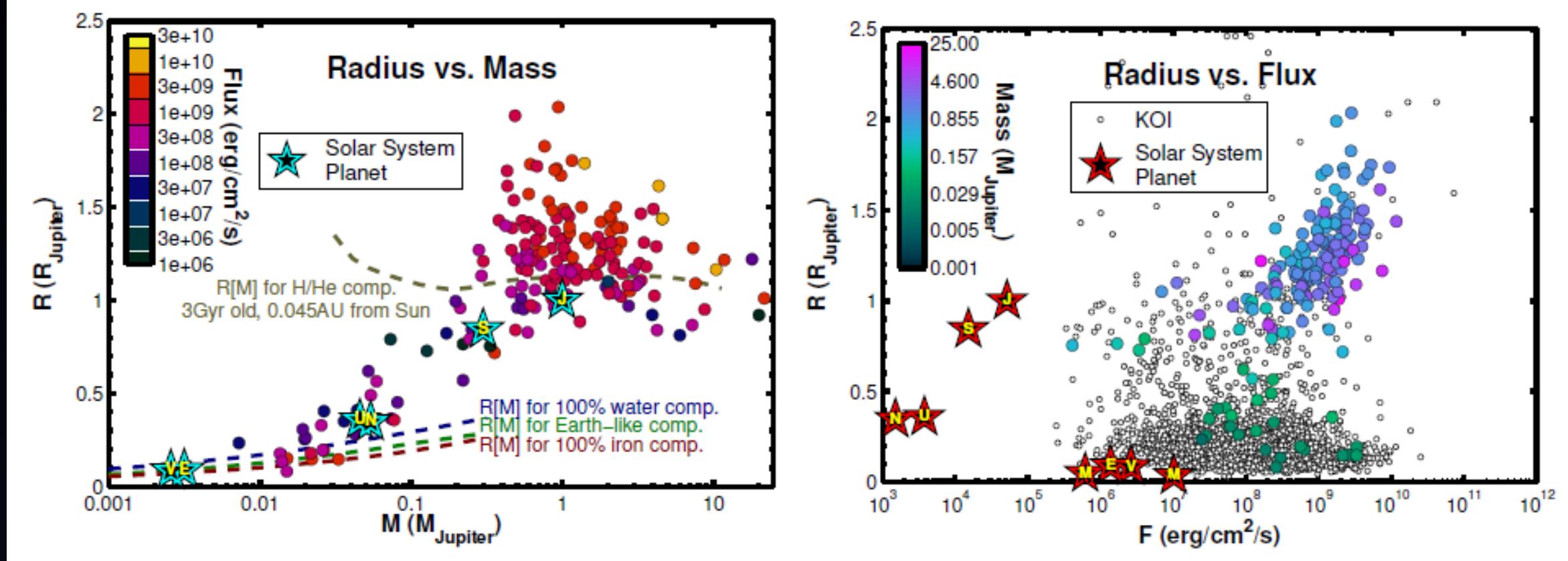


Экзопланеты: строение и эволюция

Размеры планет

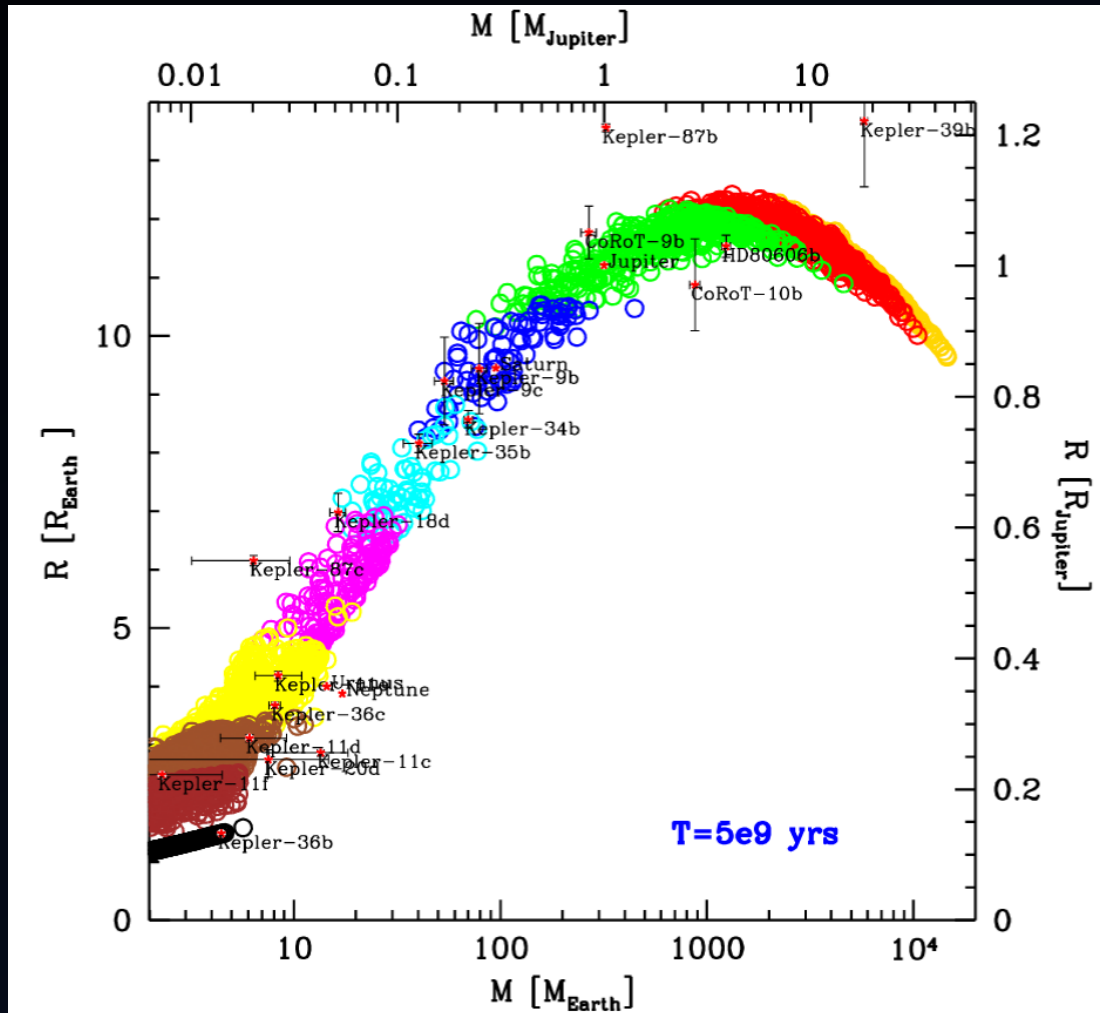


В принципе, по данным о массе и радиусе можно делать некоторые выводы о составе экзопланет. Хотя, как правило, будет несколько вариантов.

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

- возраста
- близости к звезде

Зависимость Масса-Радиус

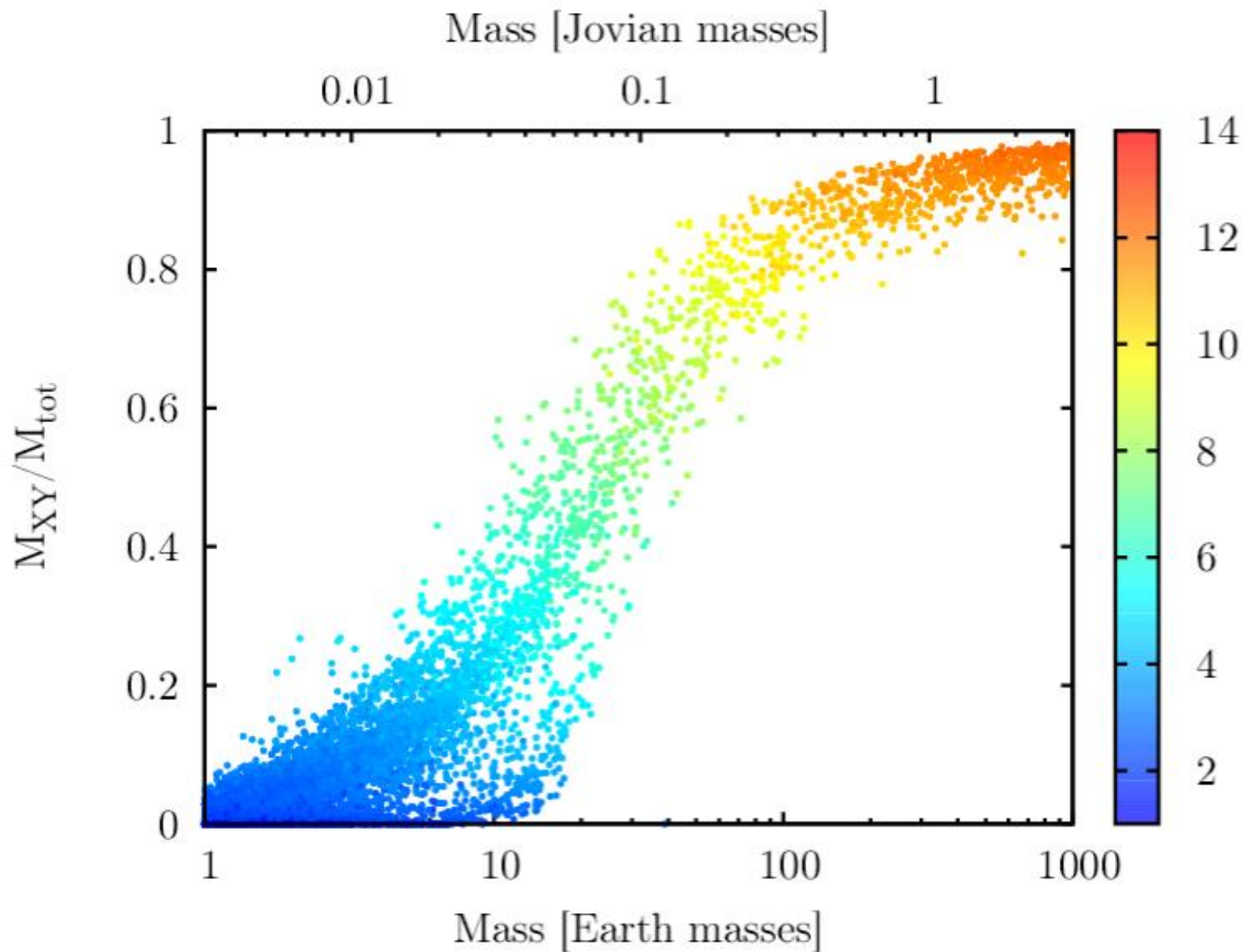


Показаны результаты моделирования и результаты наблюдений.

Цвет кодирует долю легких элементов (водорода и гелия).

Возраст планет – 5 млрд лет.

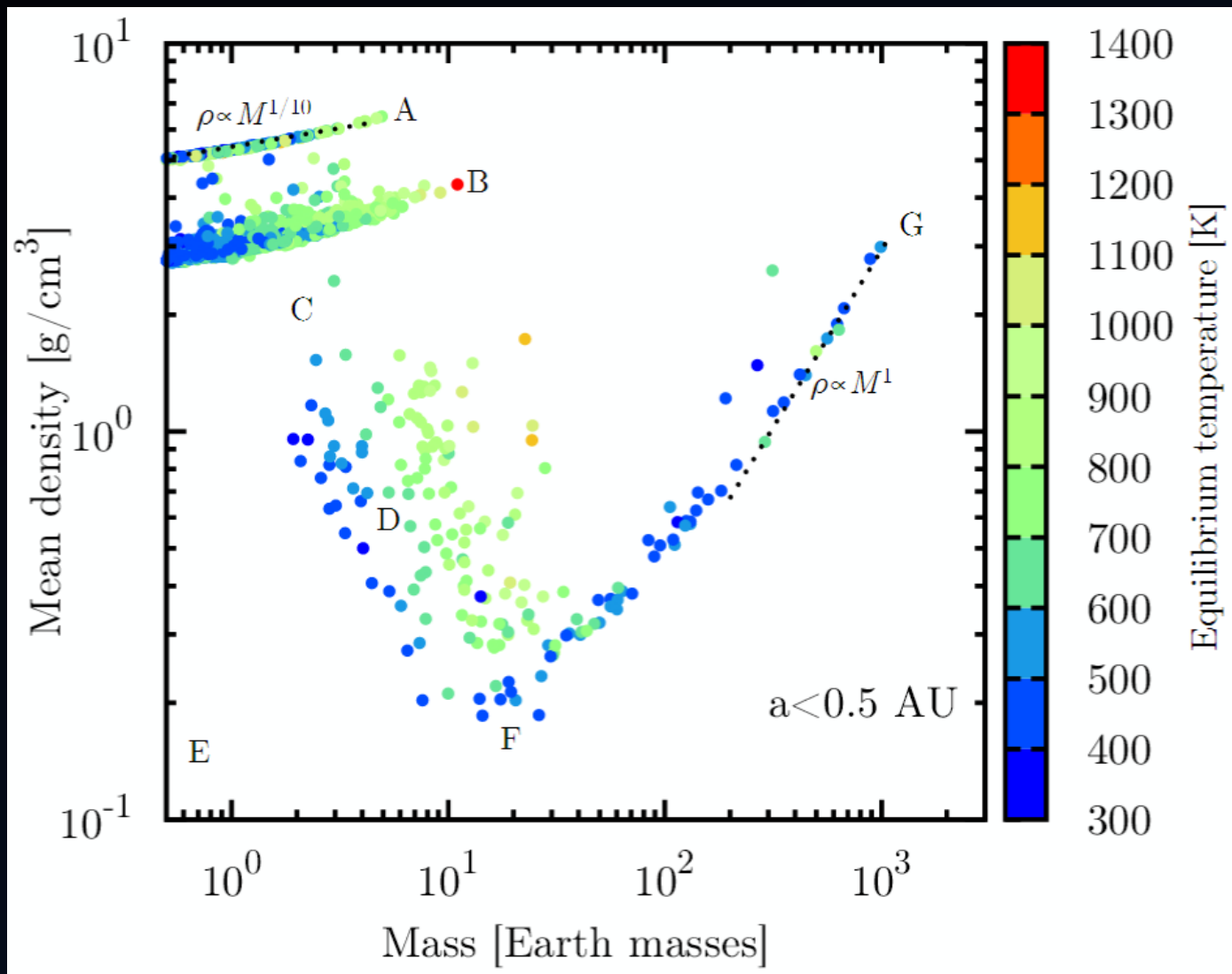
Доля легких элементов в полной массе



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 заметной долей H/He.

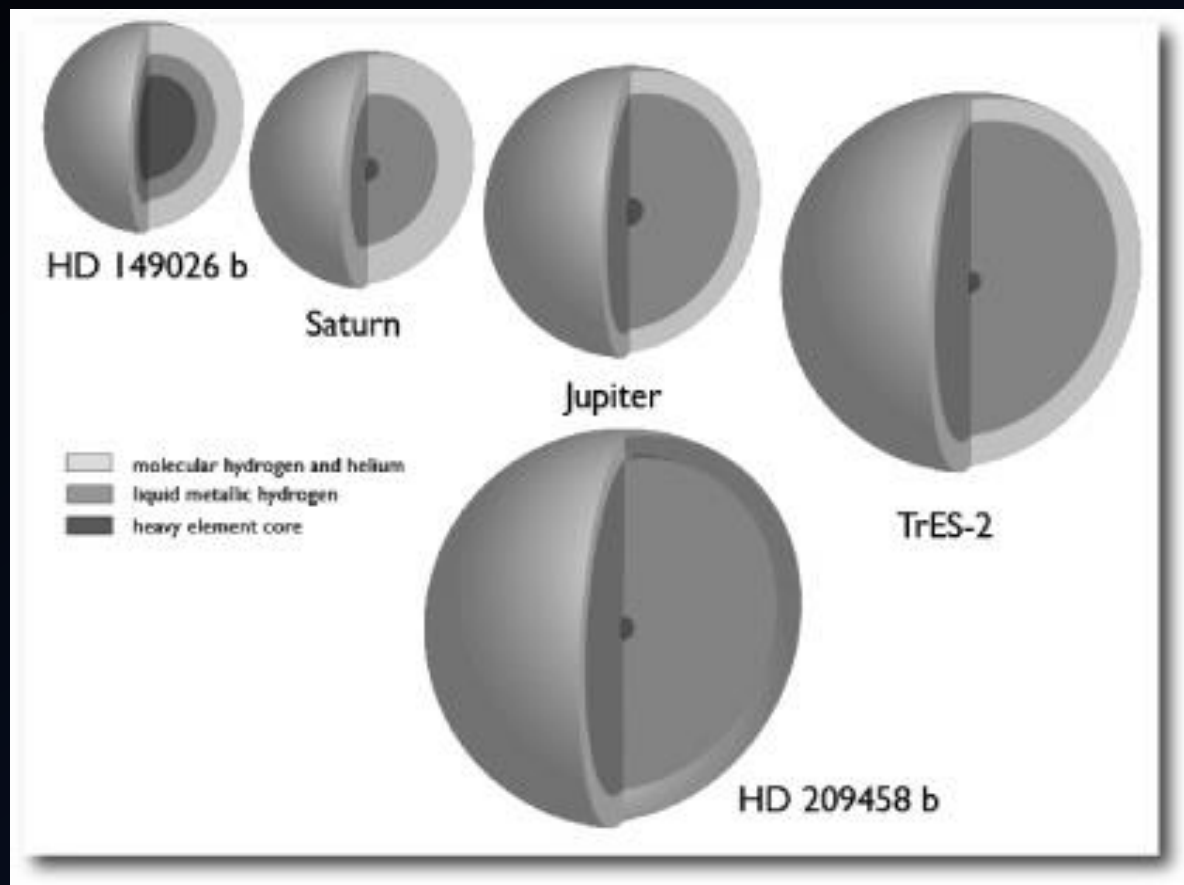
E – запрещенная зона (испар.)

