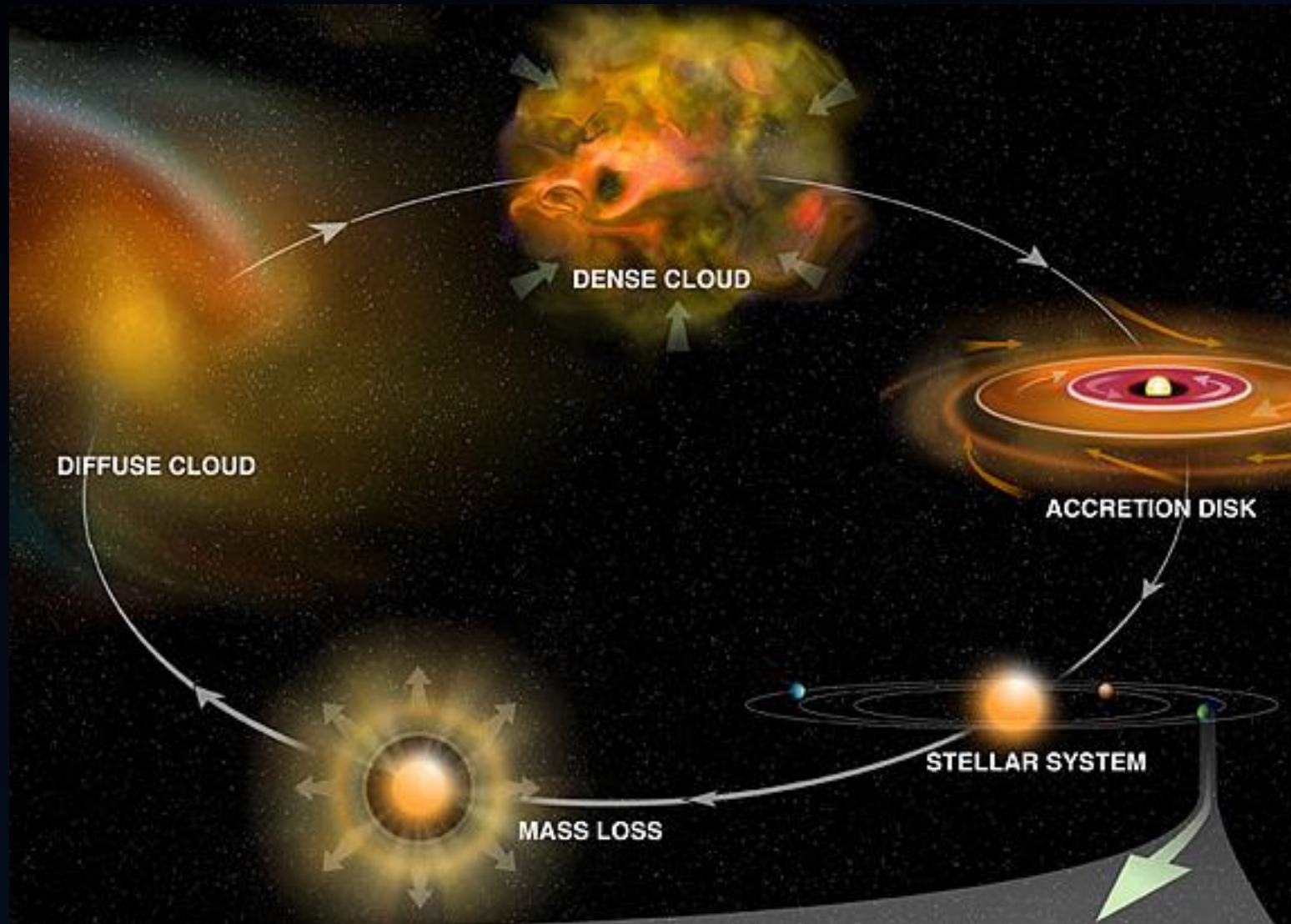
Ледяные гиганты
H/He+лед+ядро

Твердые планеты
Si, Mg, Fe, O, C



Но этим, конечно, многообразие не исчерпывается,
да и внутри этих классов есть более мелкие деления...

Галактический спиралеворот

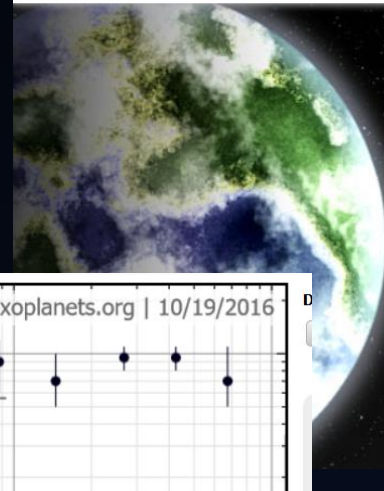


Непрерывно идет процесс образования новых звезд и планетных систем, а также выброса вещества в межзвездную среду.

Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

Со временем появились тяжелые элементы, и стало возможным создавать твердые планеты.

Наконец, появилась жизнь.



Table

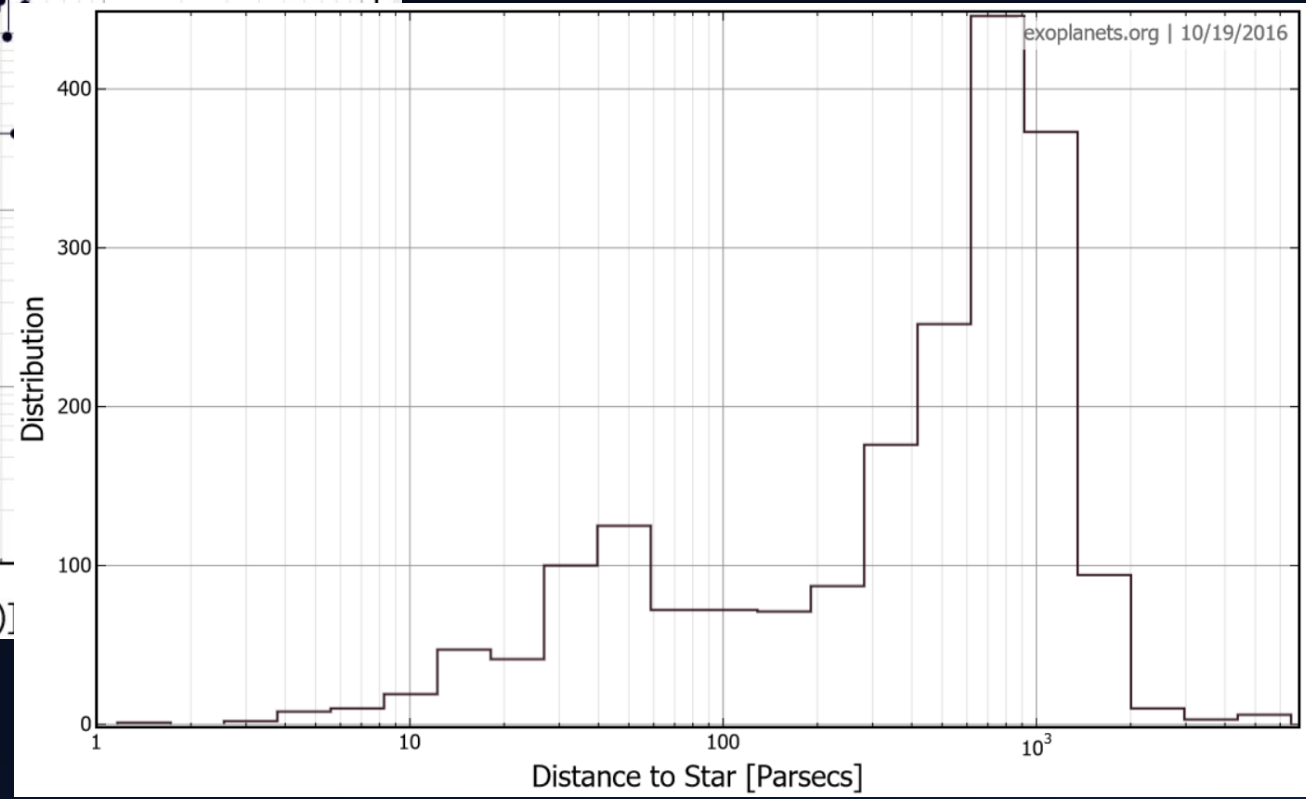
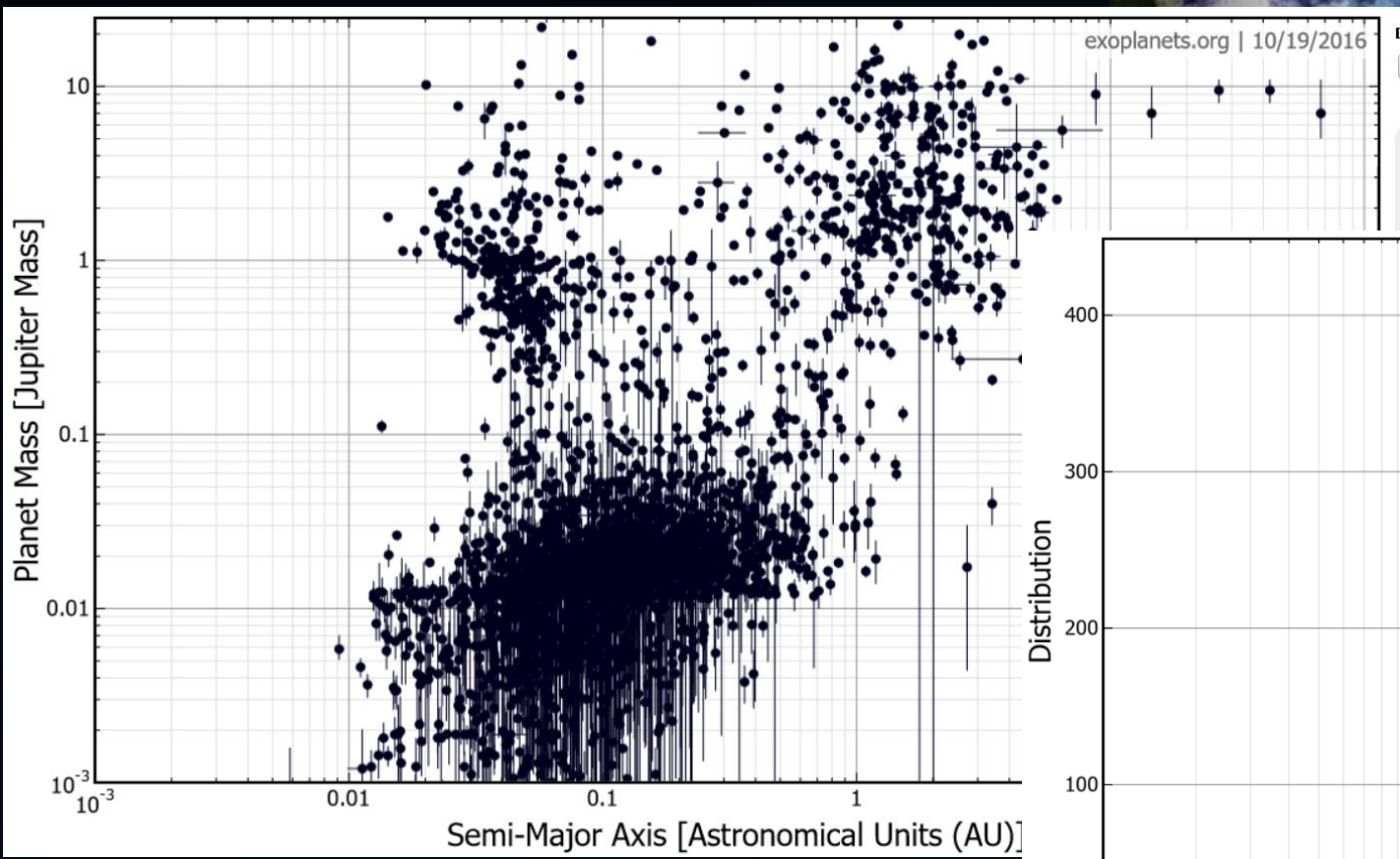


Plots

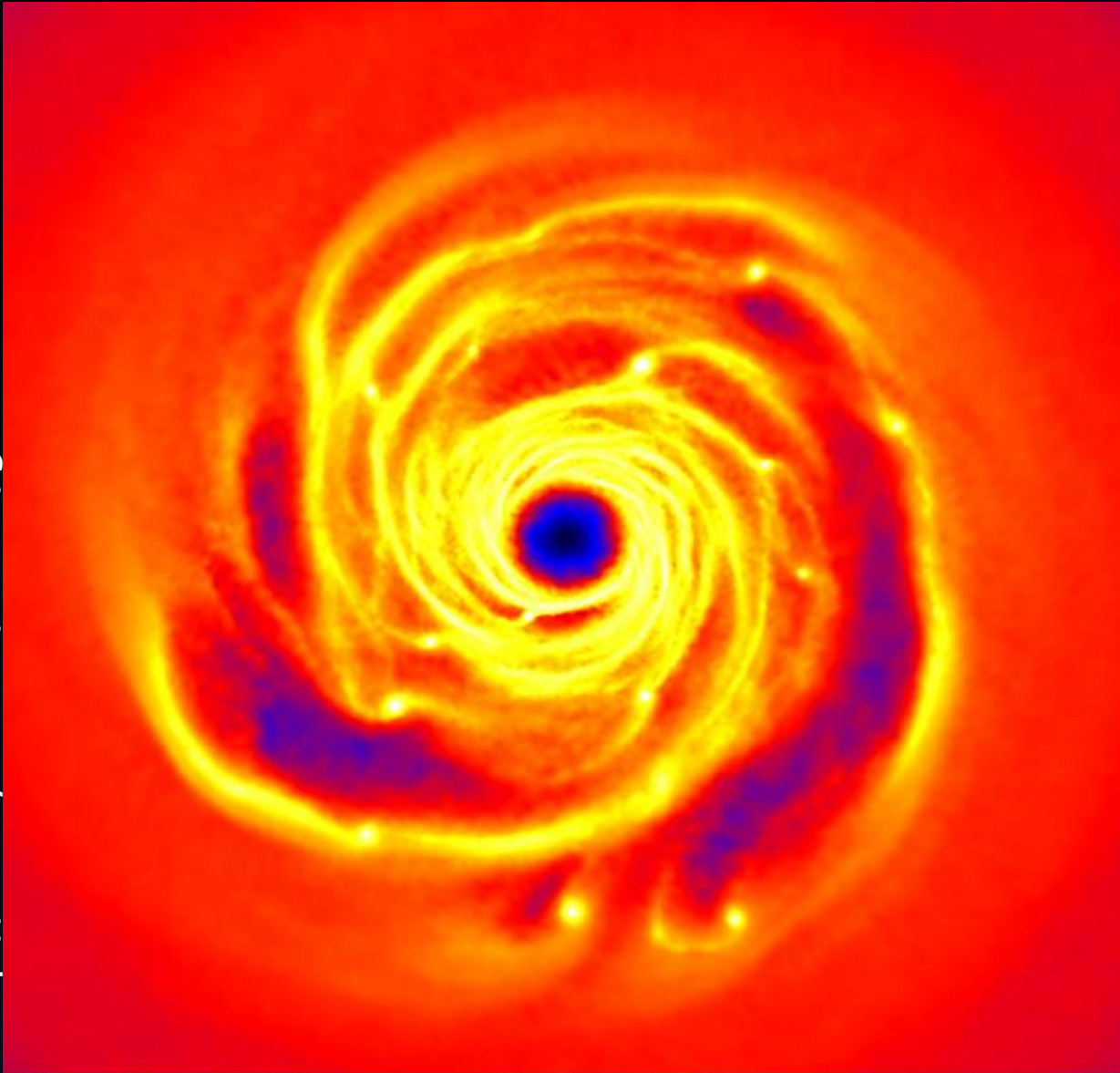


Search BETA

- 2926** EOD Planets
Planets with good orbits listed in the Exoplanet Orbit Database
- 25** Other Planets
Including microlensing and imaged planets
- 2951** Total Confirmed Planets
- 2503** Unconfirmed Kepler Candidates
- 5454** Total Planets
Confirmed planets + Kepler



Фрагментация диска



Крупные планеты могут образовываться в результате неустойчивостей в диске.

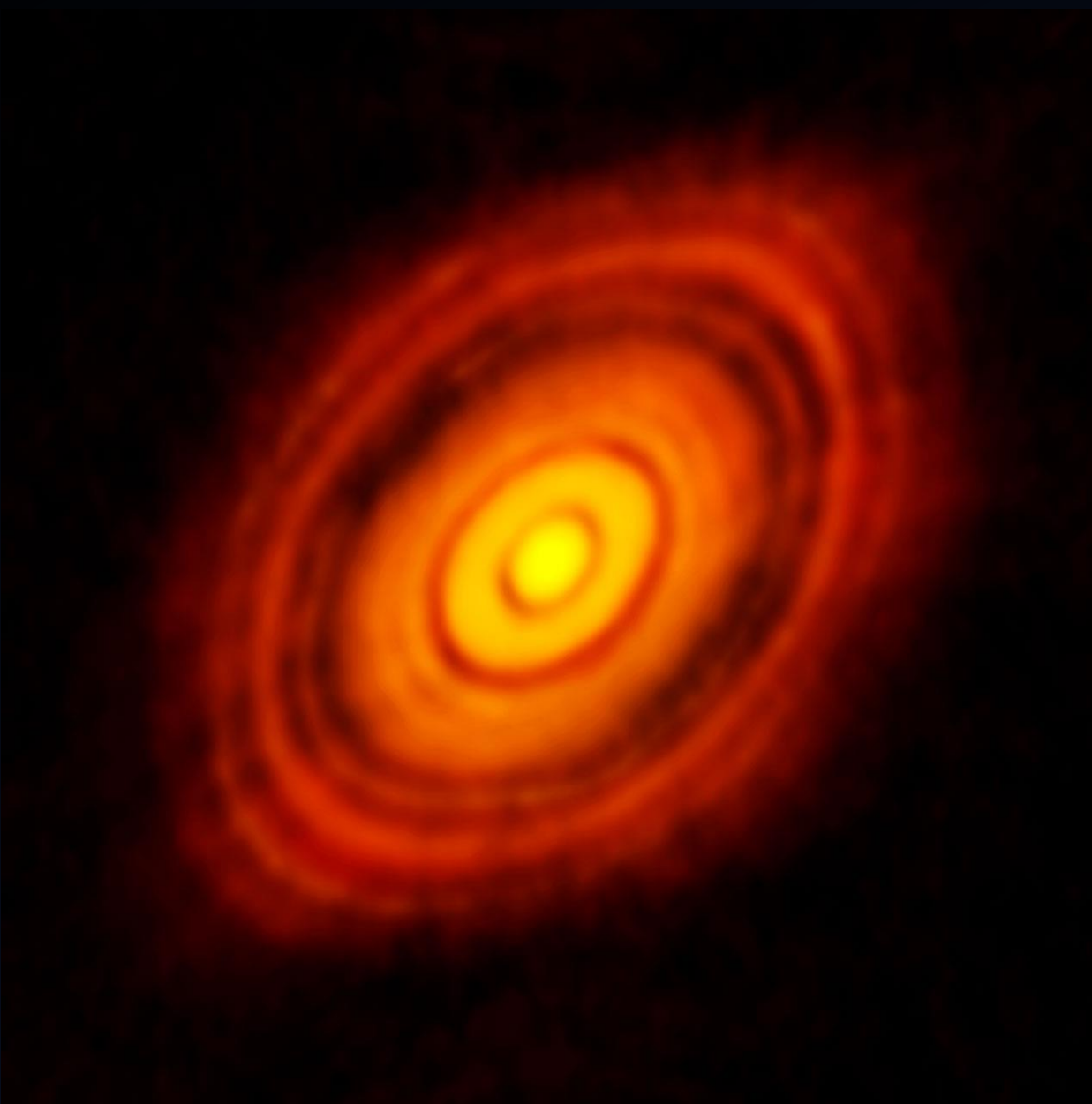
Это подтверждается некоторыми численными моделями.

Это происходит на значительном расстоянии от звезды.

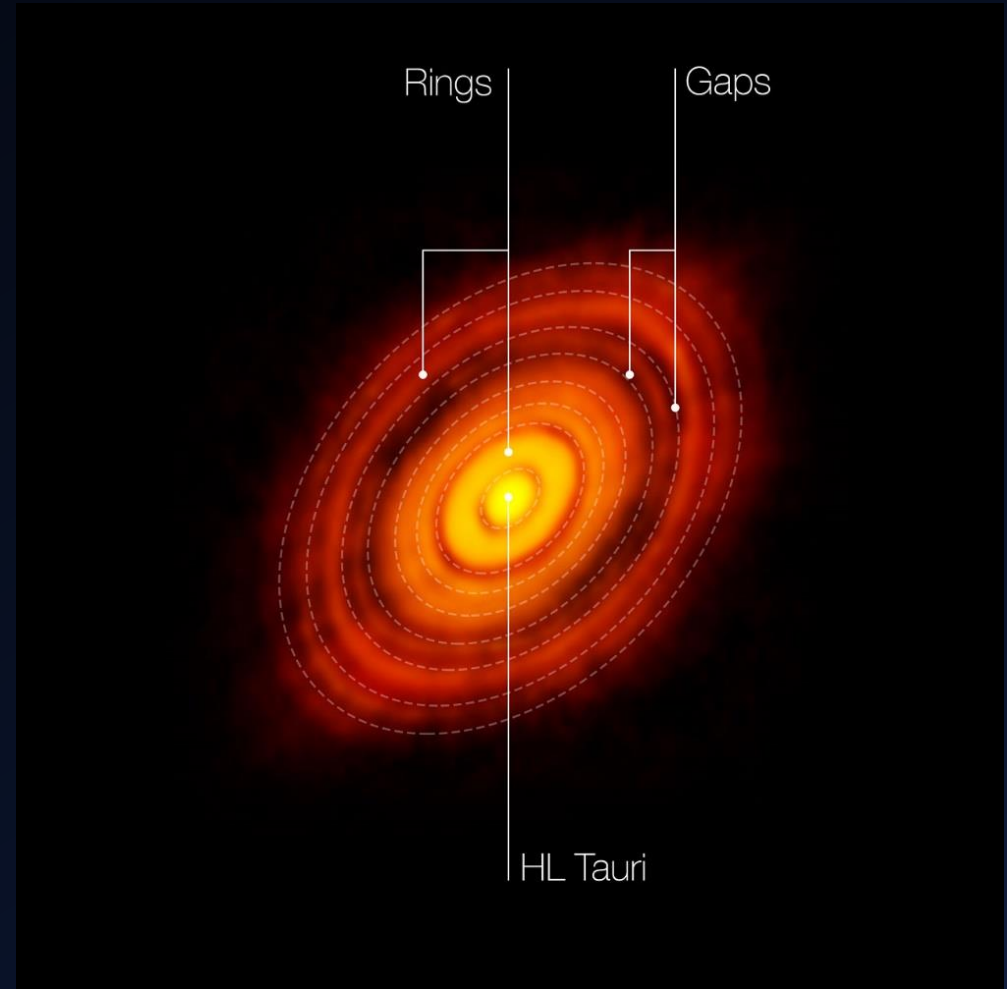
Планеты системы HR 8799 могли образоваться именно в таком сценарии.

Протопланетный диск HL Тельца

<http://www.eso.org/public/images/eso1436a/>



Темные кольца - результат действия массивных планет в диске



Место, где рождаются звезды и планеты

<http://www.eso.org/public/images/eso1436b/>

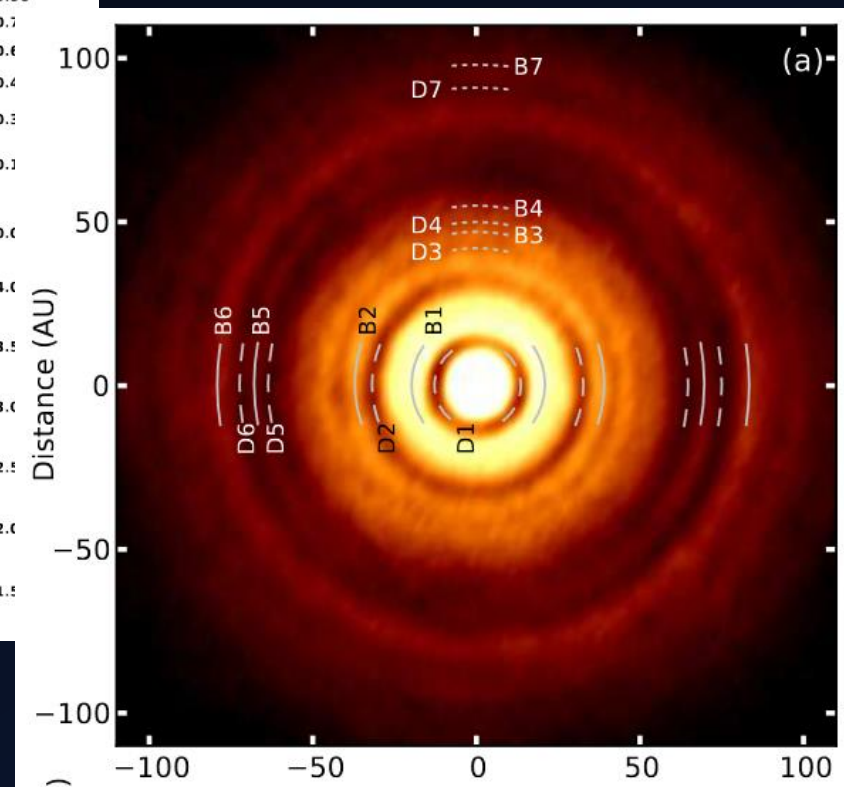
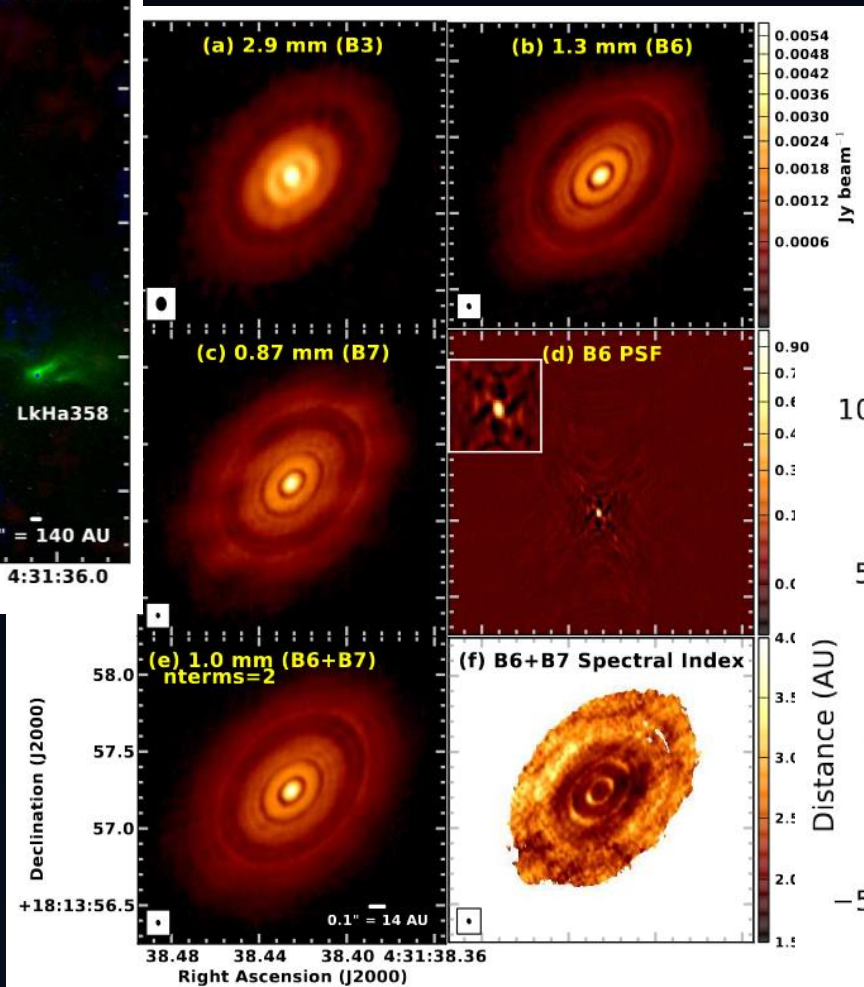
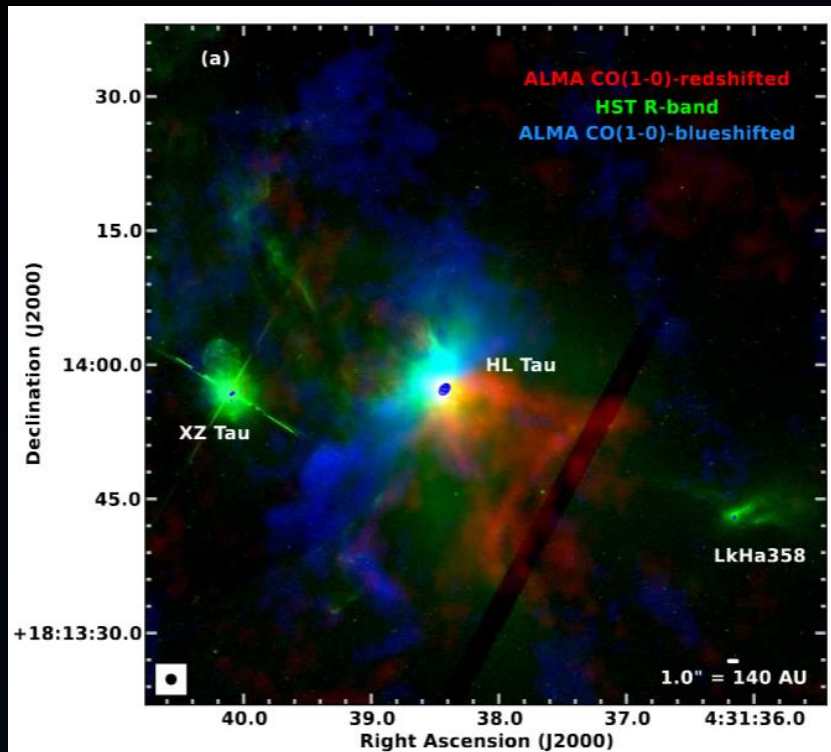


Наблюдения проводились на установке ALMA.

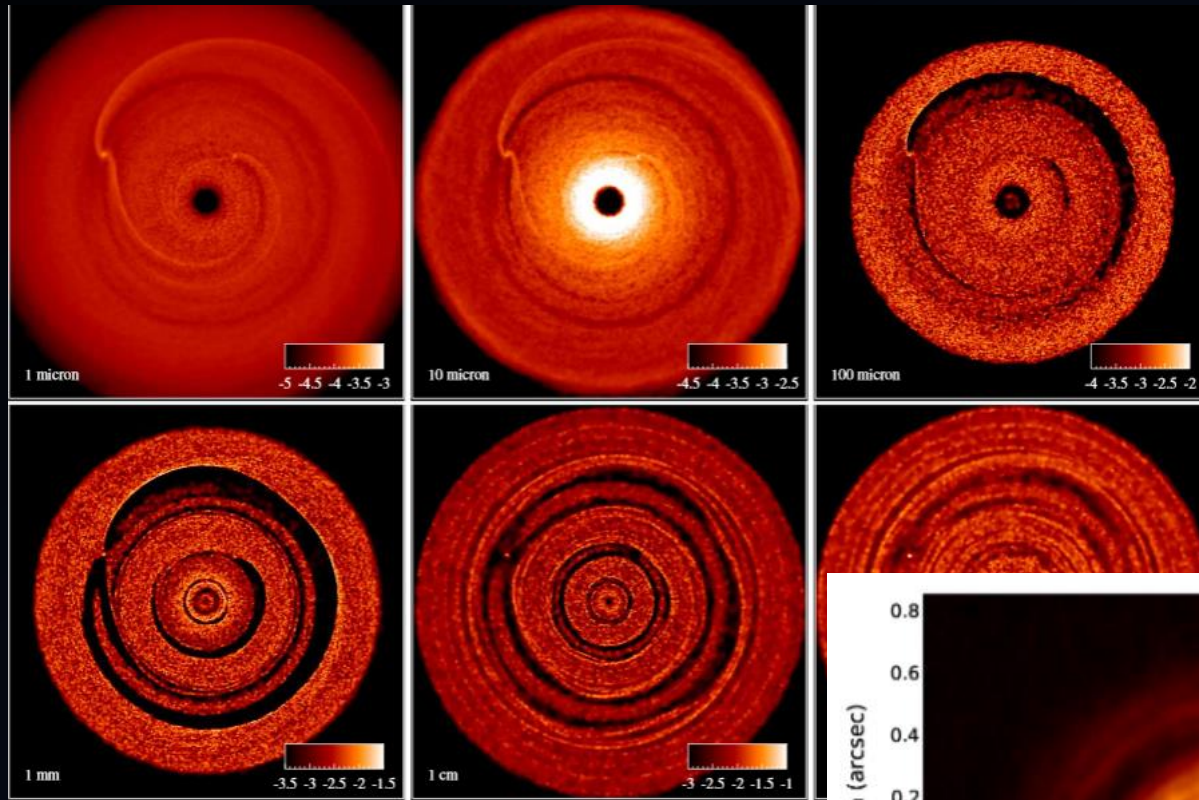


<https://public.nrao.edu/AlmaExtras/>

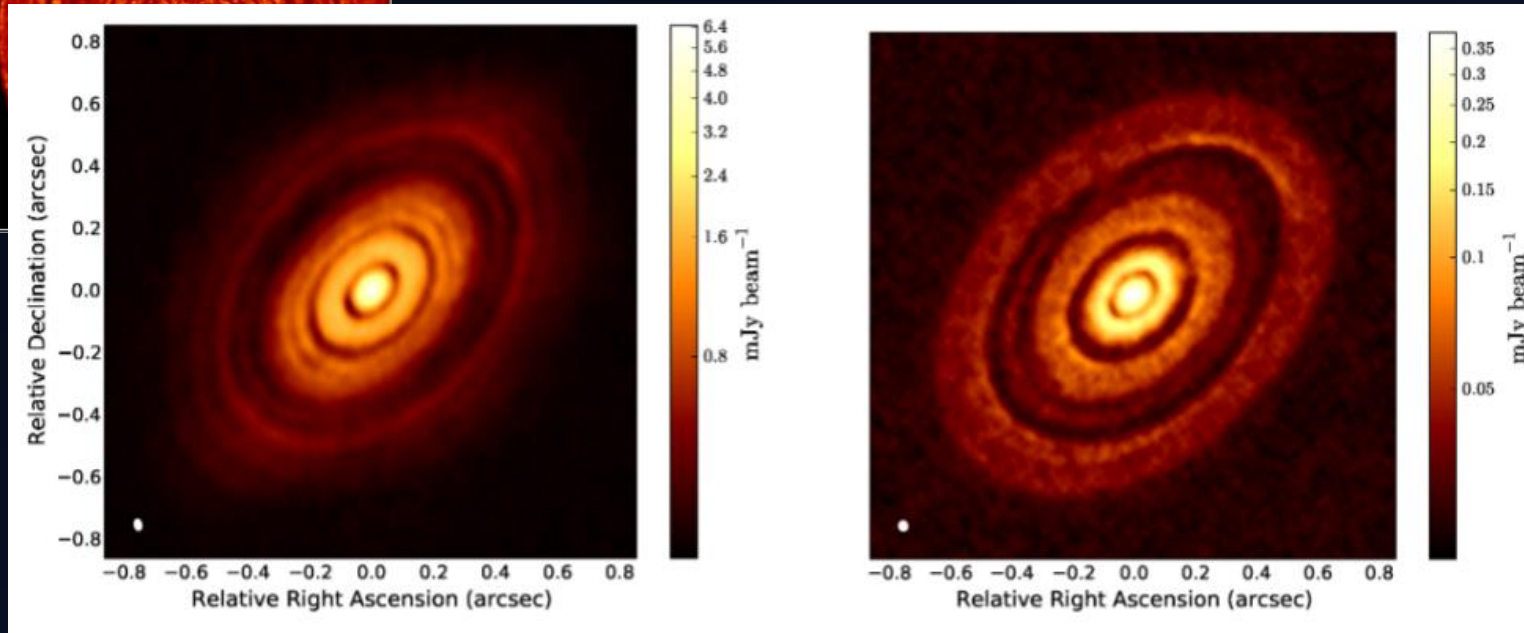
Протопланетный диск HL Tau



Моделирование диска HL Tau



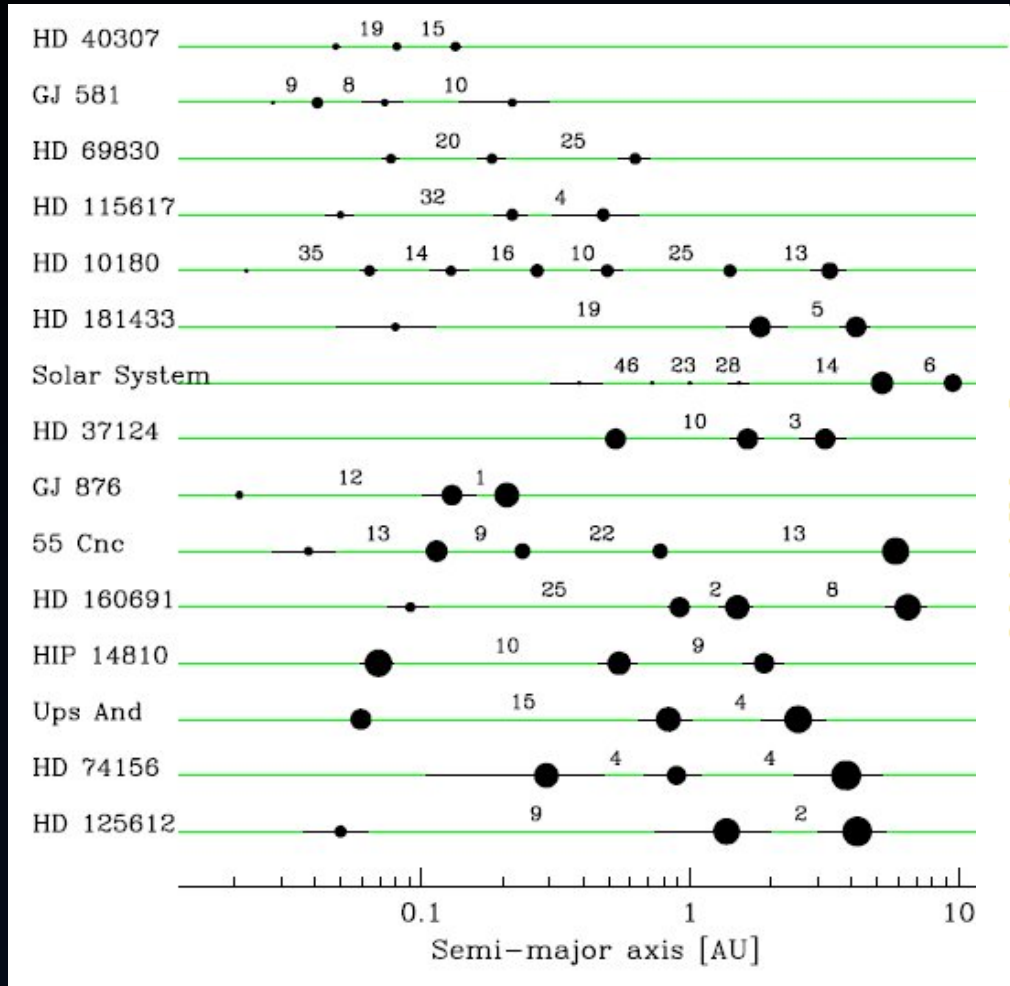
Три планеты с массами от 0.2 юпитерианских до 0.55. На нижнем рисунке сравниваются Результаты наблюдений (слева) с результатами моделирования.