F – переход к гигантам.

G – планеты-гиганты.

Загадочный горячий сатурн

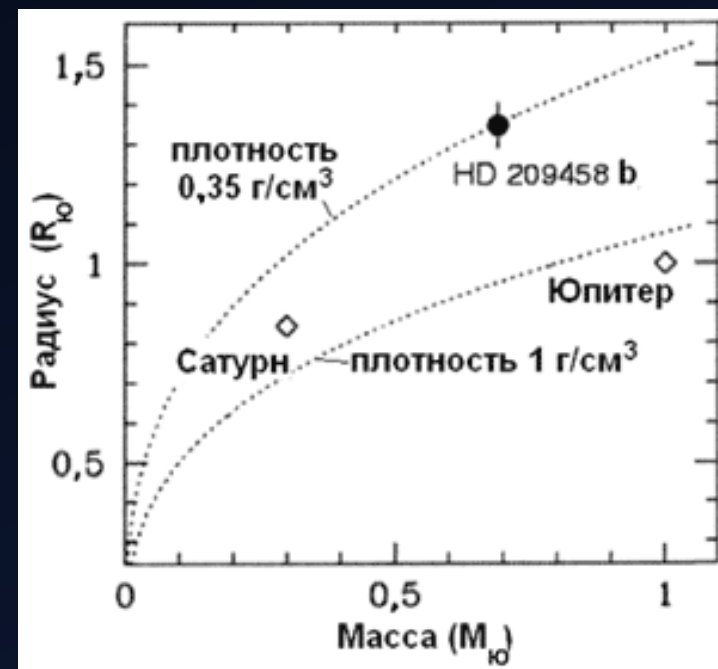
HD 149026 – горячая, но маленькая.
На 20% тяжелее Сатурна,
но на 22% меньше по размеру.



В случае газовых планет мы не знаем, насколько большими у них могут быть твердые ядра (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.



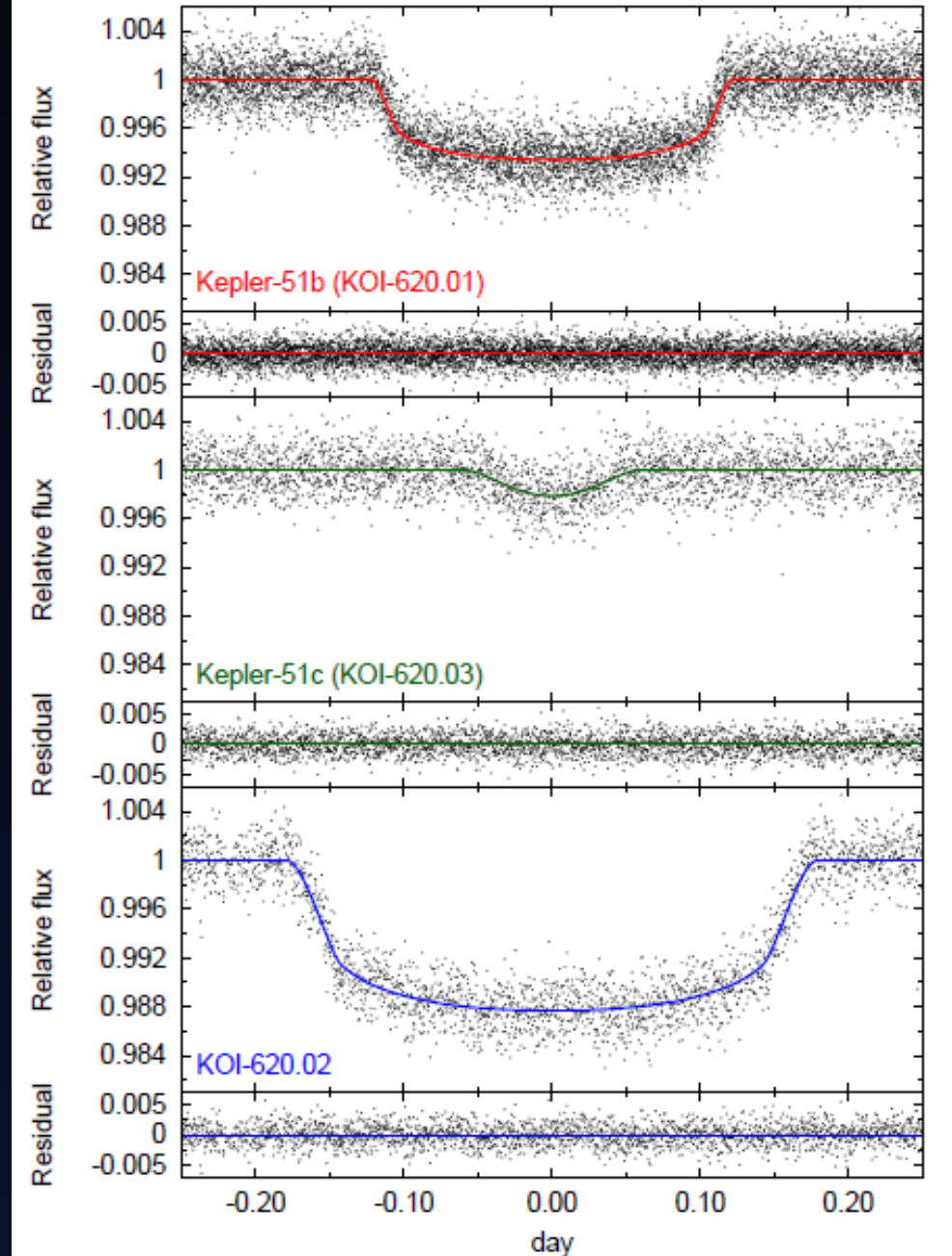
Kepler-51. Рыхлые планеты

Звезда типа Солнца.

Три планеты с массами 2-8 земных.

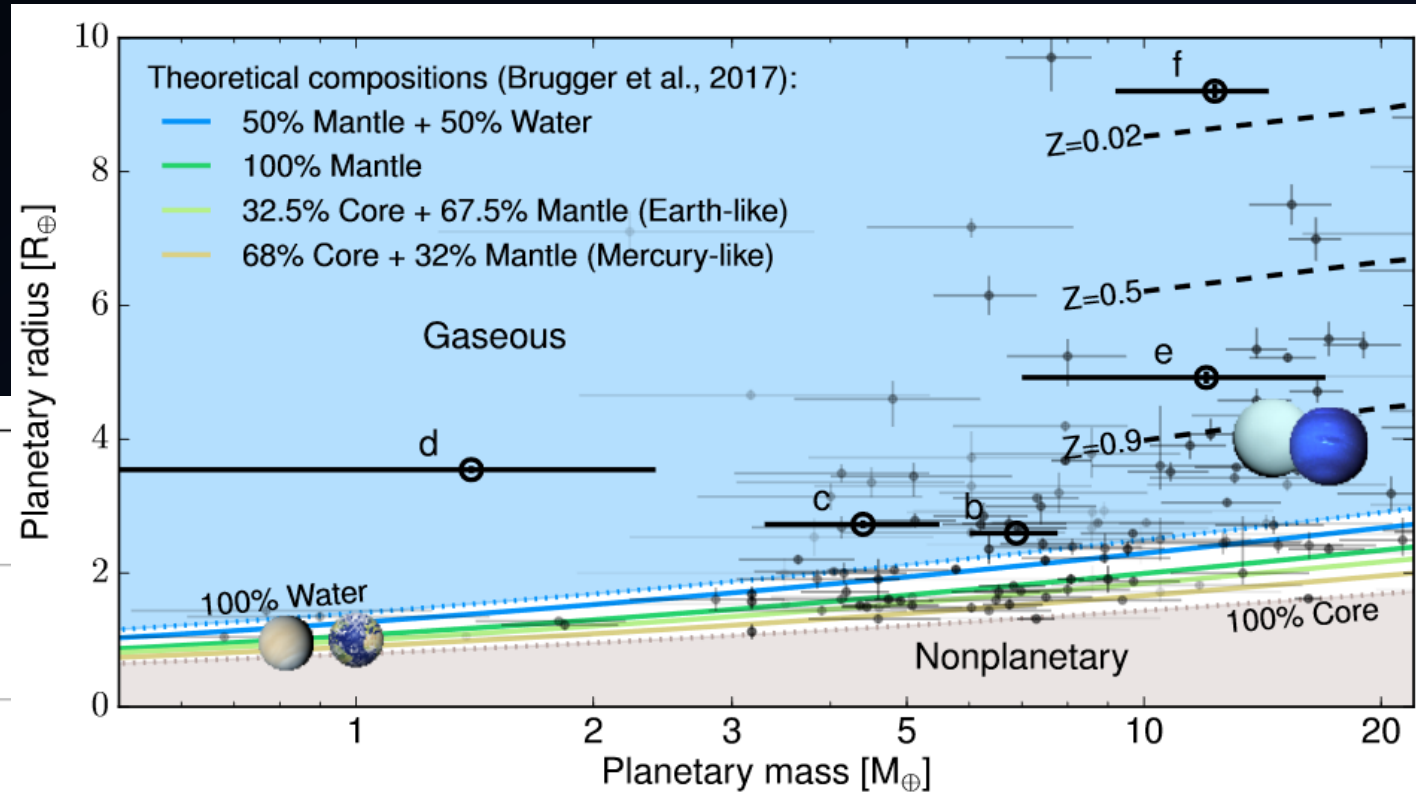
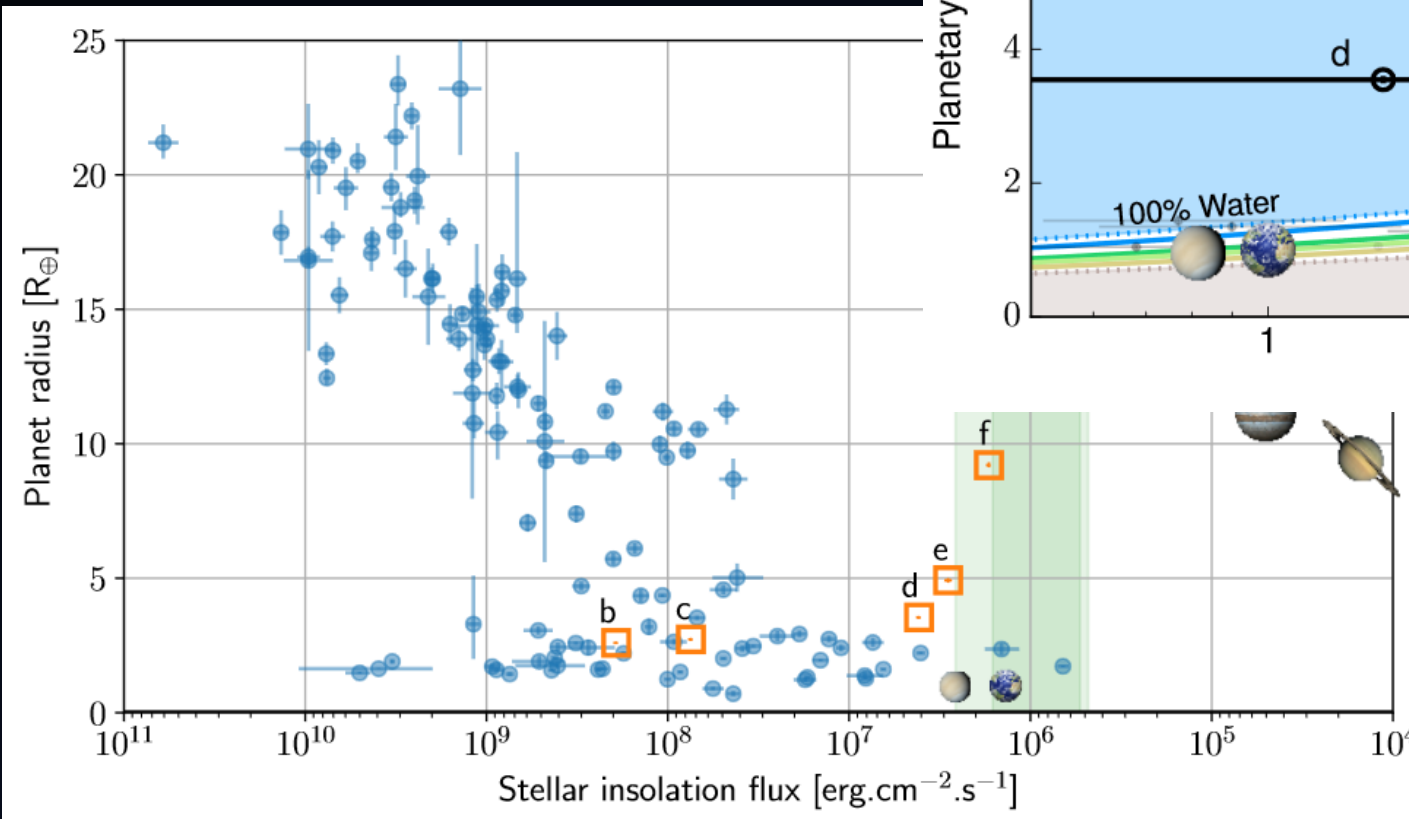
Плотности < 0.05 г/см³

Орбитальные периоды 45-130 дней.



Прохладный Сатурн низкой плотности

Плотность $< 0.1 \text{ г/см}^3$
при нормальной
(земной) инсоляции.