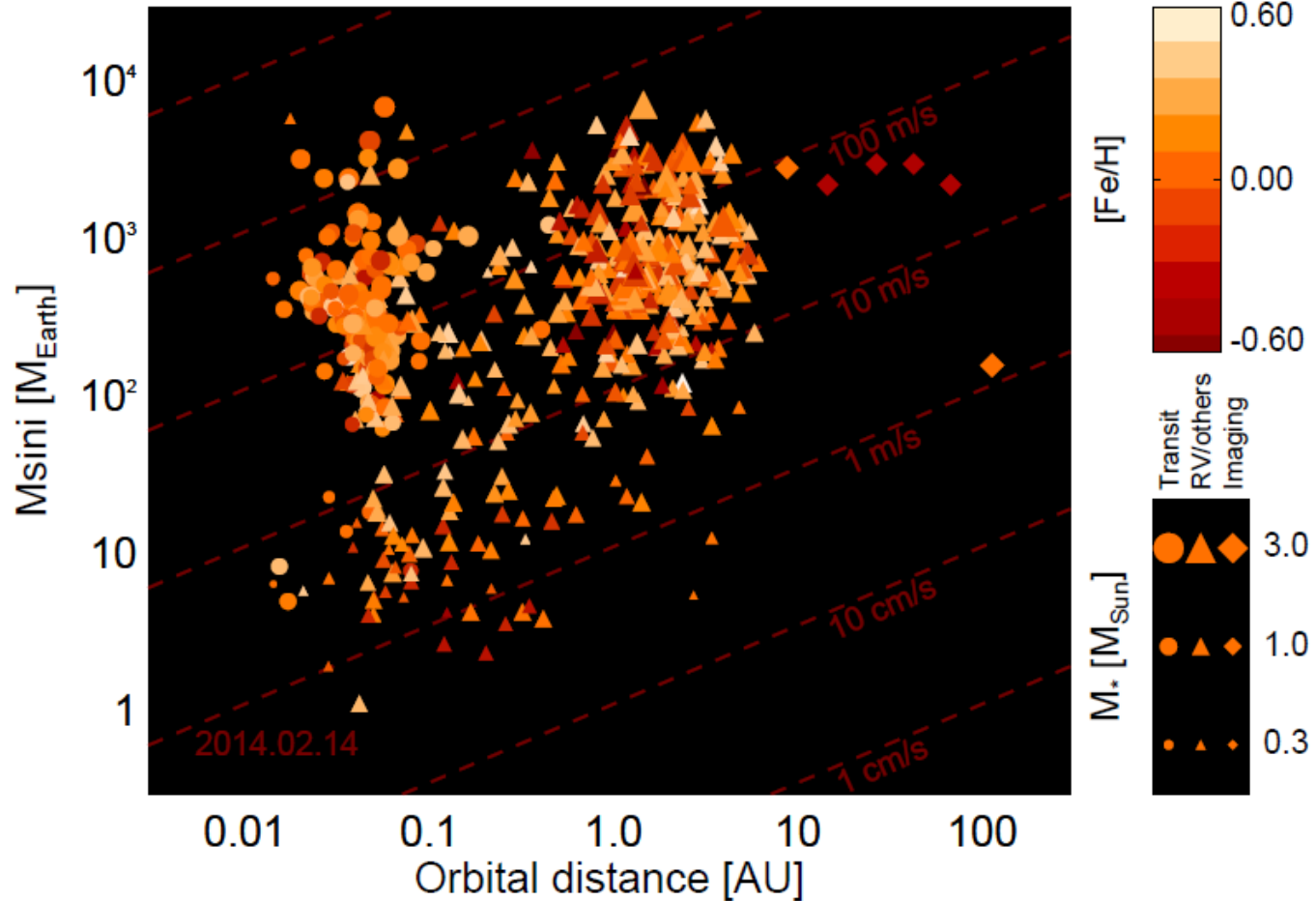
1507.06719

Газовые и ледяные планеты вблизи своих звезд

arXiv: 1011.4994

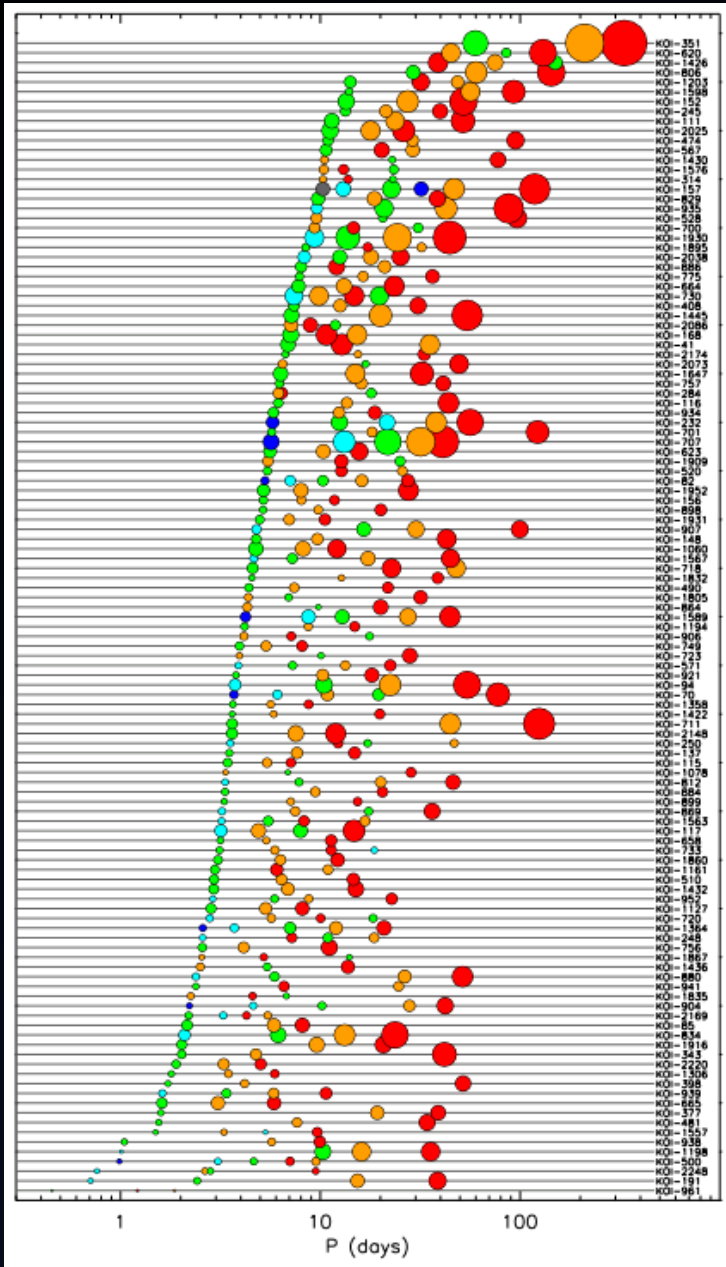


1405.3752



Есть много массивных (т.е. газовых!) планет там, где им было бы трудно образоваться

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.

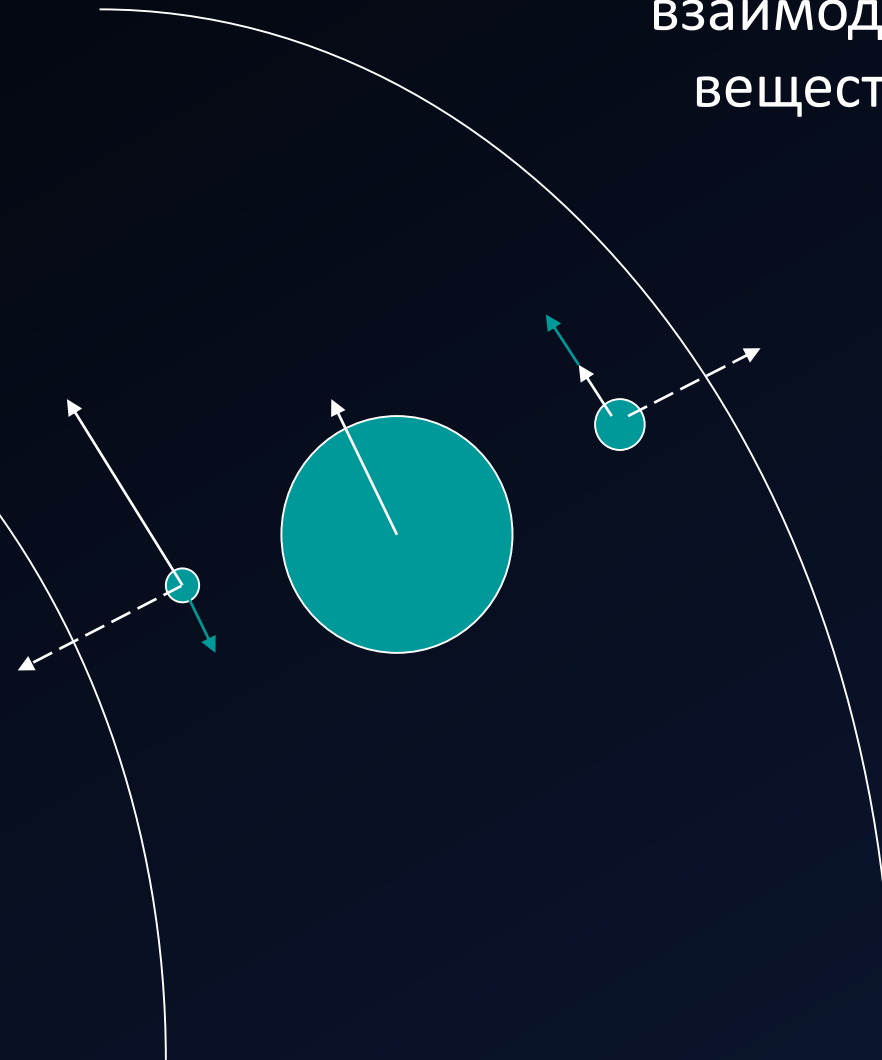
Еще важно, что более крупные планеты в системе лежат снаружи, а более мелкие – внутри.

Миграция планет

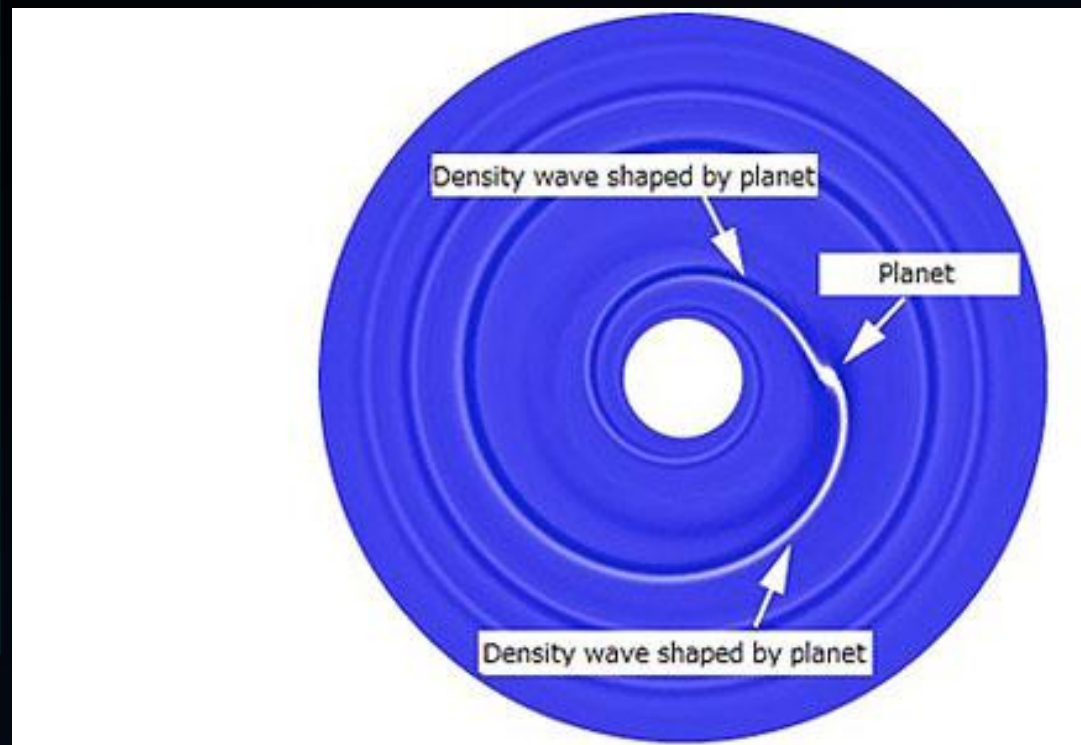
Планета может менять свою орбиту, за счет взаимодействия с веществом диска.

Взаимодействие с внешними частями приводит к торможению планеты и ее движению внутрь. С внутренними – наоборот.

Чаще планеты в итоге двигаются ближе к звезде.

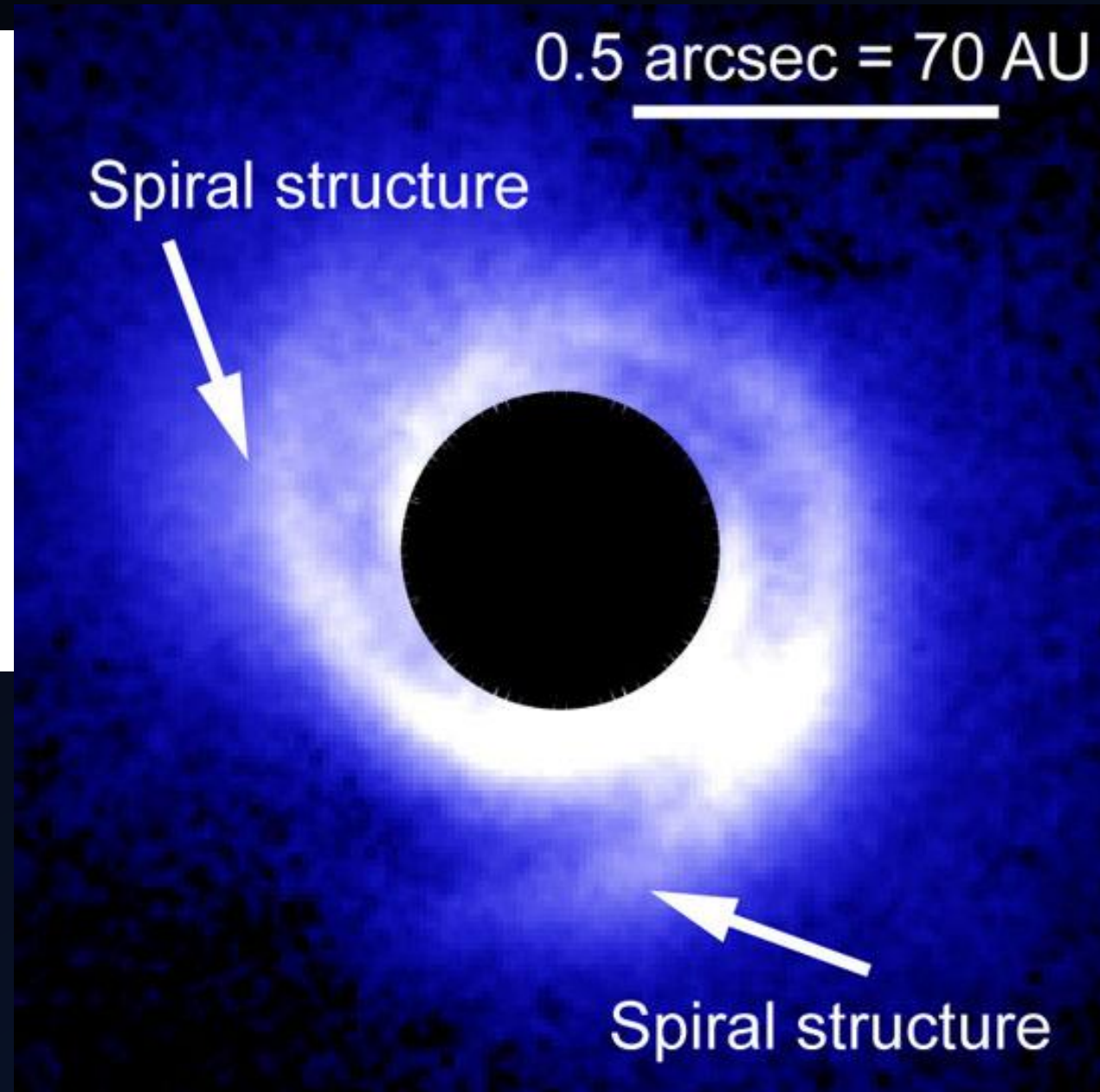


Структуры в диске

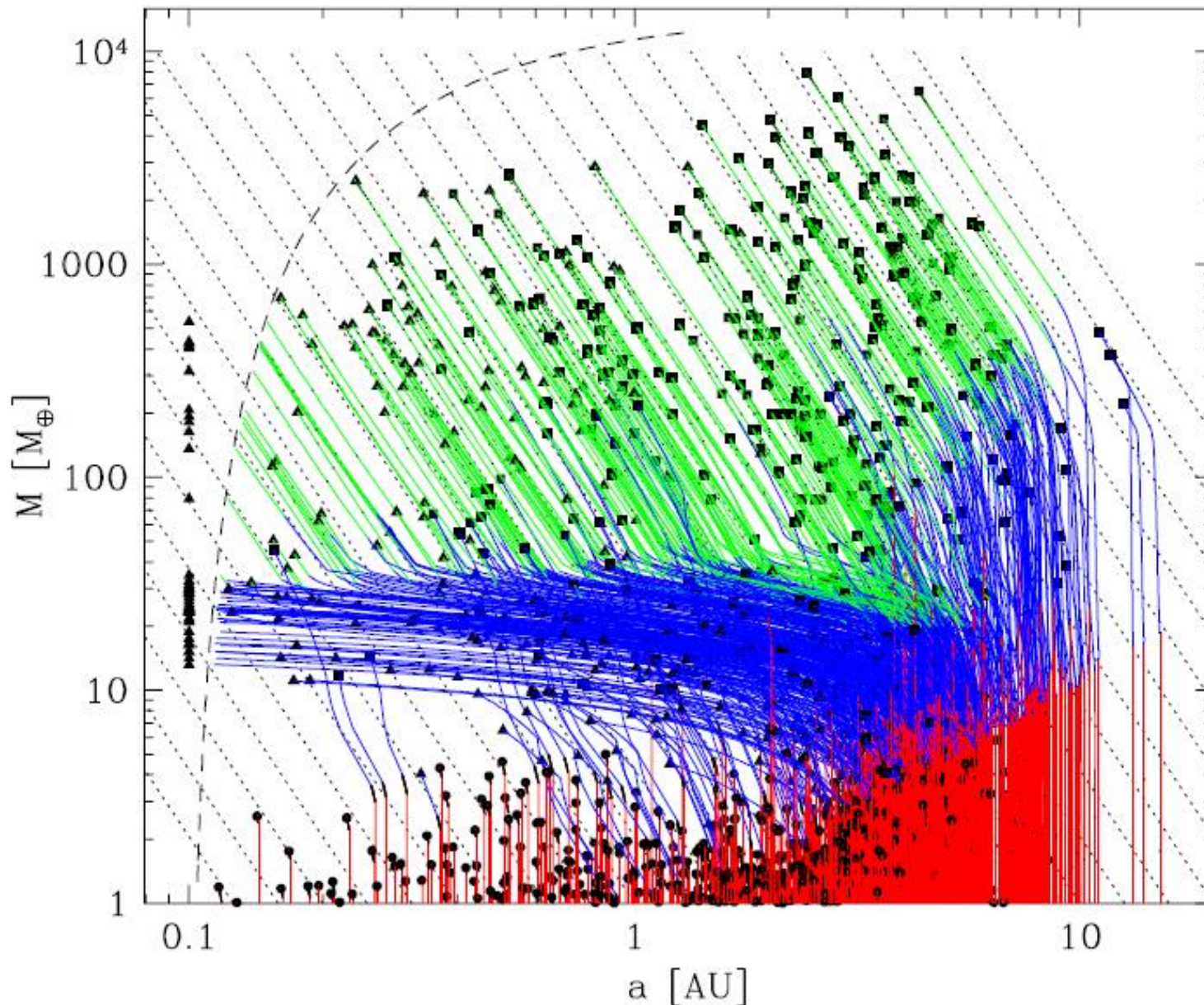


Планета рождает в диске структуру и взаимодействует с ней.

Наблюдения на Субару в 2012 г. позволили увидеть такие спирали.



Моделирование миграции

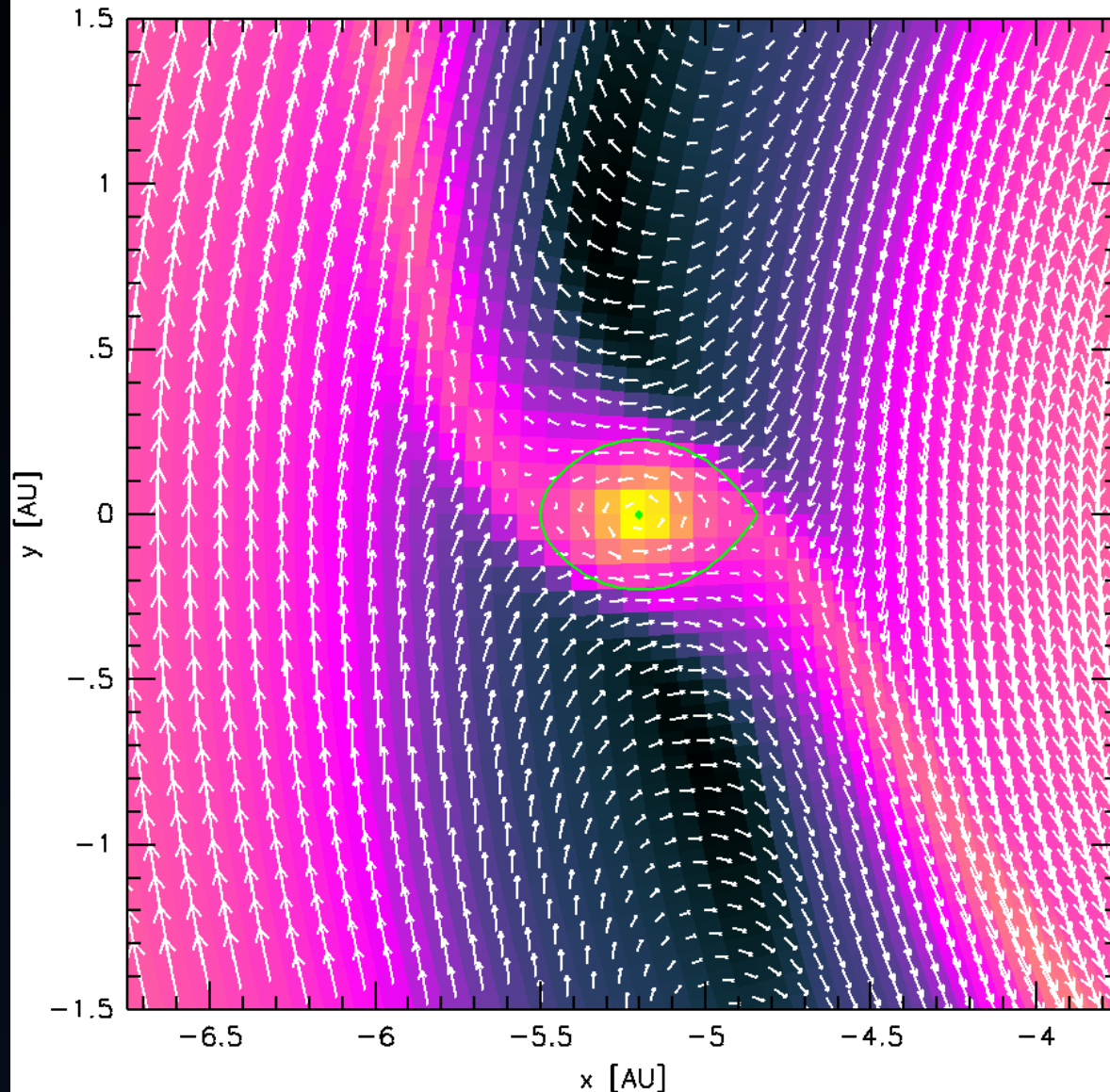


Миграция настолько важна, что может полностью поменять вид системы.

Показано, как планеты меняют свою массу и орбиту.

Ясно выделяются три типа миграции.

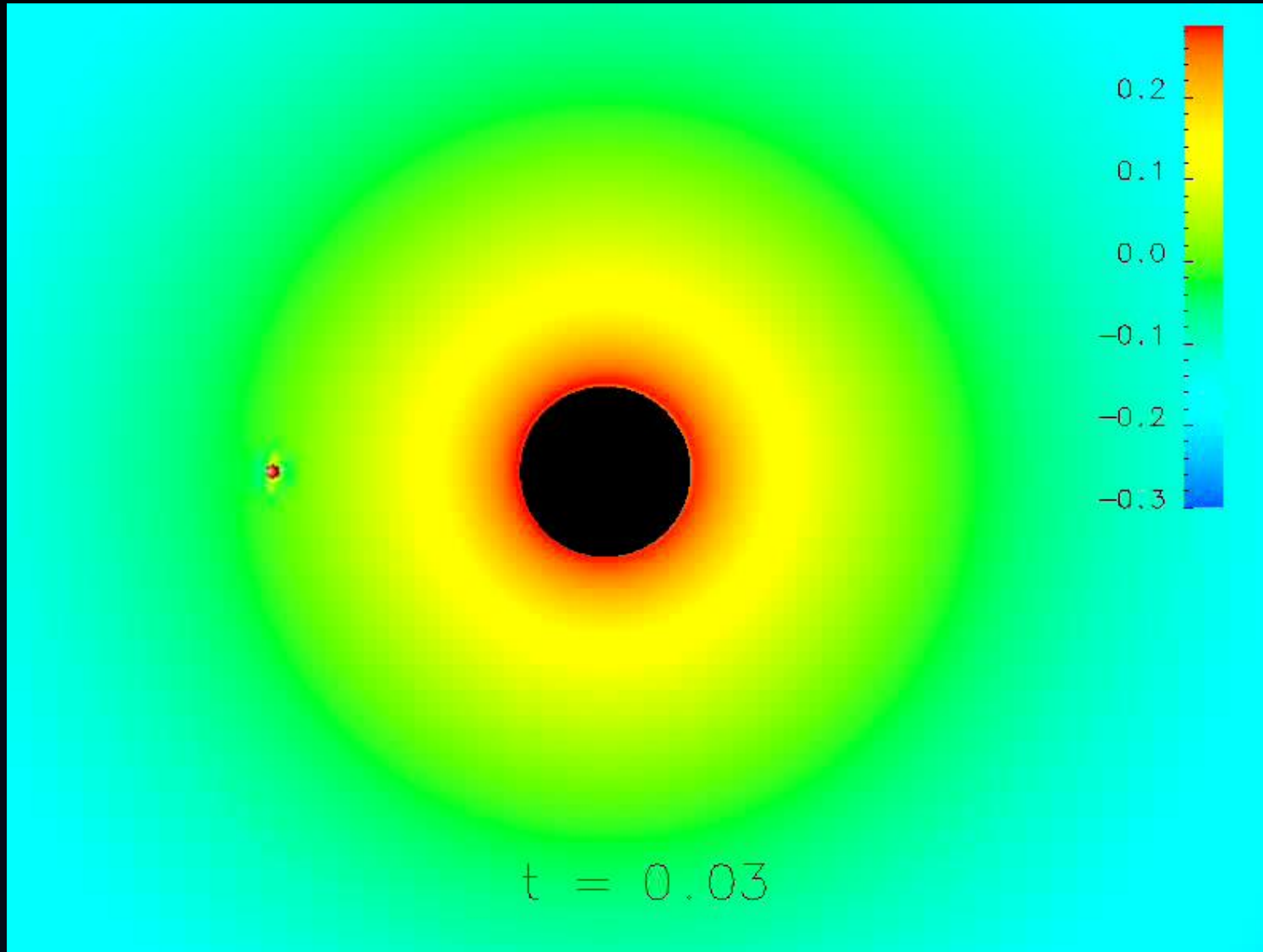
Щели и мосты



Аналитические модели и численное моделирование показывают, что планета будет «отталкивать» вещество, в результате чего в диске образуется щель. Однако сама планета служит «мостом», перенося вещество и угловой момент.

Численное моделирование

www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley/



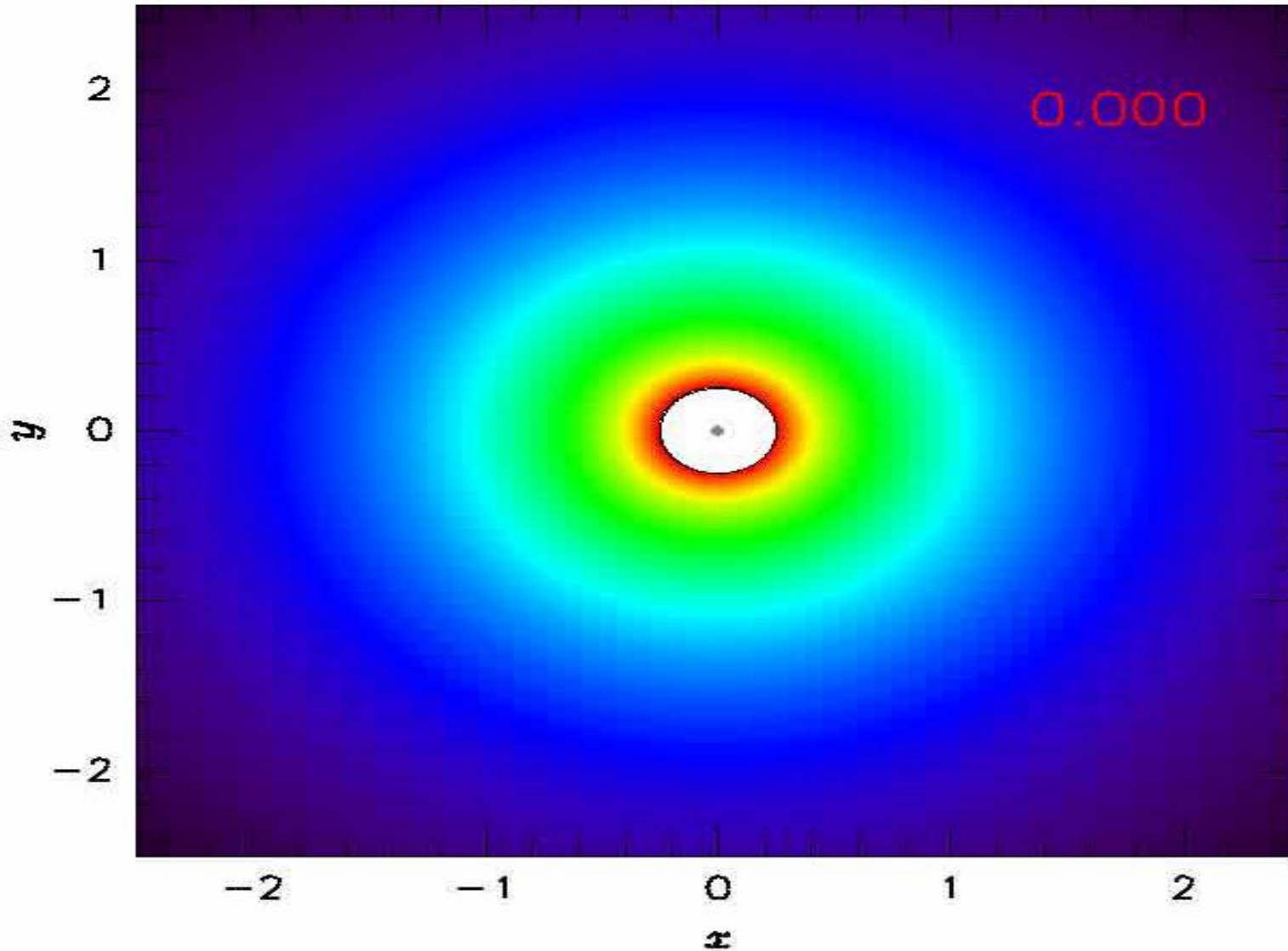
Планета движется против часовой стрелки, но выбрана такая система отсчета, в которой мы видим ее покоящейся.

Возникают спиральные волны, и постепенно открывается щель.

Щель становится хорошо заметной, когда ее ширина достигает толщины диска.

Численное моделирование

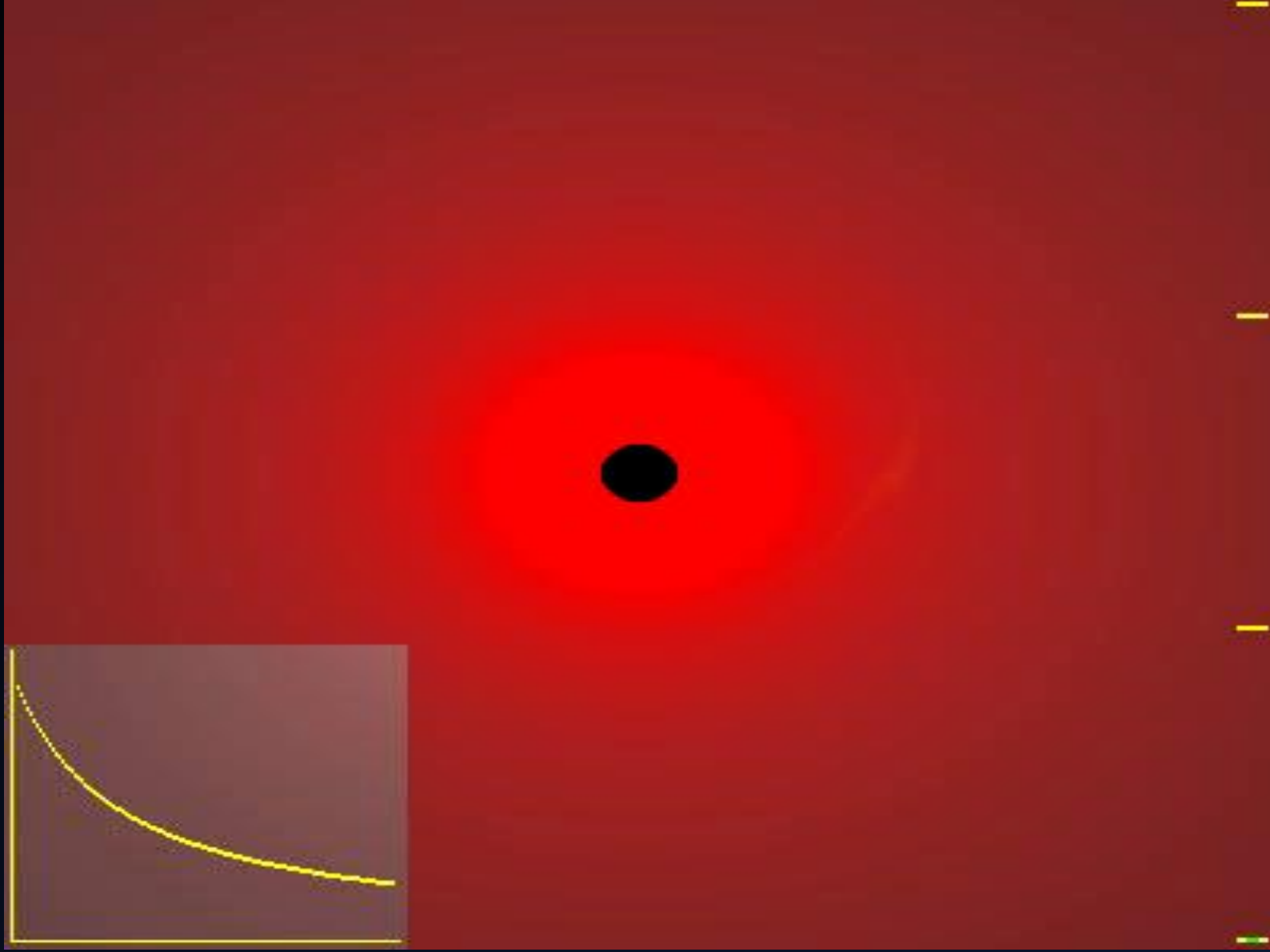
www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley/



По мере хода времени планета увеличивает свою массу. Именно поэтому ее влияние на диск становится все заметнее.

Численное моделирование

Armitage



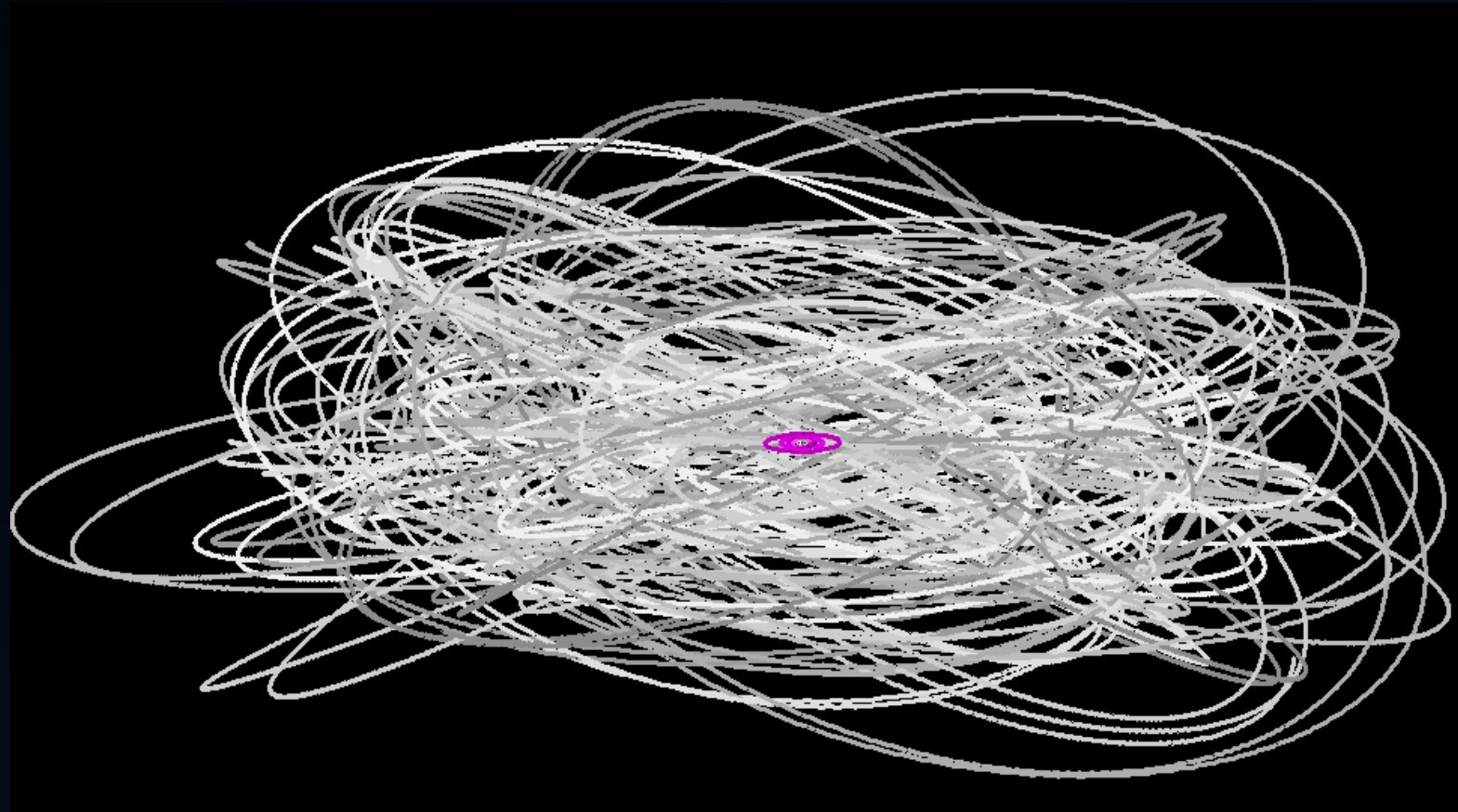
http://jila.colorado.edu/~pja/planet_migration.html

Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

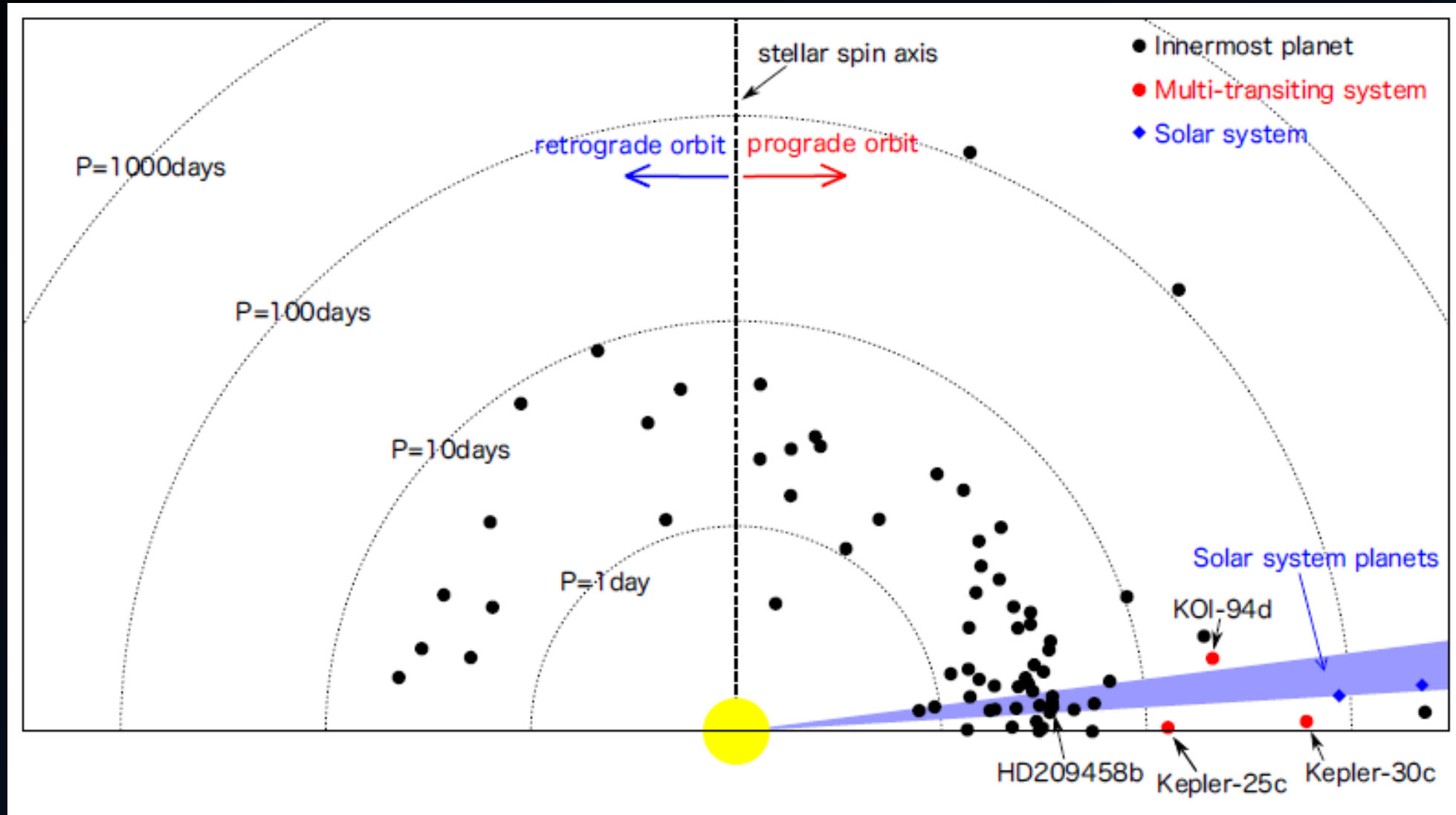
$$e_{\max} \approx \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0}$$



Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 г., а затем в 1962 г. был описан Козаи для астероидов.