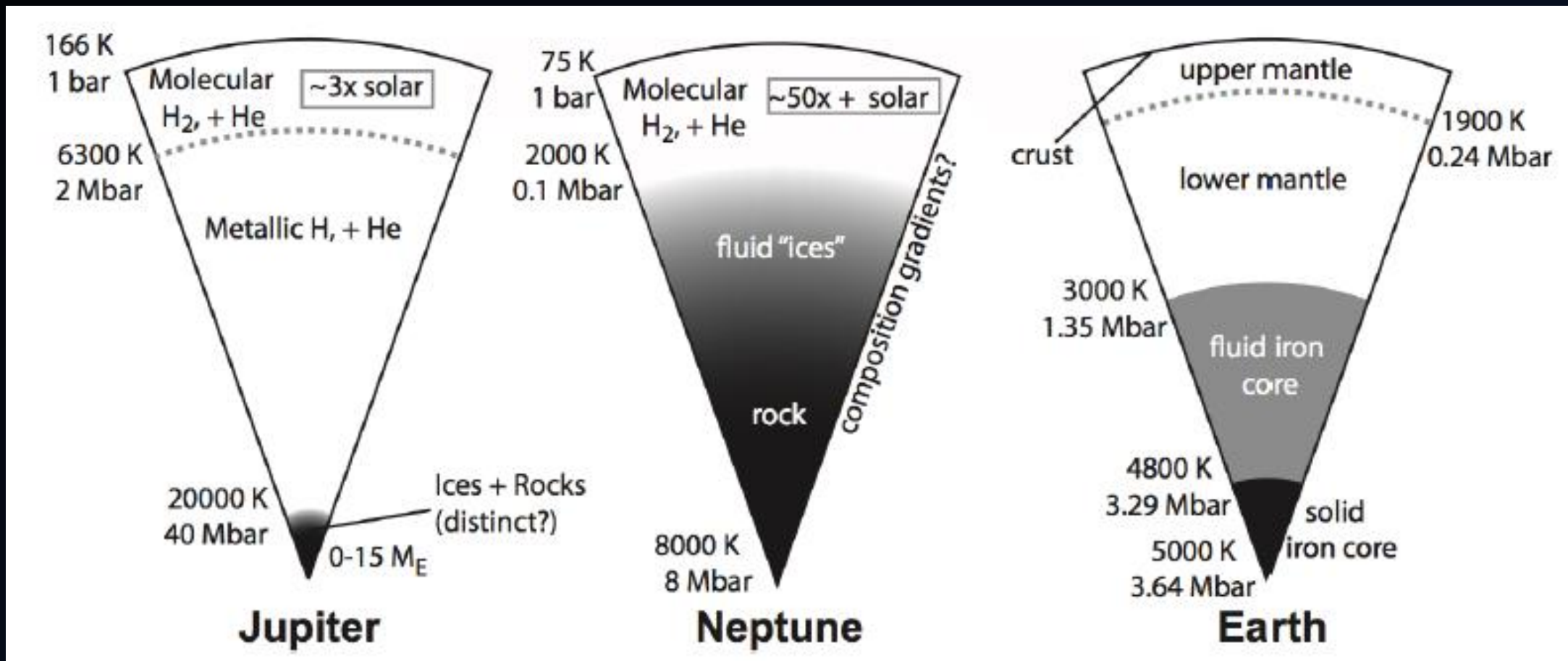


Три основных типа планет

Газовые гиганты
H/He

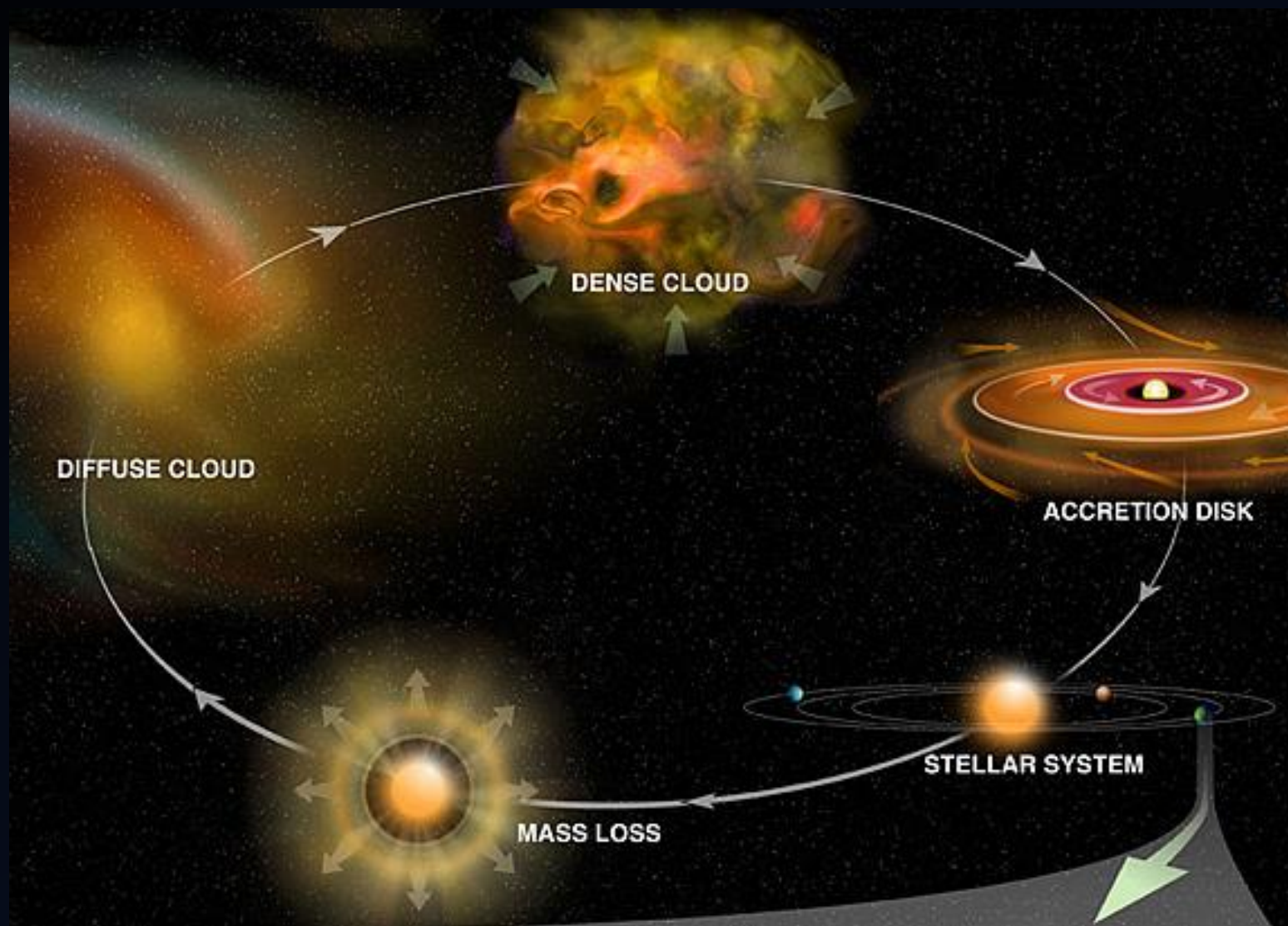
Ледяные гиганты
H/He+лед+ядро

Твердые планеты
Si, Mg, Fe, O, C



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

Галактический спиралеворот



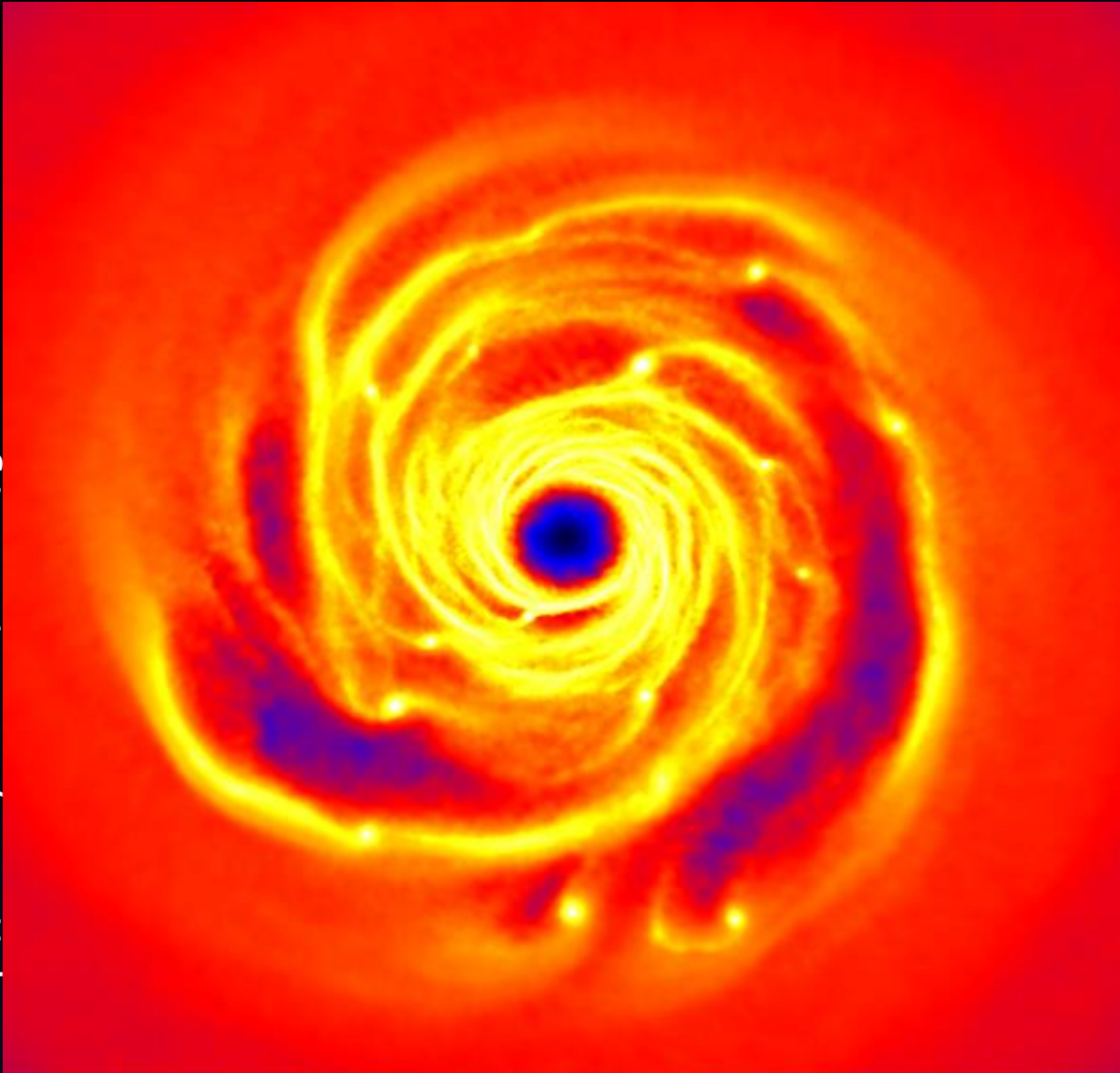
Непрерывно идет процесс образования новых звезд и планетных систем, а также выброса вещества в межзвездную среду.

Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

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

Наконец, появилась жизнь.

Фрагментация диска



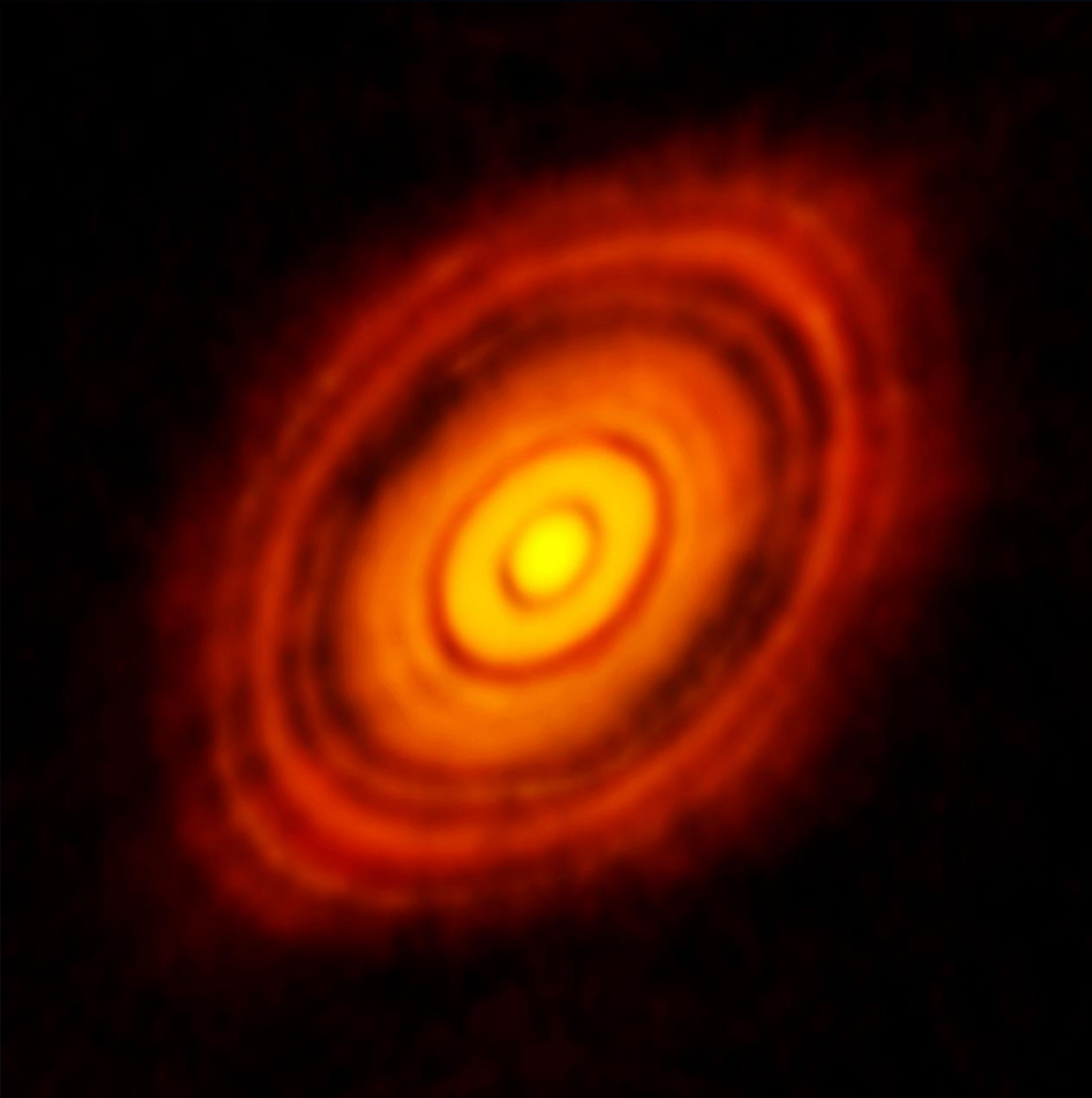
Крупные планеты могут образовываться в результате неустойчивостей в диске.

Это подтверждается некоторыми численными моделями.

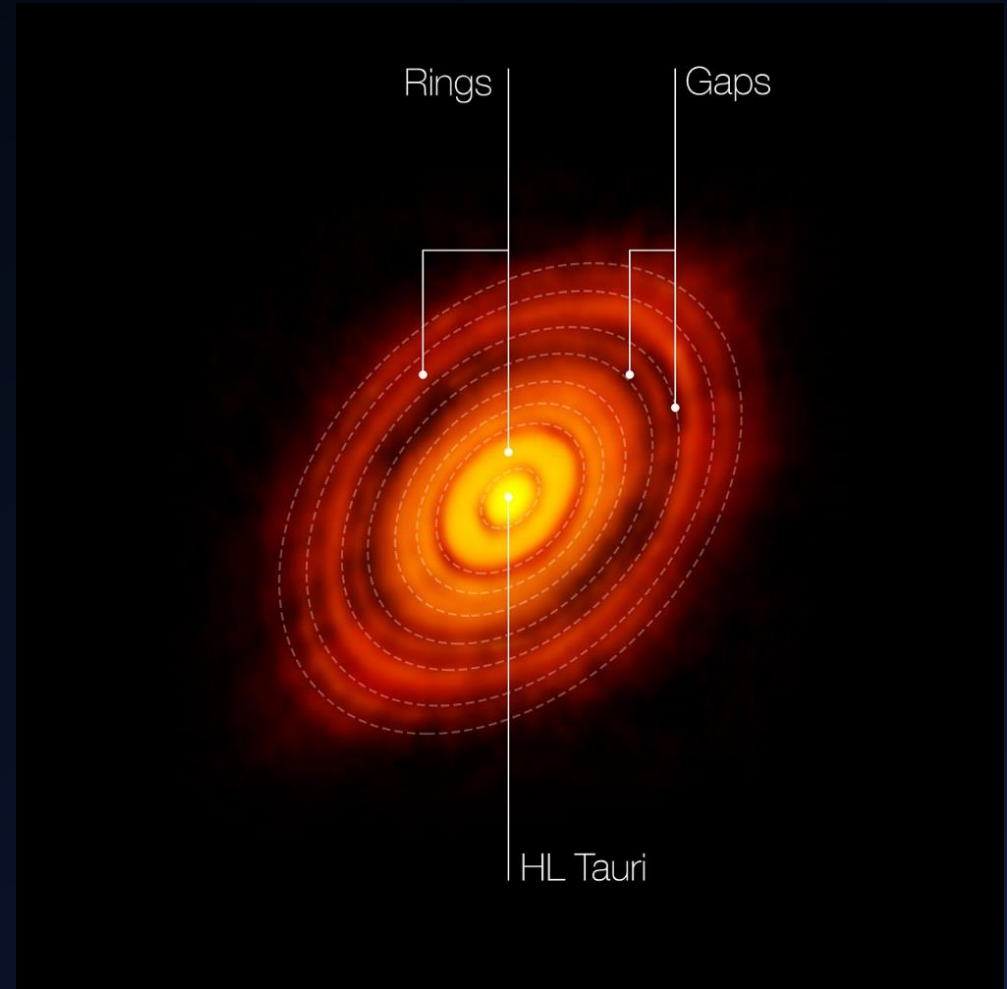
Это происходит на значительном расстоянии от звезды.

Протопланетный диск HL Тельца

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

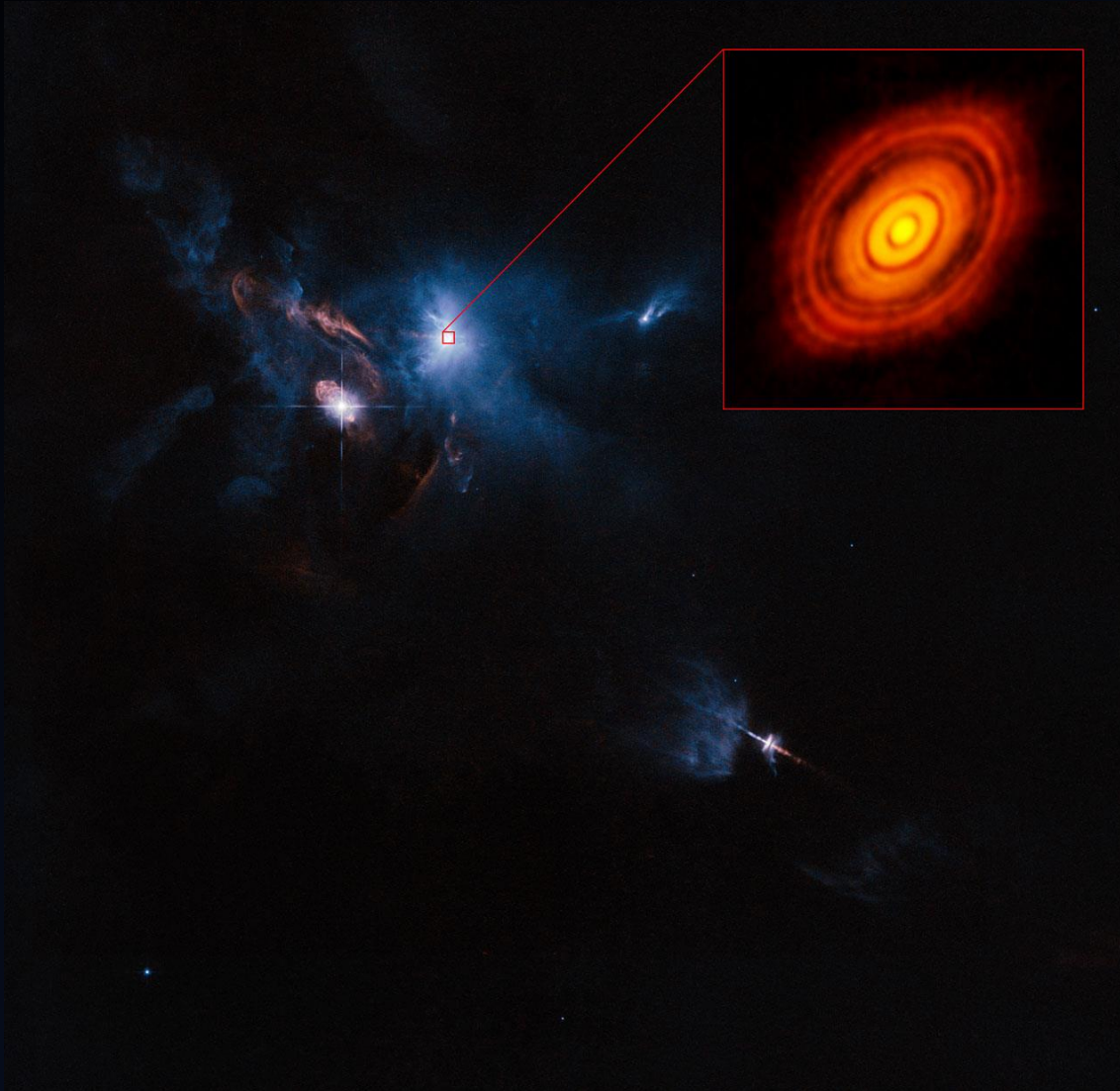


Темные кольца - результат действия массивной планеты в диске



Место, где рождаются звезды и планеты

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

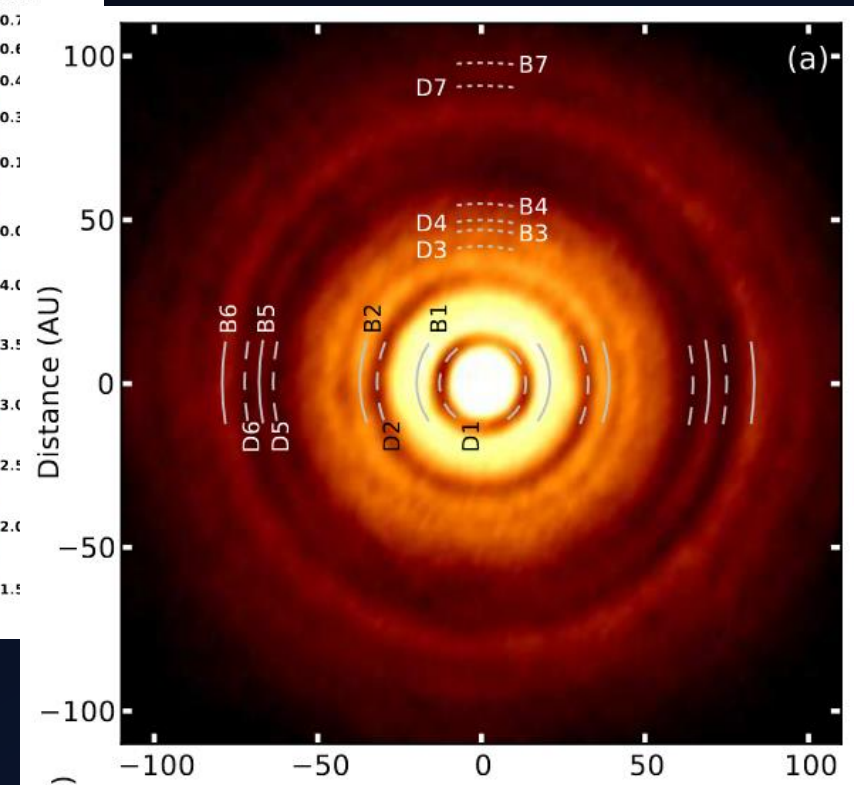
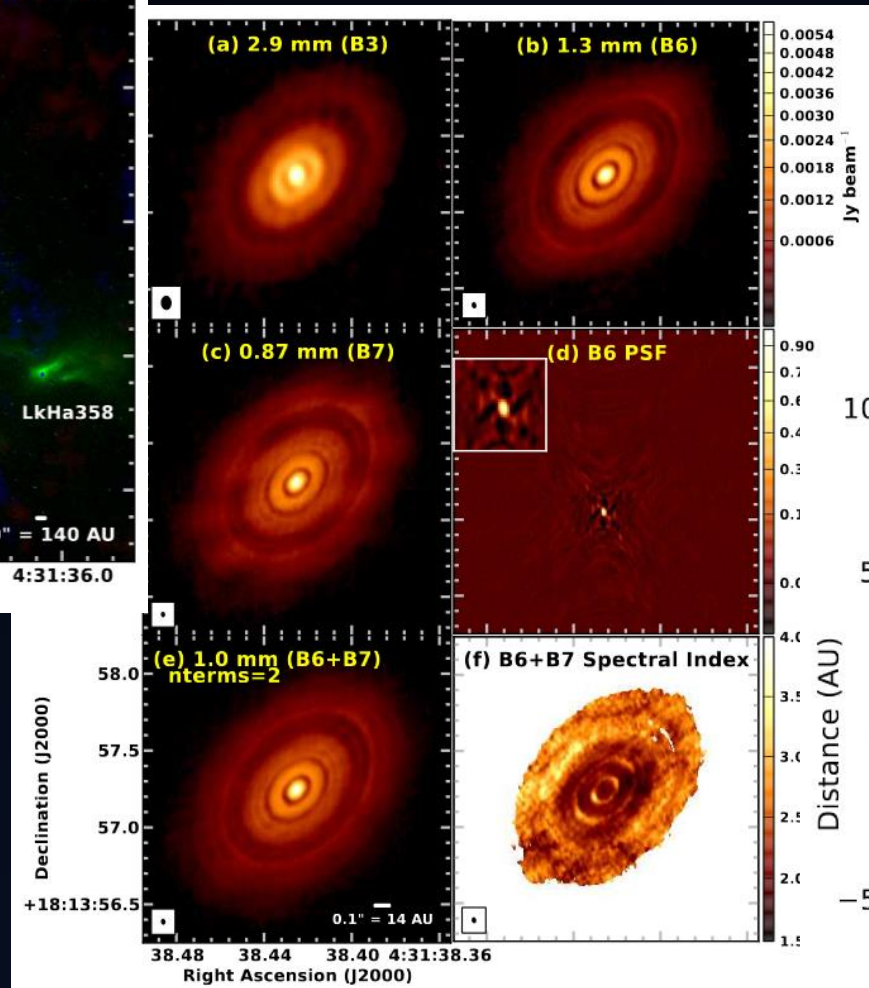
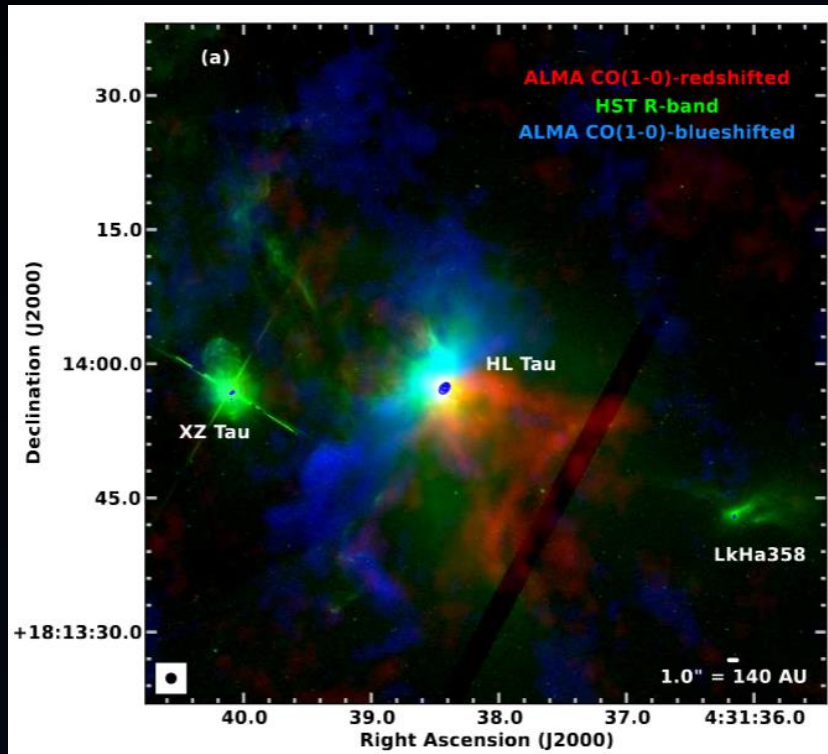


Наблюдения проводились на установке ALMA.