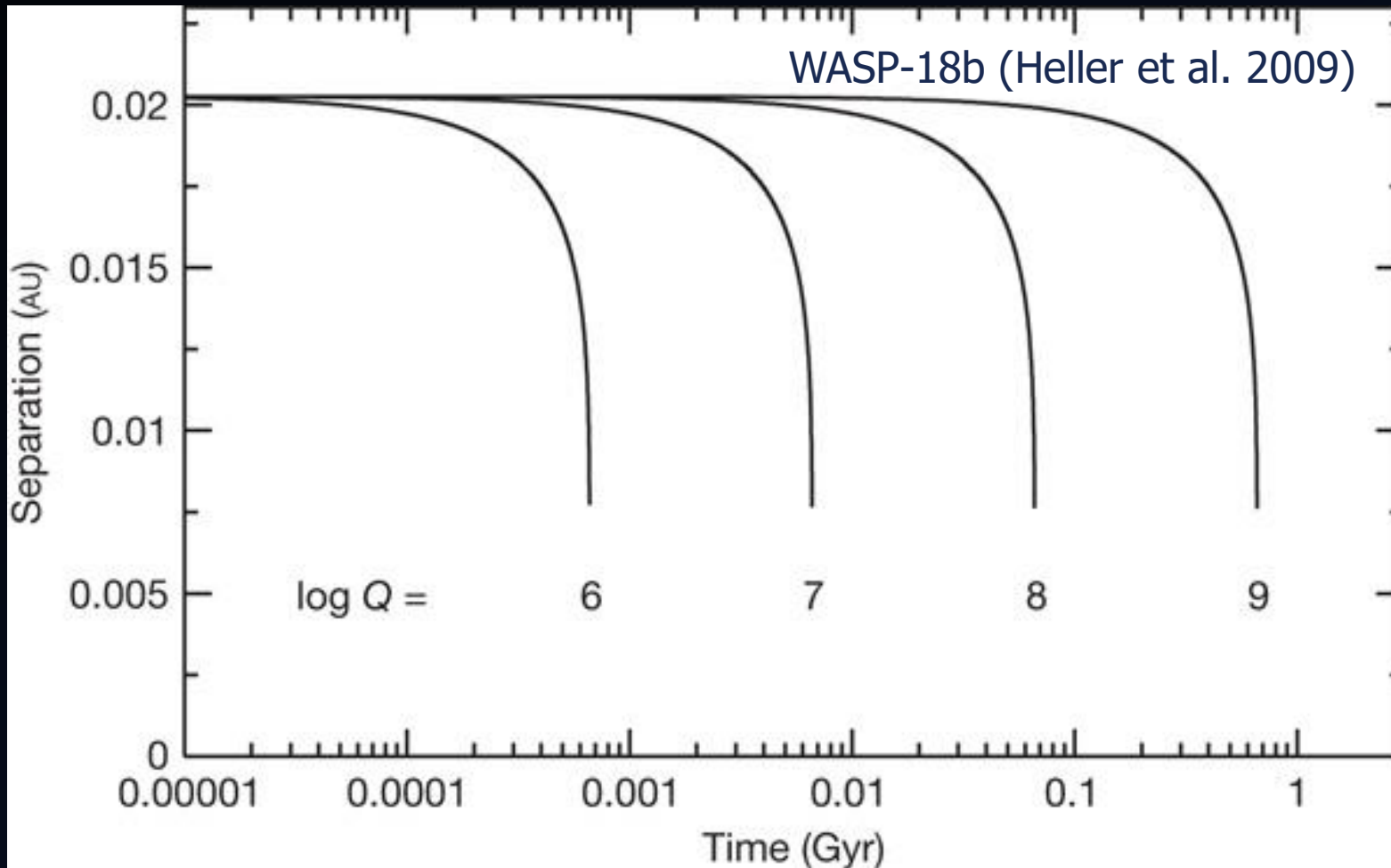
Распределение планет по ориентации орбиты

Есть планеты с полярными и даже обратными орбитами.



Приливы

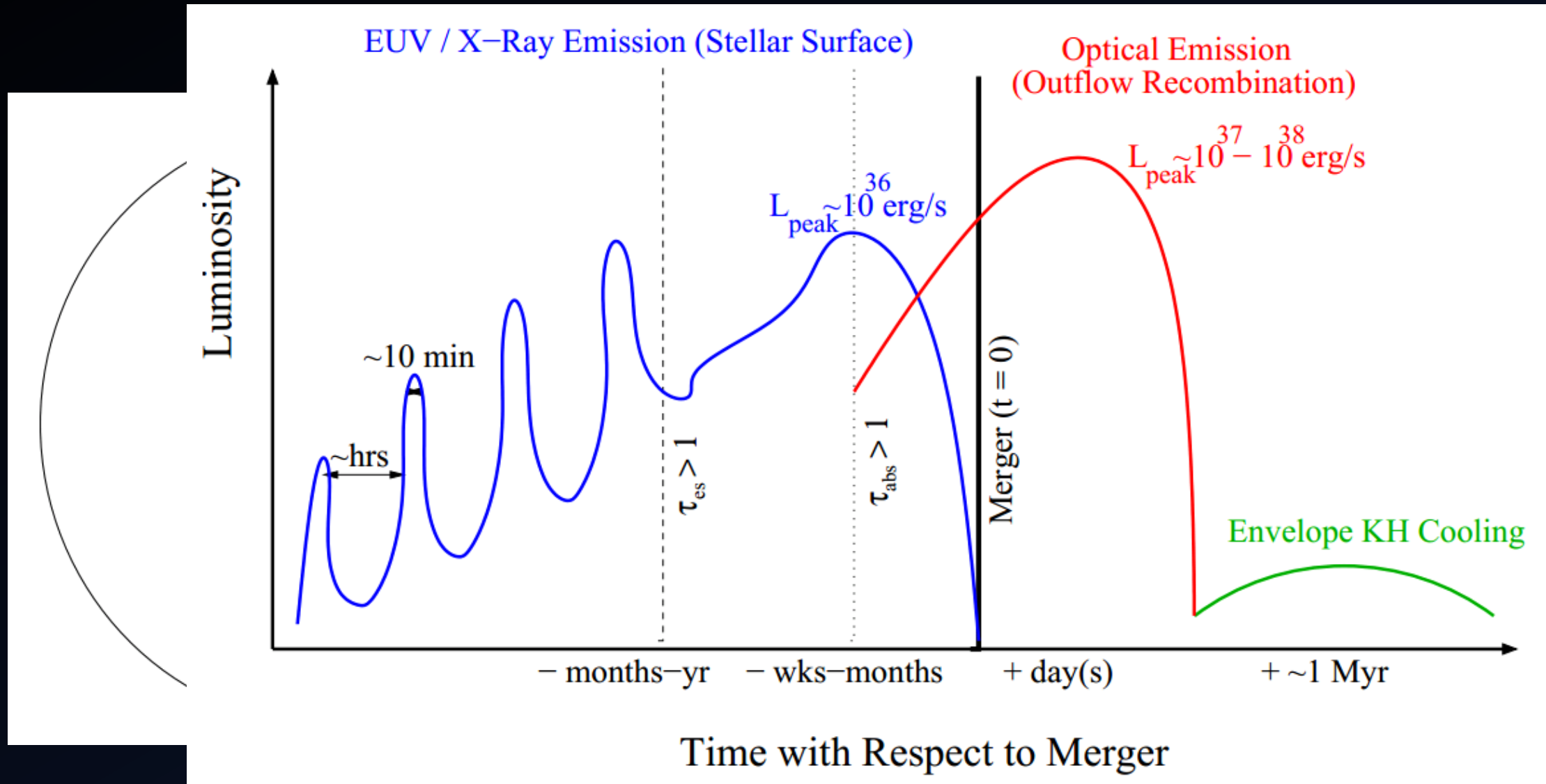
Планеты и звезды (а также планеты друг с другом) могут активно взаимодействовать за счет приливов. Это будет приводить к изменению орбиты и скорости собственного вращения.



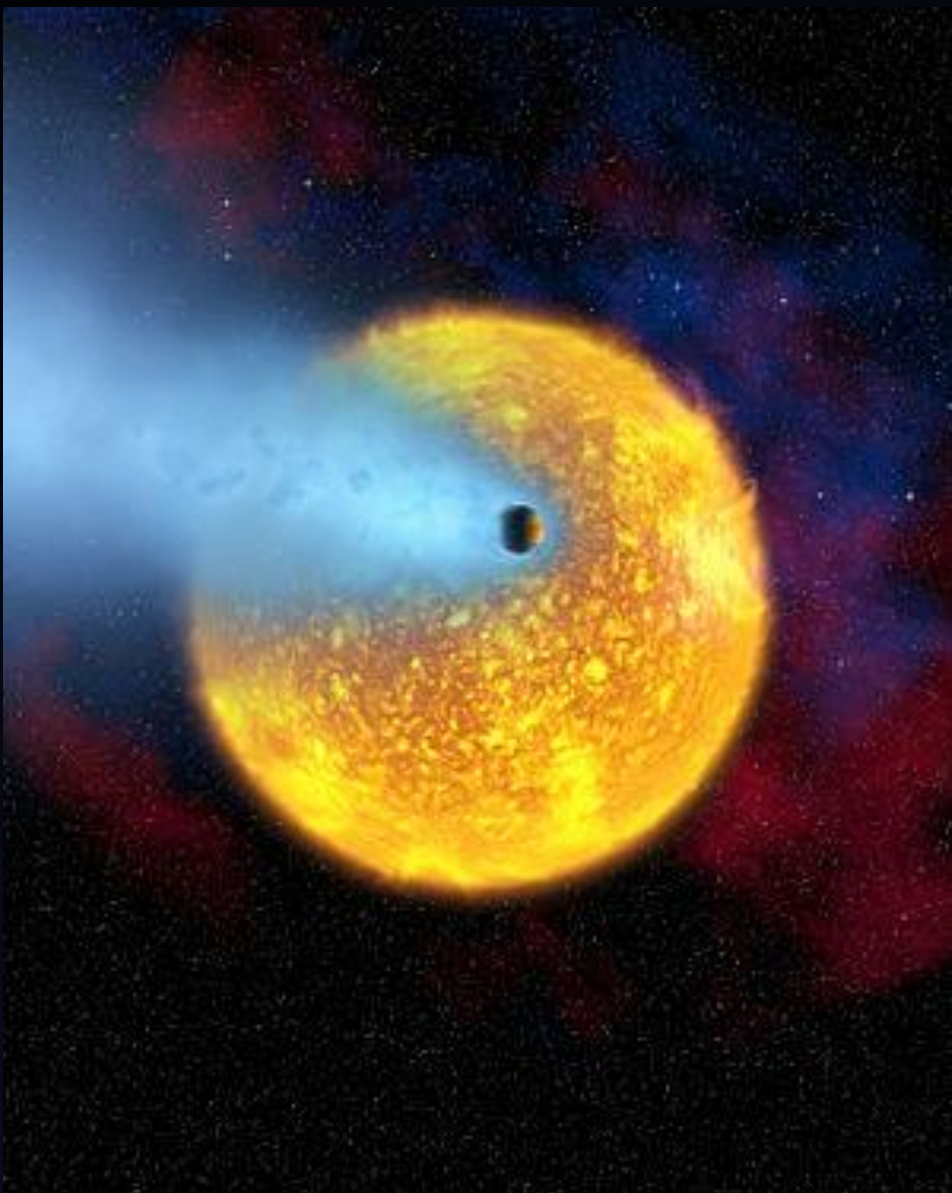
При орбитальном периоде короче нескольких дней (орбита менее 0.02 а.е.) невозможно равновесие, и орбита планеты постоянно сокращается, пока планета не будет разрушена и/или поглощена.

Слияния звезд и планет

Раз в несколько лет в Галактике.



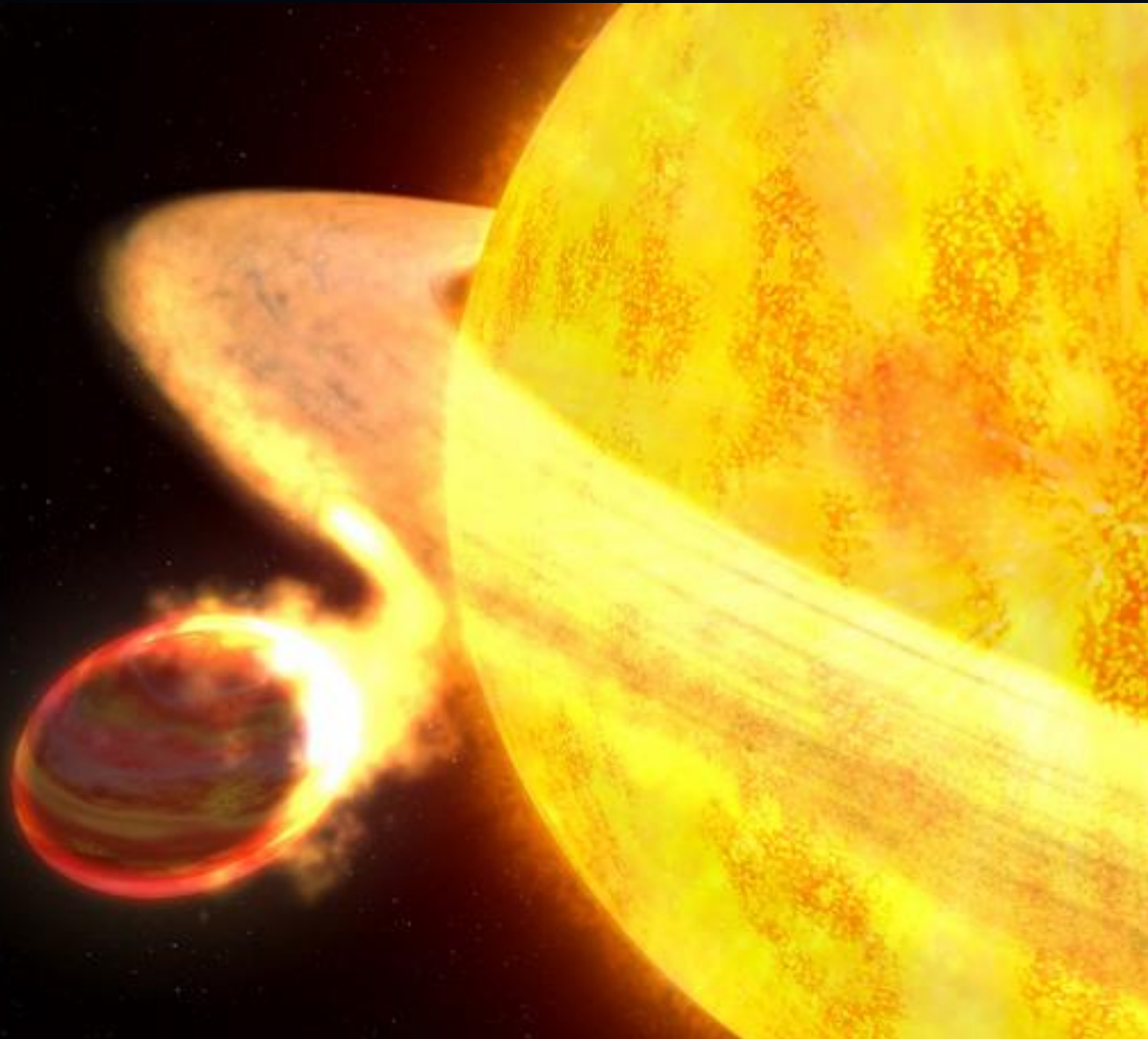
Испарение HD209458 b



Самые «горячие» планеты могут терять свою газовую оболочку из-за прямого нагрева, а также из-за разогрева приливами.

Поглощение WASP-12b

<http://www.universetoday.com/64739/hubble-confirms-star-is-devouring-hot-exoplanet/>



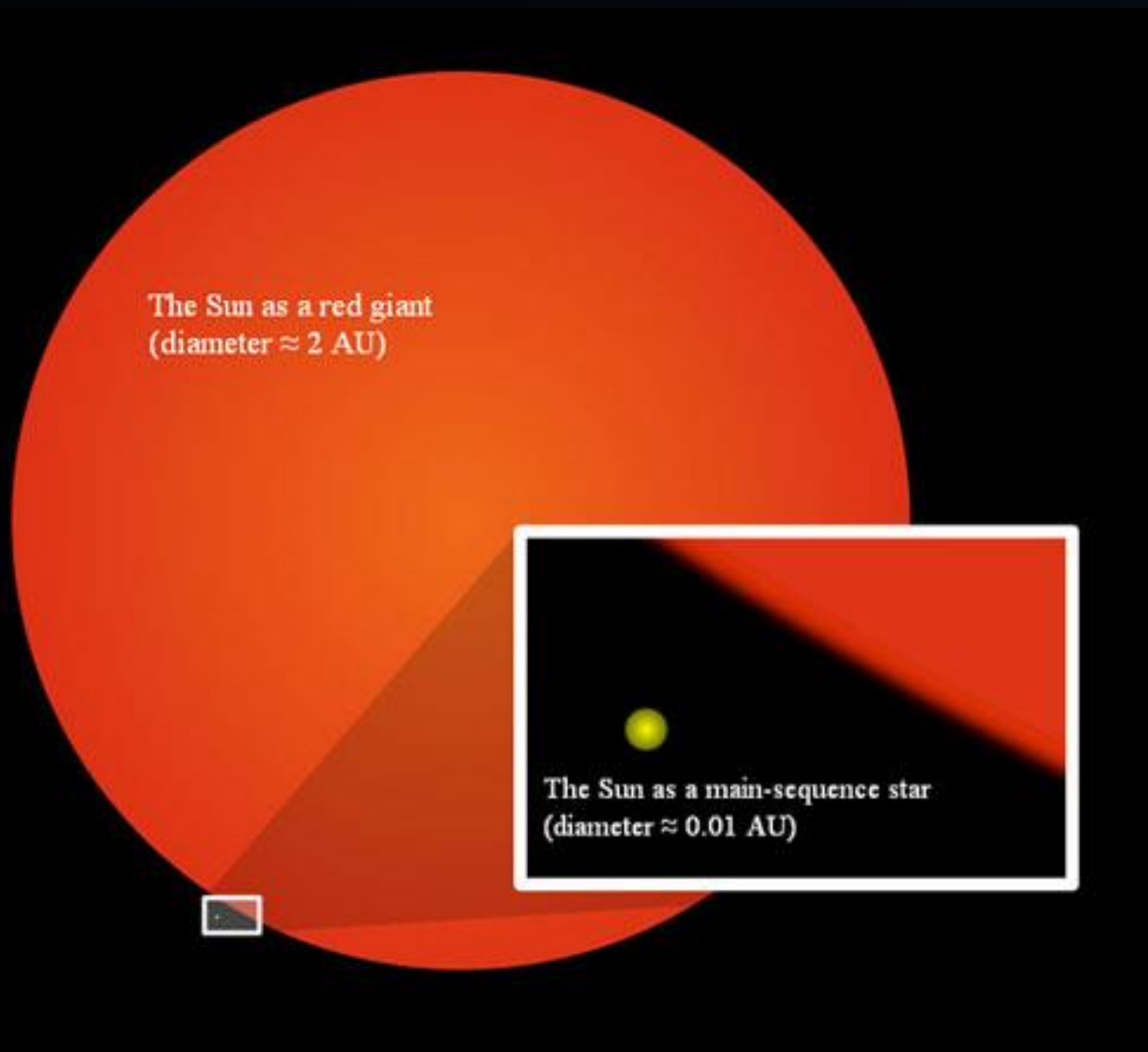
Приблизившись совсем близко к звезде, планета может начать терять свое вещество.

Планета WASP-12b является таким примером (1005.3656). Удалось увидеть поглощающее облако, состоящее, в том числе, и из тяжелых элементов.

Превращение звезды в красного гиганта

Звездная эволюция отражается на планетах.

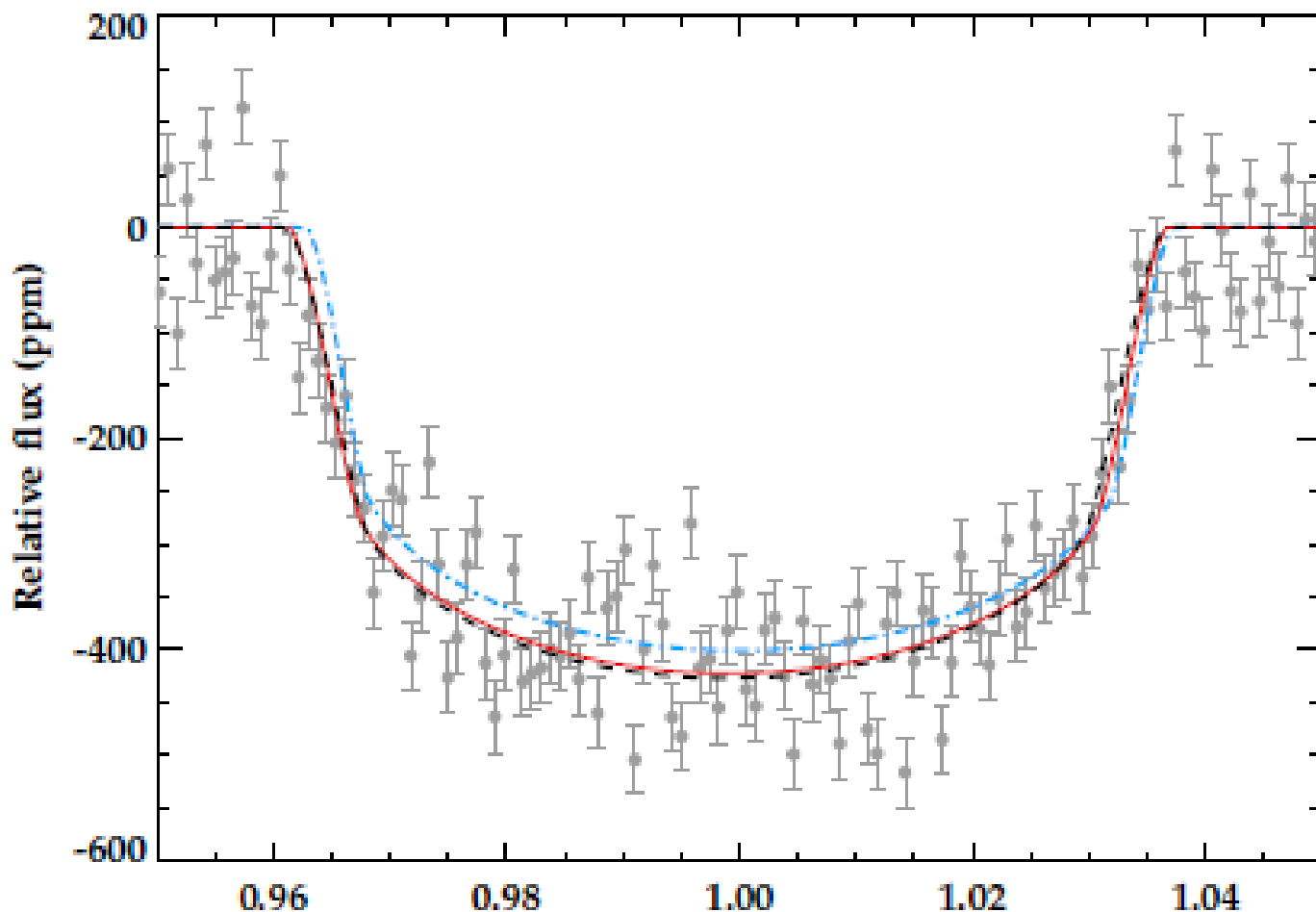
При превращении звезды в красного гиганта часть планет оказывается поглощенными.



Планеты вокруг звезд-гигантов

Известно несколько десятков таких планет. Они особенно интересны в связи с пониманием судьбы планетных систем на поздних стадиях эволюции звезд.

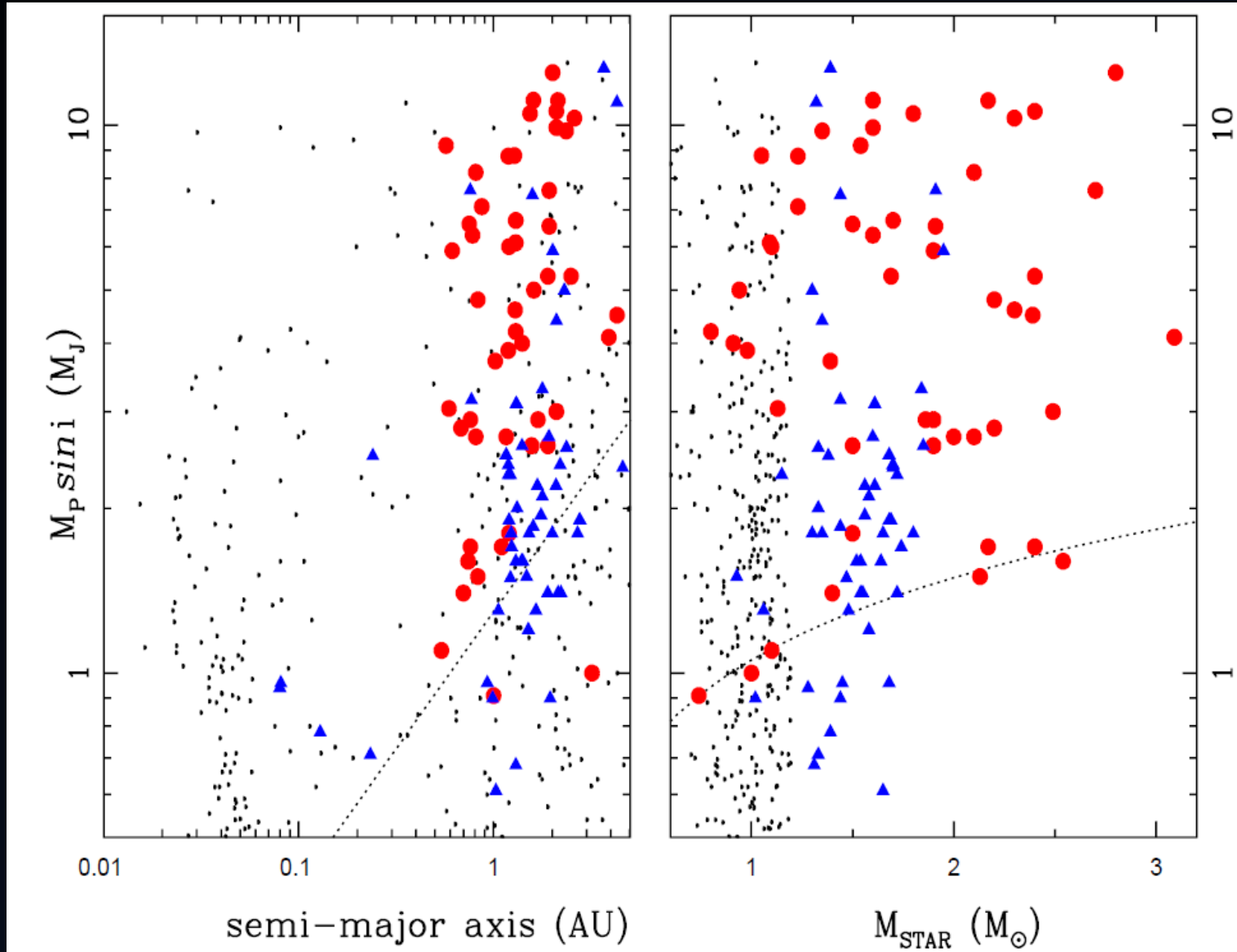
Кеплер-91



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

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

Статистика планет вокруг гигантов



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

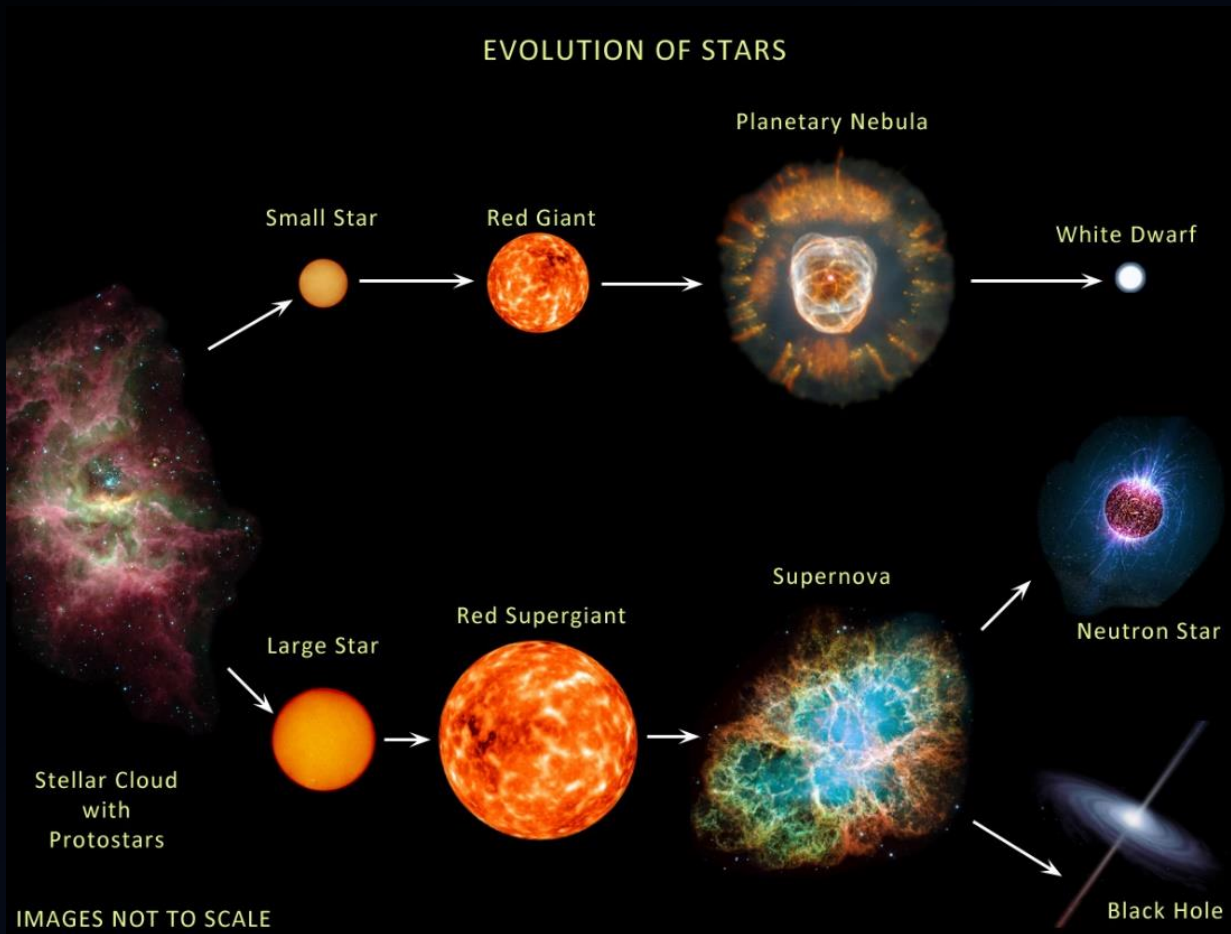
Концентрация планет на орбитах 0.5-0.9 а.е. может быть связана с приливными эффектами.

Планеты массивны, и авторы выдвигают гипотезу, что масса планет могла расти за счет вещества звезды.

Орбиты более круглые – за счет взаимодействия.

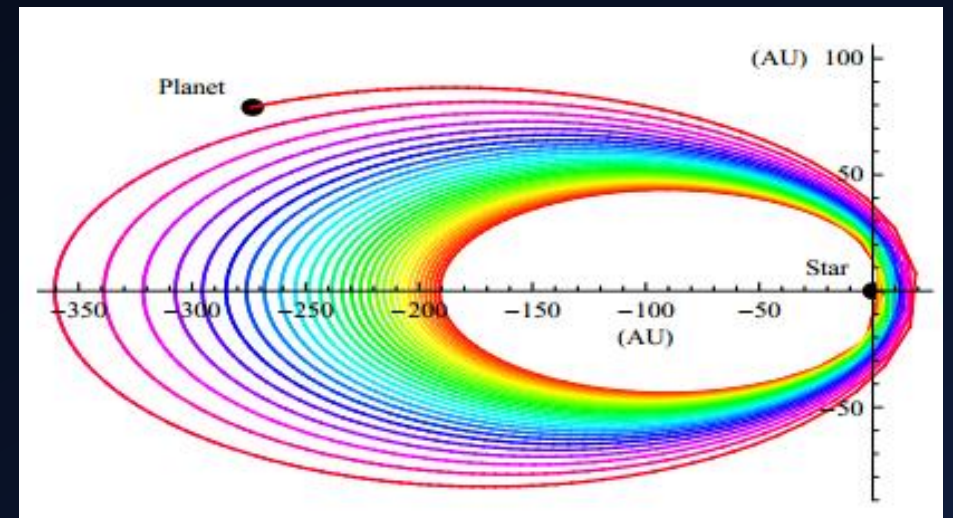
Выброс планет звездами

Что происходит с планетами когда звезда теряет массу?



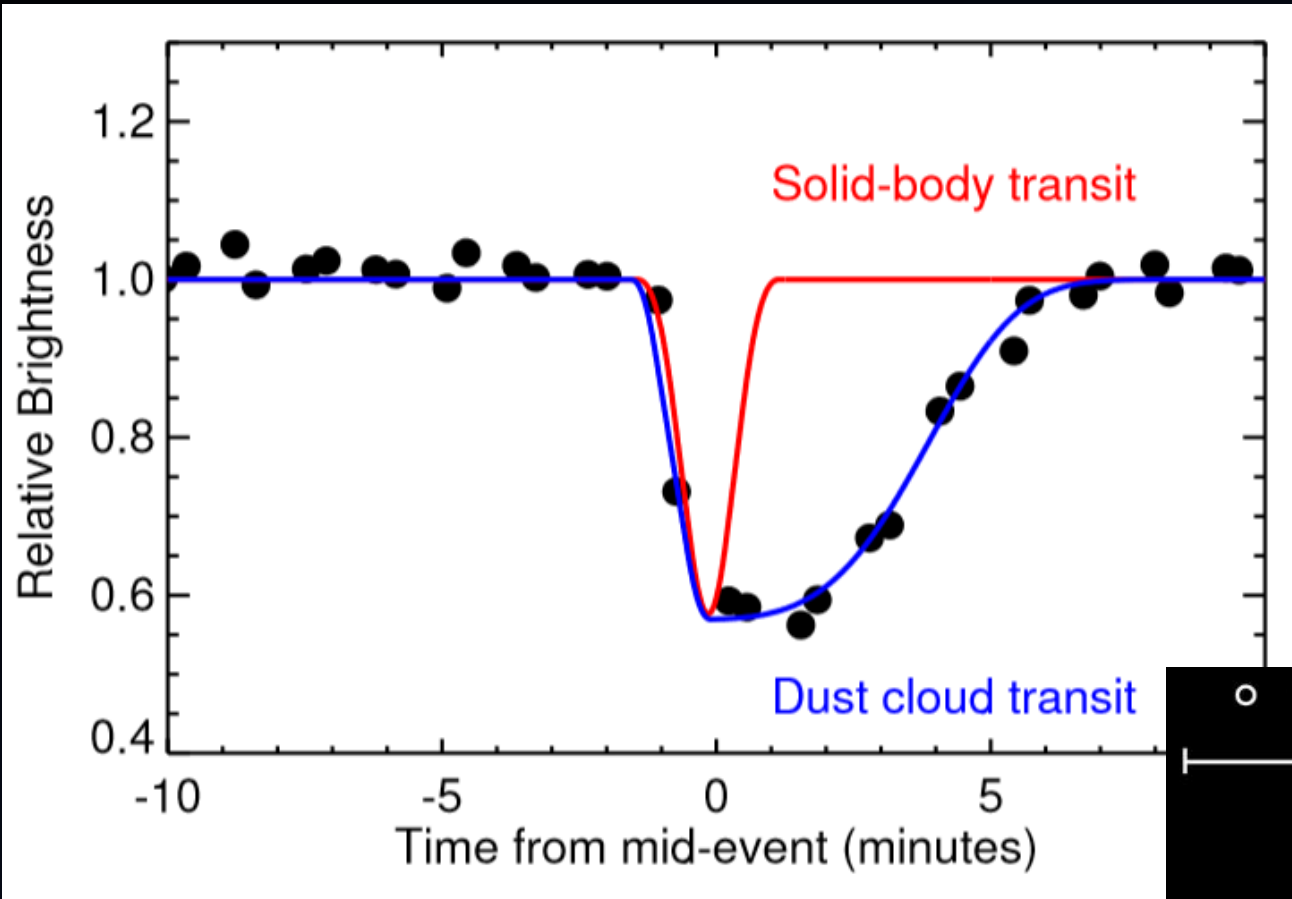
У звезд типа Солнца планеты на орбитах, как в СС, останутся в системе, но орбиты будут шире. Поэтому и наблюдают планеты у белых карликов

Далекие планеты могут «улетать»



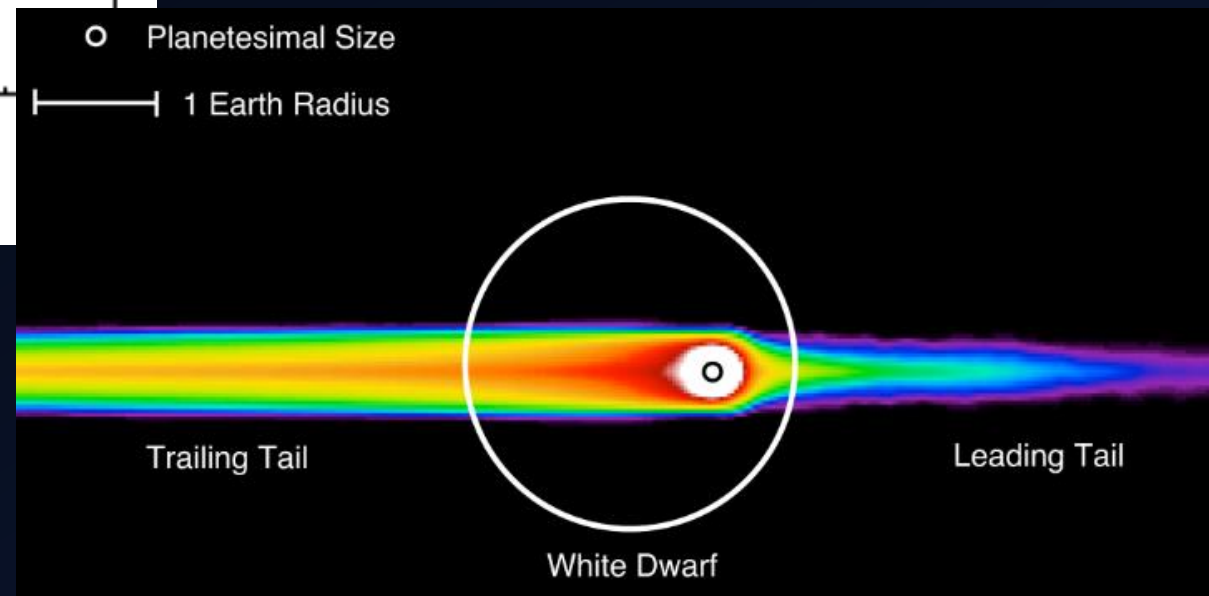
Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!

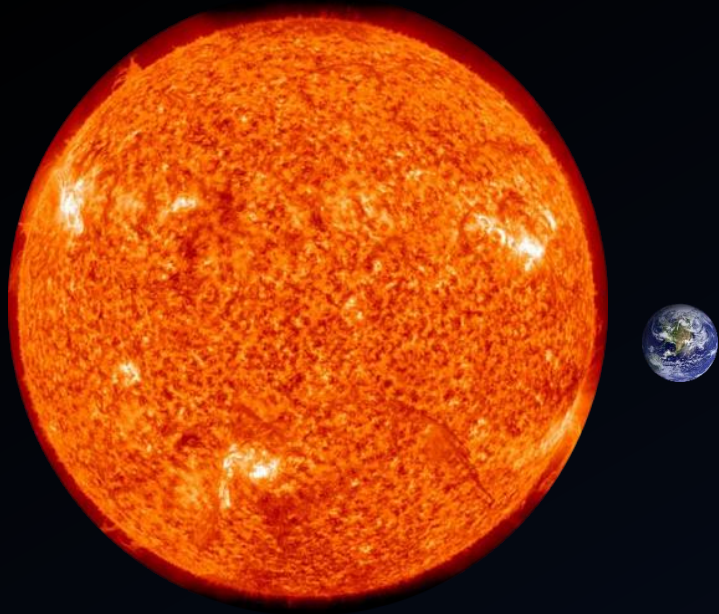
Разрушение планеты белым карликом



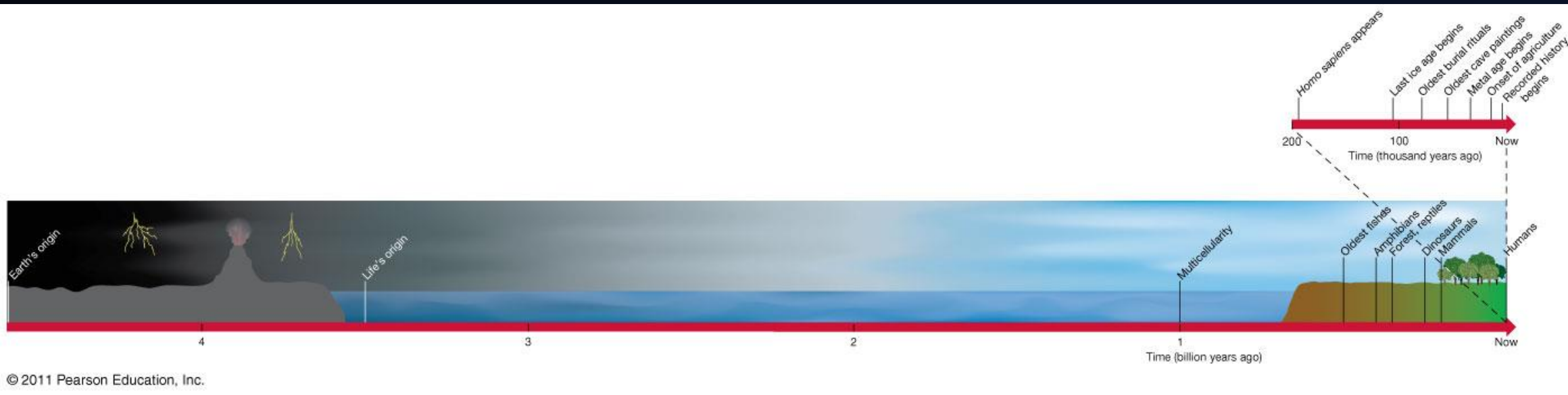
Удалось пронаблюдать транзиты газопылевых облаков. Кроме того, видны аномалии в спектре белого карлика.