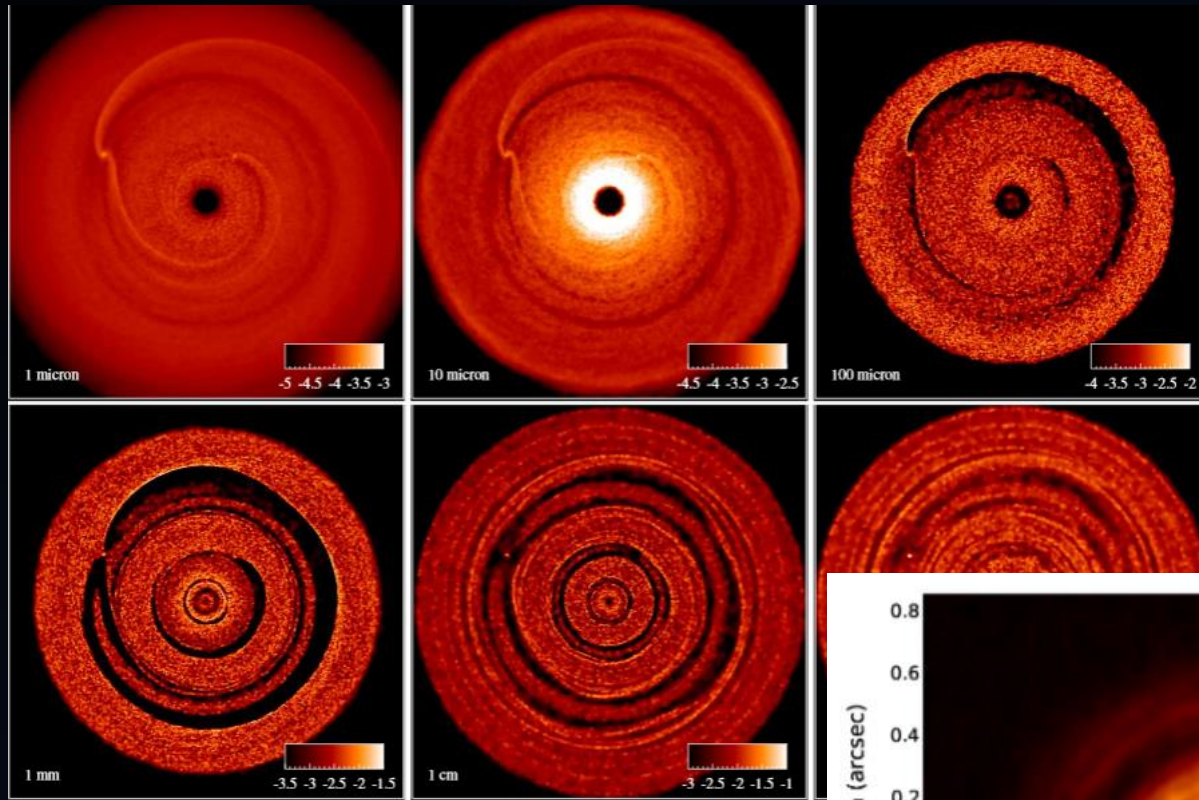


<https://public.nrao.edu/AlmaExtras/>

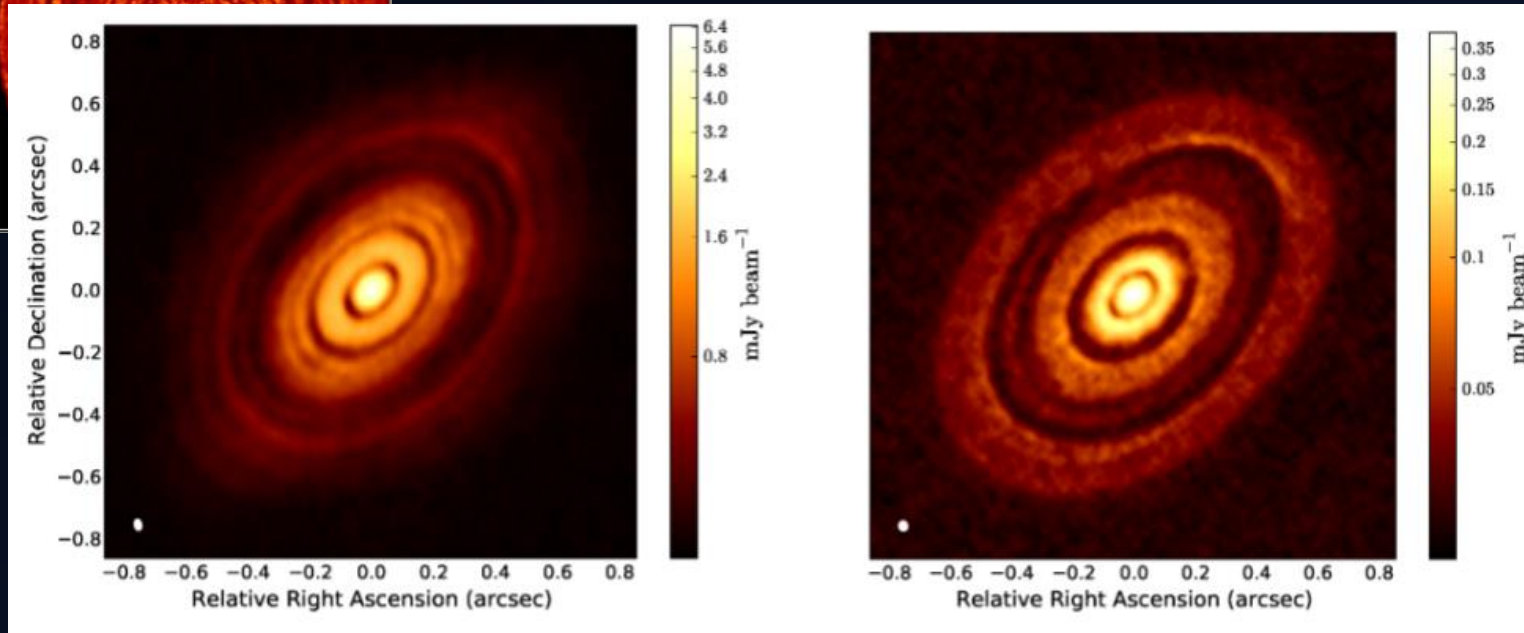
Протопланетный диск HL Tau



Моделирование диска HL Tau



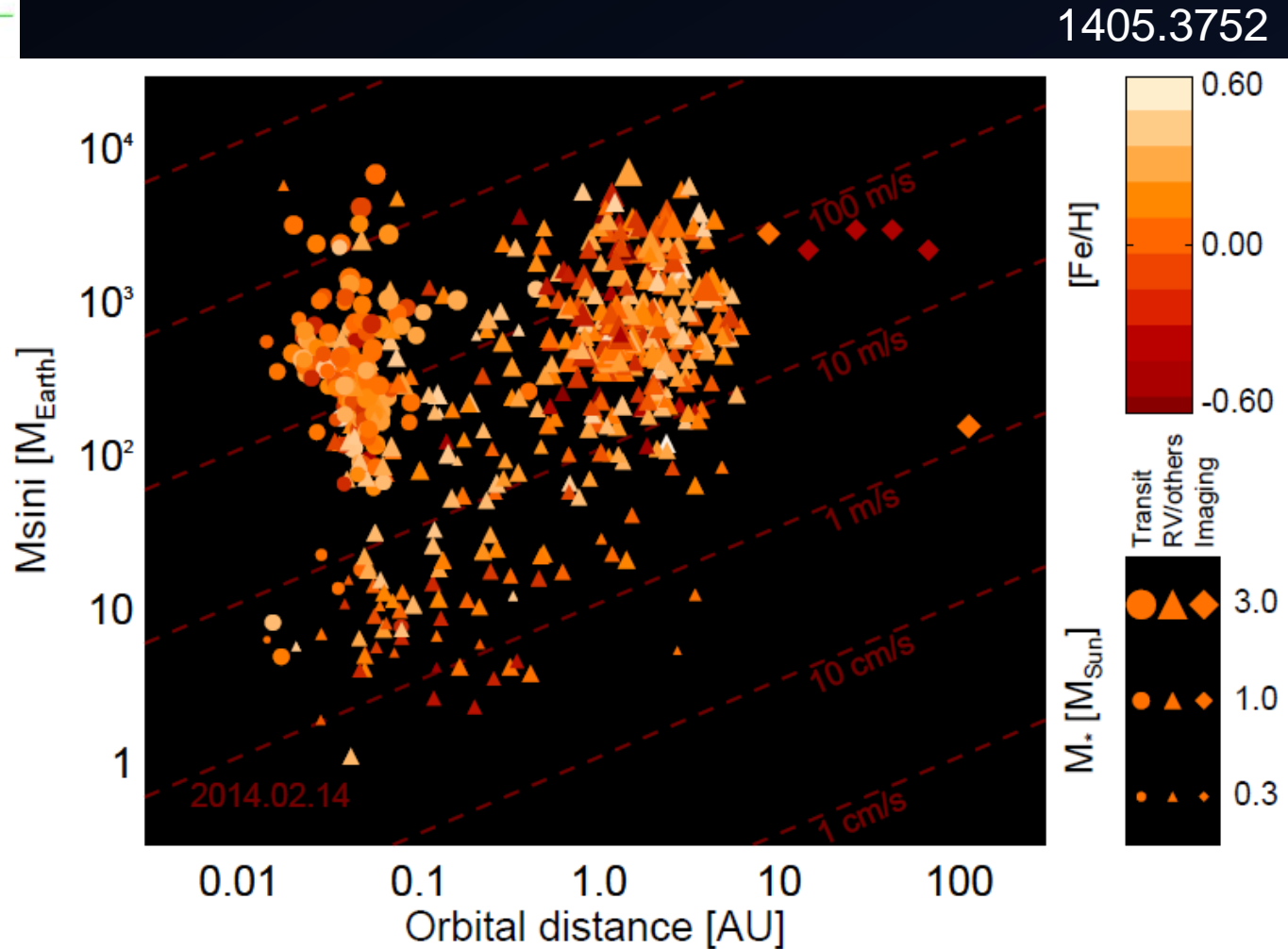
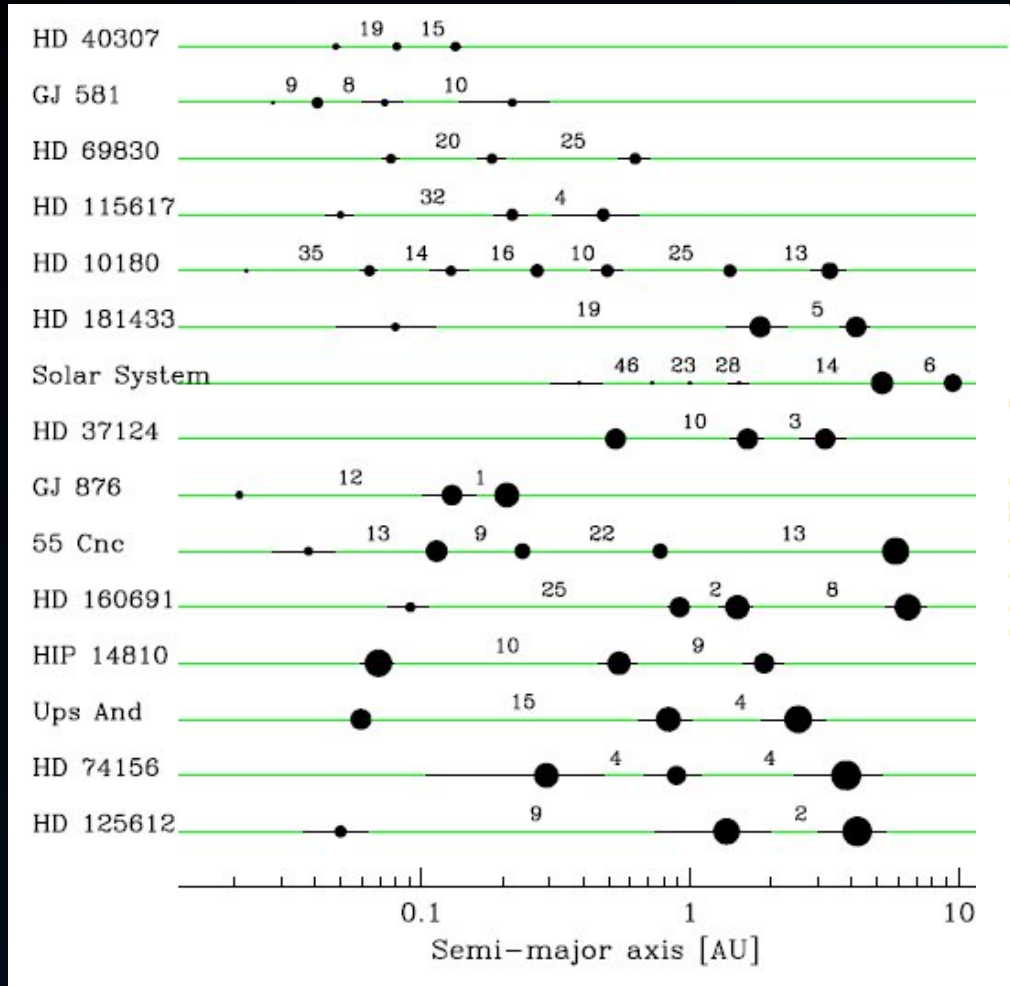
Три планеты с массами от 0.2 юпитерианских до 0.55. На нижнем рисунке сравниваются Результаты наблюдений (слева) с результатами моделирования.



1507.06719

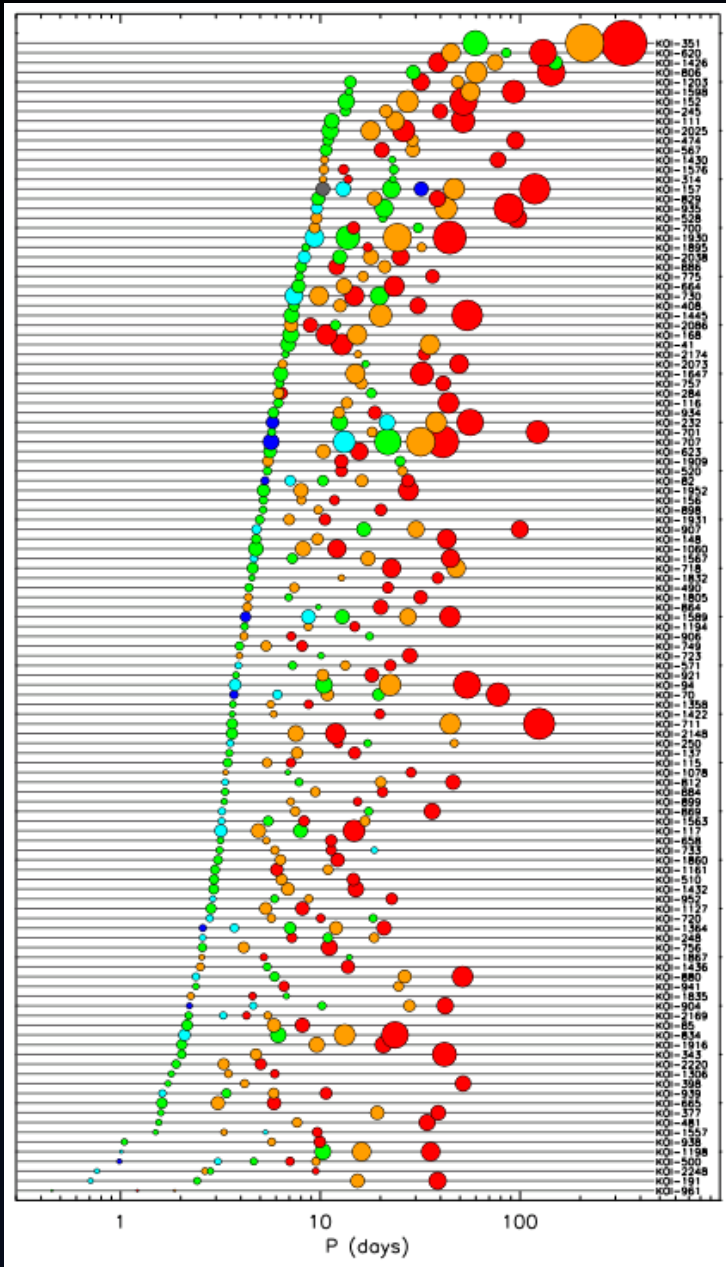
Газовые и ледяные планеты вблизи своих звезд

arXiv: 1011.4994



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.

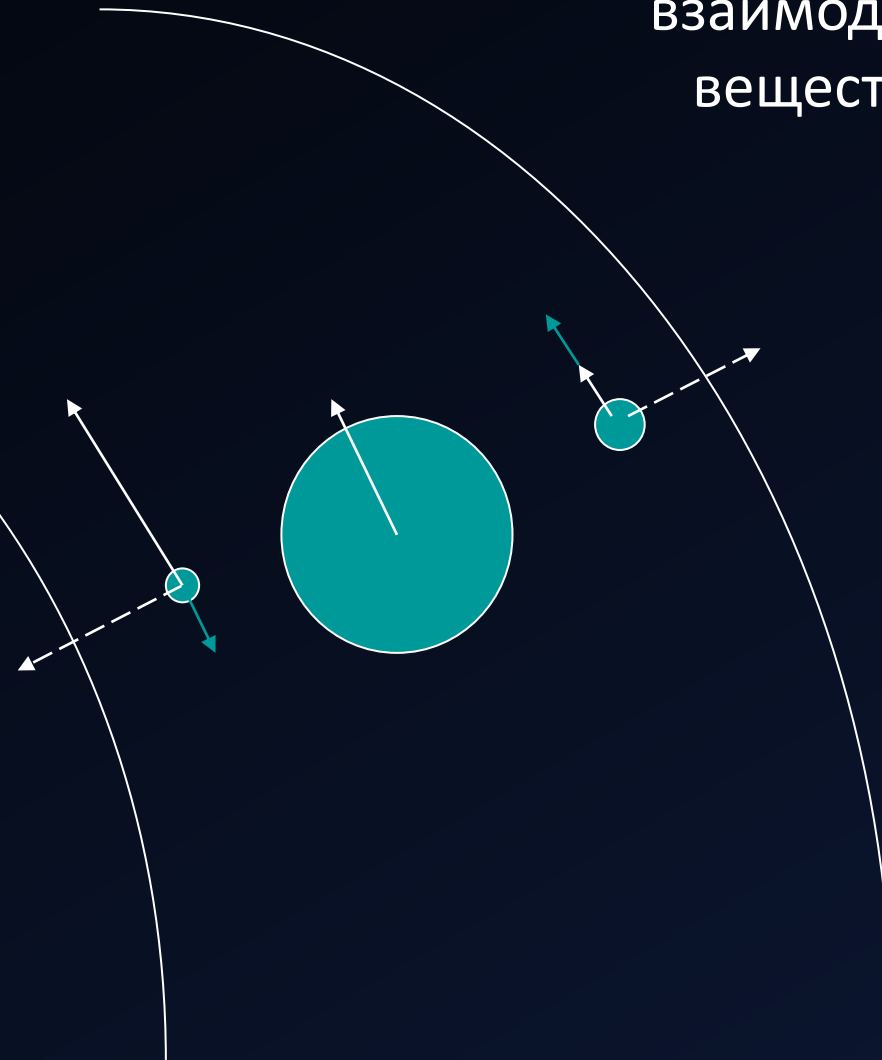
Еще важно, что более крупные планеты в системе лежат снаружи, а более мелкие – внутри.

Миграция планет

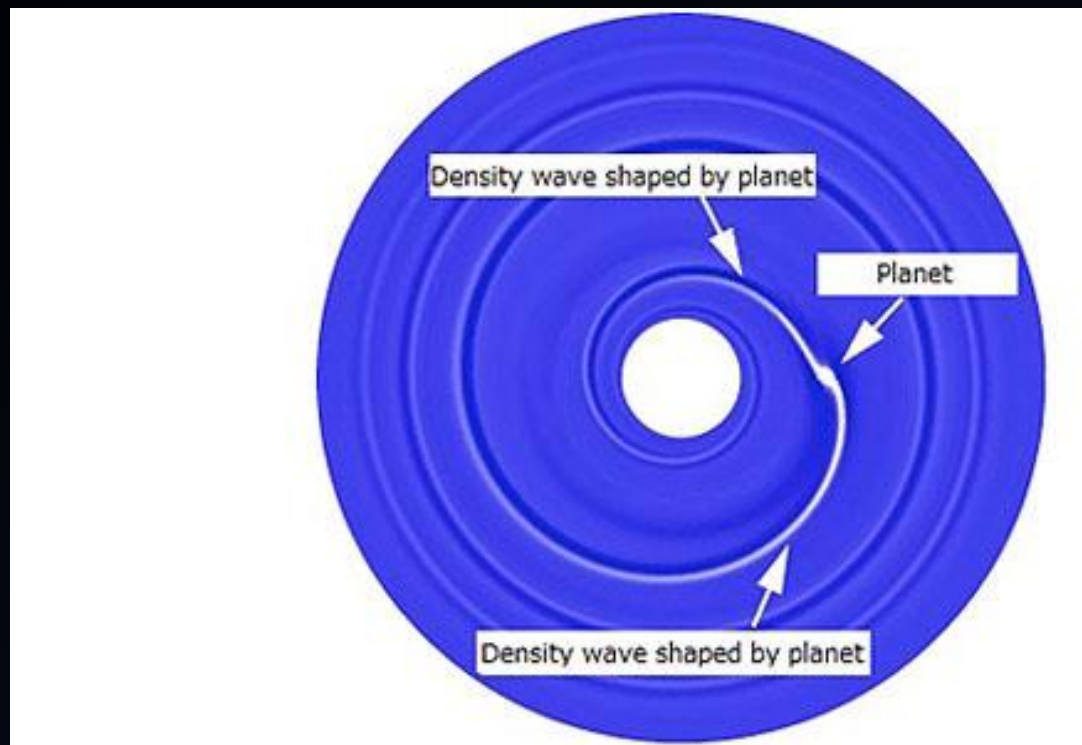
Планета может менять свою орбиту, за счет взаимодействия с веществом диска.

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

Чаще планеты в итоге двигаются ближе к звезде.