Наиболее вероятно, что было разорвано тело планетной массы. Хотя, может быть, и несколько тел типа крупных астероидов.

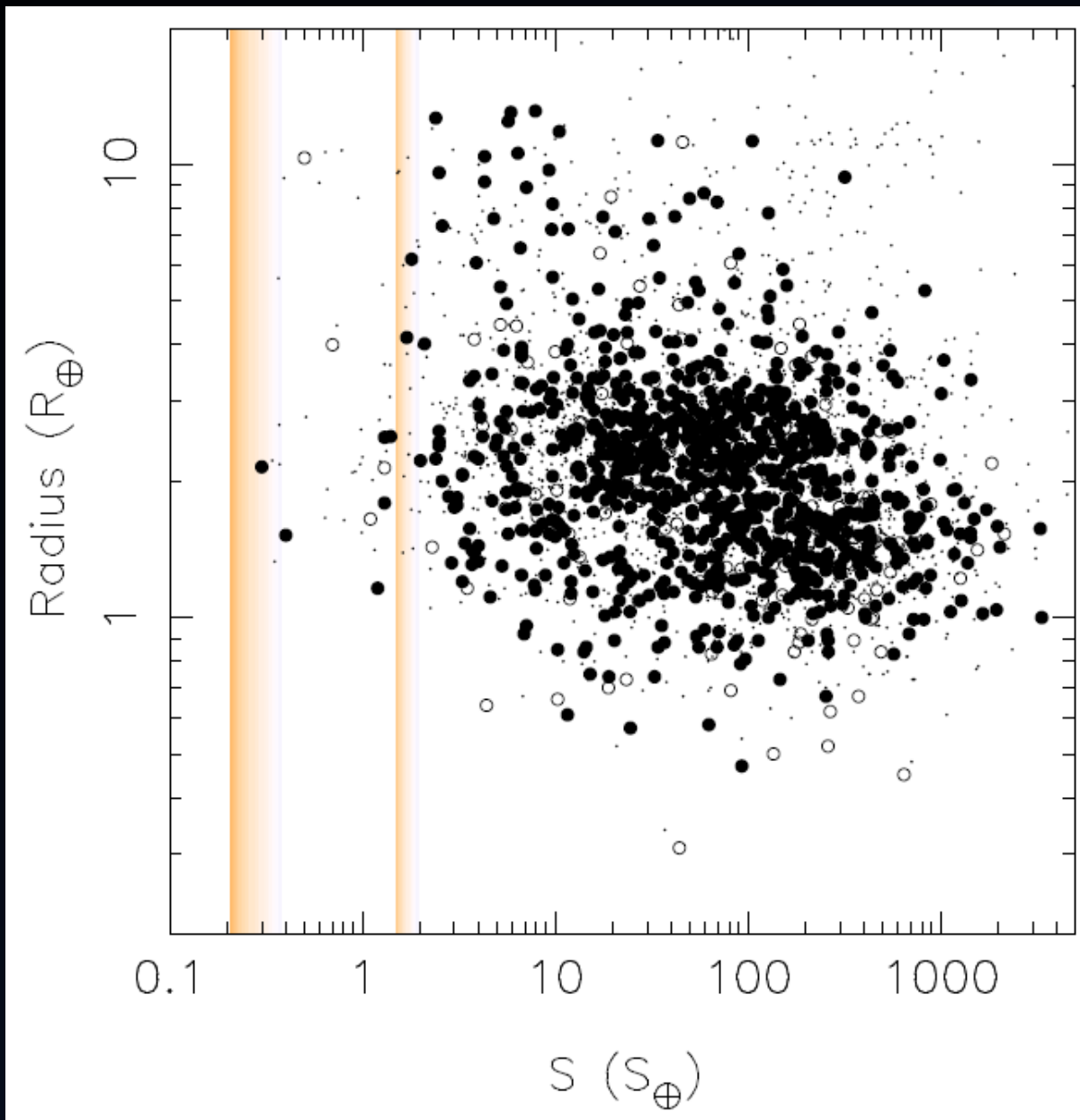




Из 4 с лишним миллиардов лет истории Земли техническая цивилизация видна лишь последние 100. Для ученых с далеких звезд (далее 100 св. лет) мы все еще дикая, но обитаемая планета.



768 новых планет в 306 системах



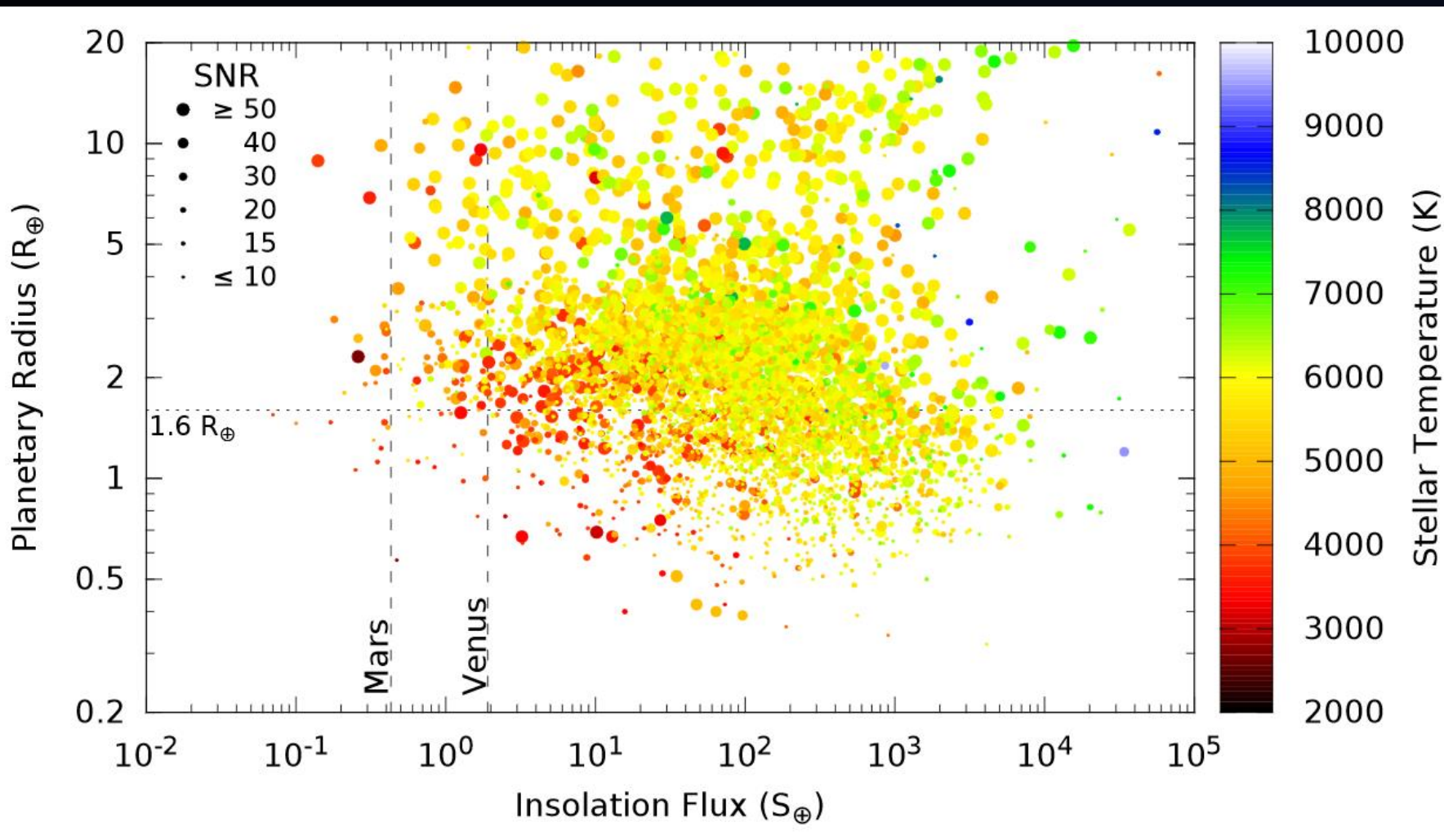
Постоянно растет число известных экзопланет.

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

Видно, что есть планеты относительно небольшого размера в области, где поток звездного излучения не слишком отличается от потока солнечного излучения на Земле.

Новый каталог кандидатов Кеплера

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

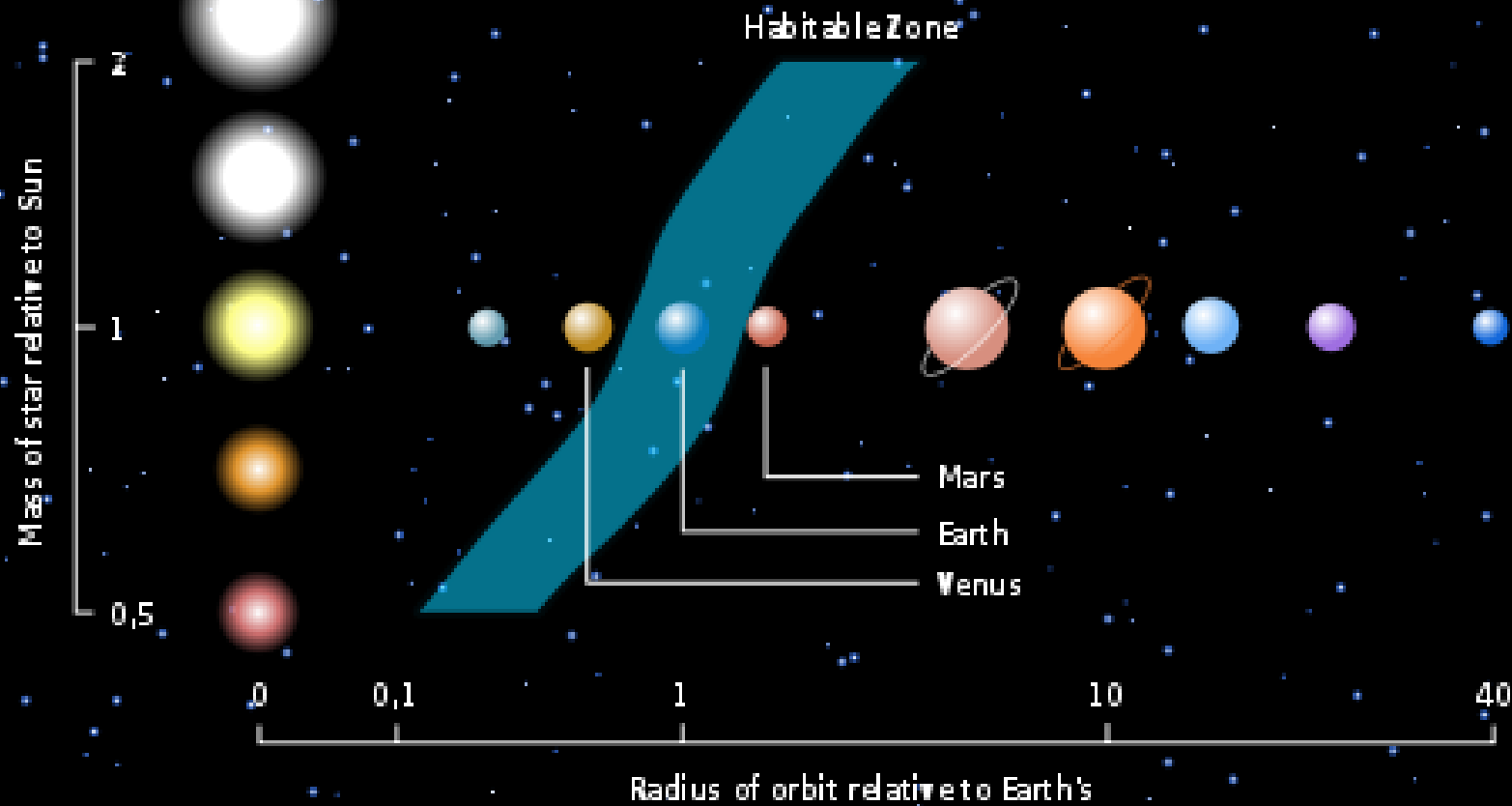


1512.06149

Почти 5000 кандидатов в экзопланеты

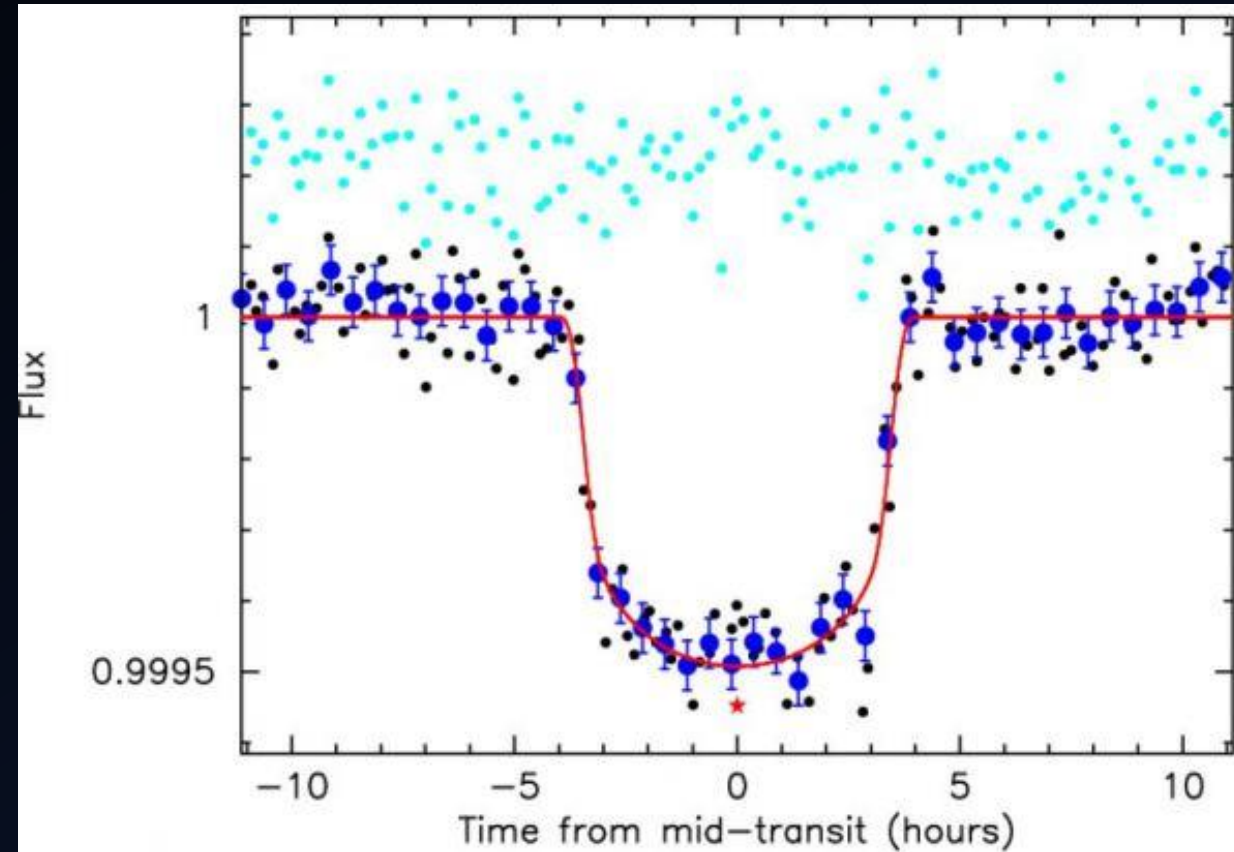
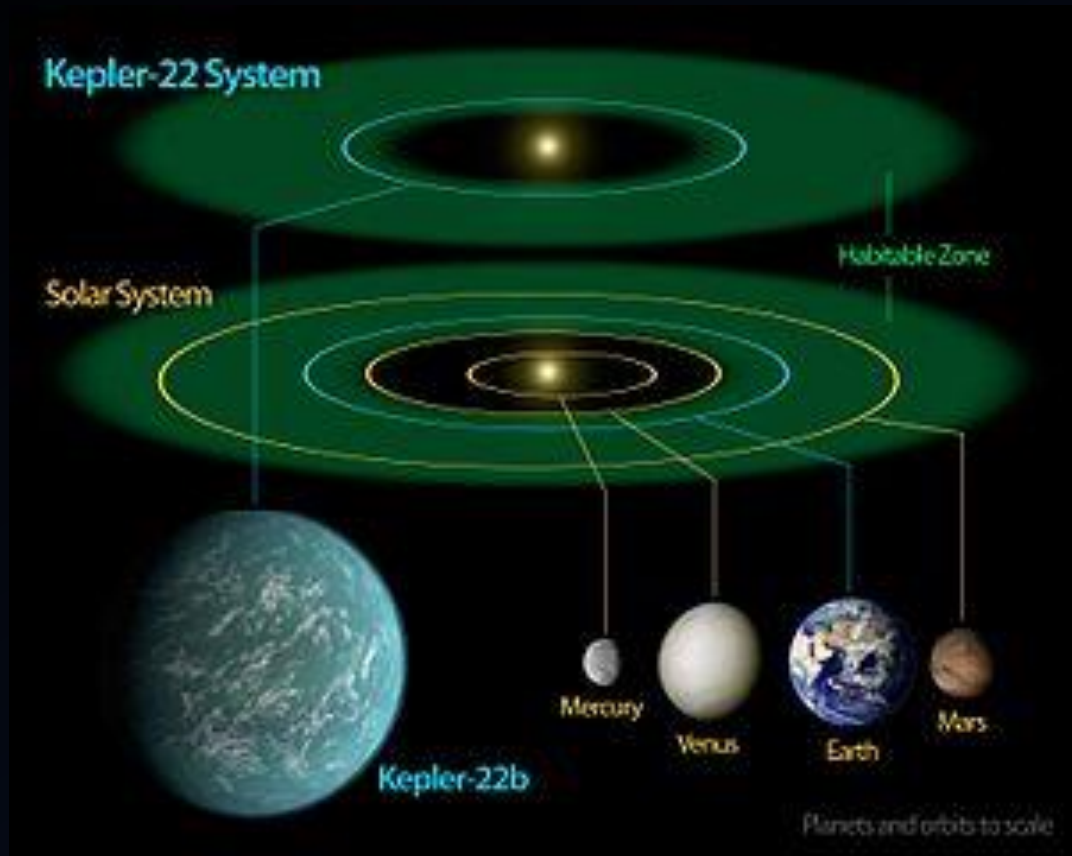
Зона обитаемости

Возможность существования жидкой воды



Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

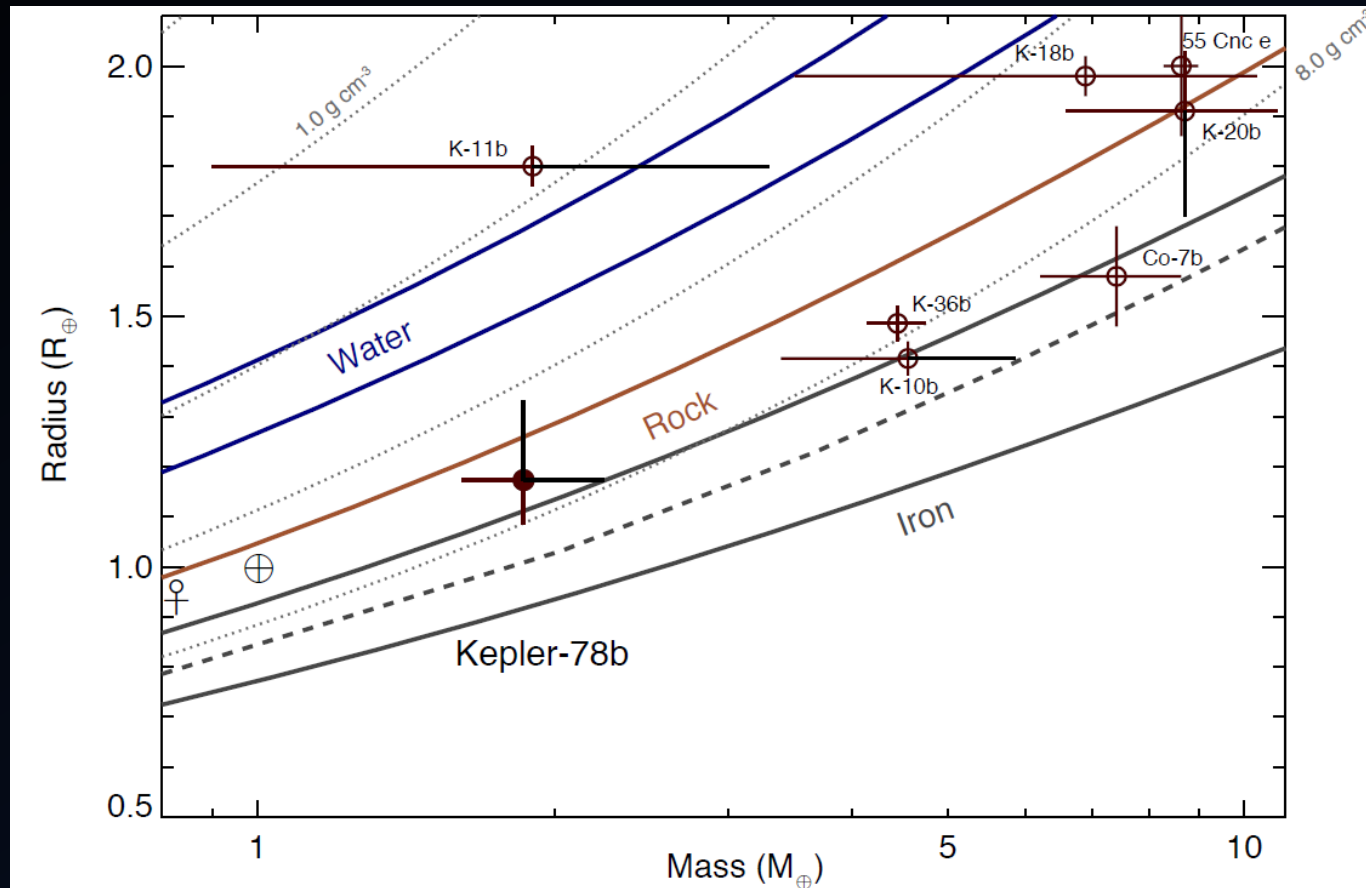
Планета Kepler-22b



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:

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

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

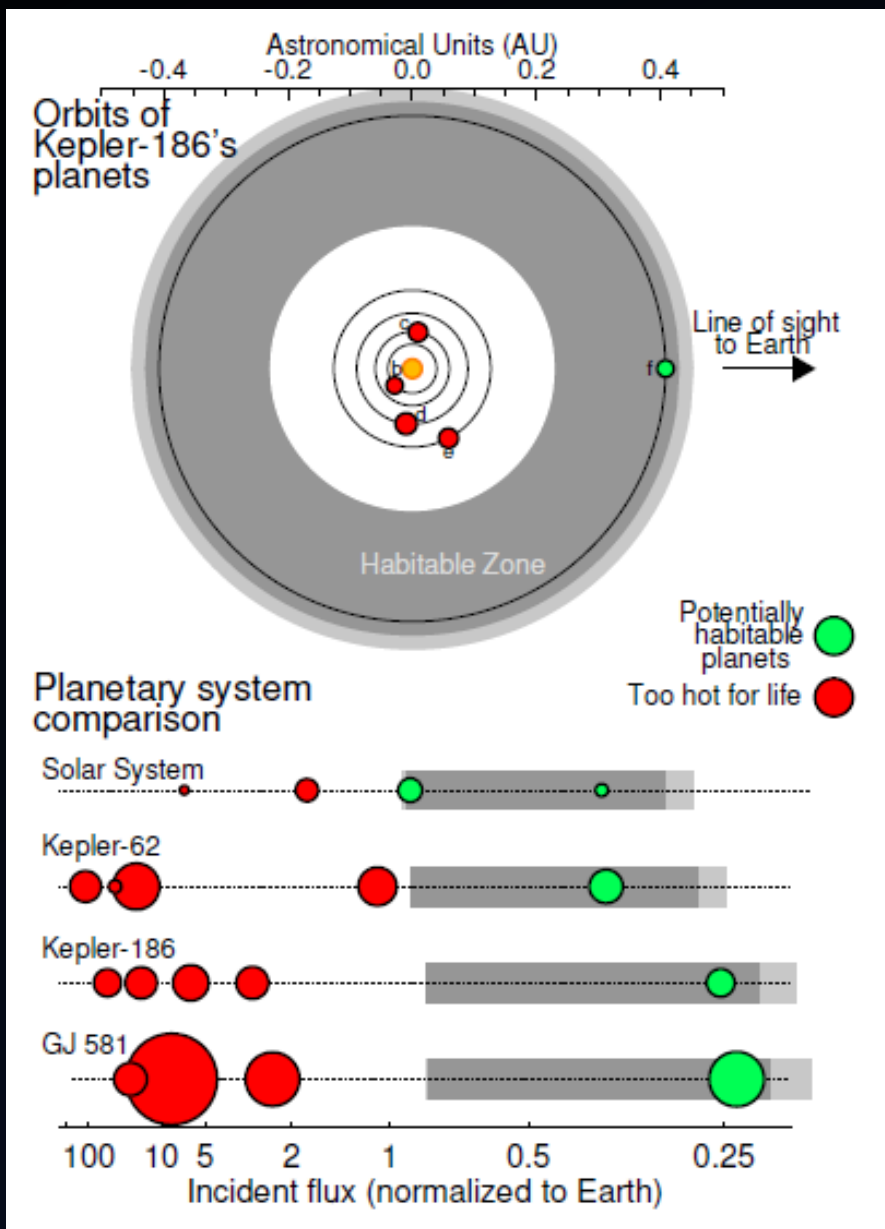
Плотность $\sim 5.57 \text{ г/см}^3$

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

1310.7987

Радиус измерен по данным Kepler,
масса – по данным HARPS

Система Кеплер-186

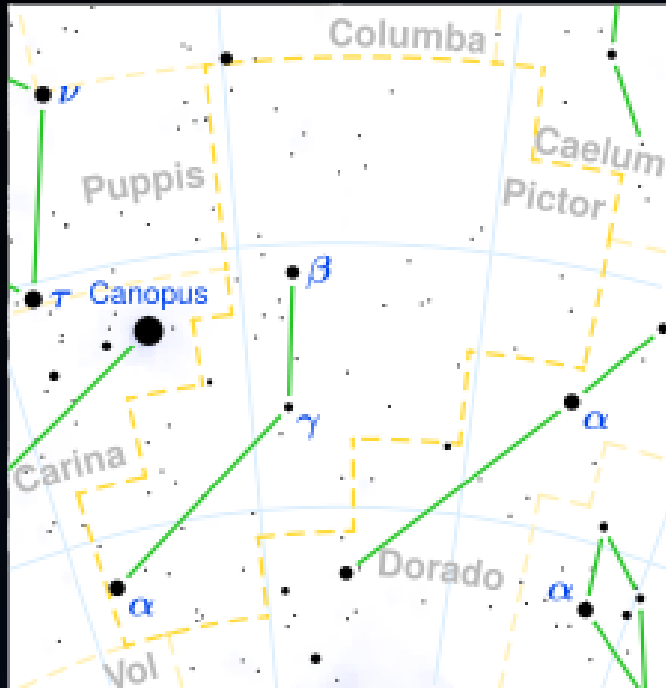


Пять планет вокруг красного карлика.
Все это небольшие планеты.

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

Планеты у звезды Каптейна

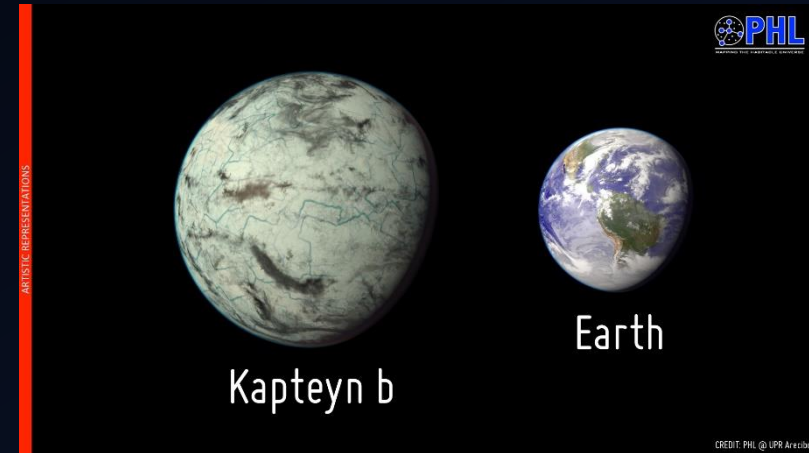
Звезда Каптейна



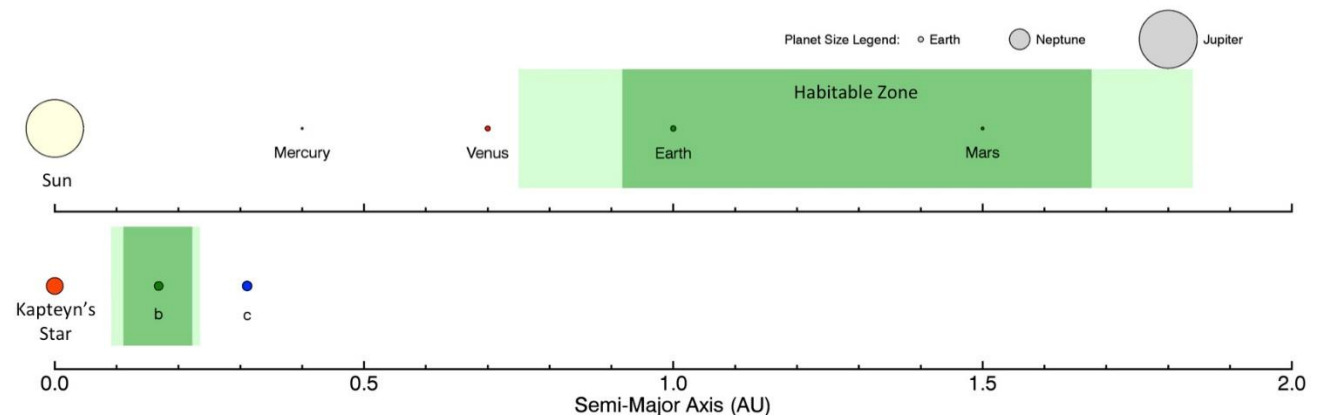
Звезда с очень большим собственным движением (второе место после Барнарда). Это звезда гало, поэтому у нее большая скорость.

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

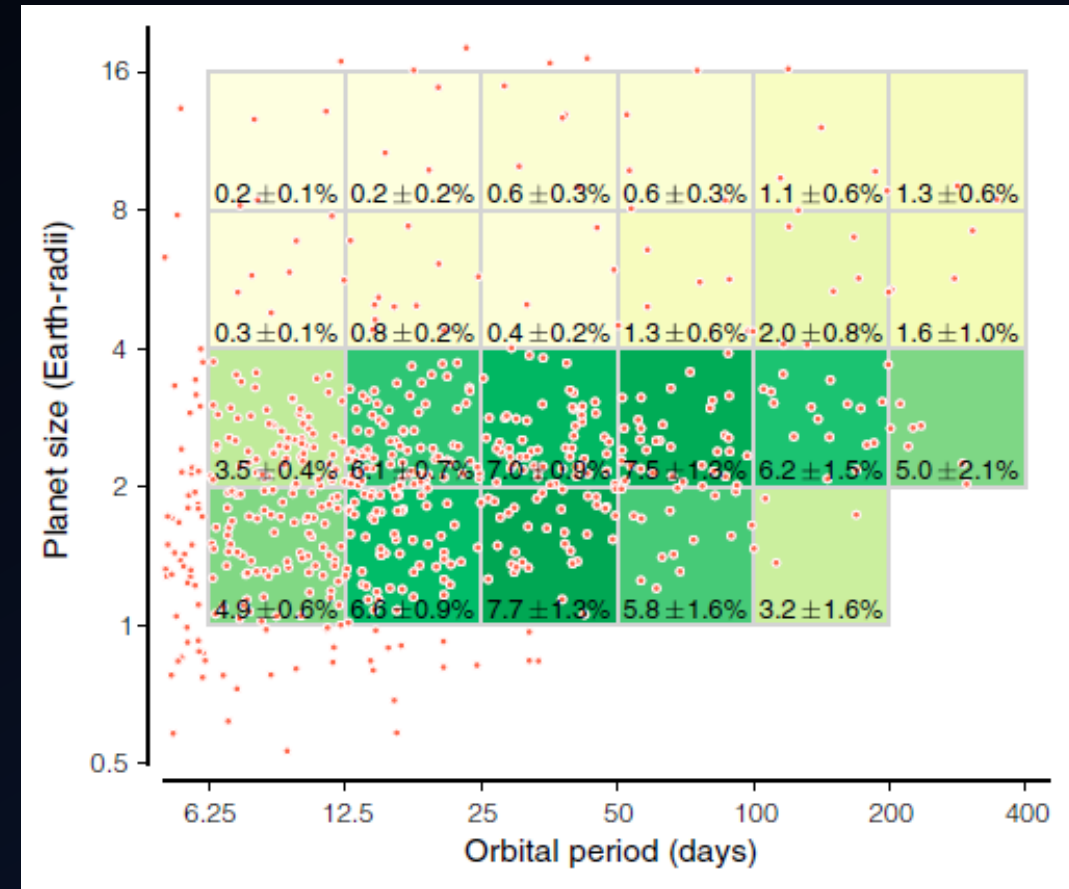
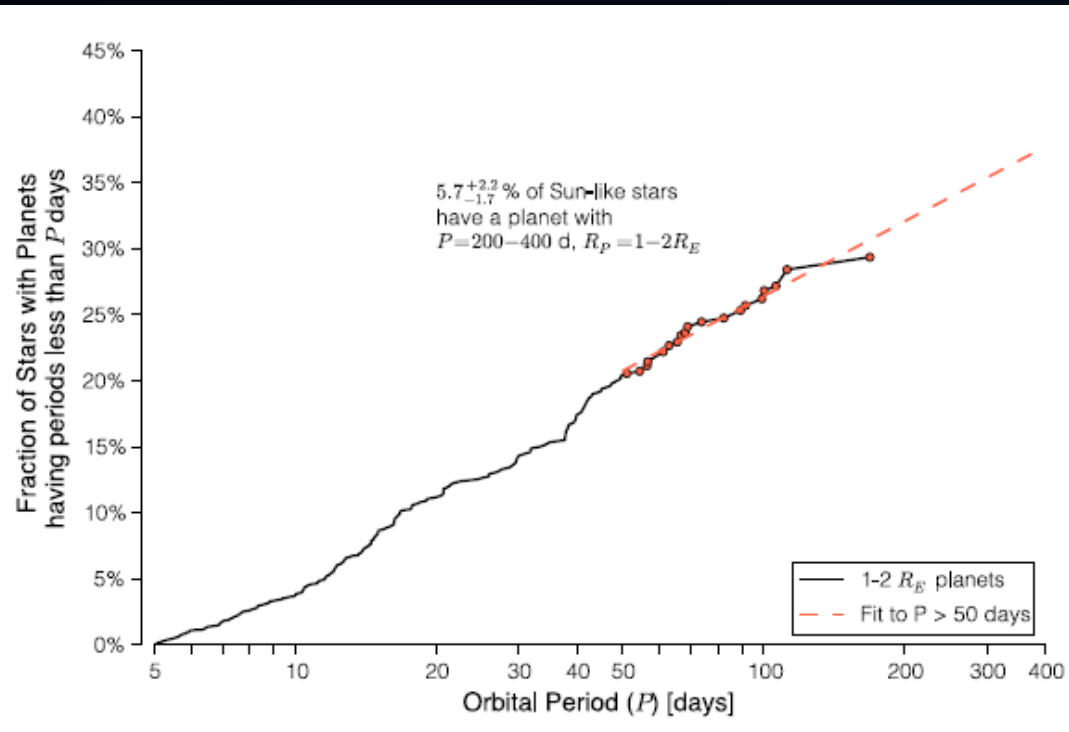


Stars Magnified x10, Planets Magnified x100

Credit: PHL @ UPR Arcibo

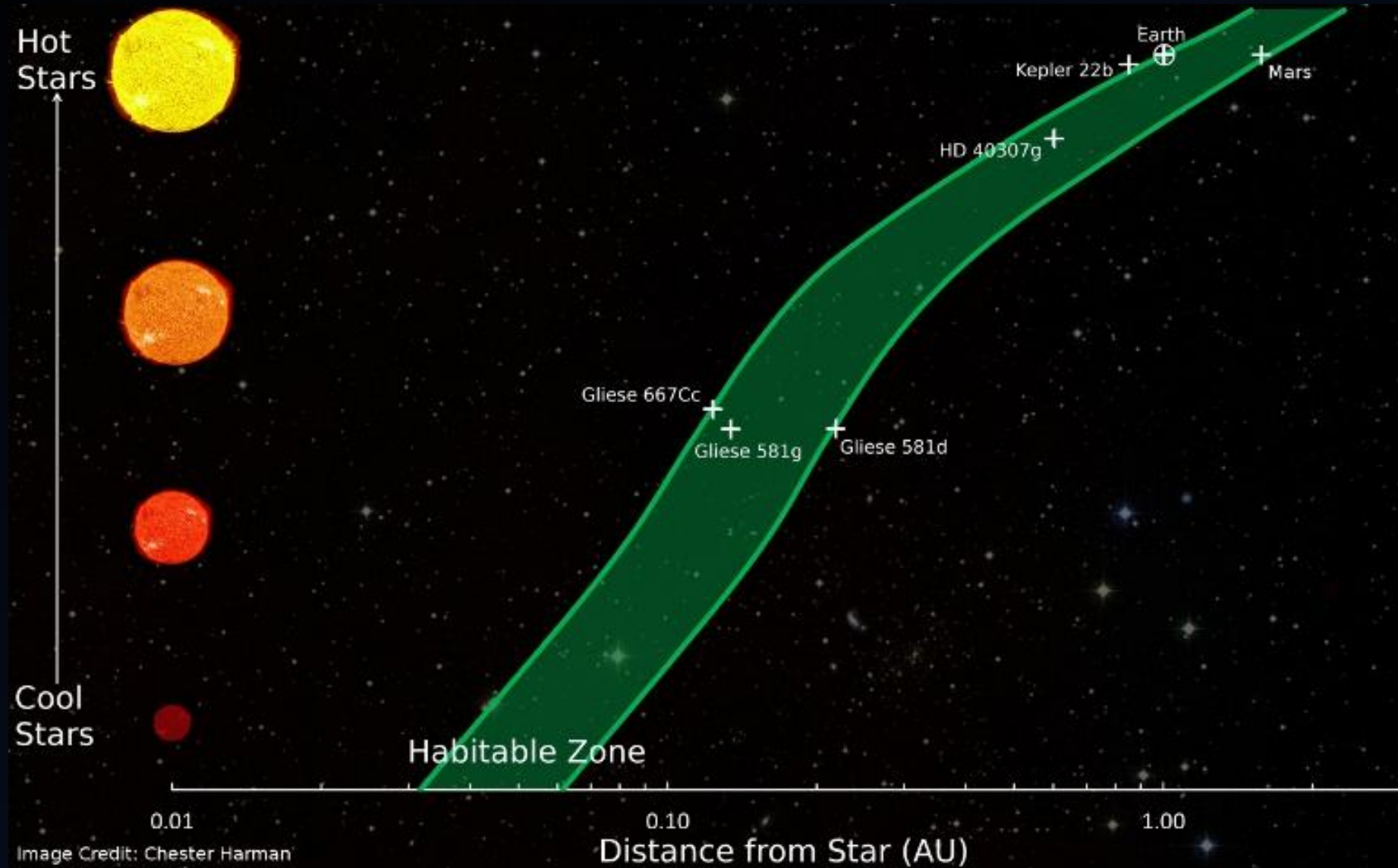
Планеты типа Земли у звезд типа Солнца

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



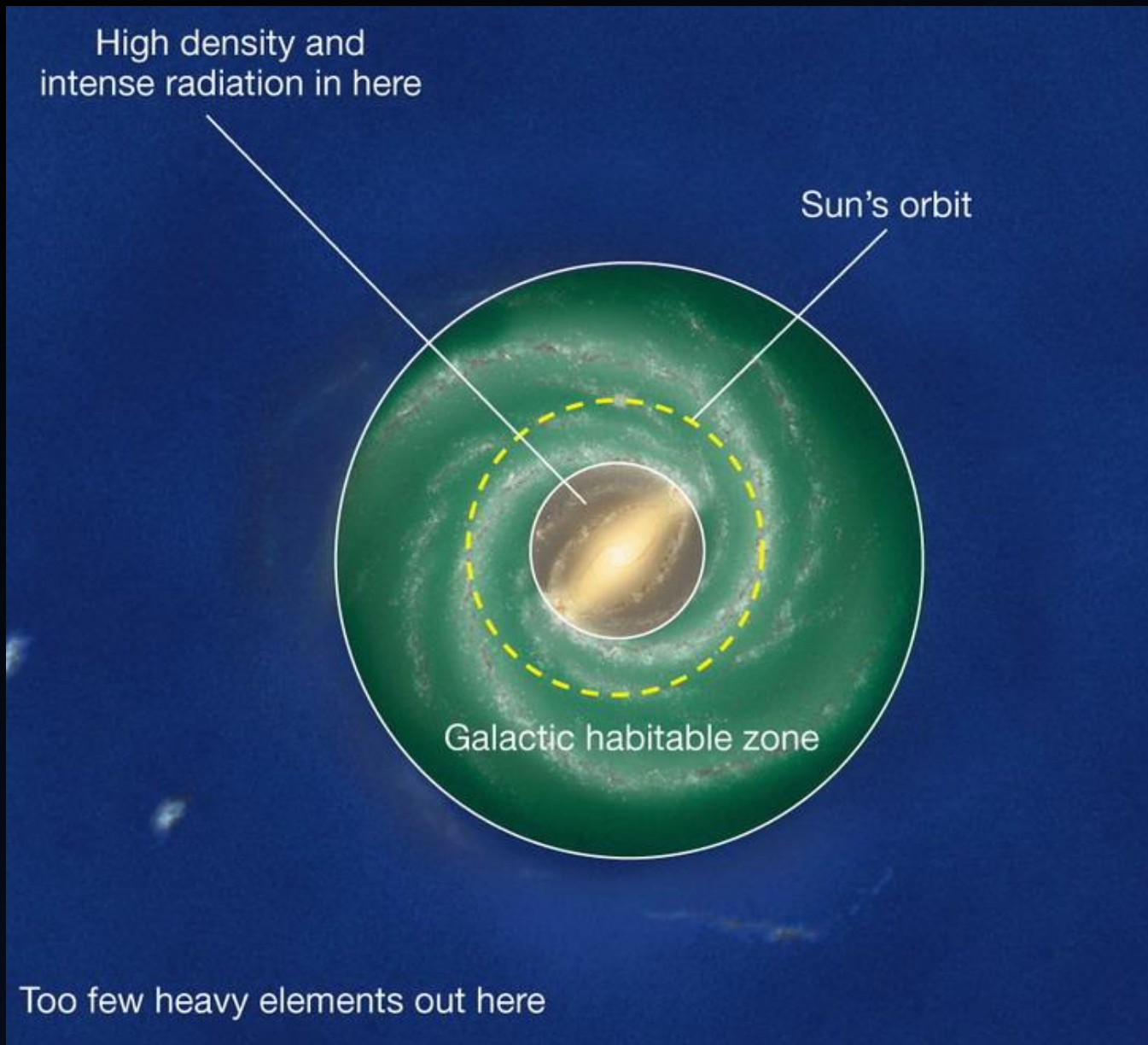
3.5-7.5% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли с орбитальными периодами 200-400 дней.

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.)

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

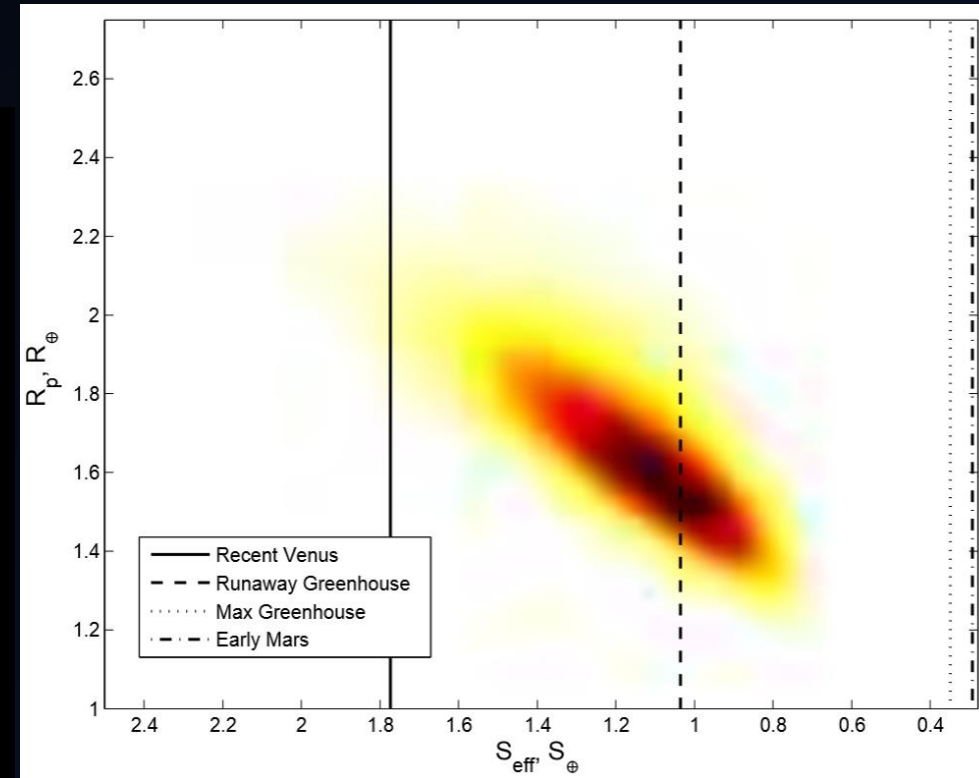


Kepler-442b 155c 235e 62f 62e 283c 440b

M Stars



Kepler-438b 186f 296e 296f

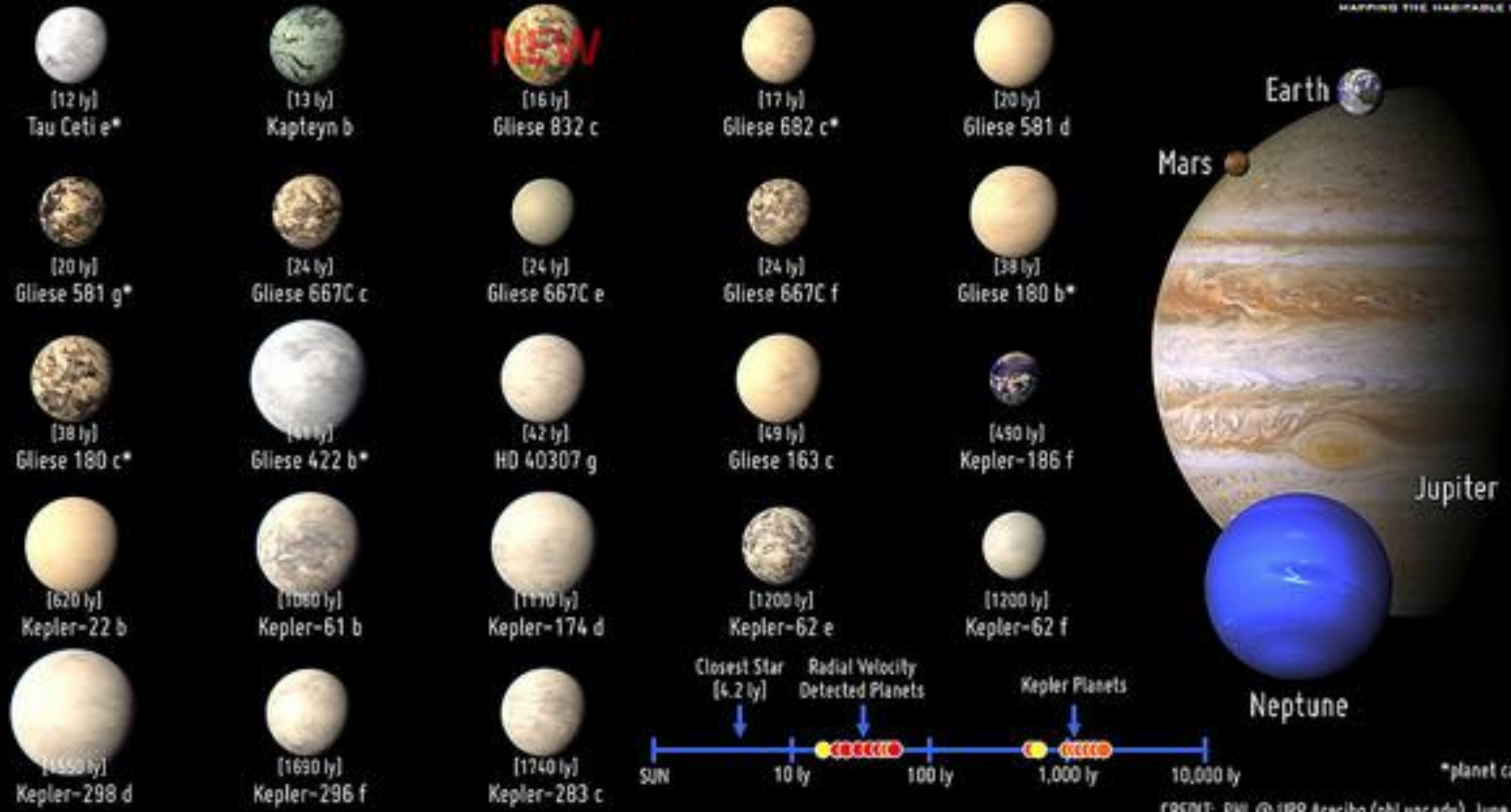


Планета имеет радиус 1.6 земного. Возраст звезды около 6 млрд. лет. В настоящее время показано, что открытие кеплер-452b нуждается в подтверждении.

Current Potentially Habitable Exoplanets

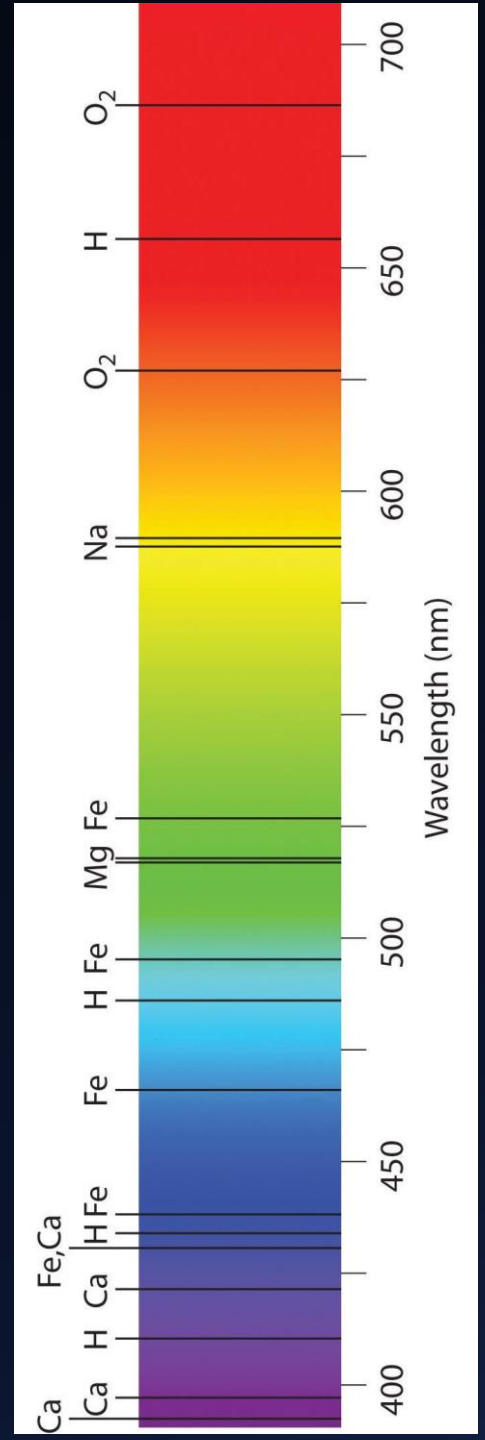


Ranked by Distance from Earth in Light Years (ly)



*planet candidates

Спектр

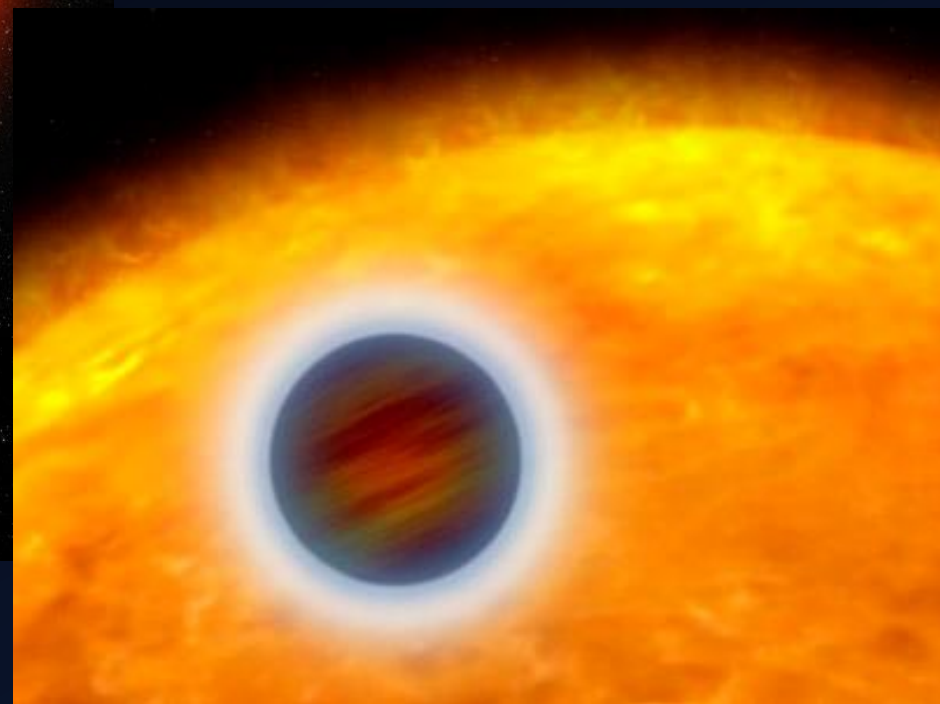
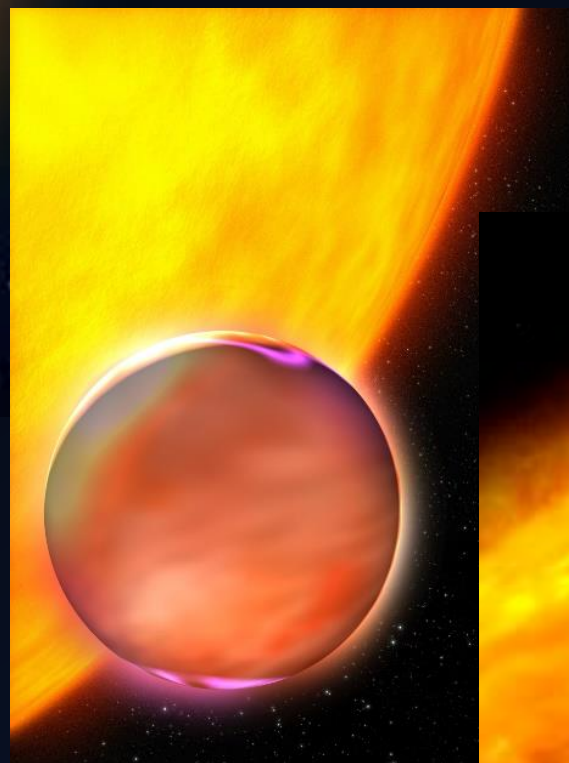


Анализ спектра позволяет установить химический состав атмосфер экзопланет.

Атмосферы экзопланет



Есть несколько возможностей для получения спектров атмосфер экзопланет.



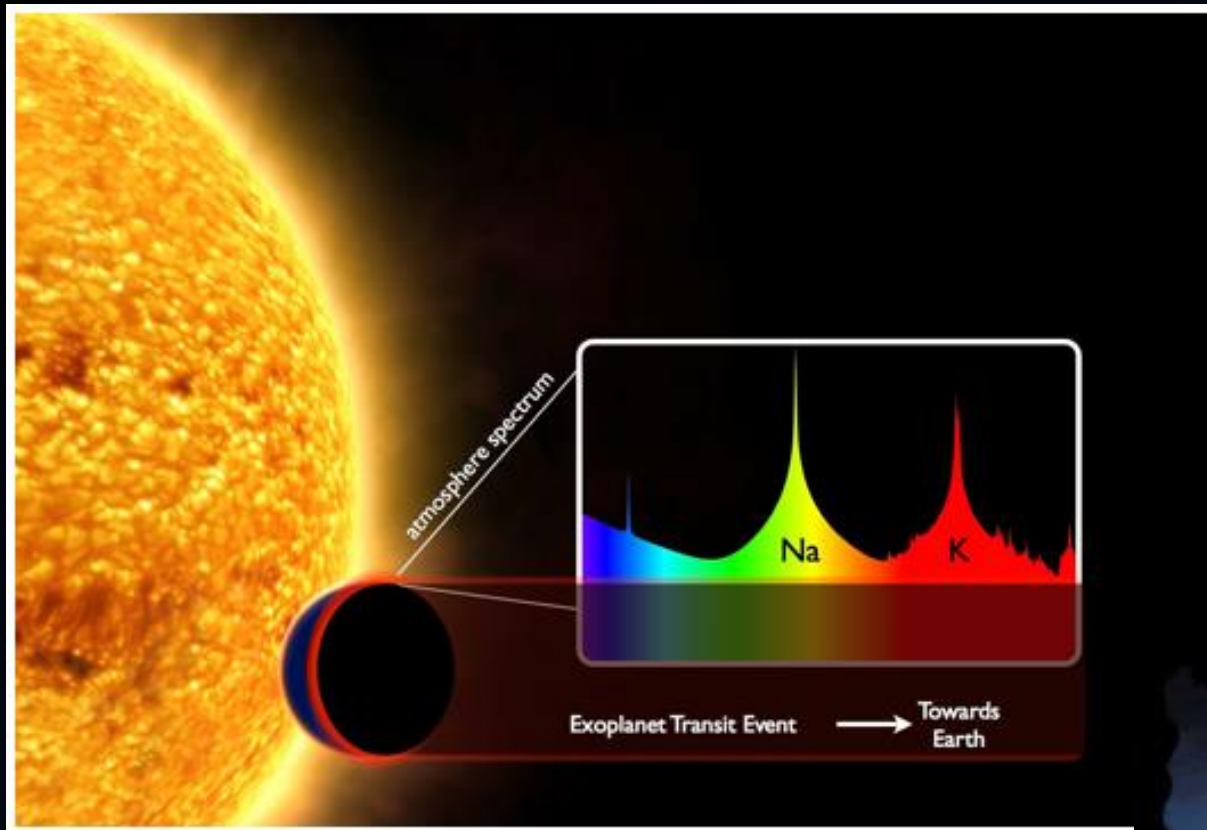
Спектр планеты



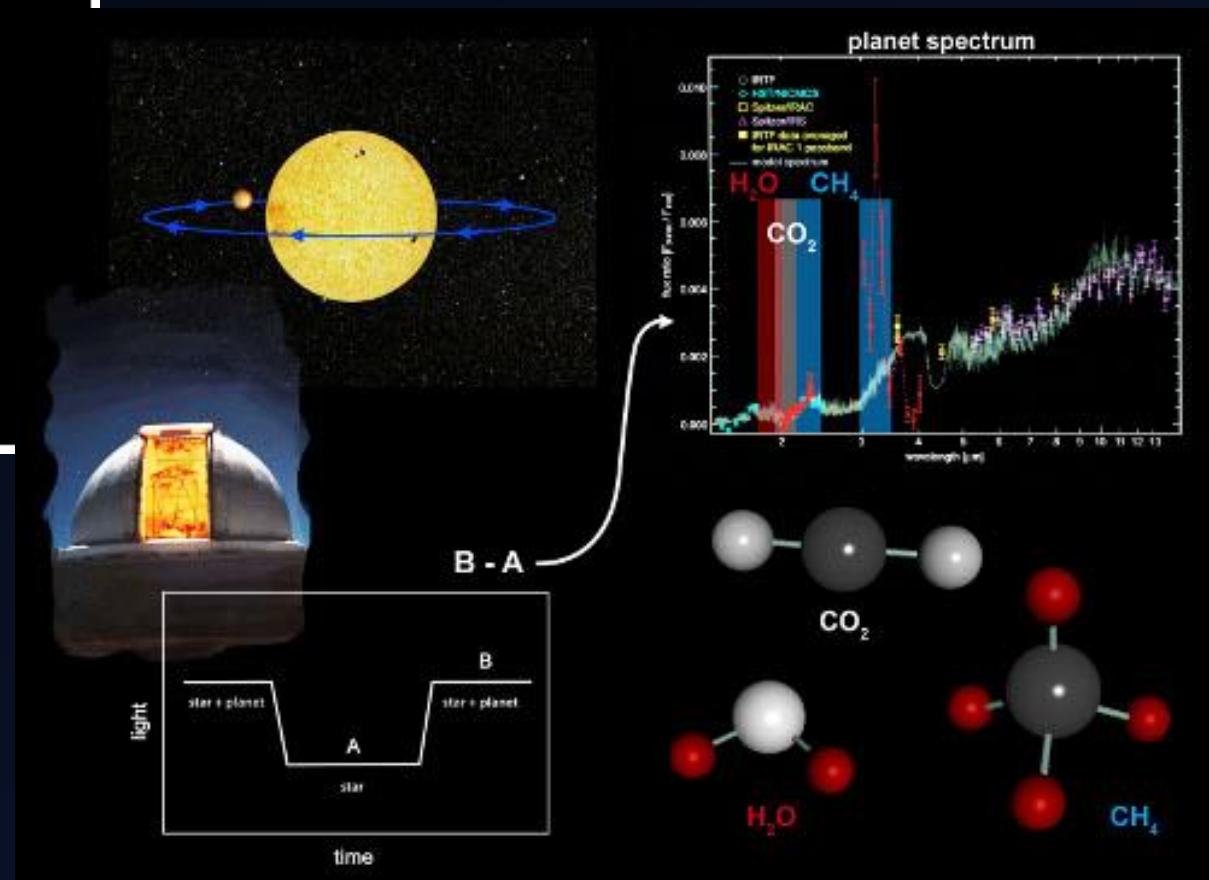
Вычитание спектра звезды из суммарного позволяет выделить спектральные детали, связанные с планетой.

Isolating a Planet's Spectrum

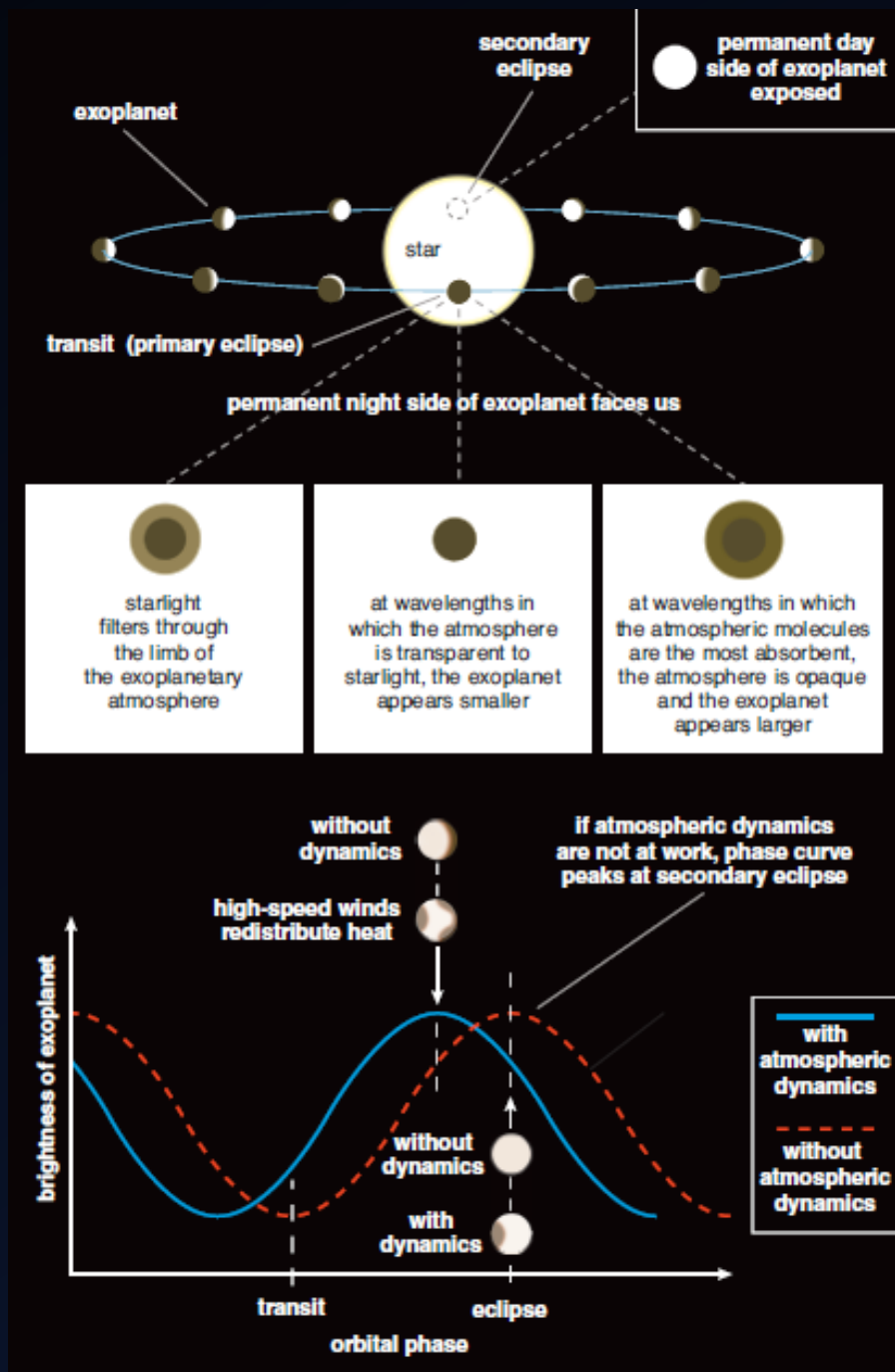
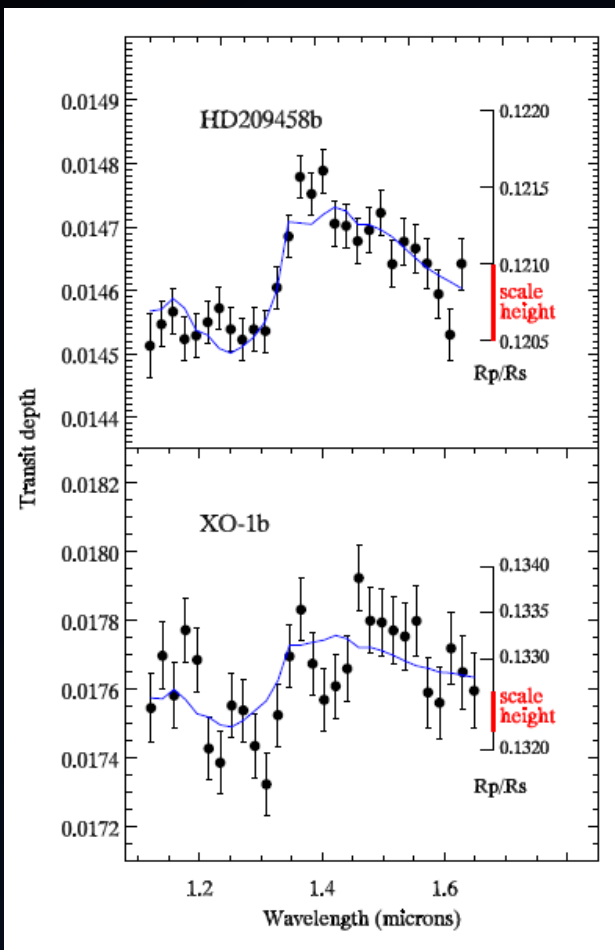
Спектры «напросвет» и прямые



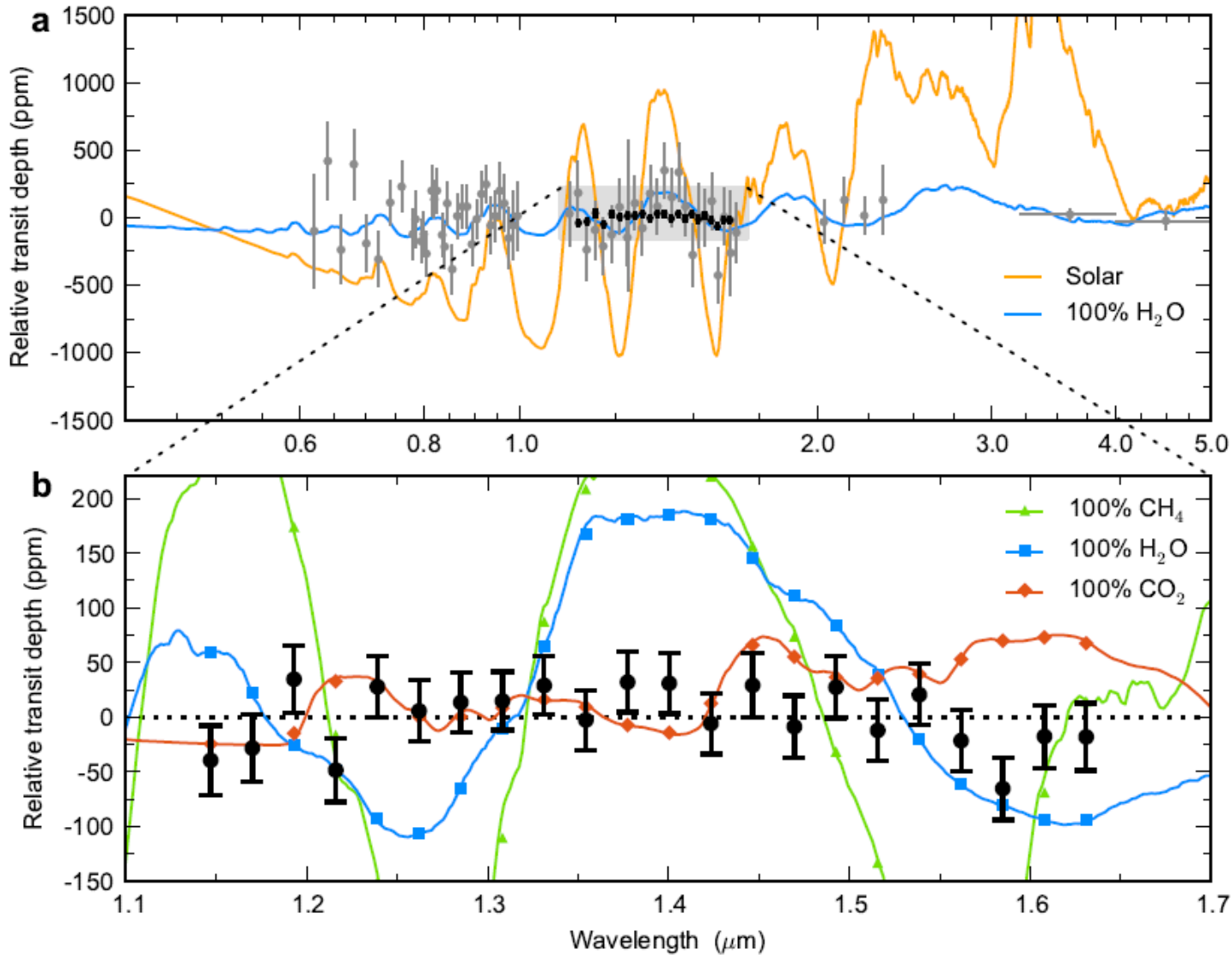
Иногда получают спектр дневной стороны планеты, а иногда изучают атмосферу «напросвет», когда планета проходит между звездой и нами.



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

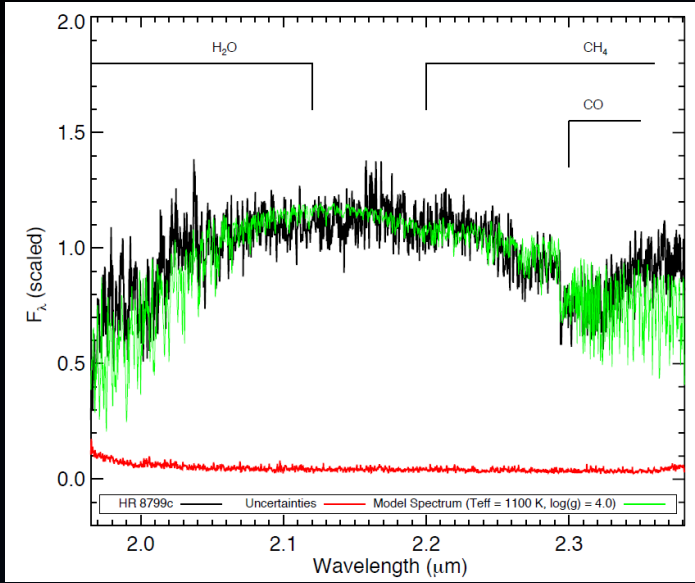


С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

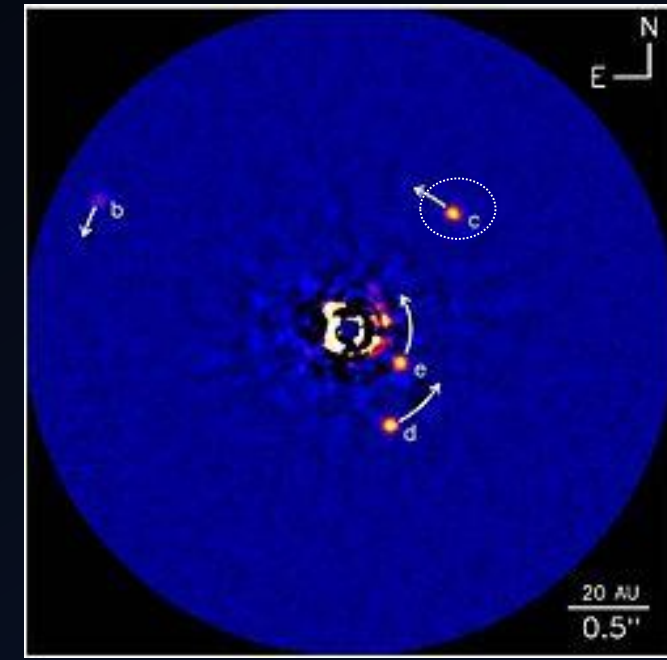
Это можно объяснить высокими облаками.

Вода и СО в спектре планеты



ИК-спектр HR 8799

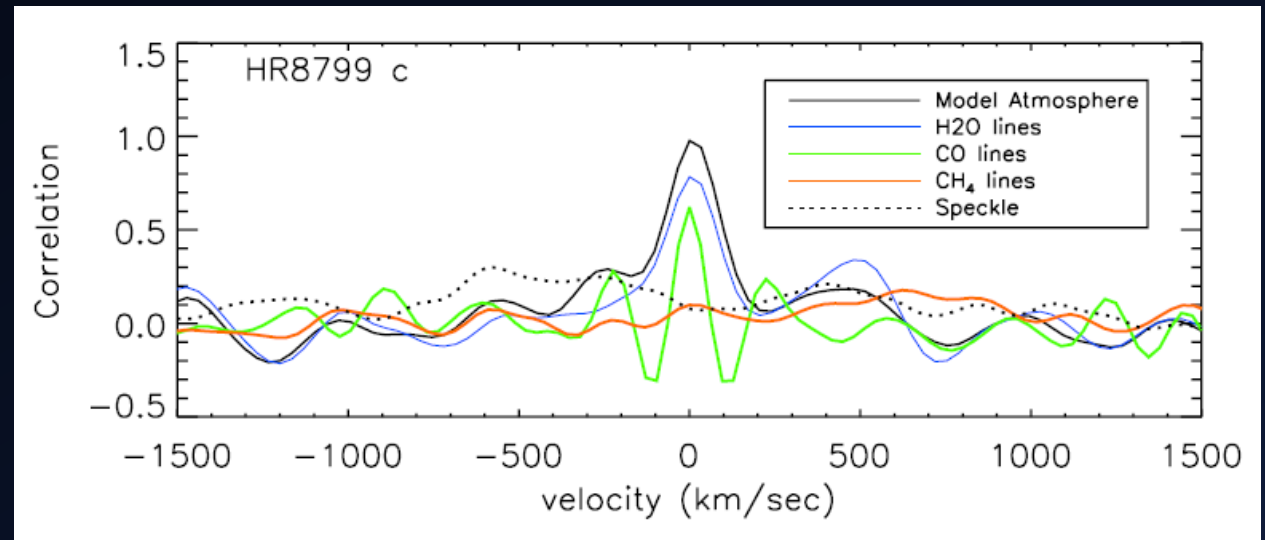
Детальная обработка показала наличие спектральных деталей, связанных с присутствием воды и монооксида углерода (CO) в атмосфере планеты HR 8799c.