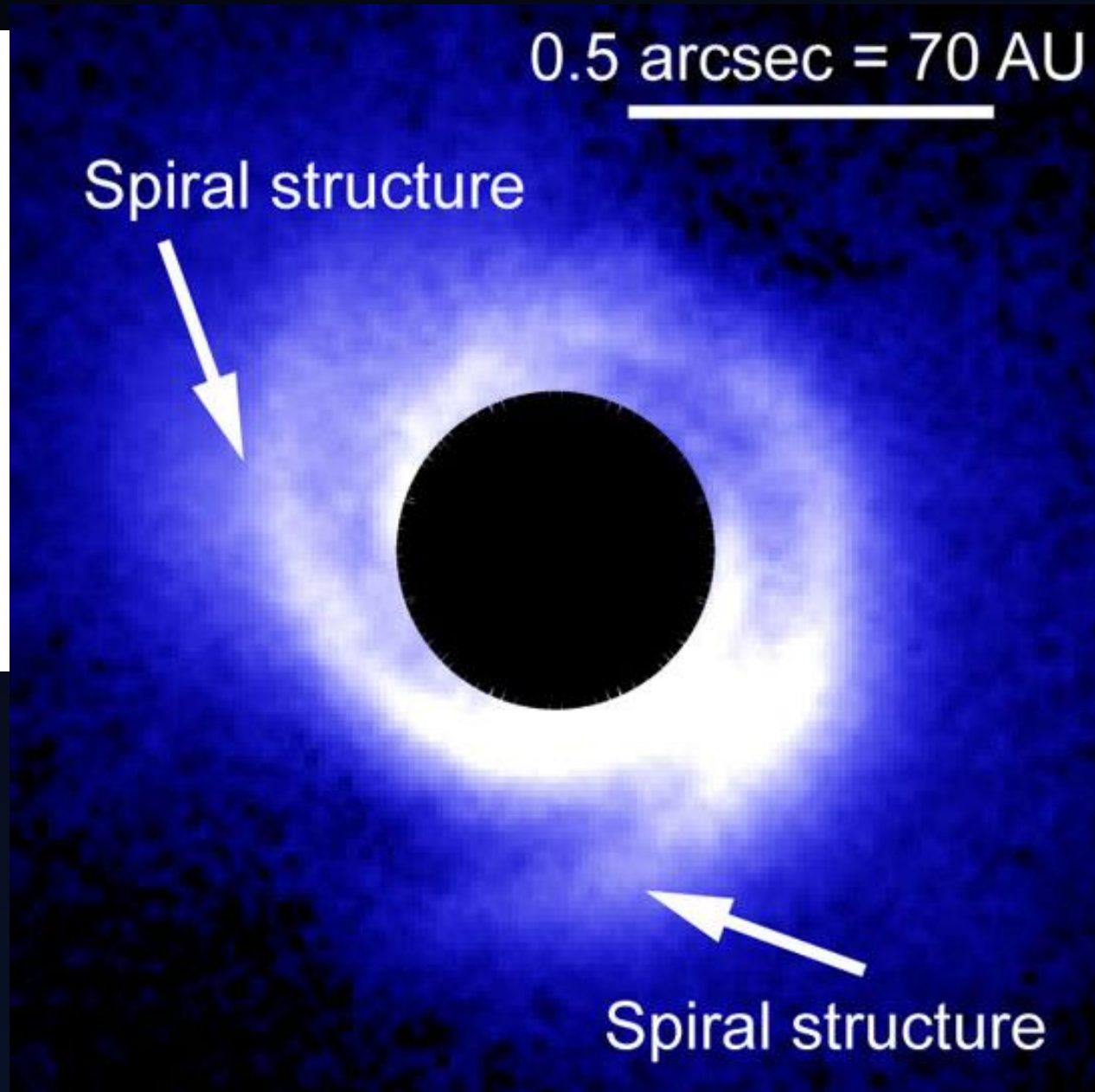


Структуры в диске

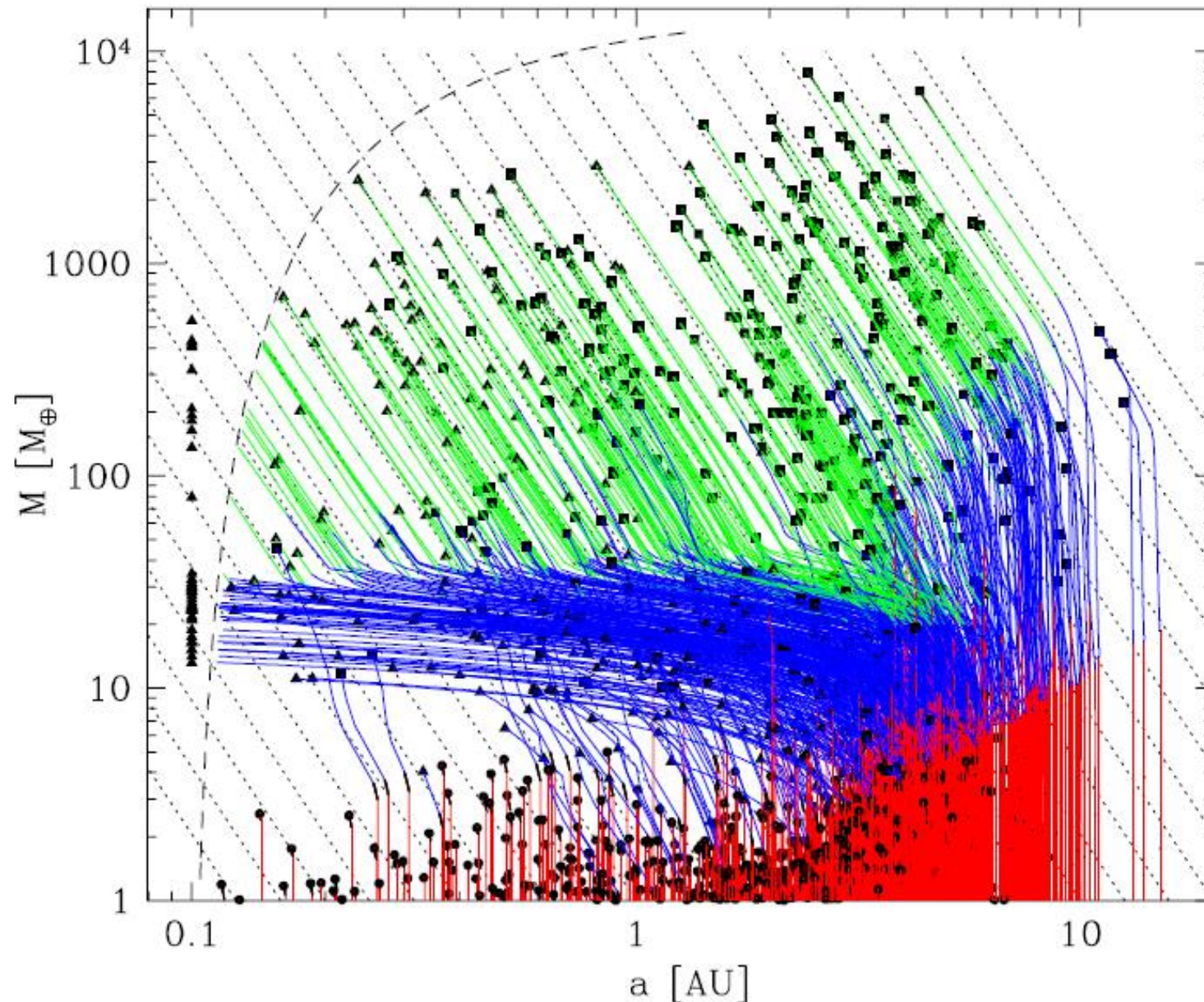


Планета рождает в диске структуру и взаимодействует с ней.

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



Моделирование миграции

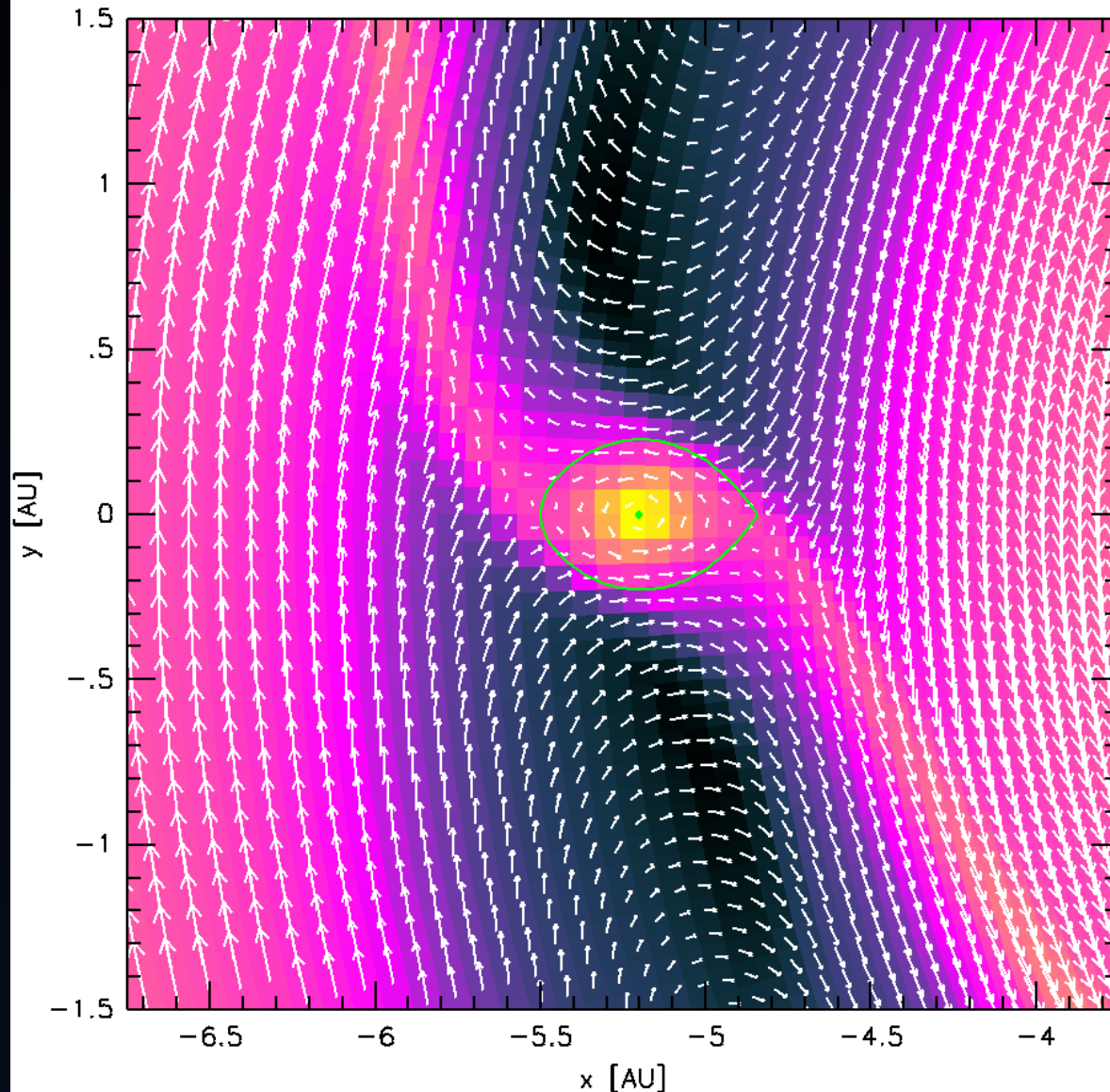


Миграция настолько важна, что может полностью поменять вид системы.

Показано, как планеты меняют свою массу и орбиту.

Ясно выделяются три типа миграции.

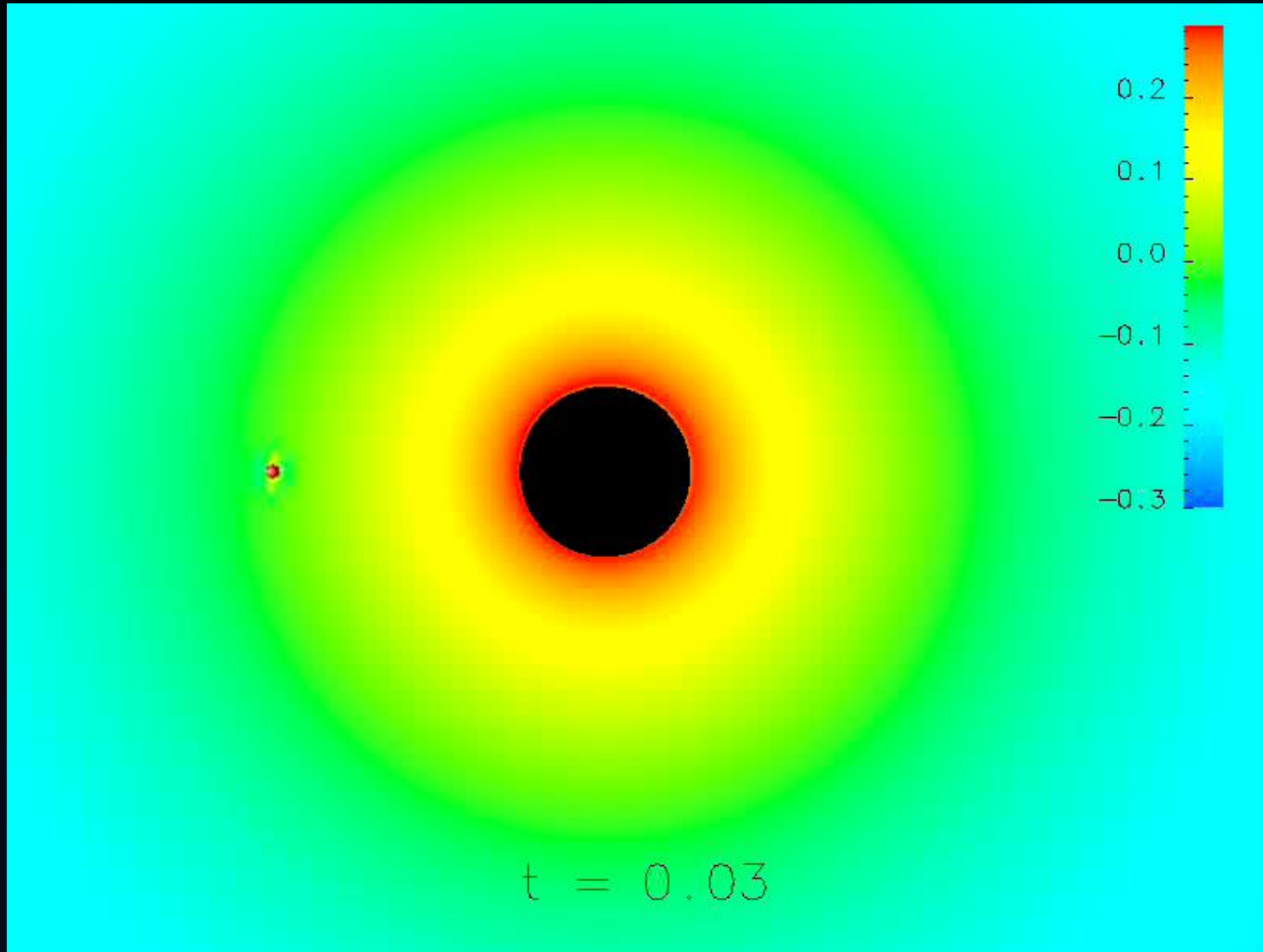
Щели и мосты



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/



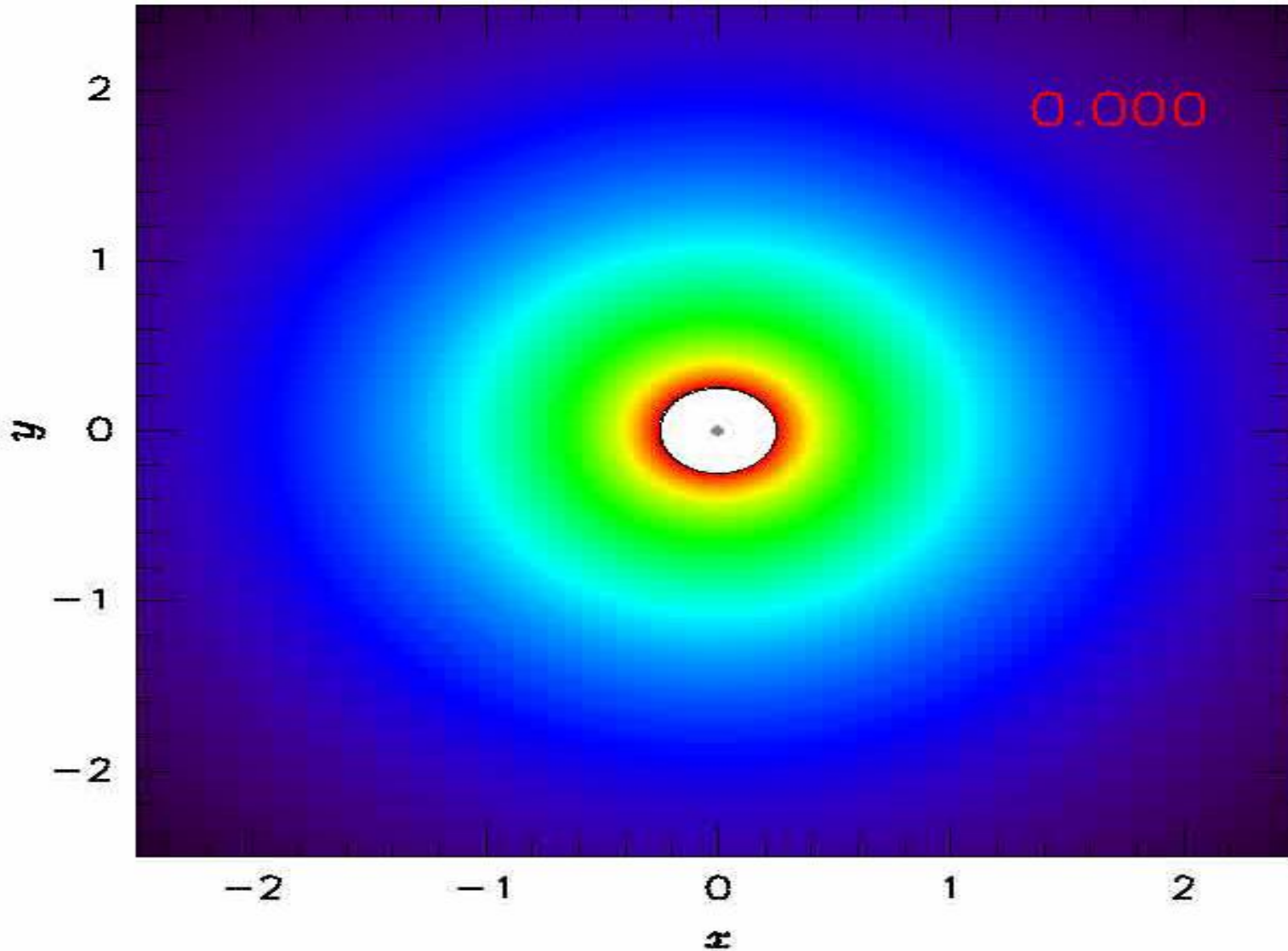
Планета движется против часовой стрелки, но выбрана такая система отсчета, в которой мы видим ее покоящейся.

Возникают спиральные волны, и постепенно открывается щель.