HR 8799



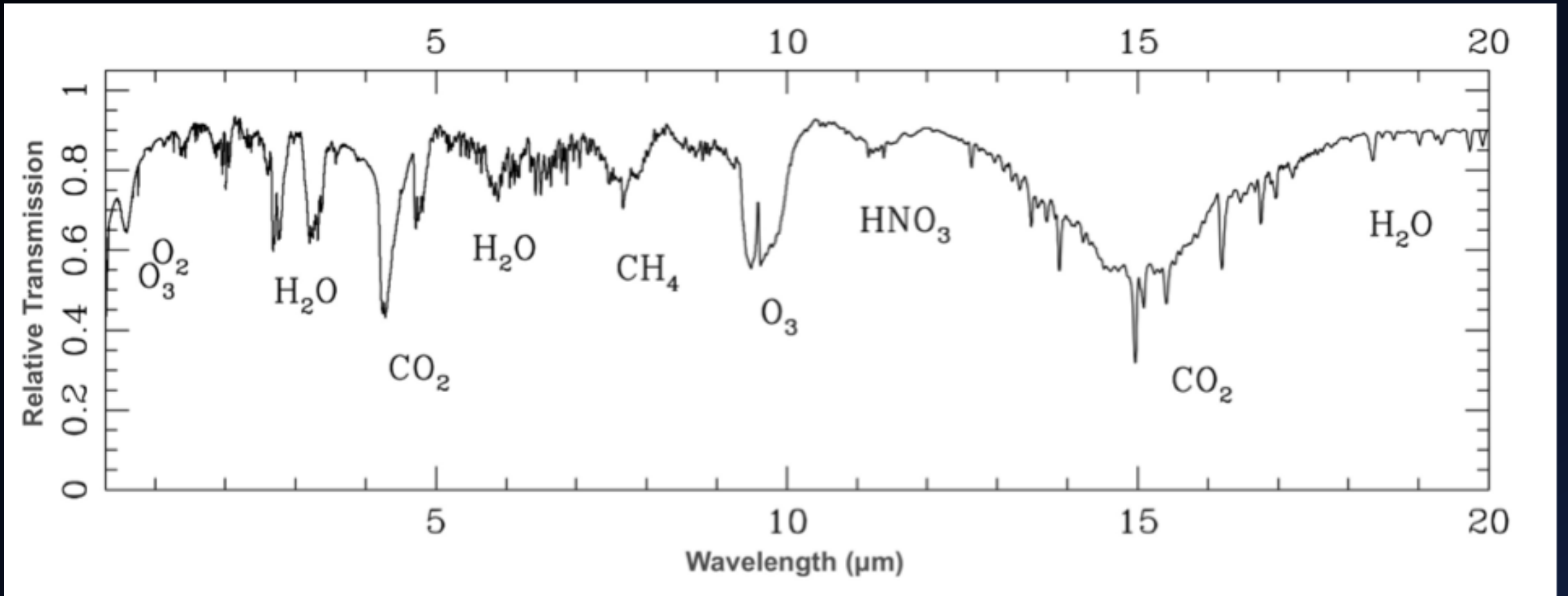
Наблюдения на Keck II



Биомаркеры

Спектр Земли с указанными биомаркерами:

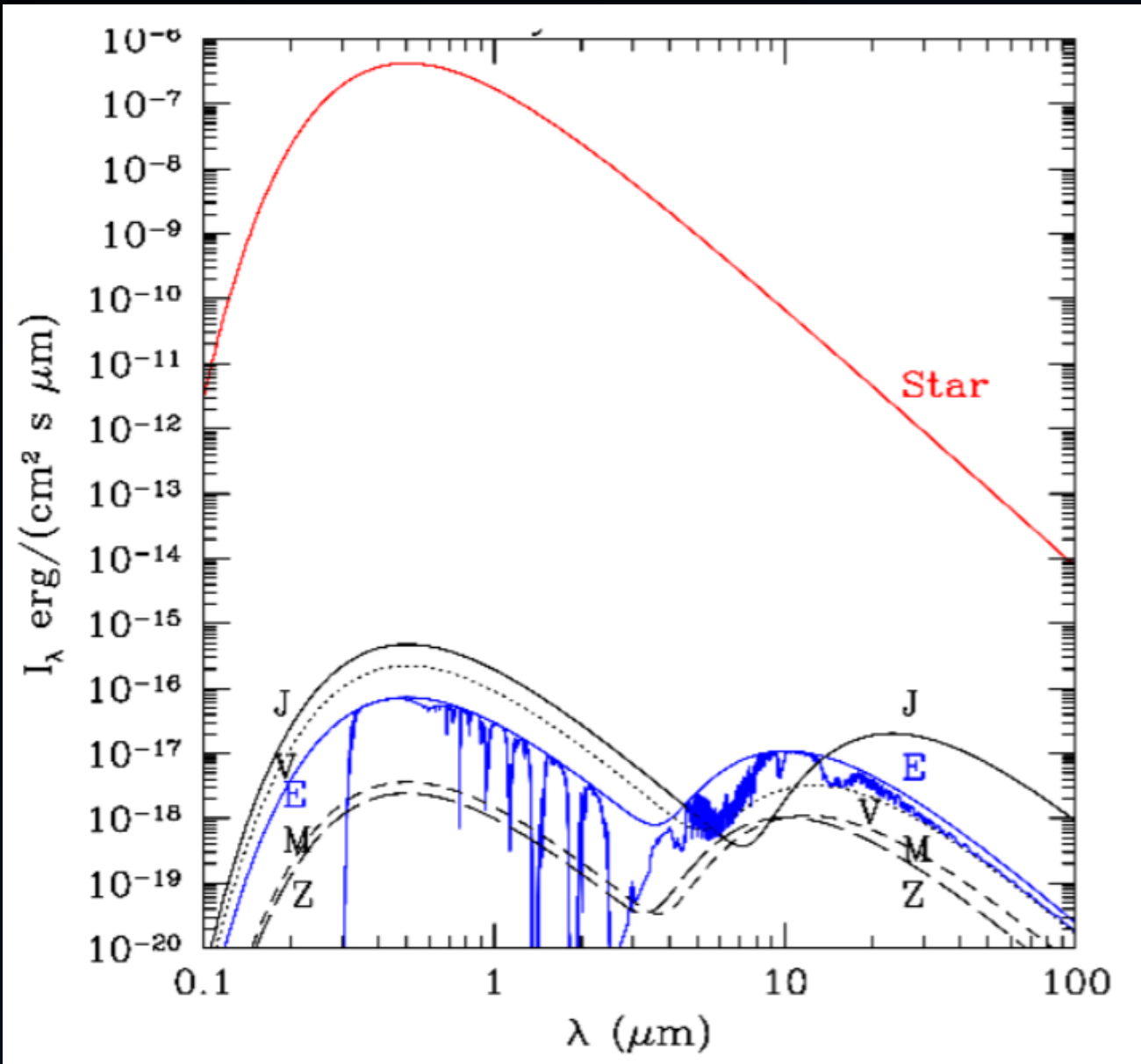
- кислород,
- озон,
- углекислый газ,
- метан,
- вода



Кислород на Земле

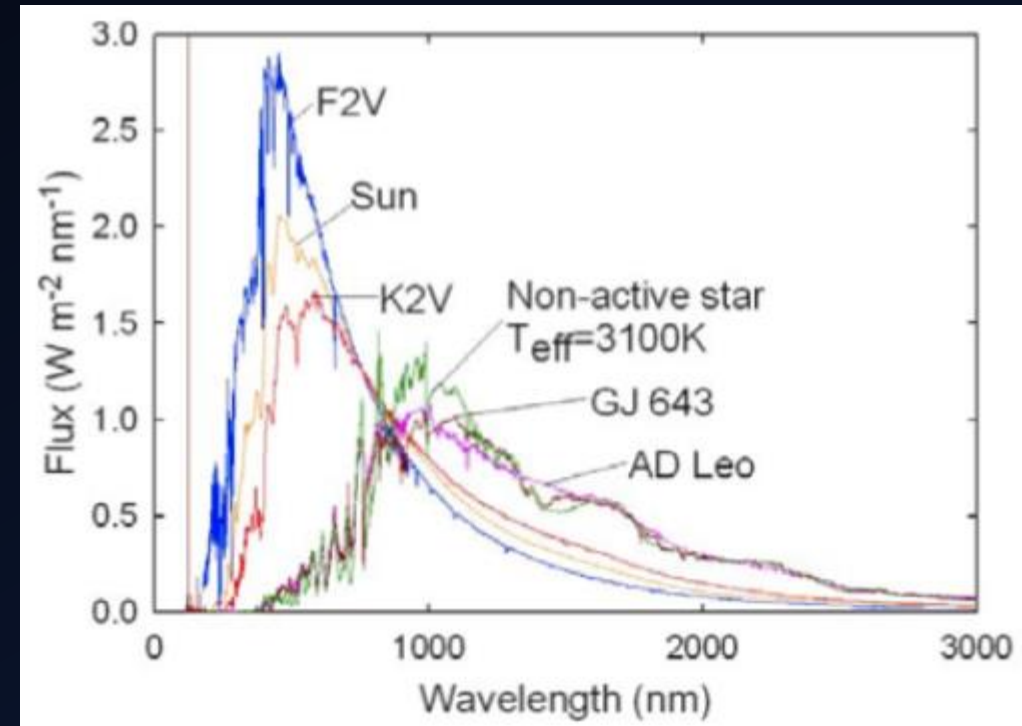


Солнце и планеты

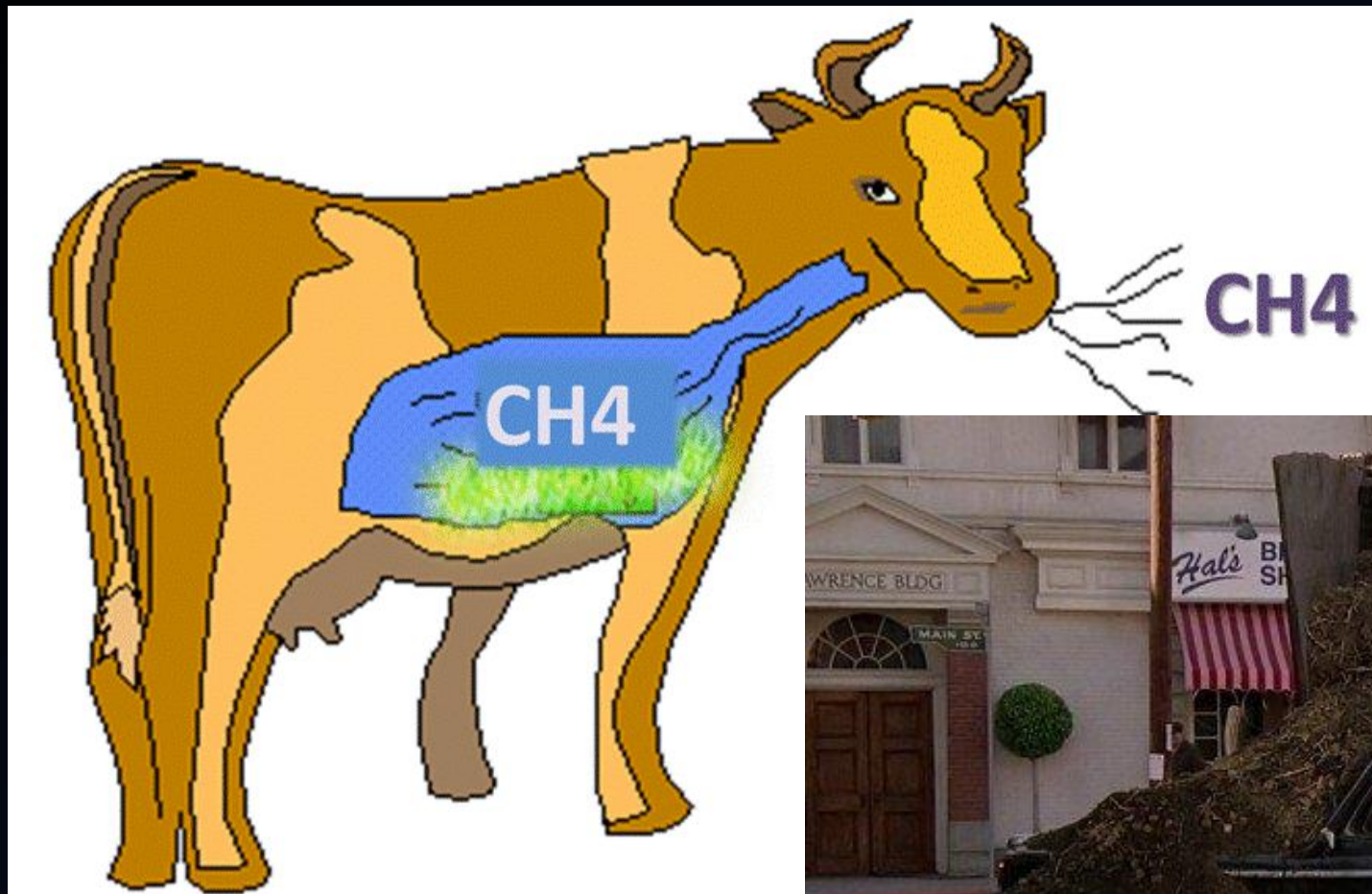


Выделение спектра планеты на фоне излучения звезды является трудной задачей.

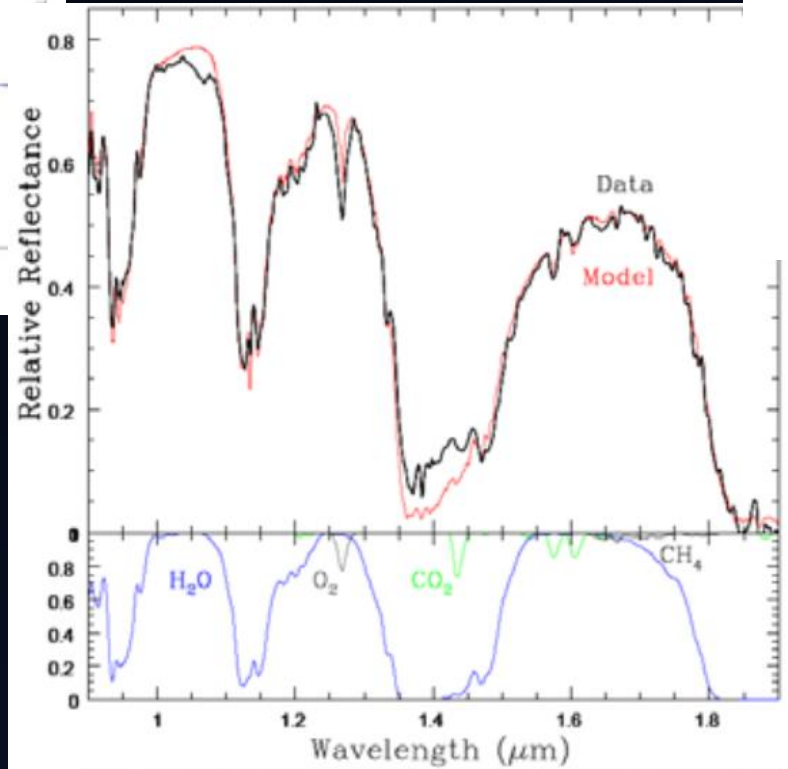
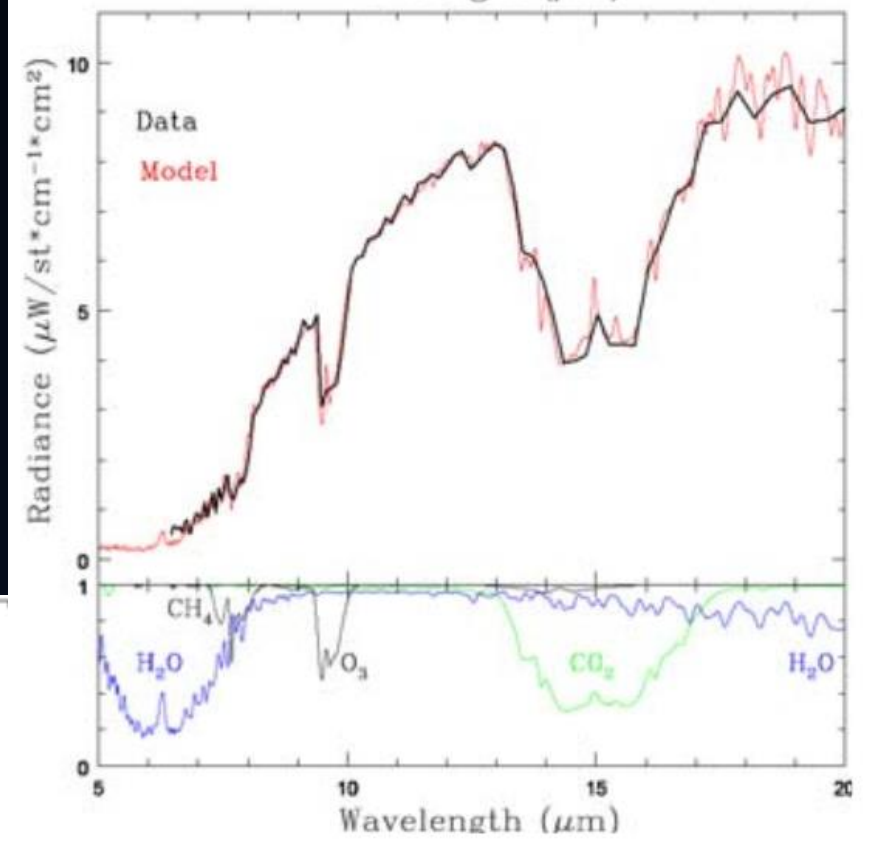
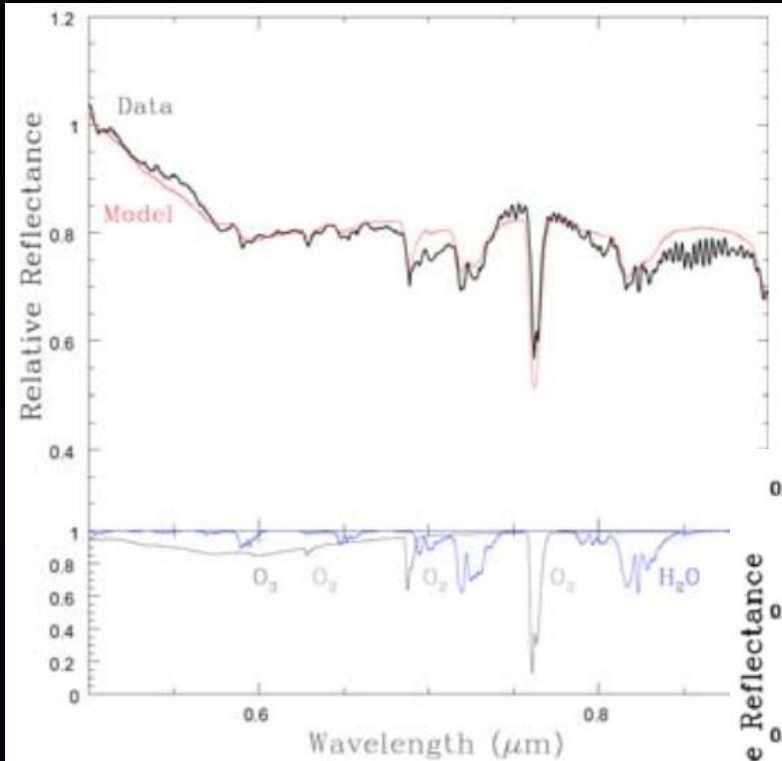
Спектры звезд различаются.



Происхождение метана на Земле



Спектр Земли



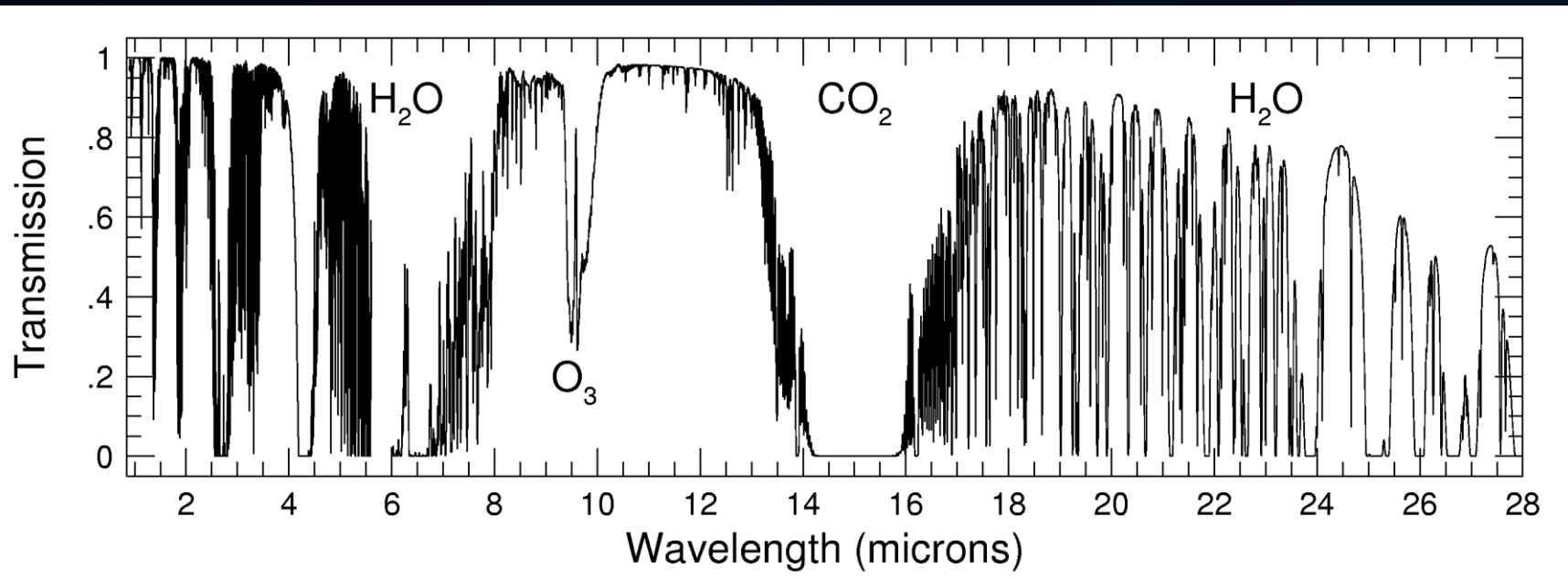
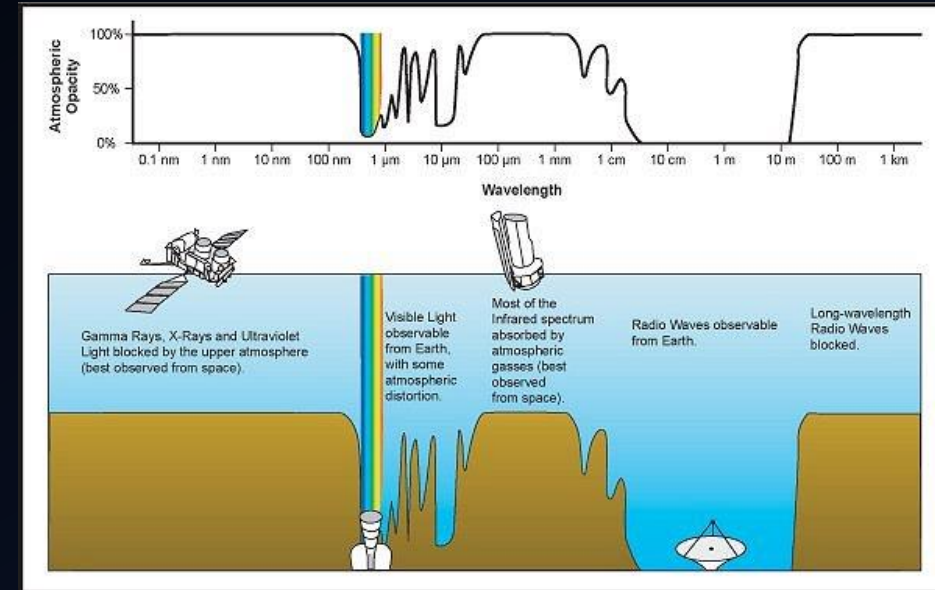
0906.2263

Прозрачность и яркость атмосферы Земли

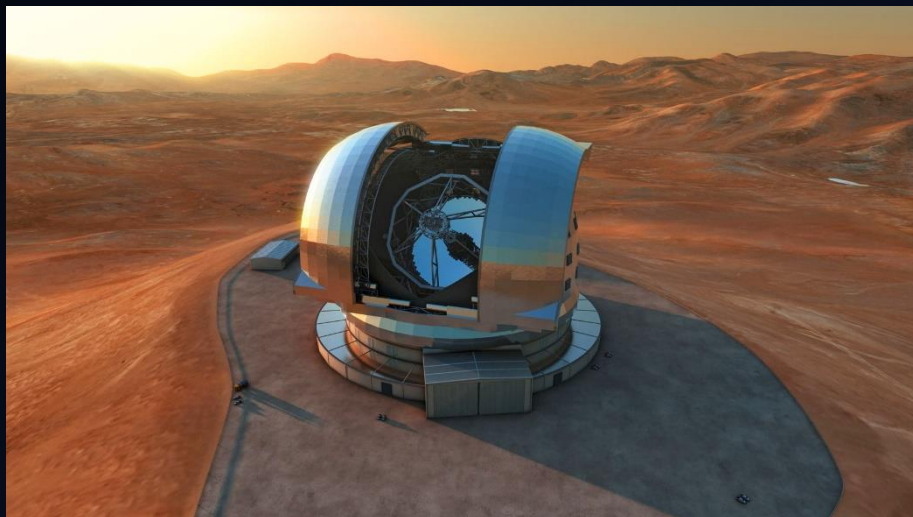
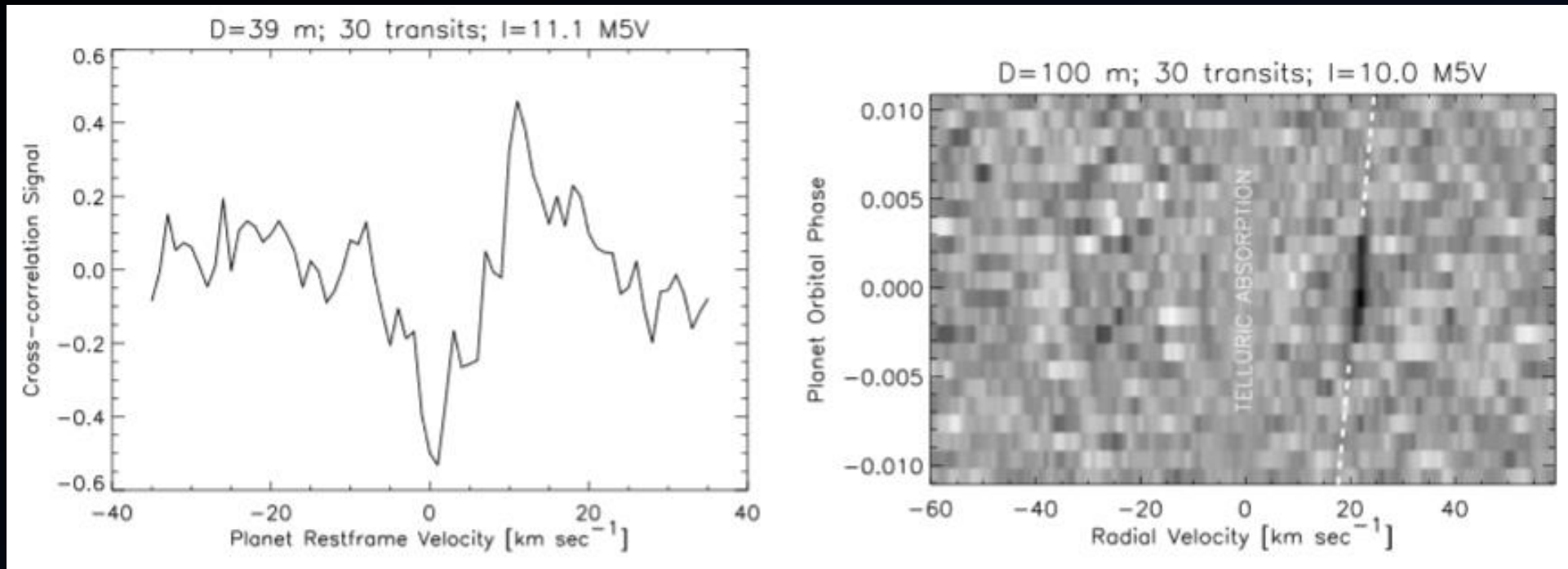
На длинах волн более 5 микрон атмосфера Земли мешает наблюдать.

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

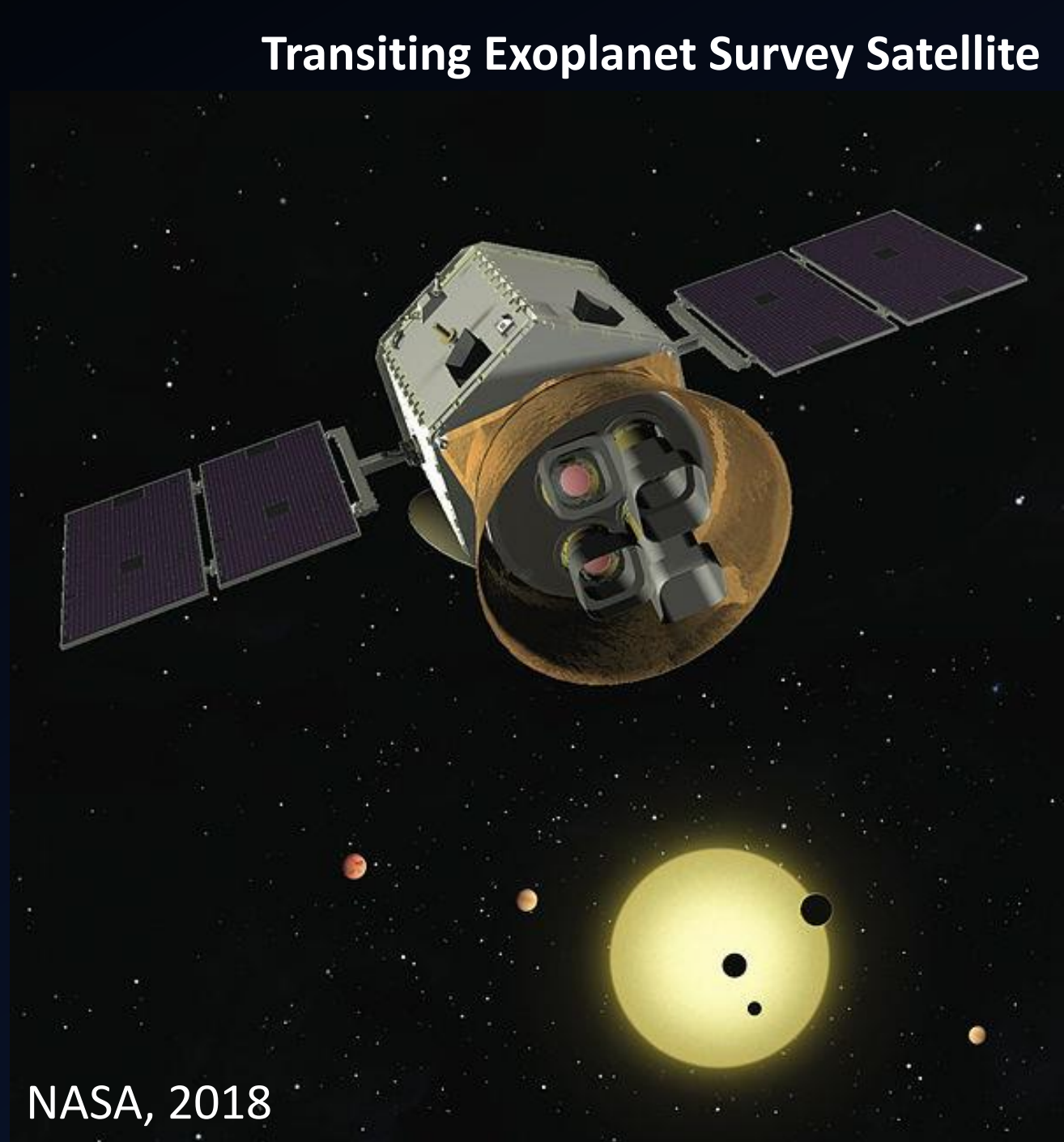
Поиск транзитных экзопланет у близких (ярких) звезд.

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.

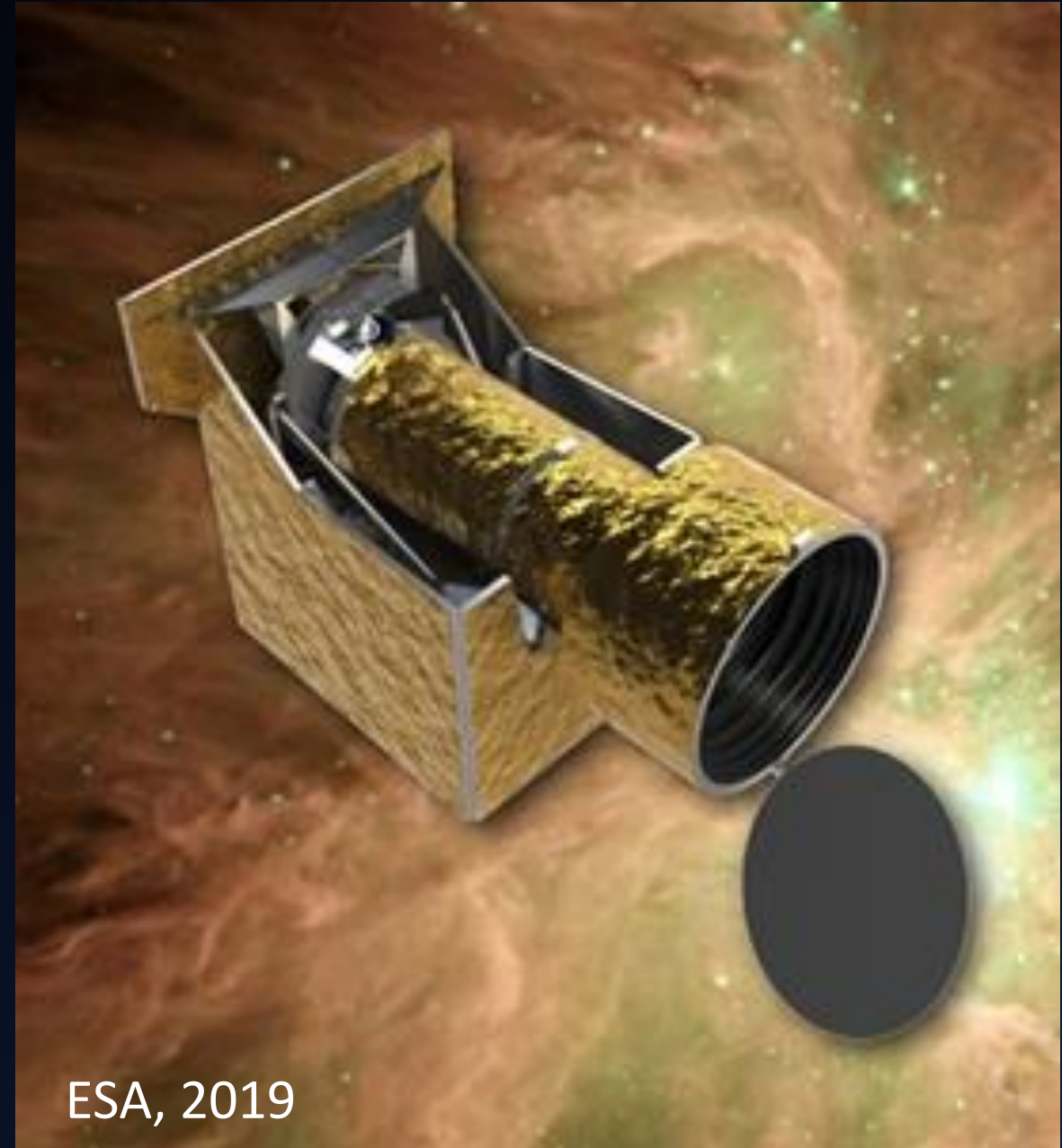
Transiting Exoplanet Survey Satellite



NASA, 2018

CHEOPS

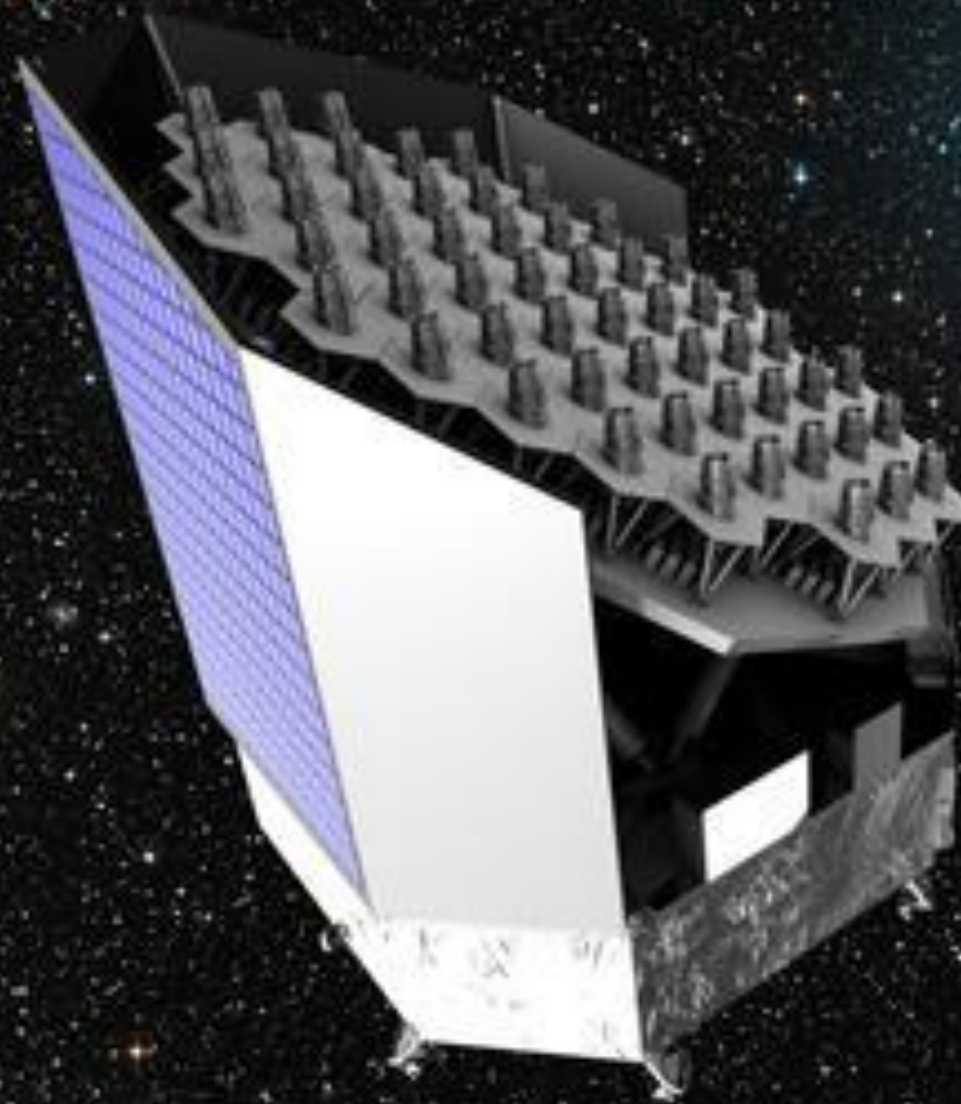
Небольшой спутник для определения радиусов экзопланет у близких звезд, для которых с помощью наземных телескопов уже получены оценки массы.



ESA, 2019

PLATO

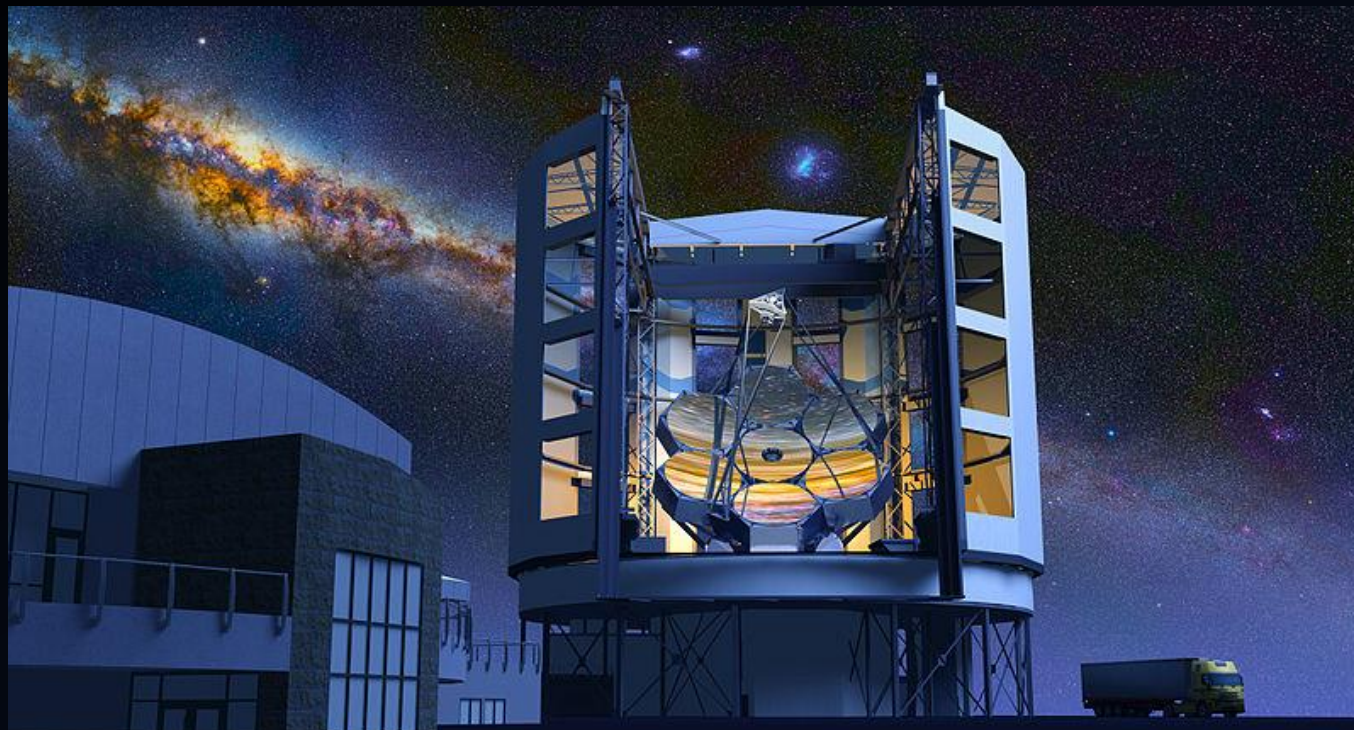
Planetary Transits and Oscillations of stars



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 2029 г.

Thirty Meter Telescope



Мауна Кеа. Гавайи.
Международная коллаборация.
Строительство задерживается.
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

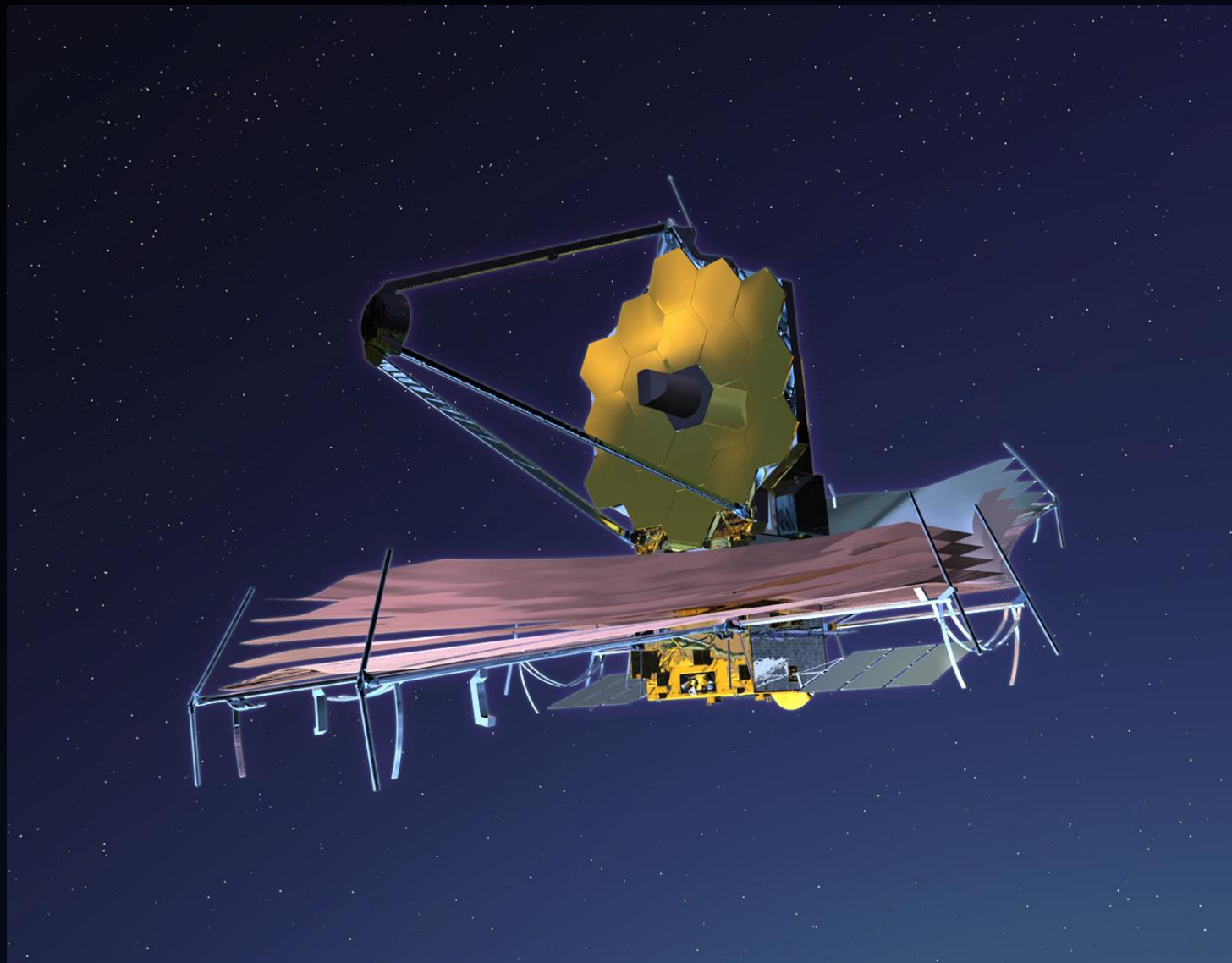


Эффективный размер - почти 40 метров
Европейская южная обсерватория (ESO).

Пустыня Атакама, Чили.

Планируемые сроки первого света – 2025 г.

James Webb Space Telescope (JWST)



Космический телескоп
следующего поколения.

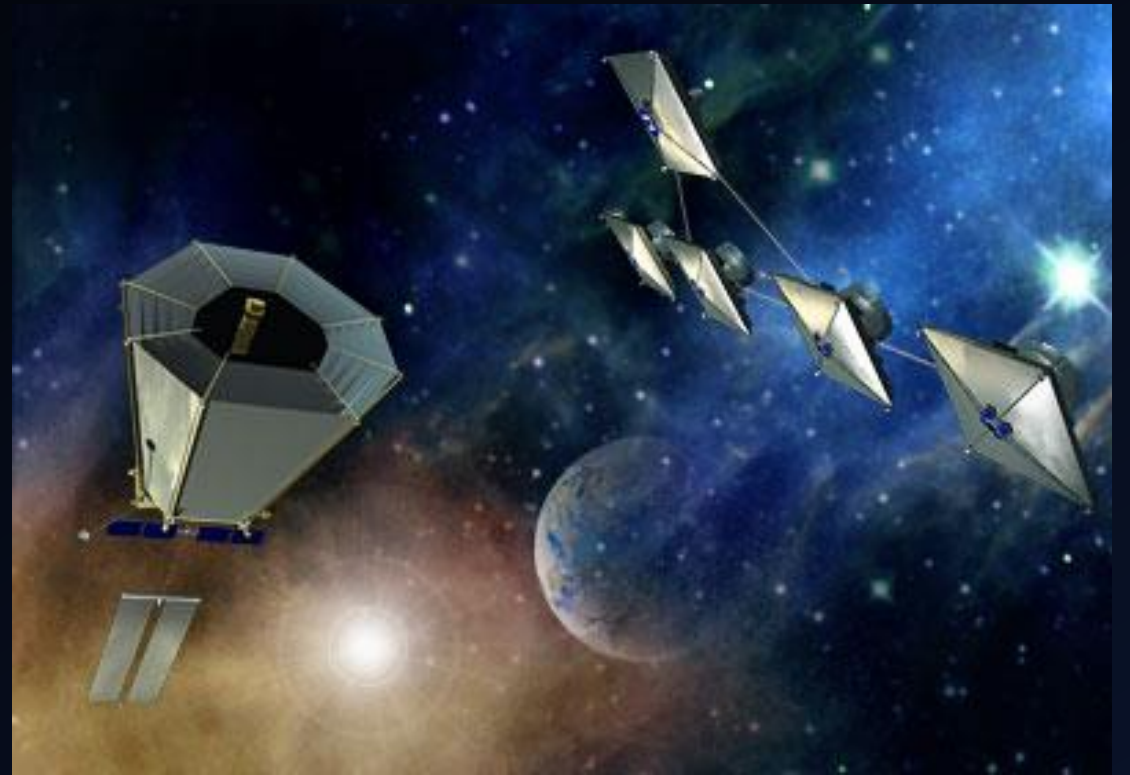
Ожидаемый запуск: 2022.

Инфракрасный диапазон.

Раскладывающееся зеркало
6.5 метра

Далекое будущее

Darwin

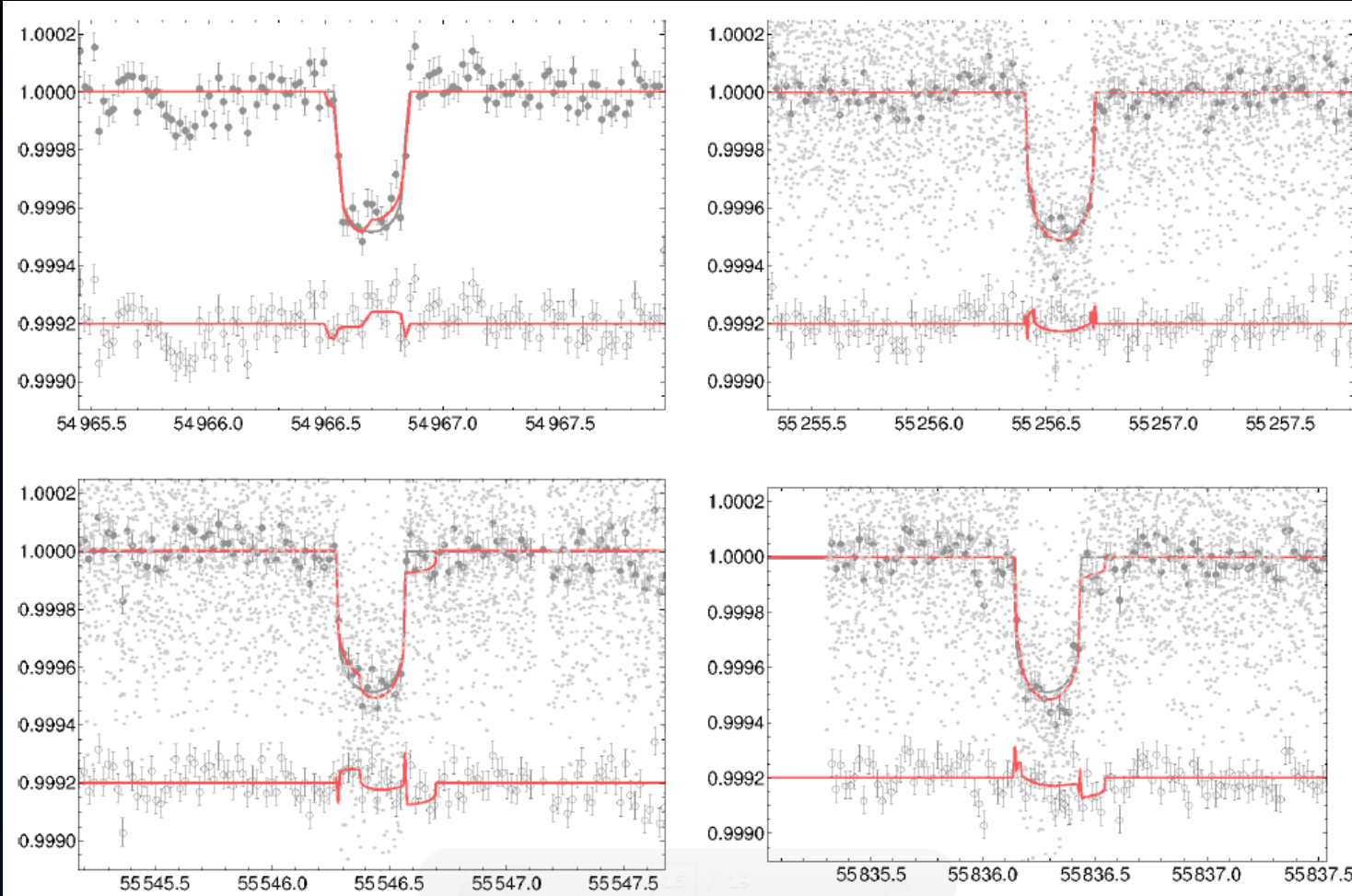


Terrestrial Planet Finder

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

Экзолуны могут быть обитаемы

Если луна достаточно велика,
чтобы удерживать атмосферу,
и находится в зоне обитаемости.

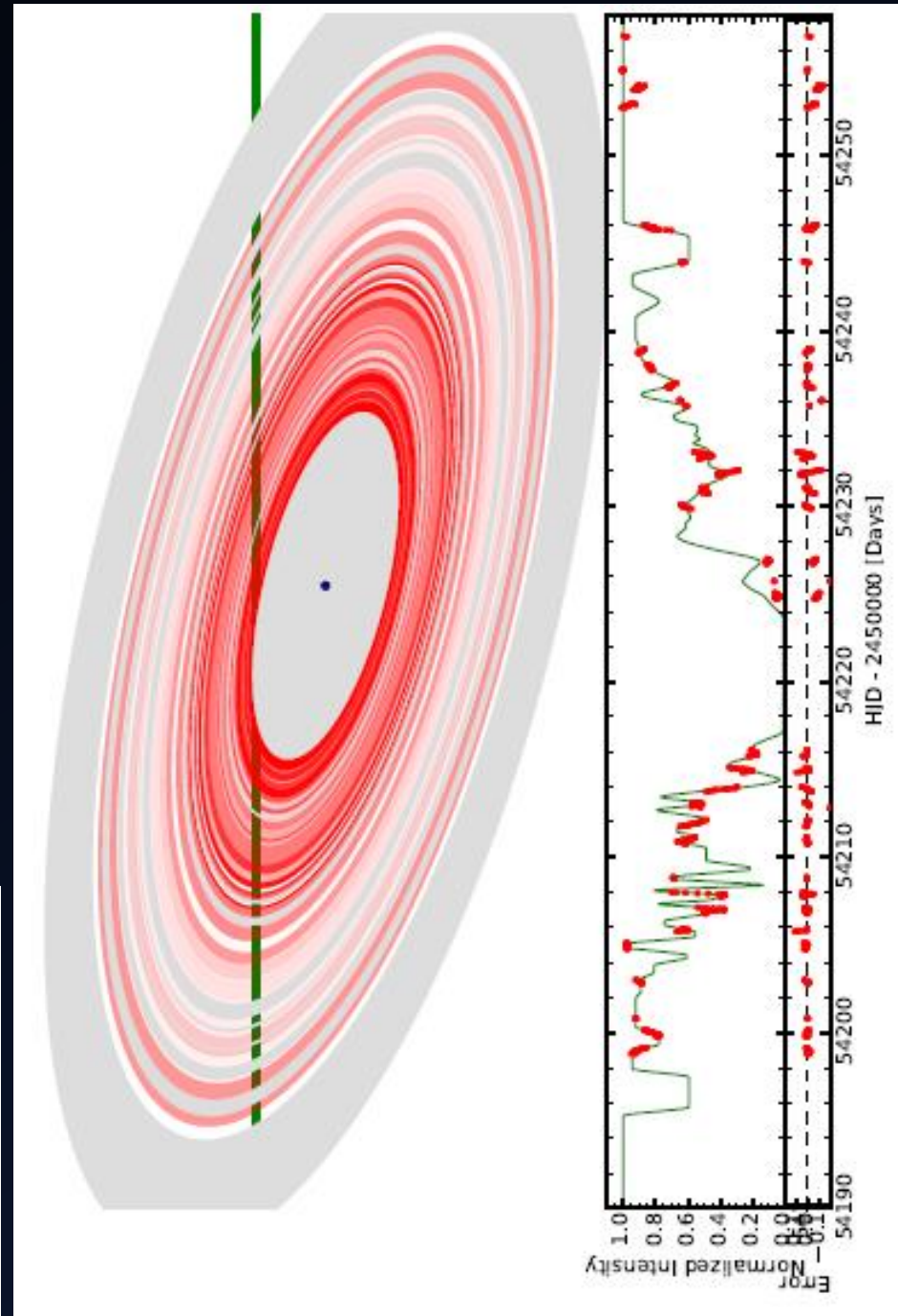
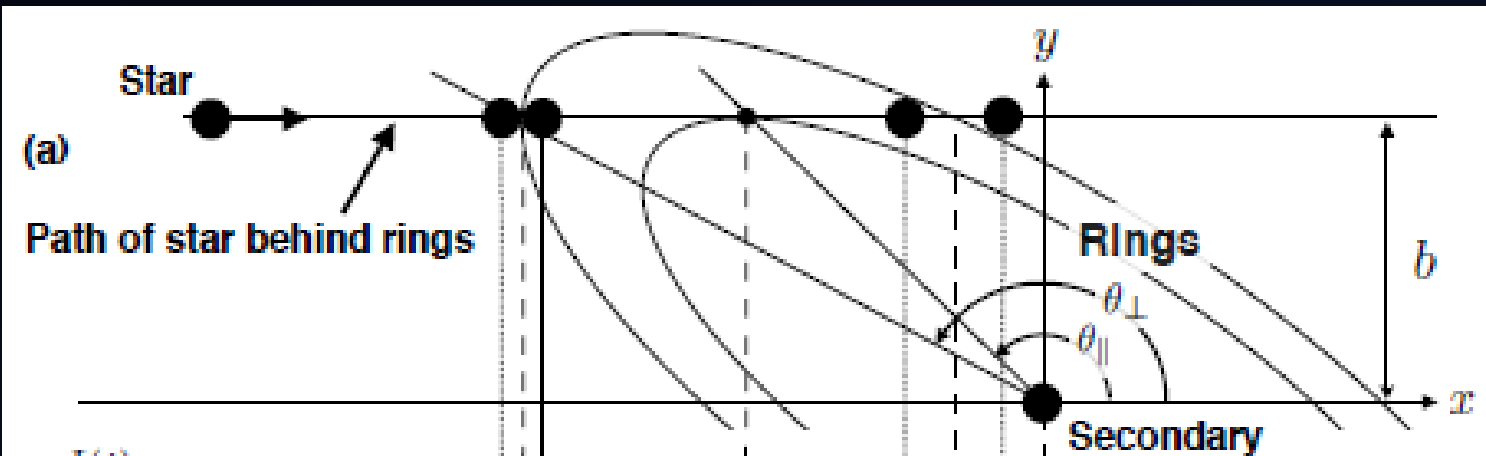


Такой спутник искали у планеты Керлер-22b. Сама планета слишком велика. Зато, тогда у нее может быть тяжелый спутник. Спутник не нашли – это дает верхний предел: спутник по крайней мере вдвое легче Земли.

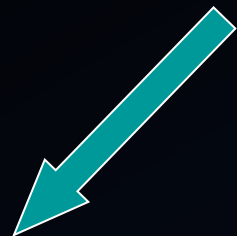
Гигантская система колец

Система из 37 колец, простирающихся до 0.6 а.е. вокруг невидимого спутника звезды.

Система колец, видимо, находится в стадии становления, т.к. звезда молода (16 млн лет). Кольца «выстраивают» спутники.

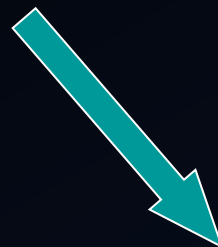
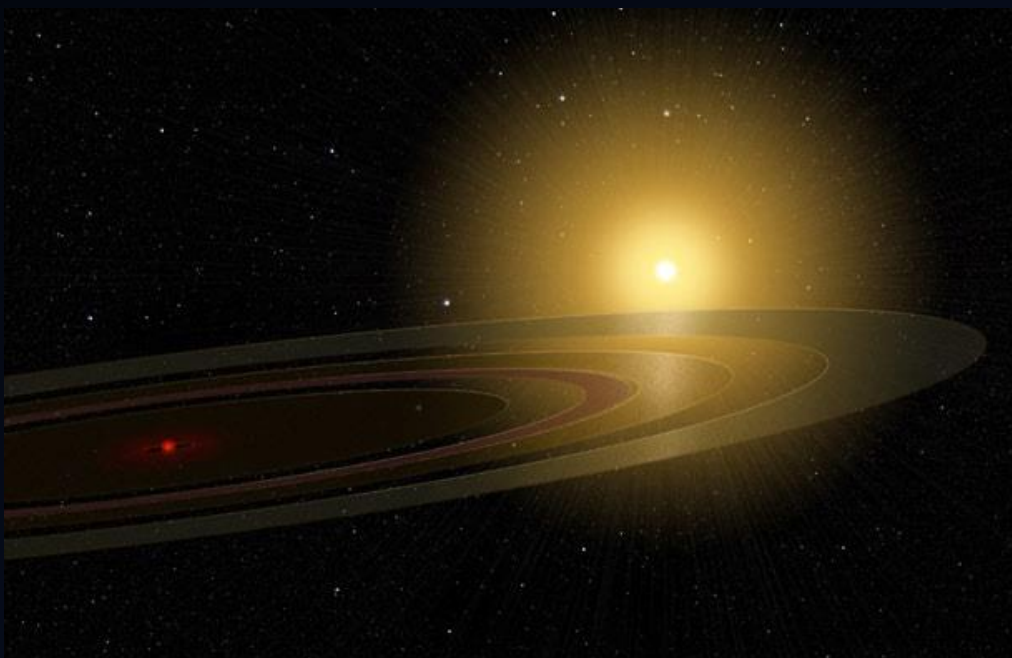


Экзолуны. Как образовать?



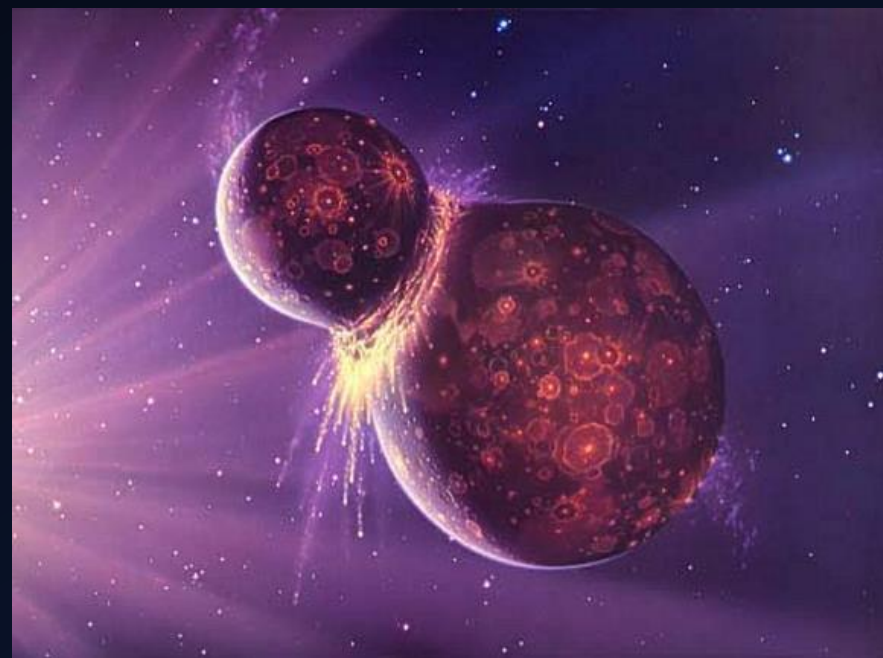
Регулярные спутники

Образуются вместе с планетами
из вещества околопланетного диска



Иррегулярные спутники

Захват или удар



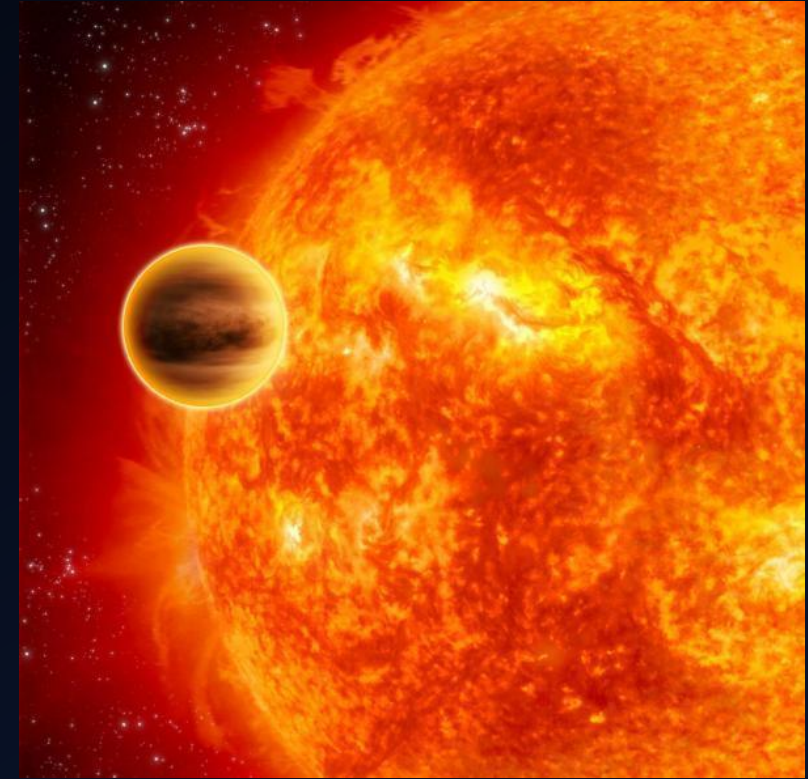
У каких планет могут быть «хорошие» экзолуны?

Чтобы спутник был большим относительно планеты (как Луна относительно Земли), он должен быть иррегулярным.



Следует выбирать системы, где много планет.

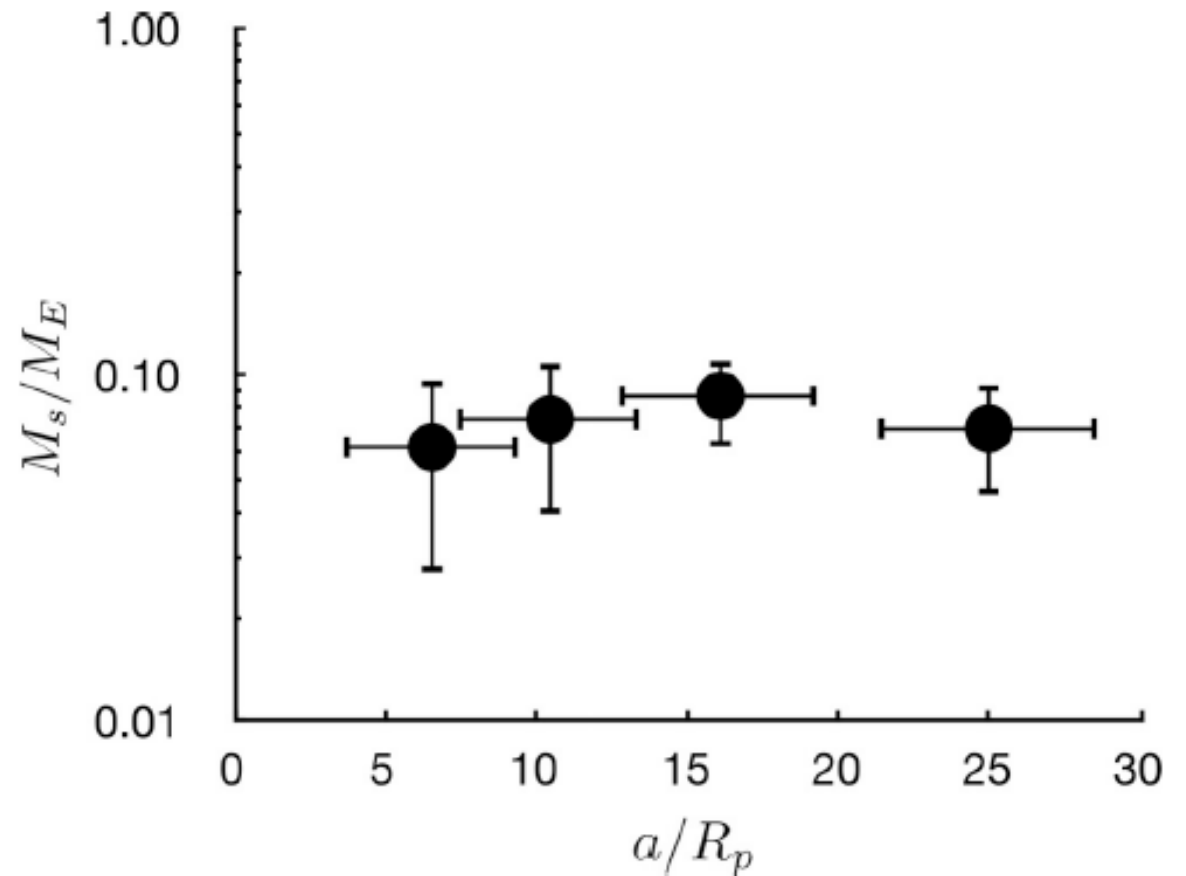
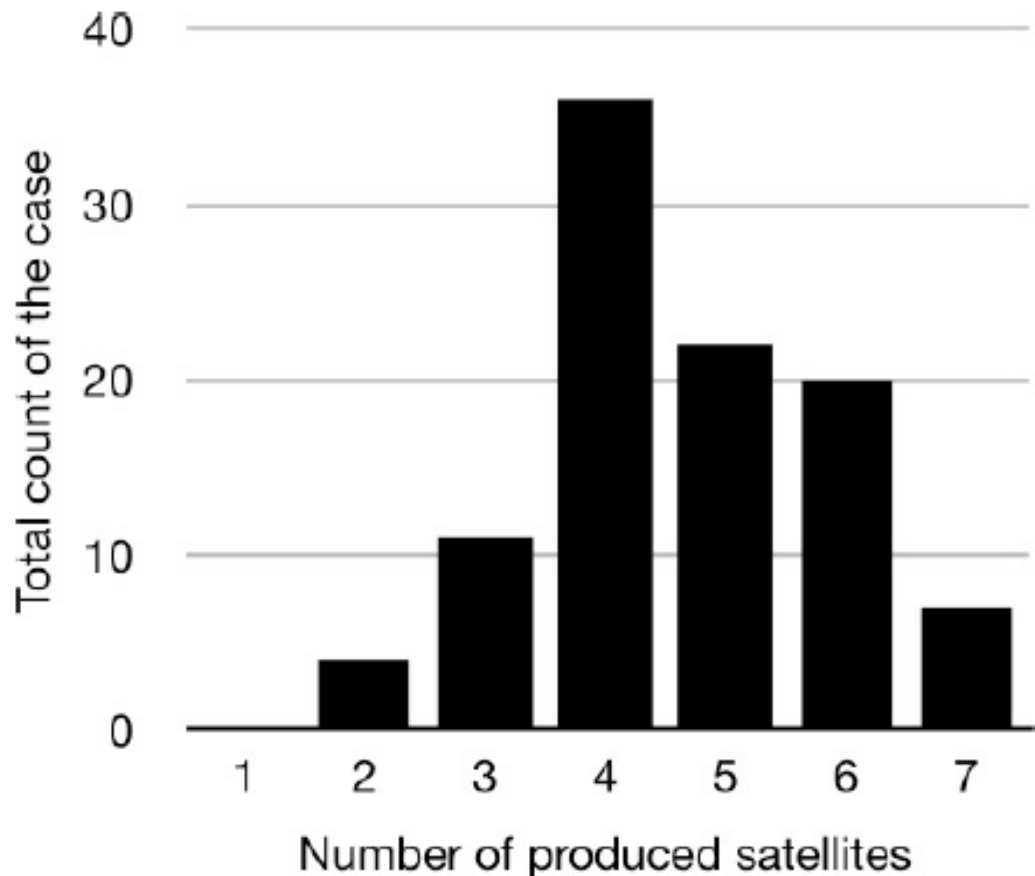
Большие луны должны быть у больших планет.



Горячие юпитеры должны растерять свои спутники пока мигрируют к звезде

Моделирование образования больших спутников

Моделирование образования крупных спутников у планеты с массой $10 M_J$

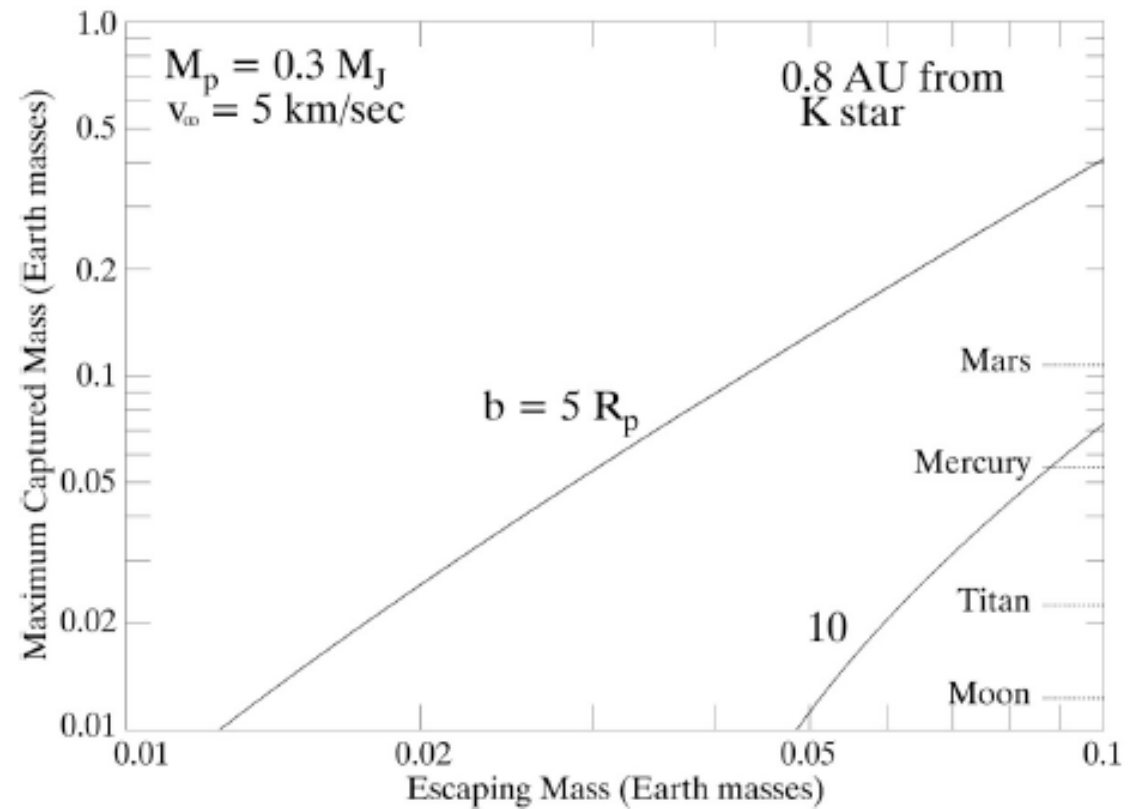
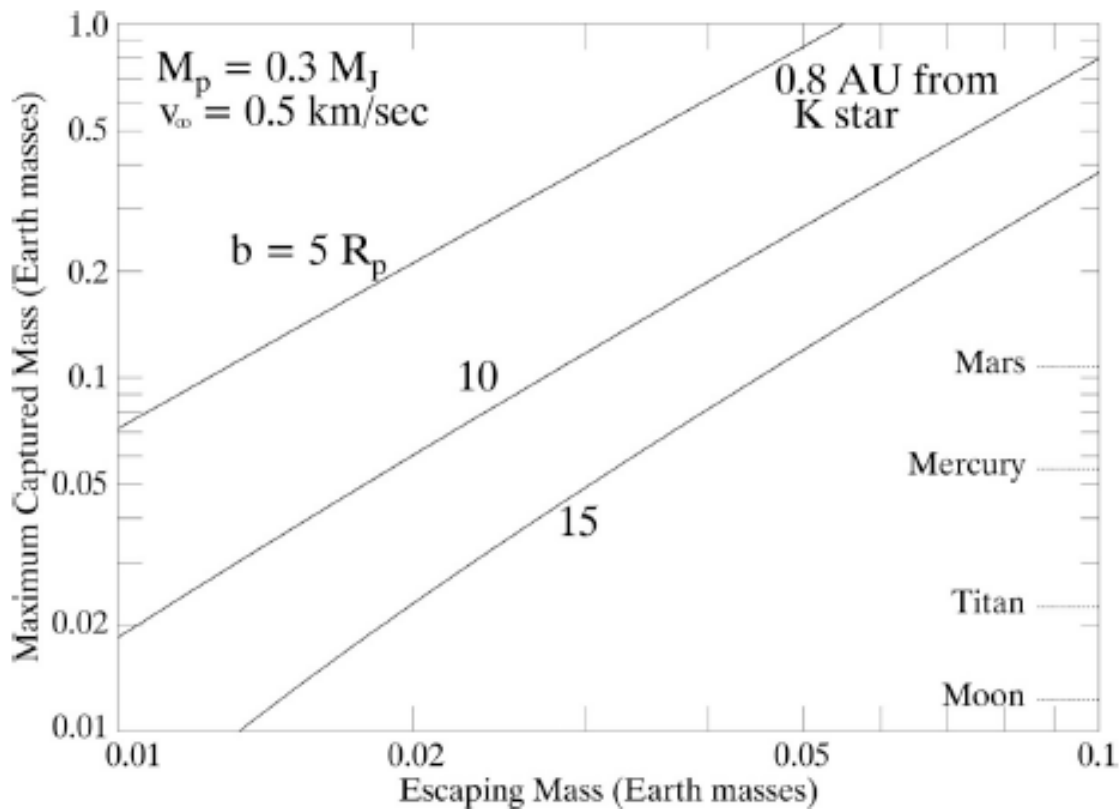


Захват спутника

Показаны результаты расчетов для захвата массивного спутника, имевшего компаньона. Компаньон выбрасывается из системы.

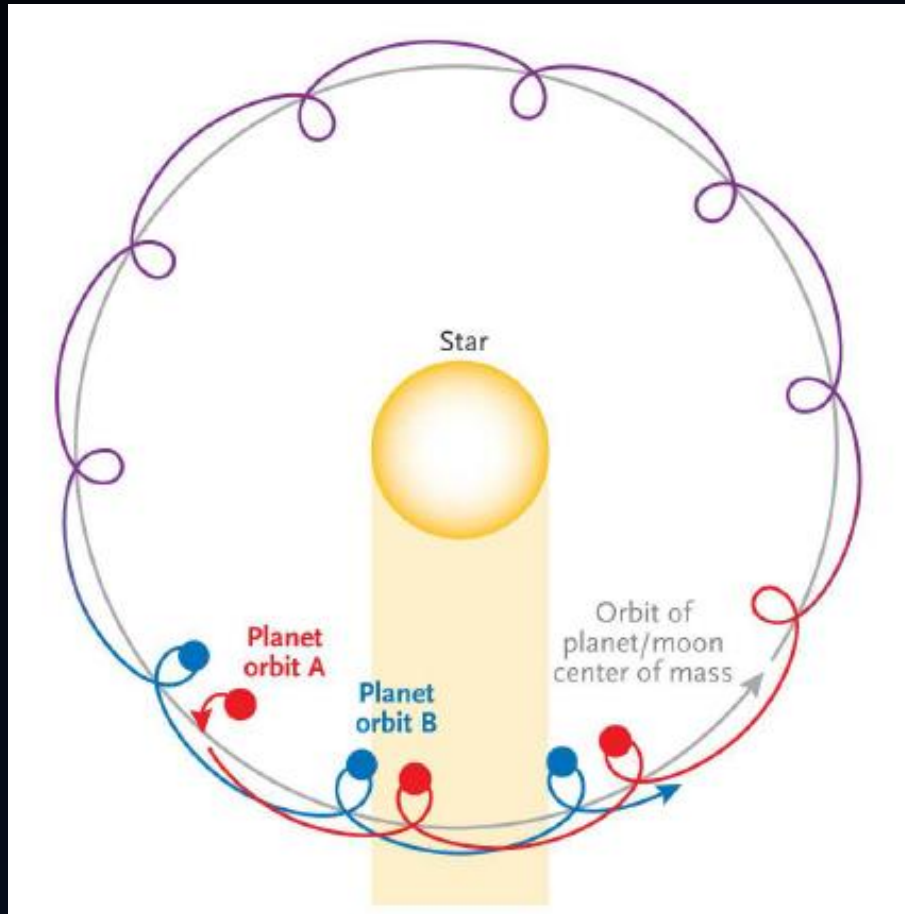
Такой сценарий проще реализовать вблизи массивной планеты.

Причем, в зоне обитаемости вероятность положительного исхода возрастает.



Как открыть экзолуну?

В принципе, могут работать все методы, пригодные для открытия экзопланет. Однако на сегодняшний день лучшим является поиск лун у транзитных планет.



1. Тайминг транзитов

Планета со спутником будет иметь «сдвинутый график» прохождений.

2. Длительность транзита

Наличие спутника приводит к вариации скорости движения планеты.

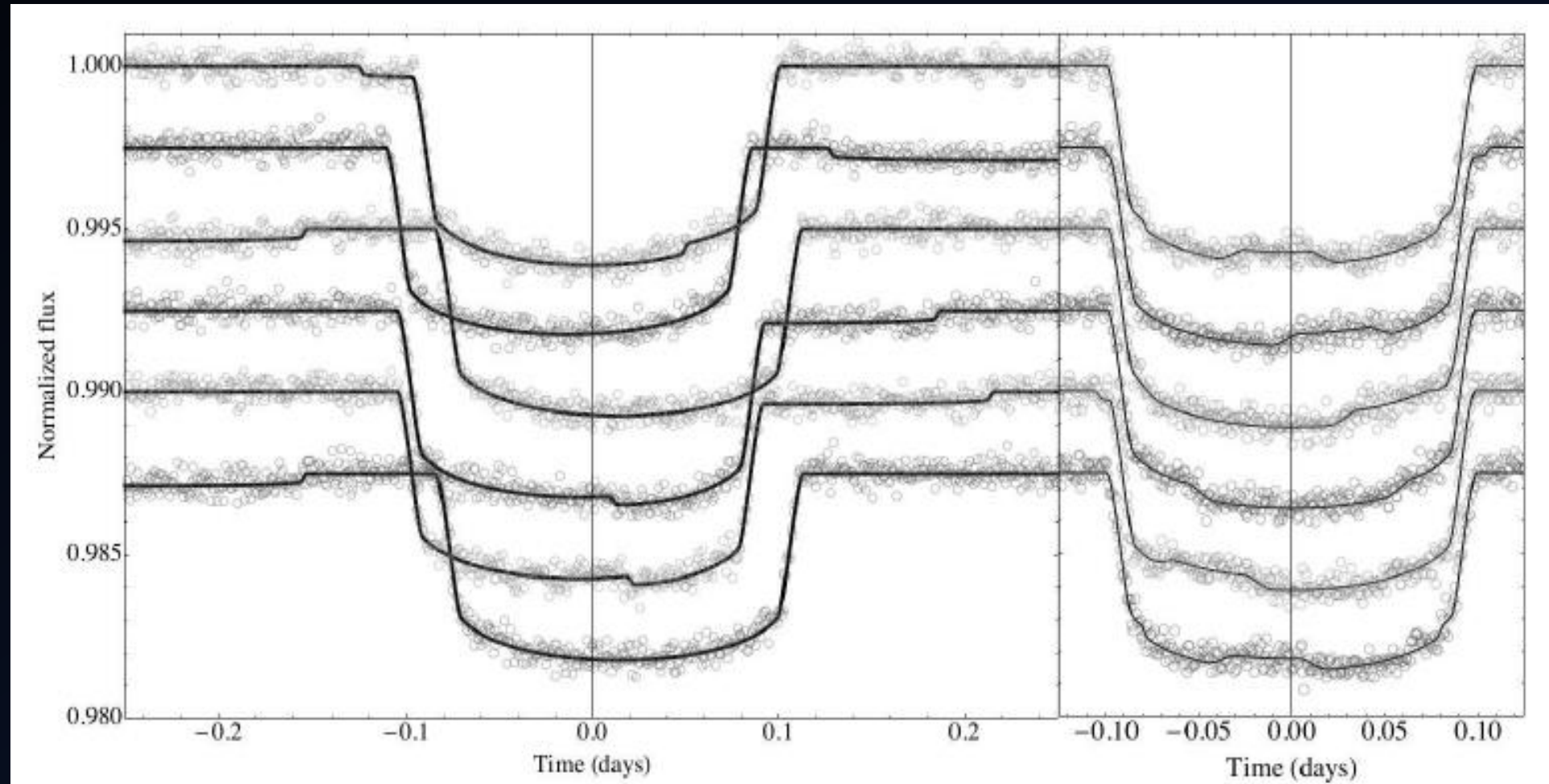
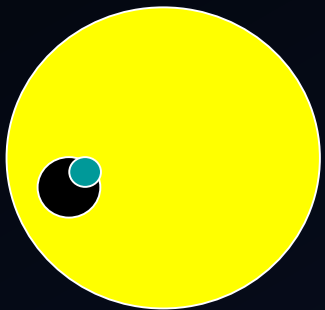
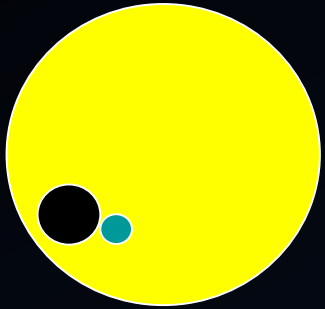
Из-за этого меняется длительность транзита.

3. Сдвиг плоскости орбиты

Из-за влияния спутника планета смещается перпендикулярно основной плоскости орбиты.