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

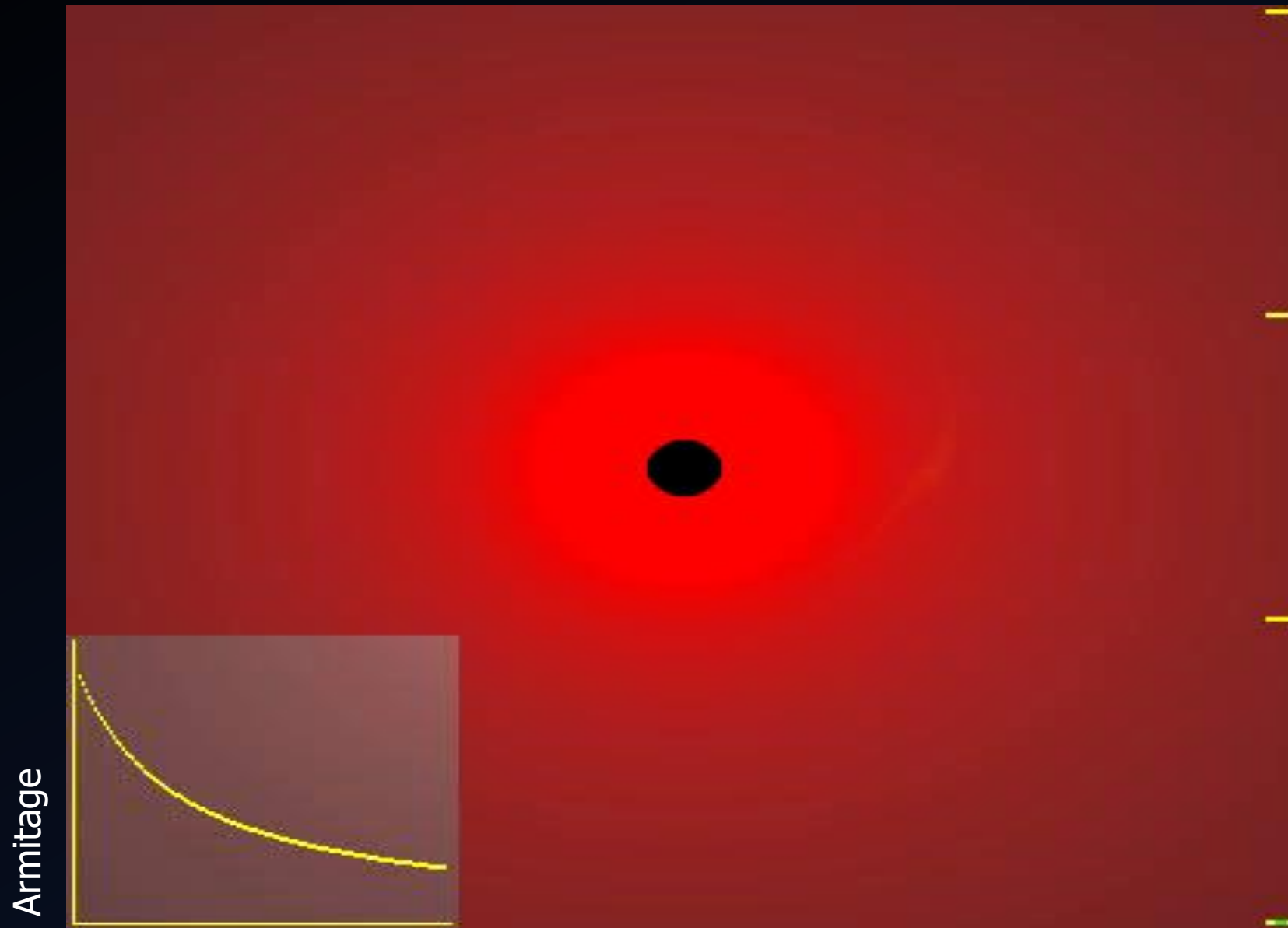
Численное моделирование

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

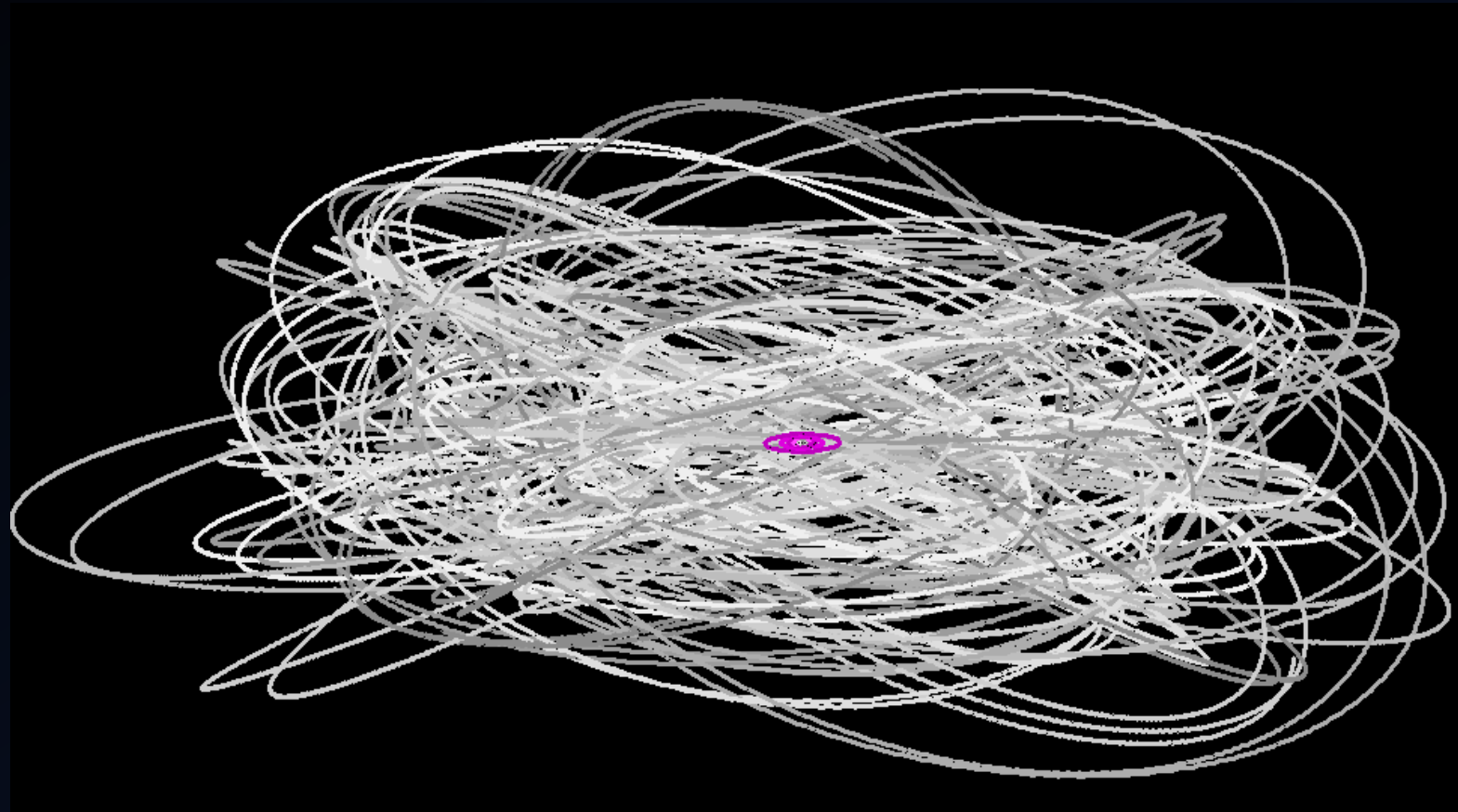


Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

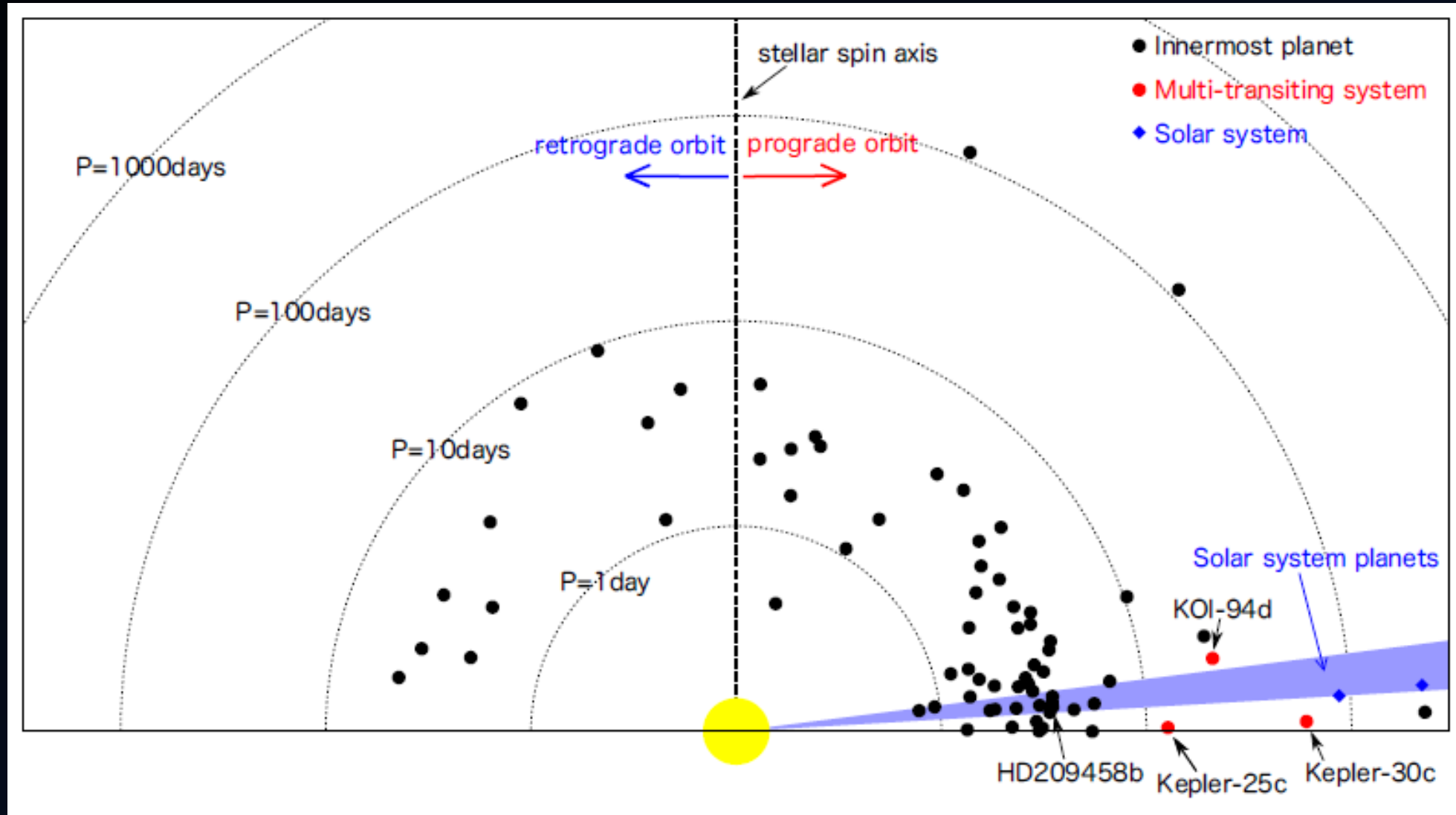
$$e_{\max} \approx \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0}$$



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

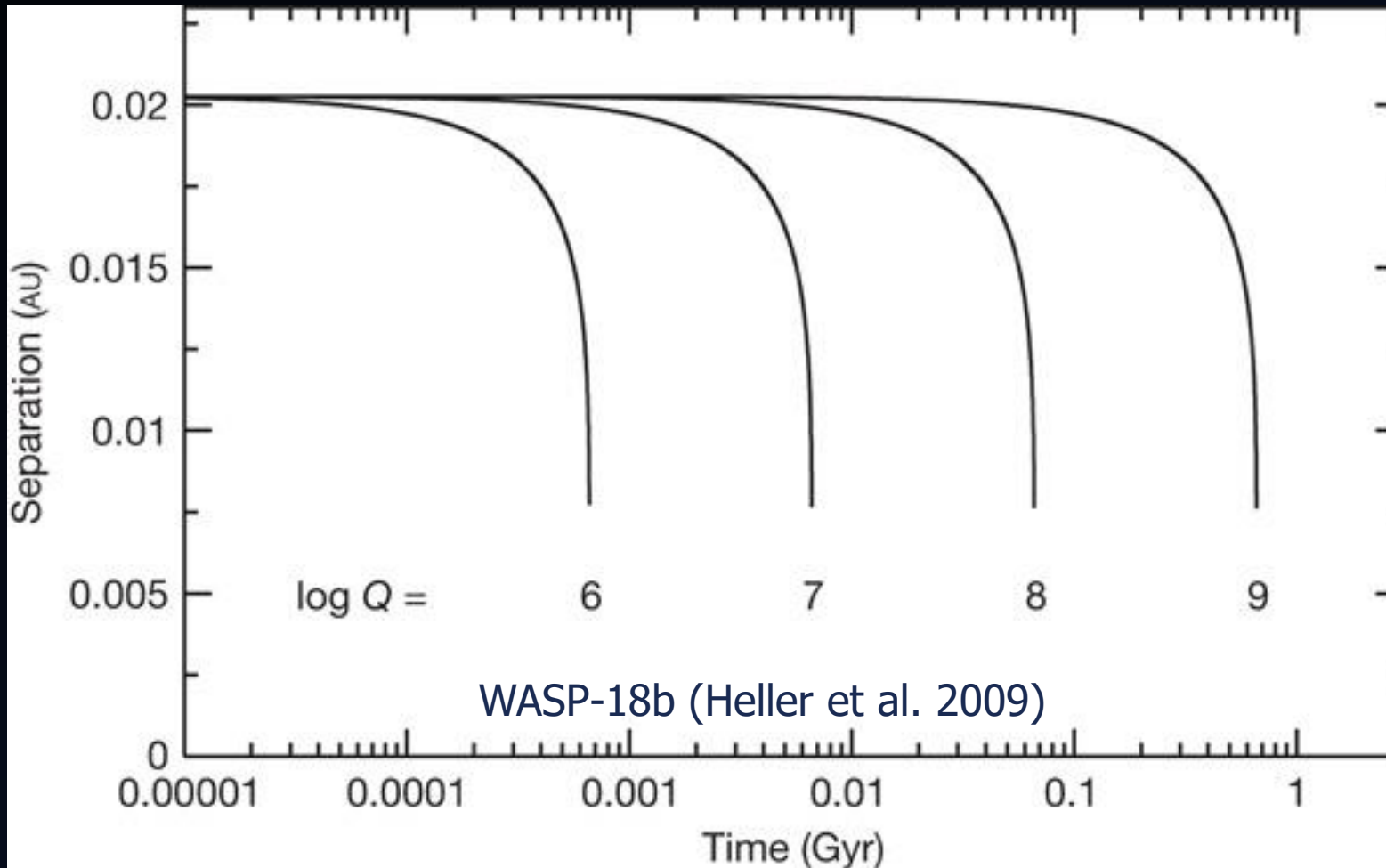
Распределение планет по ориентации орбиты

Есть планеты с полярными и даже обратными орбитами.



Приливы

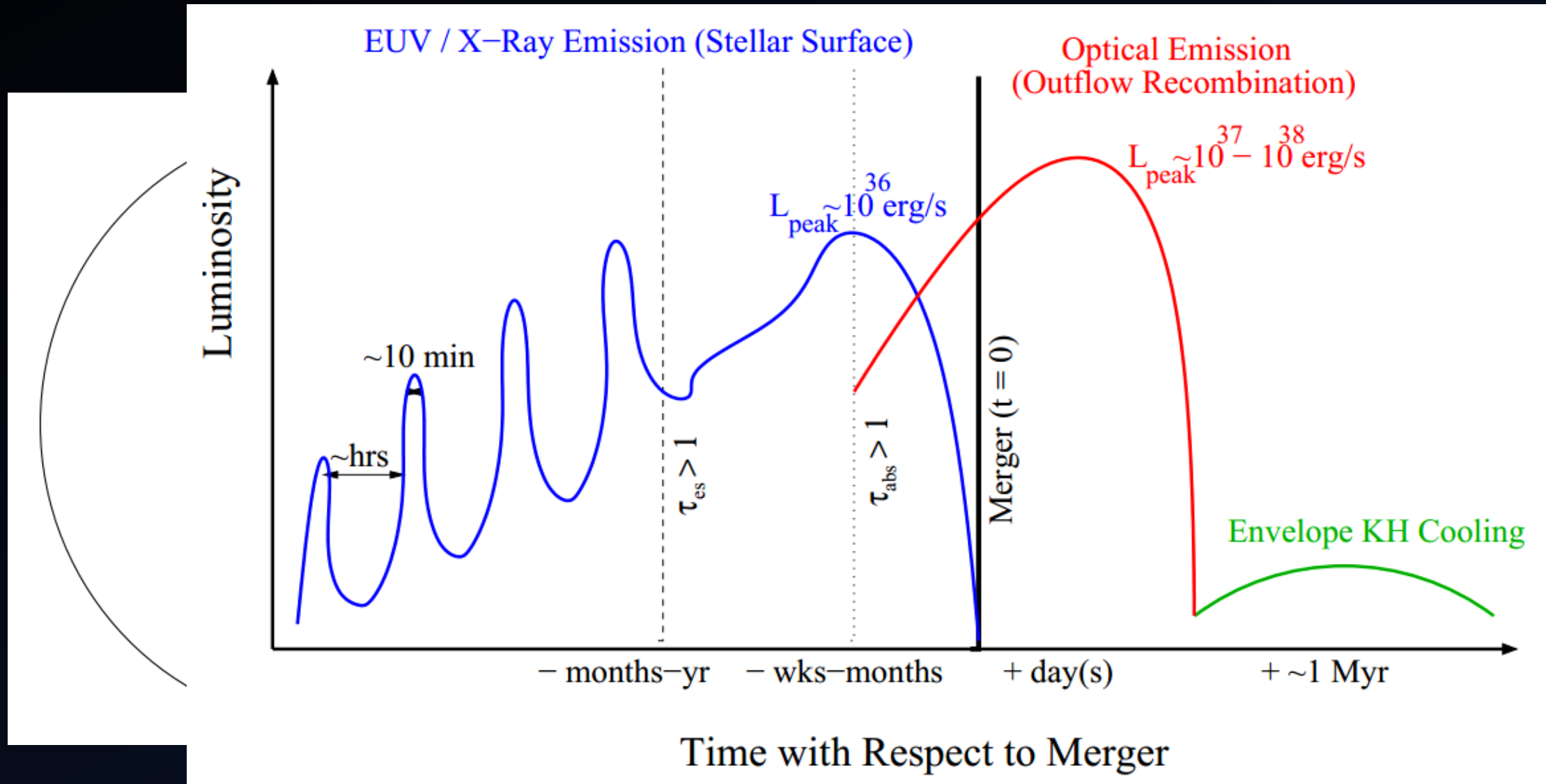
Планеты и звезды (а также планеты друг с другом) могут активно взаимодействовать за счет приливов. Это будет приводить к изменению орбиты и скорости собственного вращения.