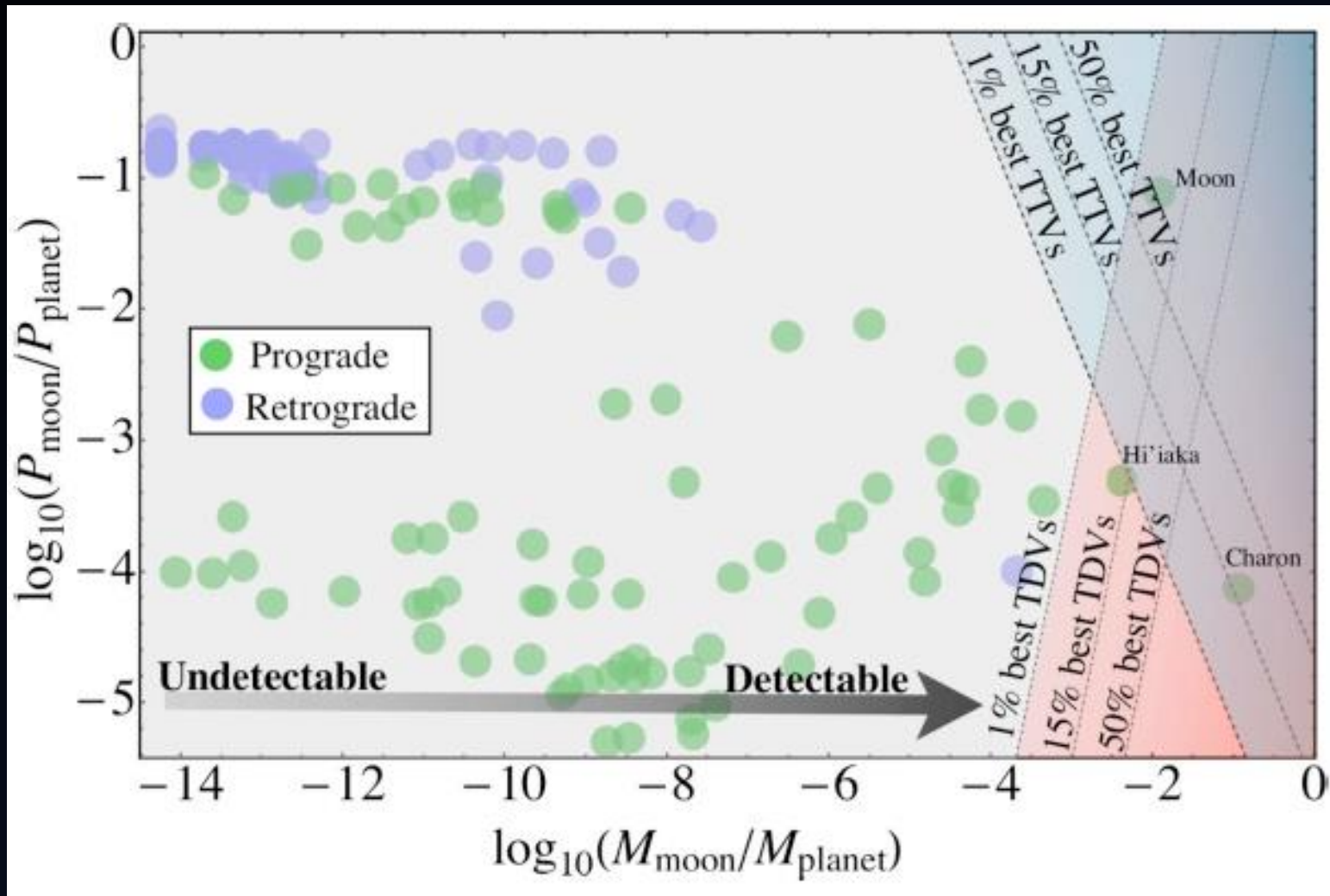
Совместные затмения

Похоже, как будто планета наехала на темное пятно на диске звезды.



1405.1455

Современные пределы

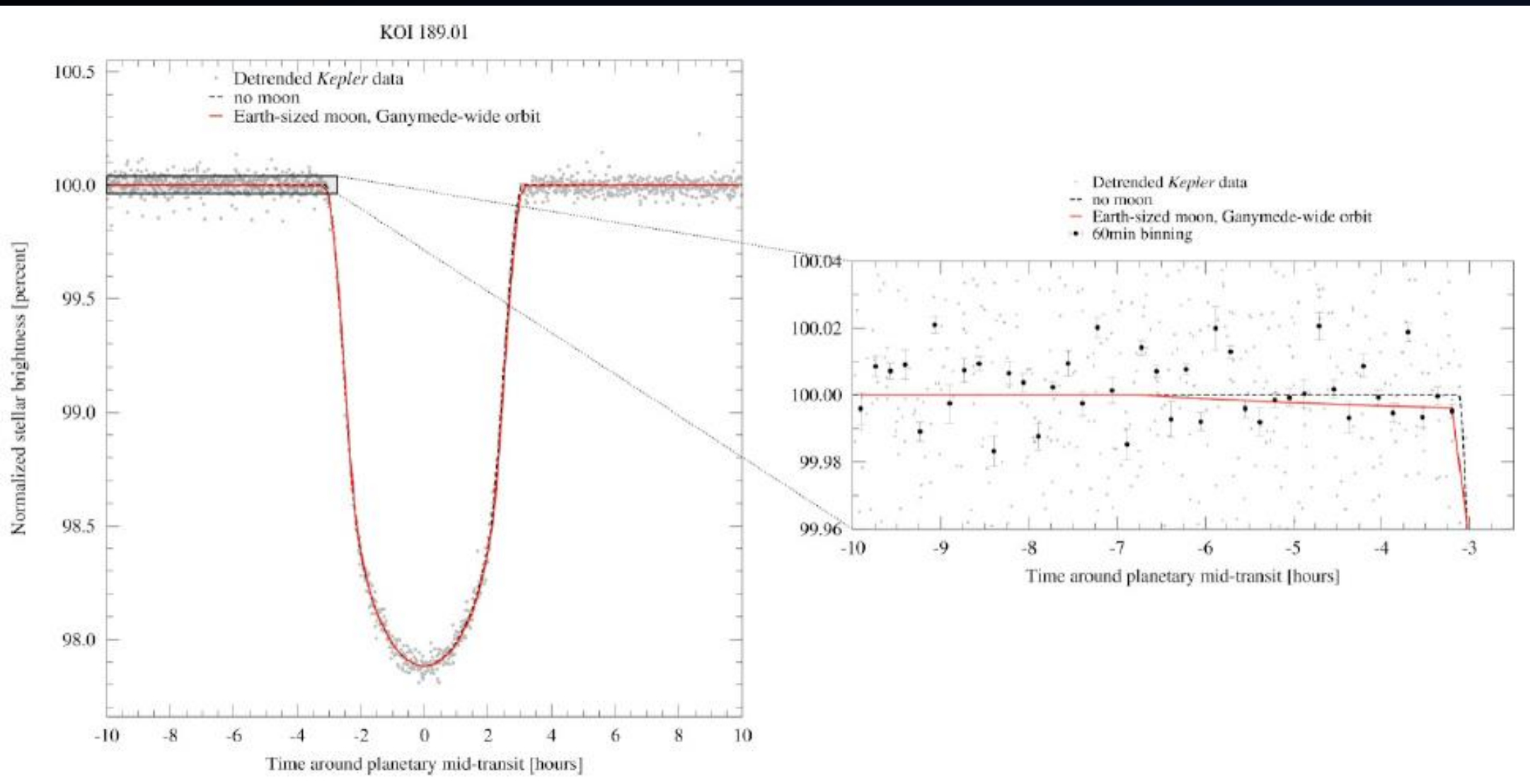


Показано, что бы мы получили, если бы луны Солнечной системы вращались вокруг планеты на 100-дневной орбите.

Предполагается, что у нас есть данные Кеплер за 4.35 лет, а поиск ведется по
- времени транзита
- длительности транзита

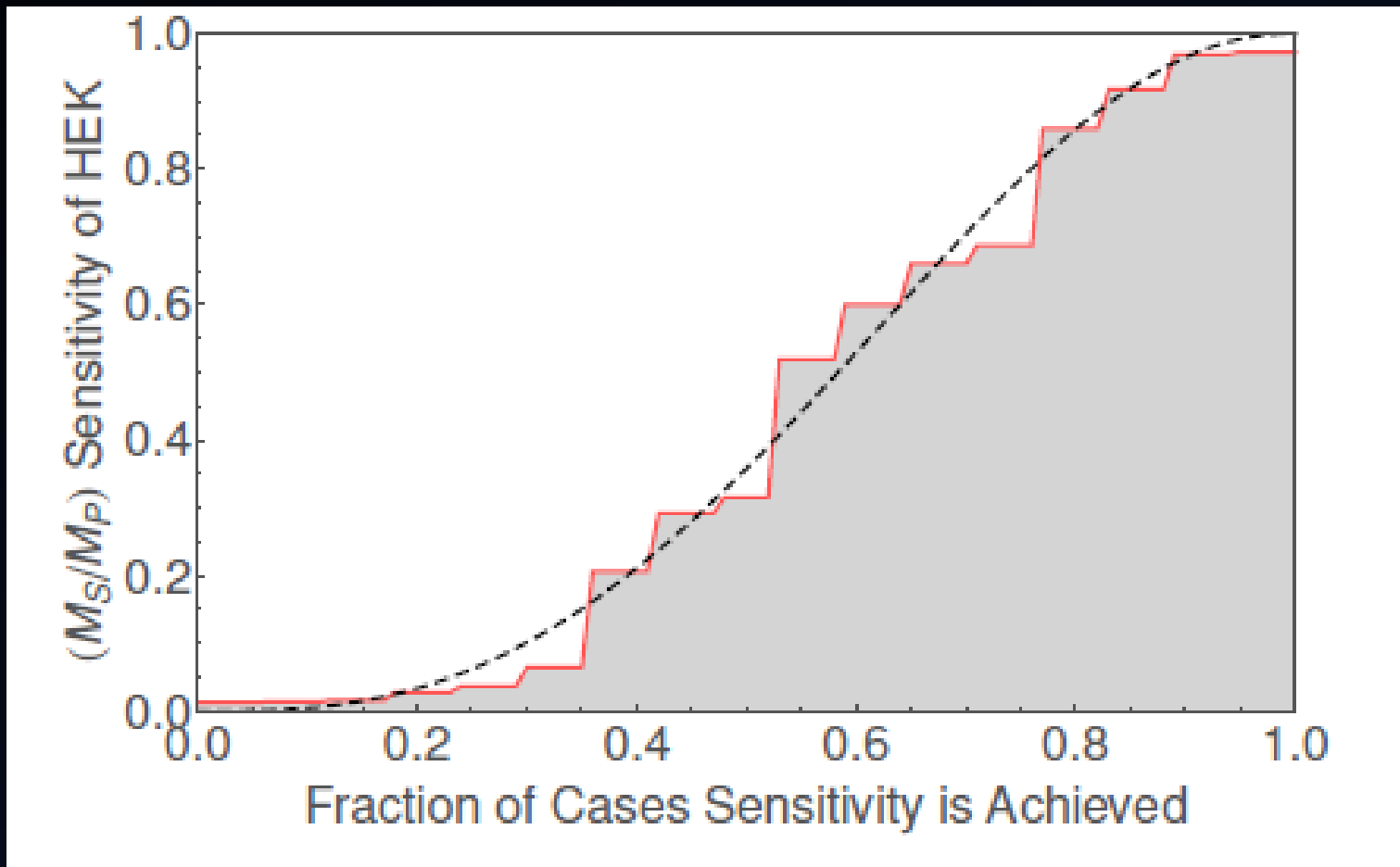
Насколько мал эффект

Планета типа Юпитера, луна – типа Земли.



Hunt for Exomoons with Kepler

Соотношение масс, как у Земли-Луны,
давало бы регистрацию в 14% случаев.
А как у Плутона-Харона – в 32%.



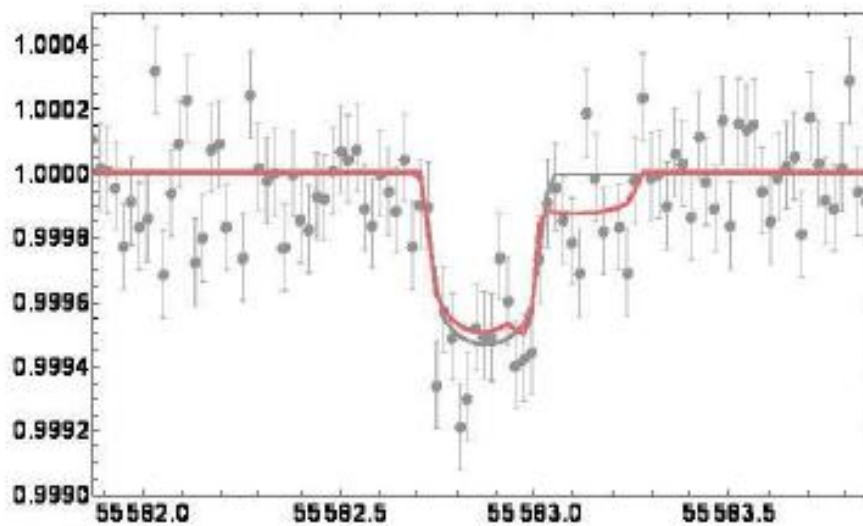
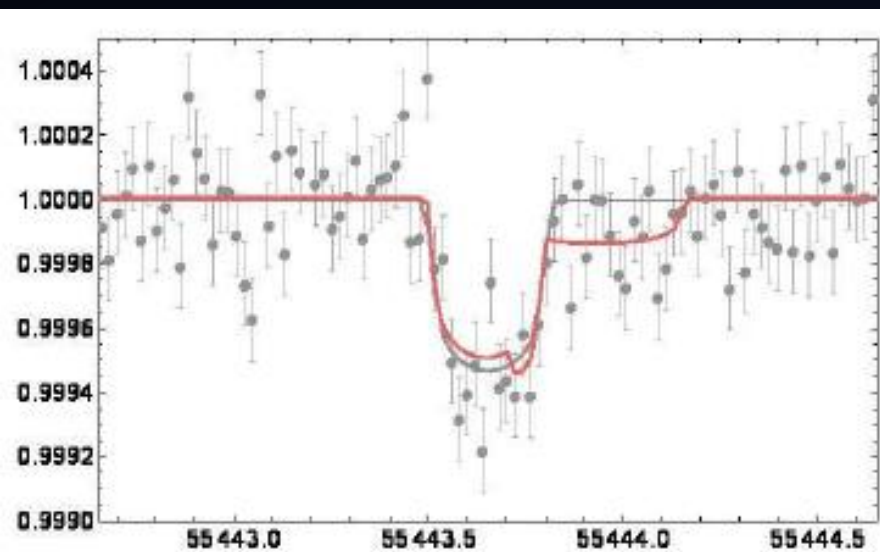
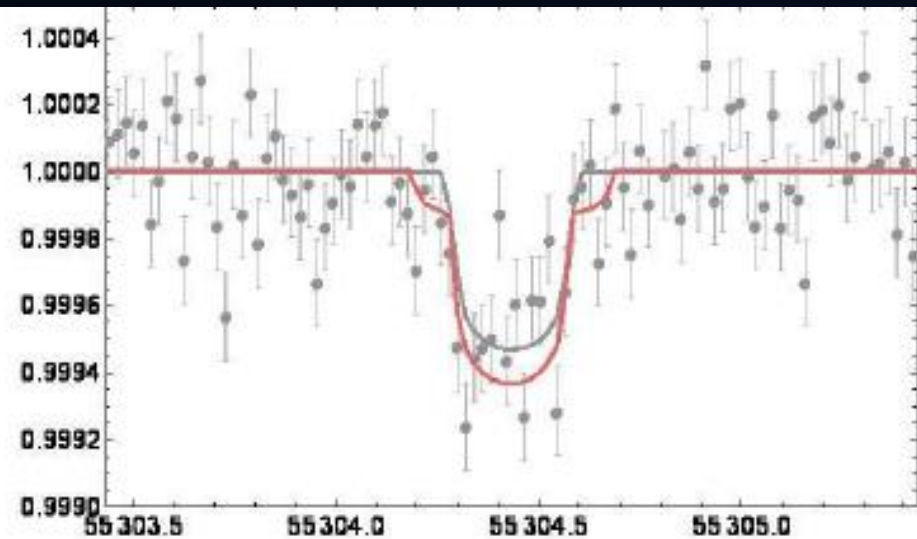
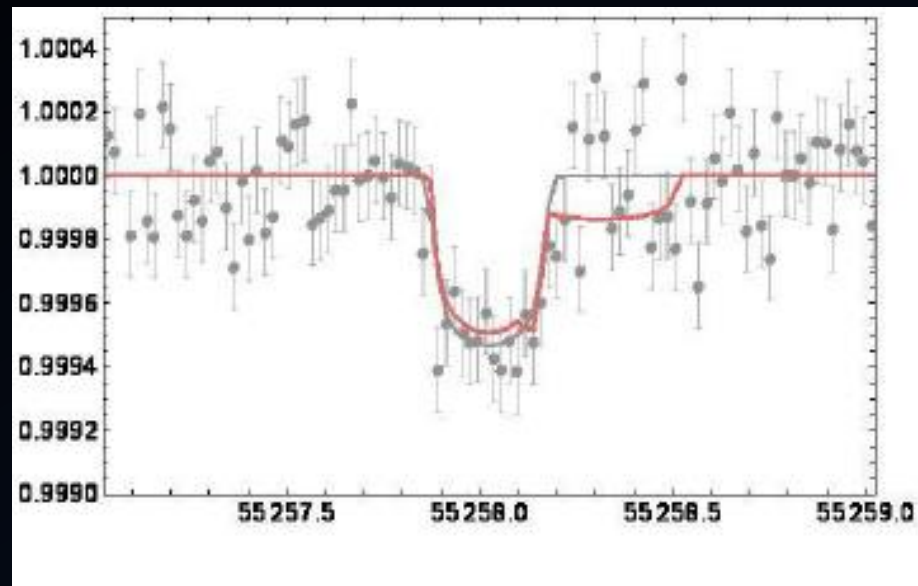
1405.1455



Искали вокруг 17 планет,
но ничего не нашли.

Если пары типа Земля-Луна
и Плутон-Харон
не являются исключениями,
то Кеплеру надо
изучить около 100 планет,
чтобы найти такие.

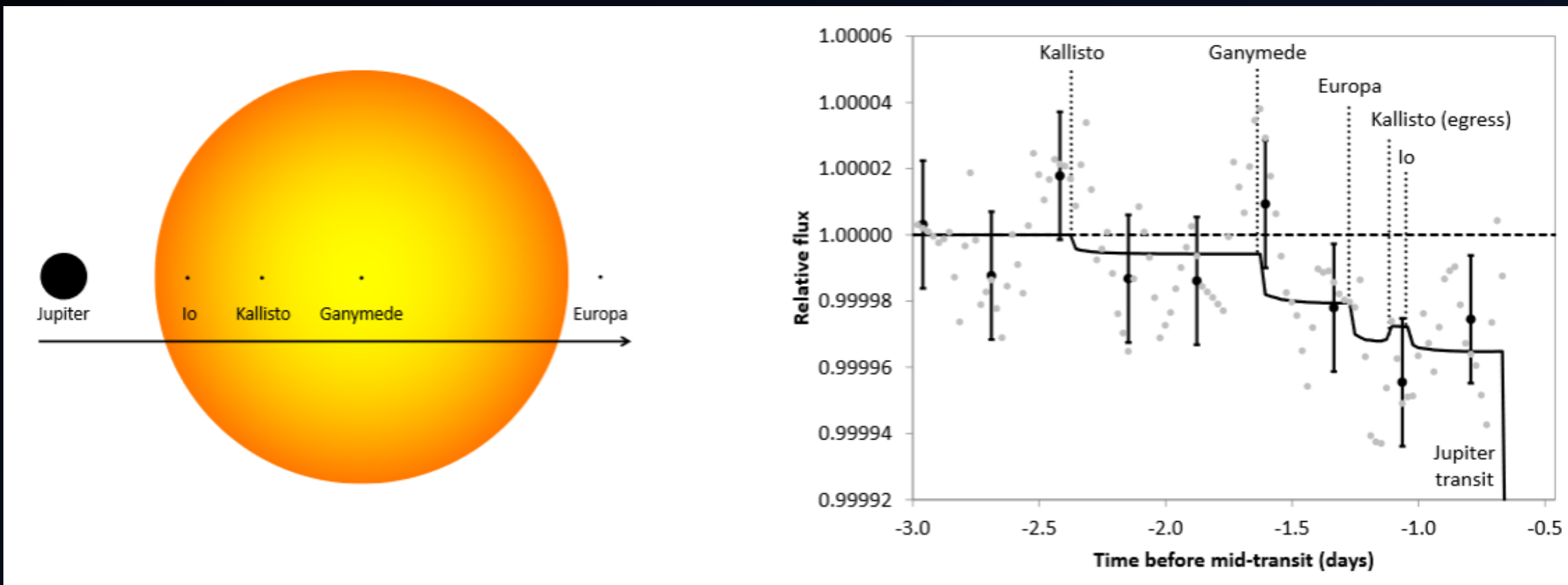
Примеры поиска



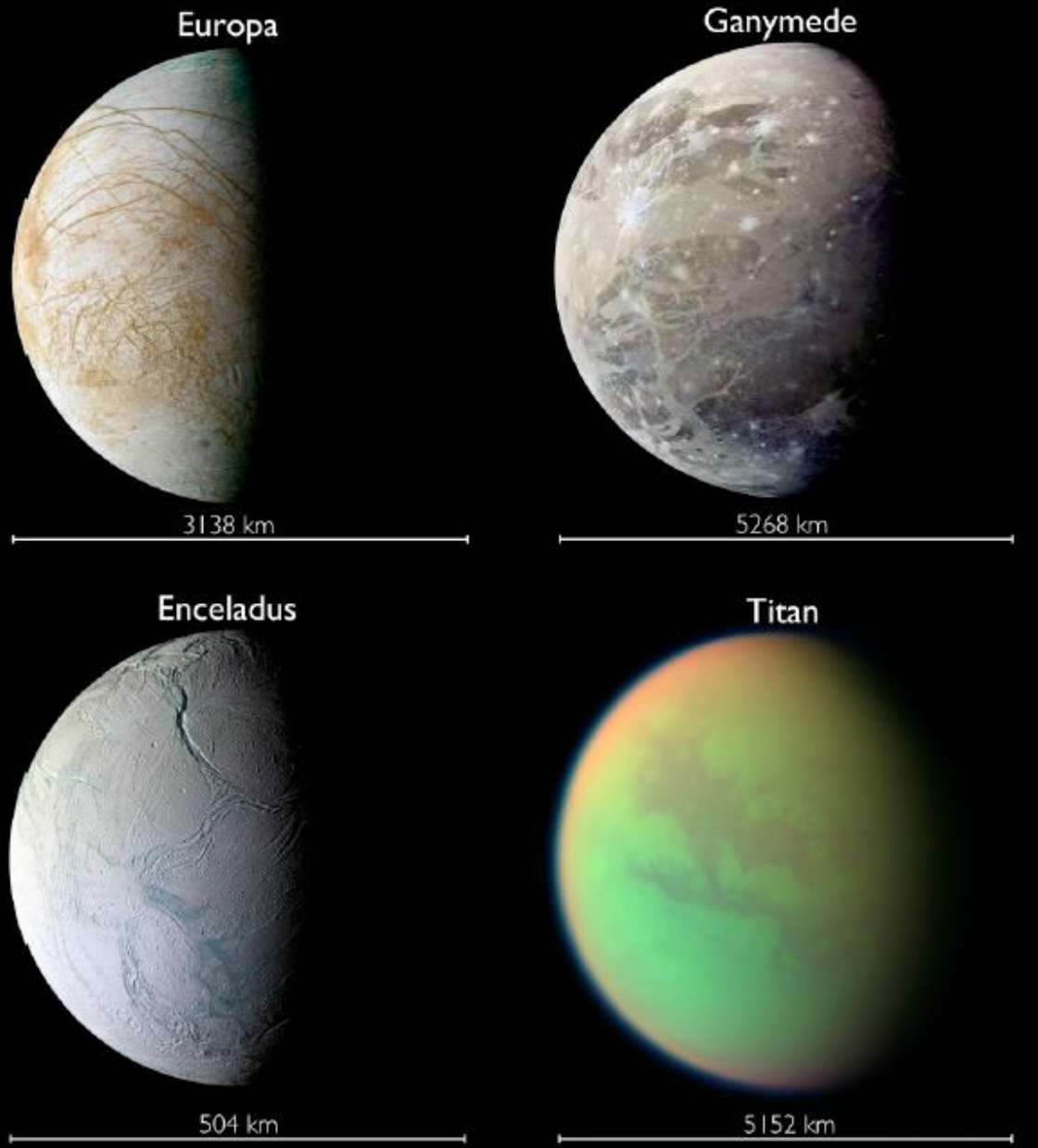
Серая кривая —
если луны нет.
Красная —
если есть.

Возможность обнаружить аналог Солнечной системы

Расчеты для спутника PLATO (2024 г.)



... и в Солнечной системе ...



Потенциально обитаемыми
Считаются четыре объекта:
спутники Юпитера и Сатурна.

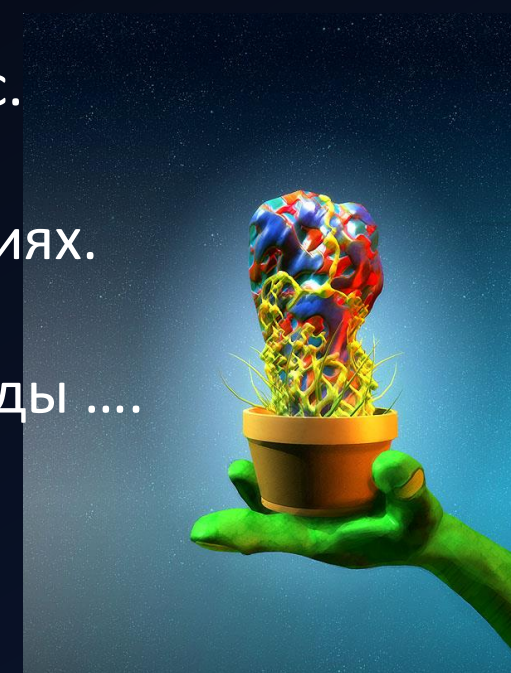
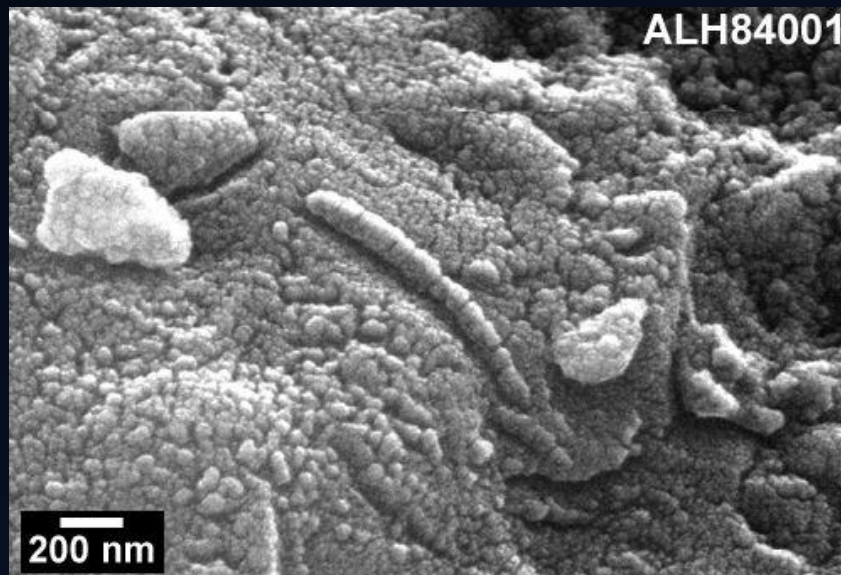


Ждем JUICE (2022-...)

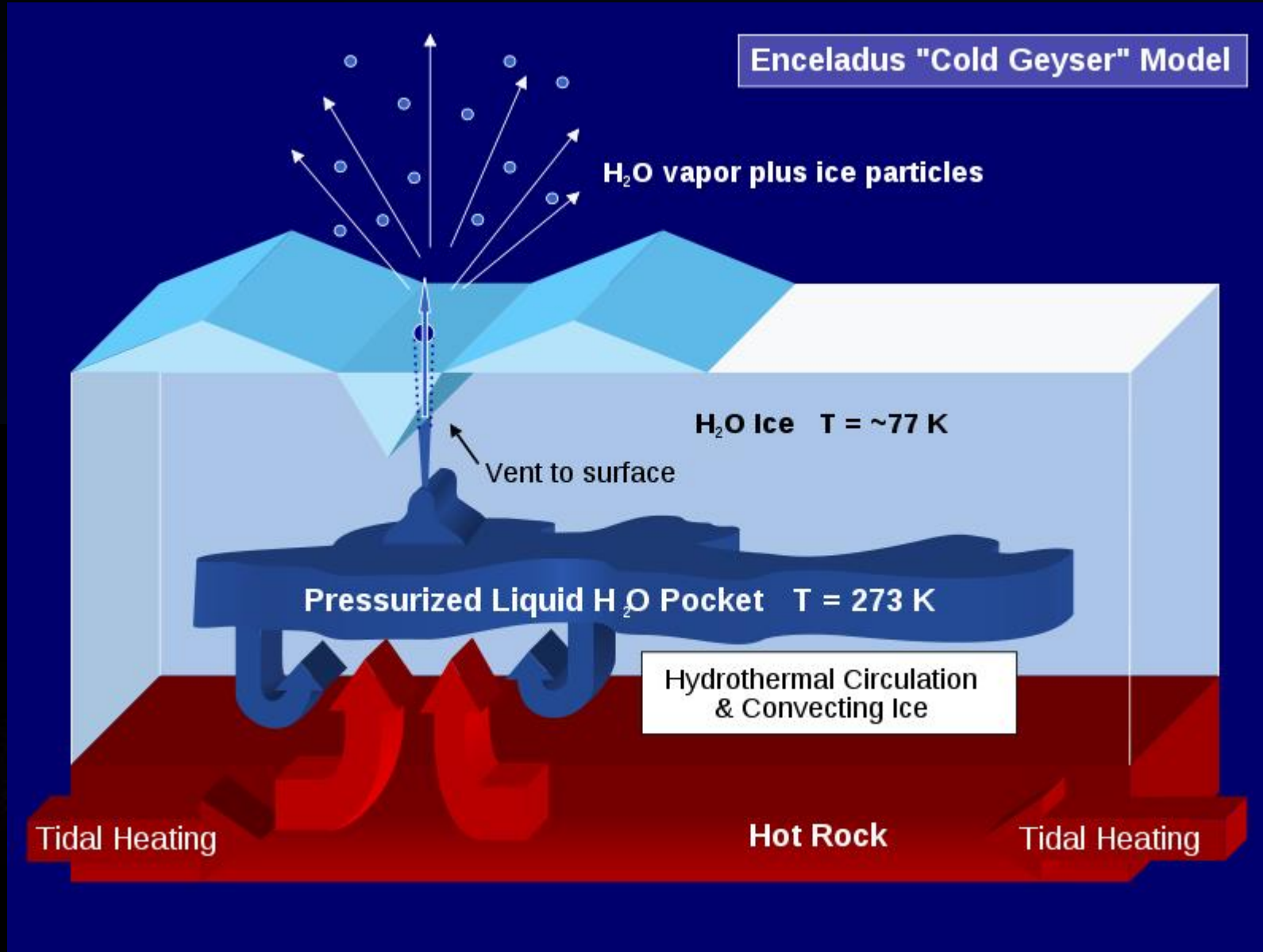
Жизнь в Солнечной системе



Формально, в зону обитаемости в Солнечной системе попадает только Земля. В некоторых моделях на самом краю оказывается и Марс. Но жизнь может «пробиться» и в довольно экстремальных условиях. Важно, чтобы была жидкая вода (или что-то аналогичное), много воды

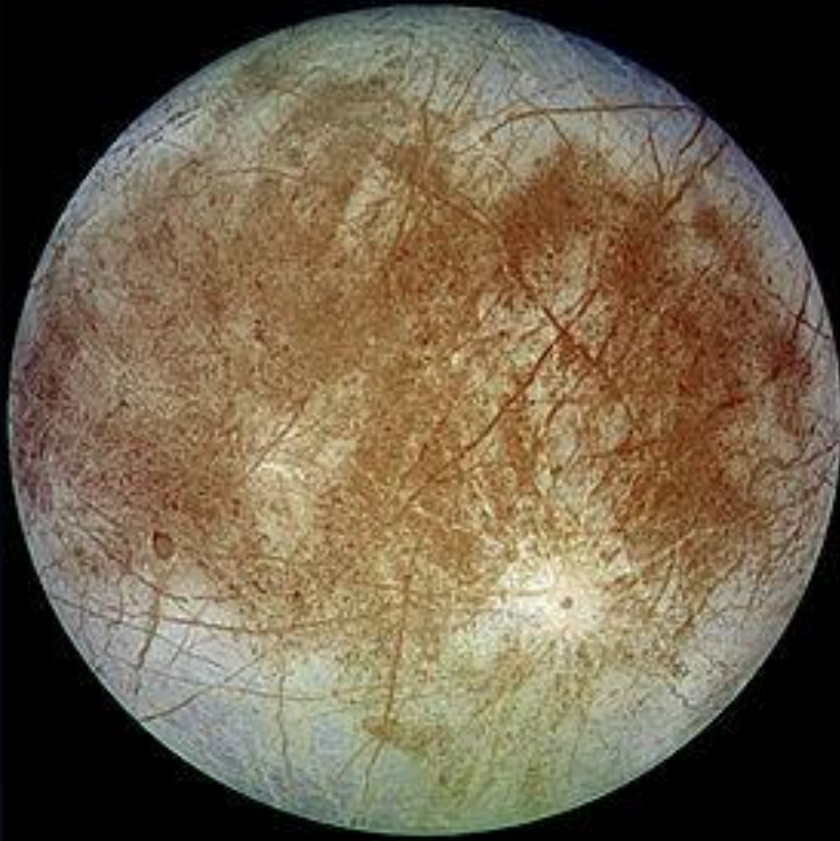


Энцелад – спутник Сатурна



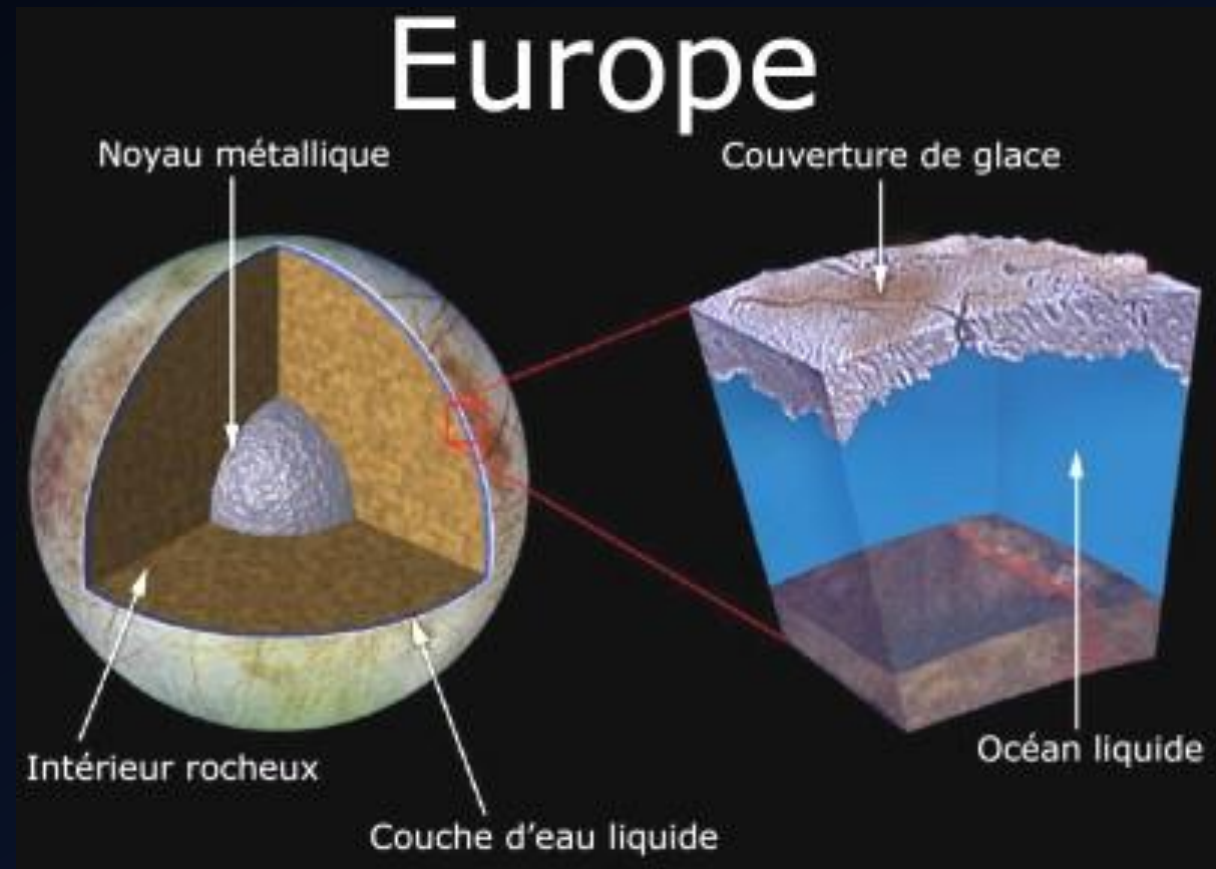
Аппарат Кассини открыл выбросы, в которых оказалось много воды.

Европа – спутник Юпитера

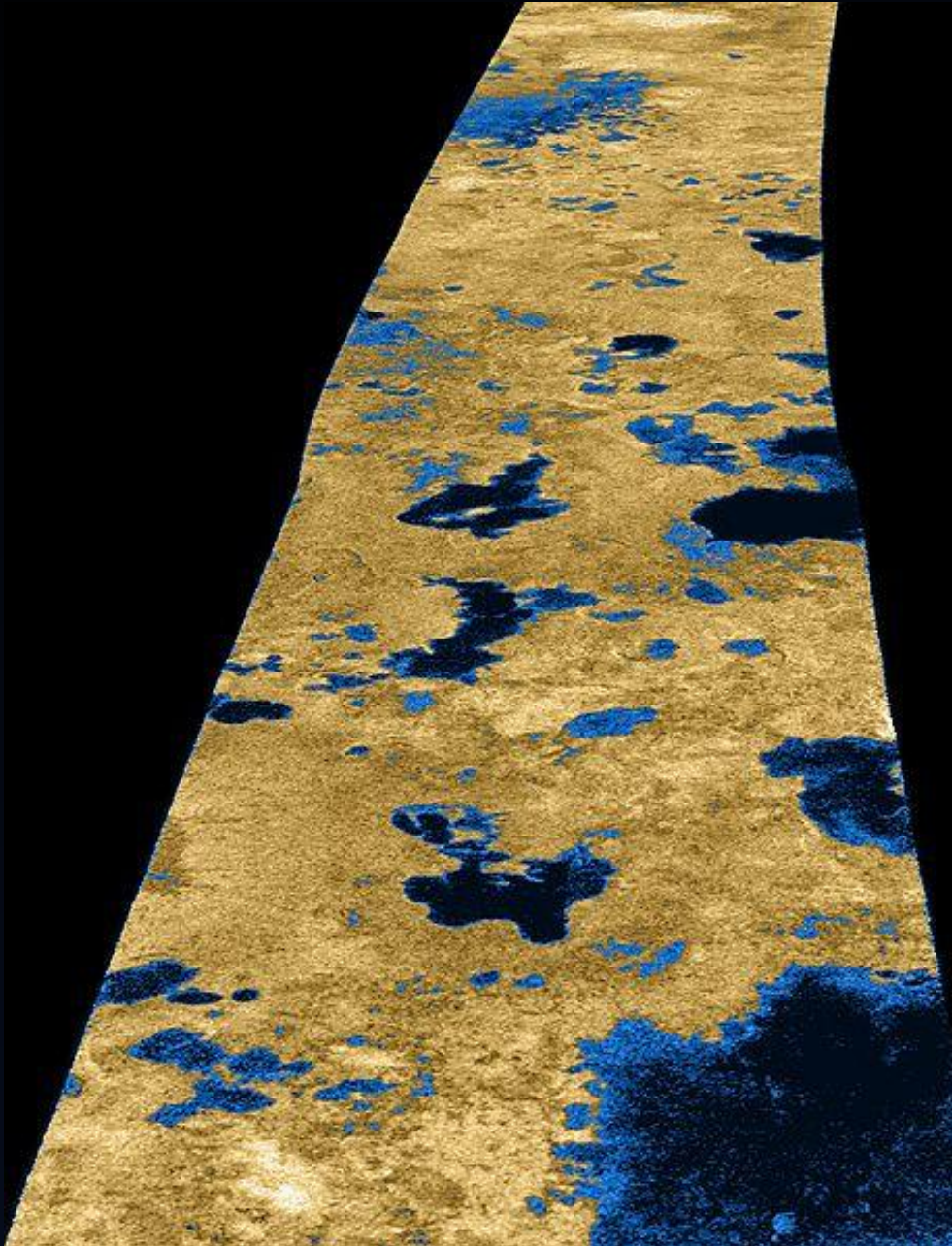


Первый хороший кандидат в обитаемые объекты

Есть надежда, что под верхней ледяной коркой находится достаточно большой объем воды (океан).



Титан – спутник Сатурна



У Титана есть достаточно плотная атмосфера. Правда, она состоит из азота и метана.

Там есть климат, есть метановые дожди и ...
озера.

В 2005 году на Титан совершил посадку аппарат «Гюйгенс».