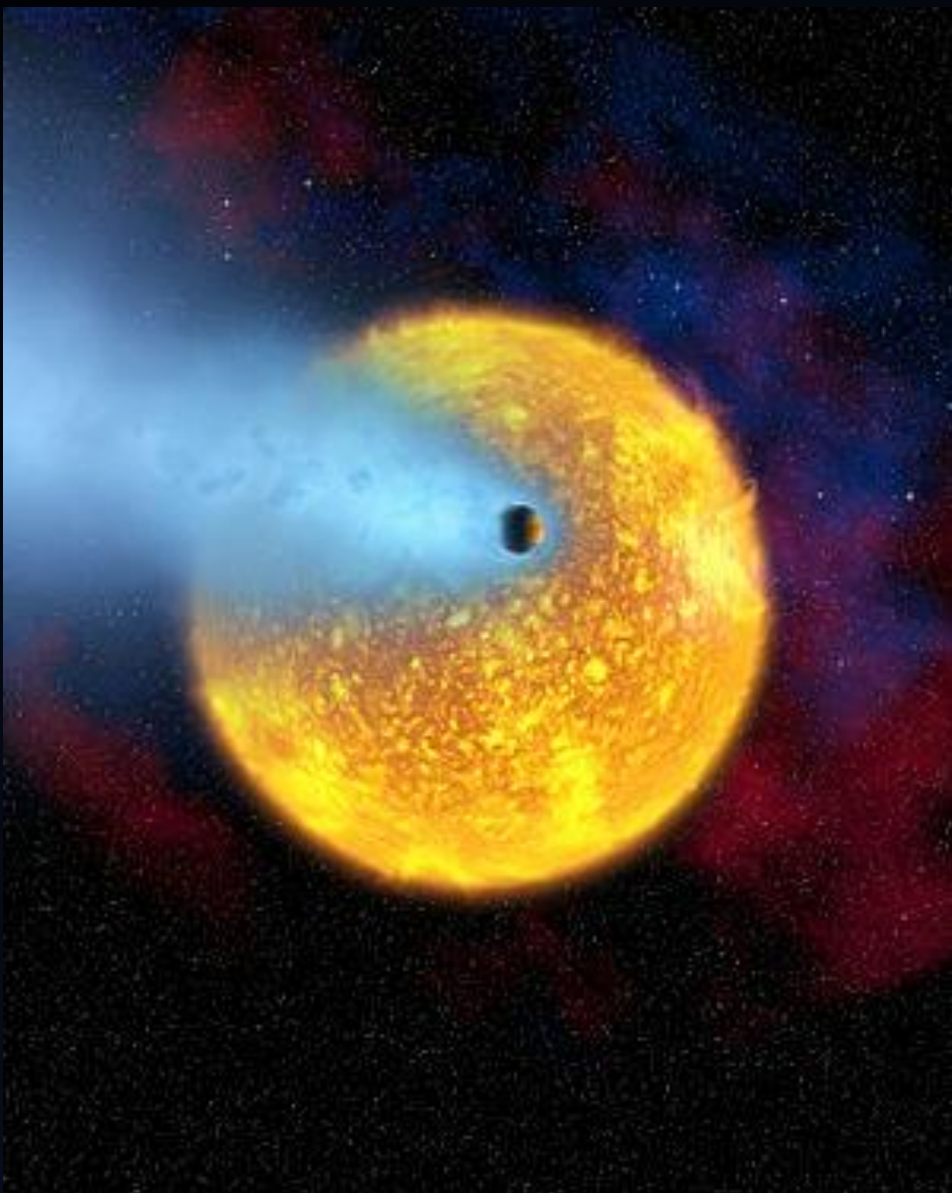
При орбитальном периоде короче нескольких дней (орбита менее 0.02 а.е.) невозможно равновесие, и орбита планеты постоянно сокращается, пока планета не будет разрушена и/или поглощена.

Слияния звезд и планет

Раз в 300 лет в Галактике.



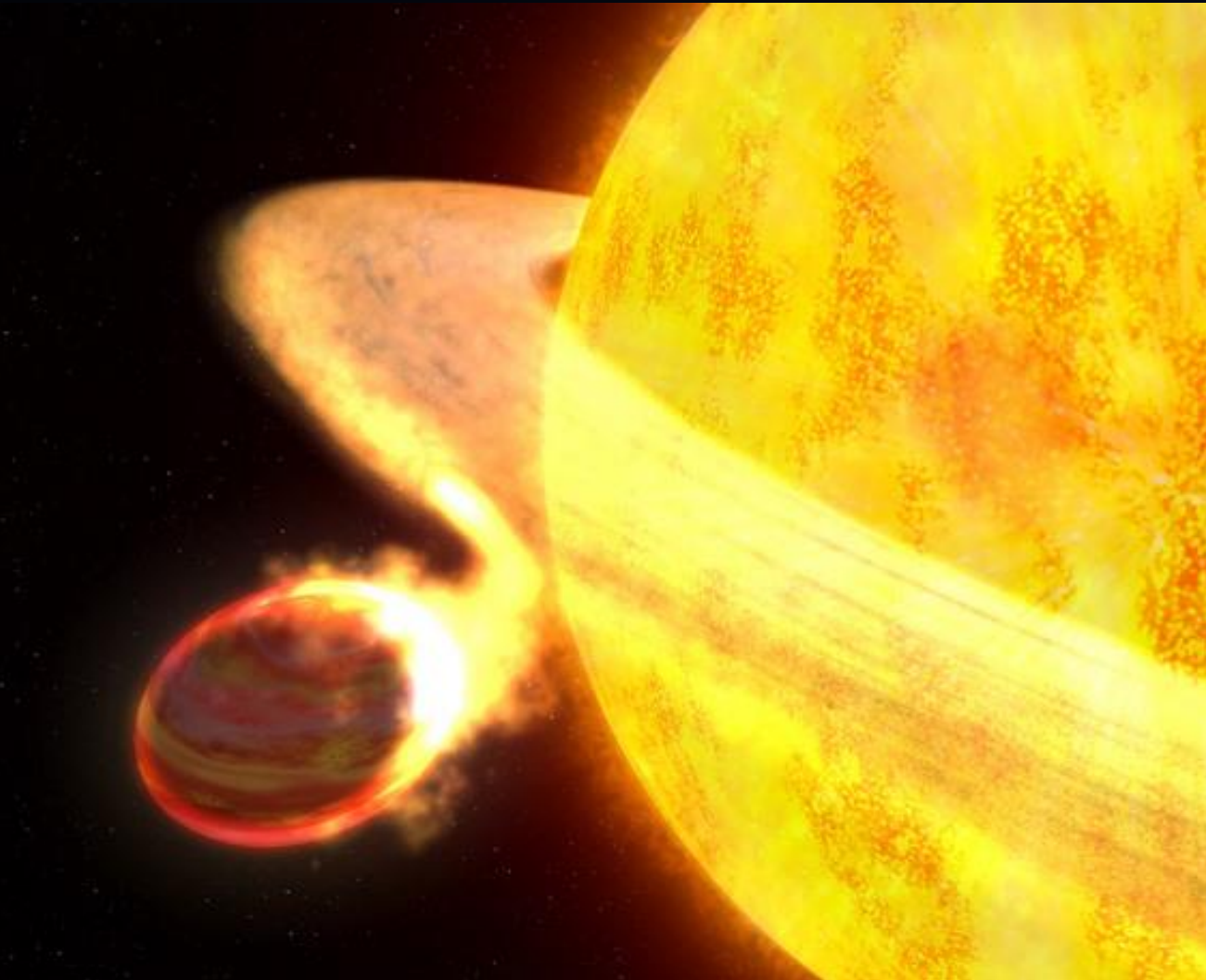
Испарение HD209458 b



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

Поглощение WASP-12b

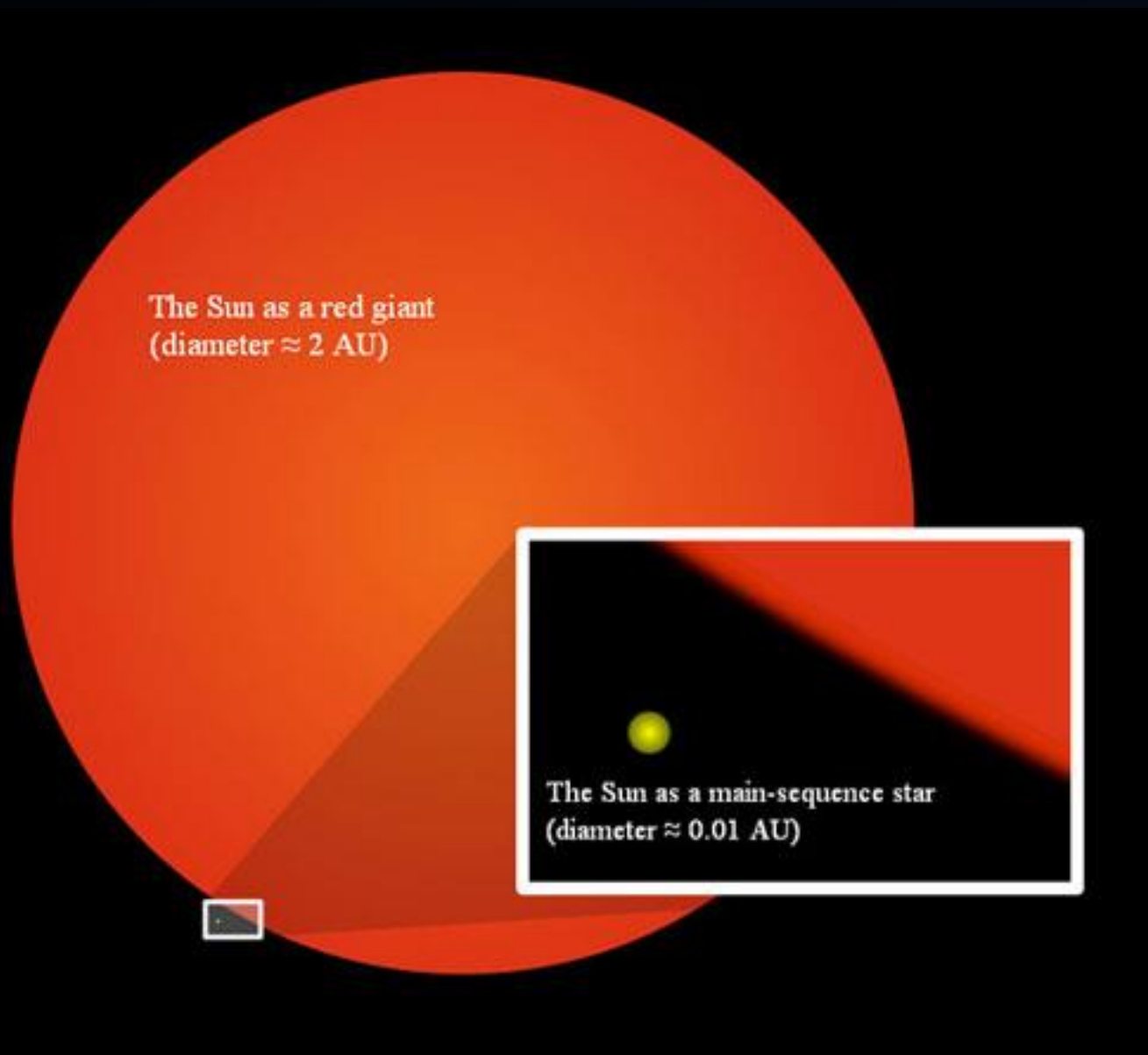
<http://www.universetoday.com/64739/hubble-confirms-star-is-devouring-hot-exoplanet/>



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



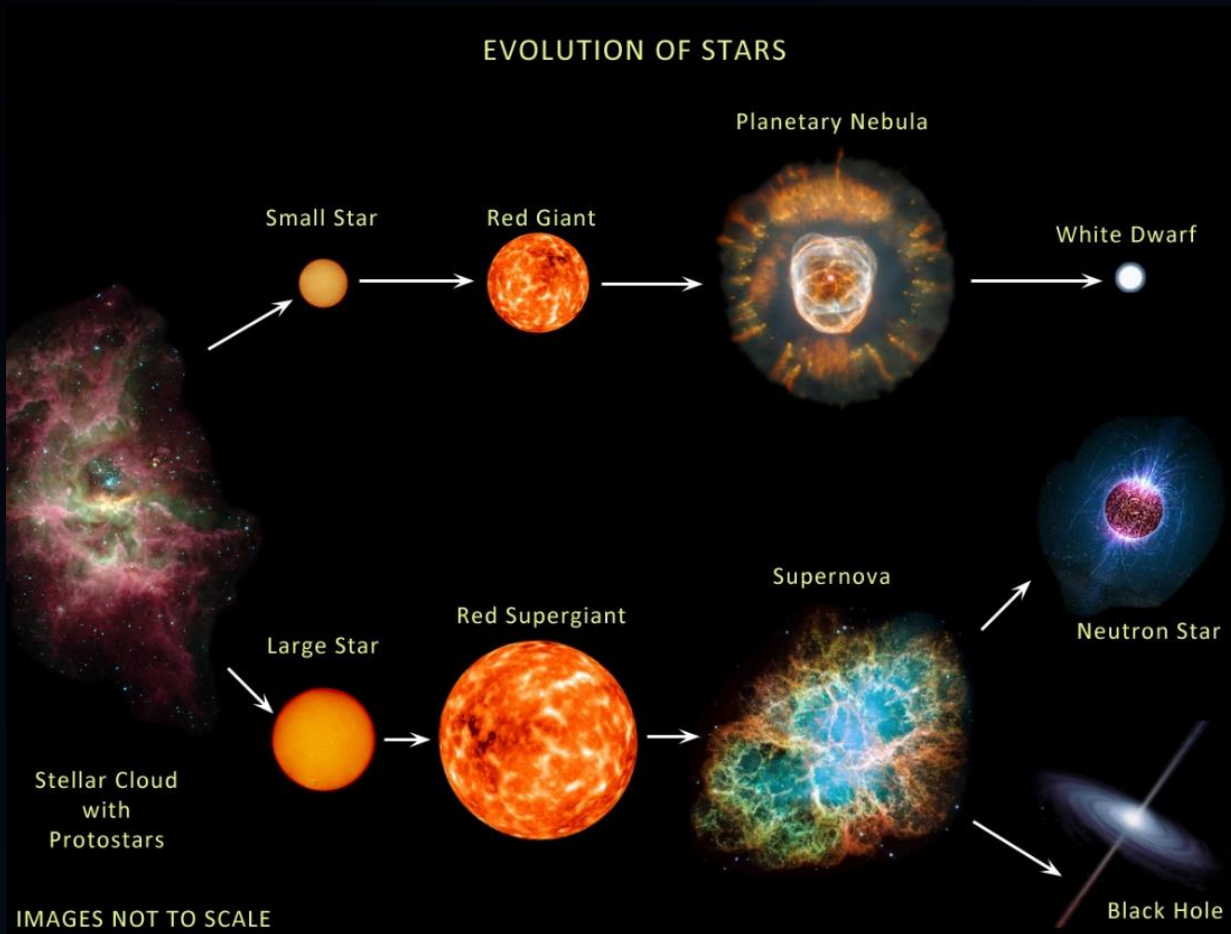
Звездная эволюция отражается на планетах.

При превращении звезды в красного гиганта часть планет оказывается поглощенными.

Примерно 2-3 в год в Галактике.

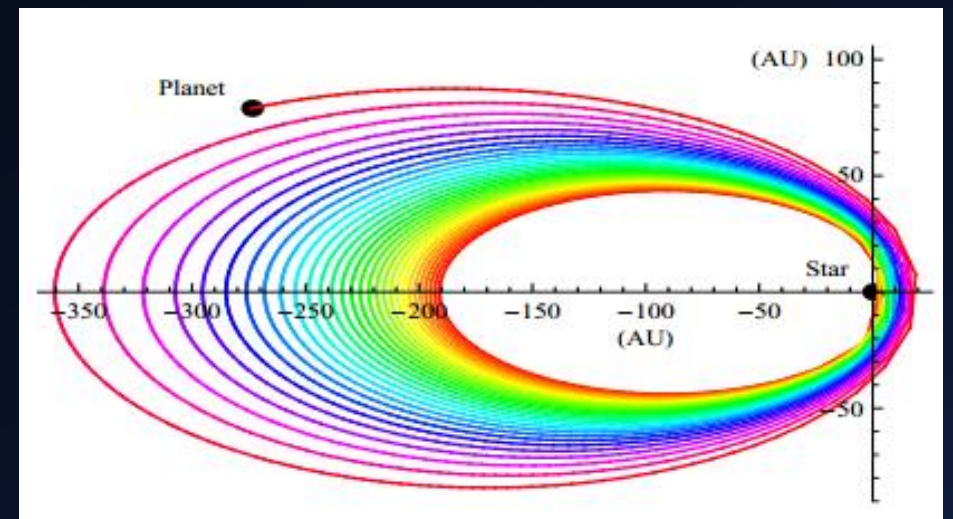
Выброс планет звездами

Что происходит с планетами когда звезда теряет массу?

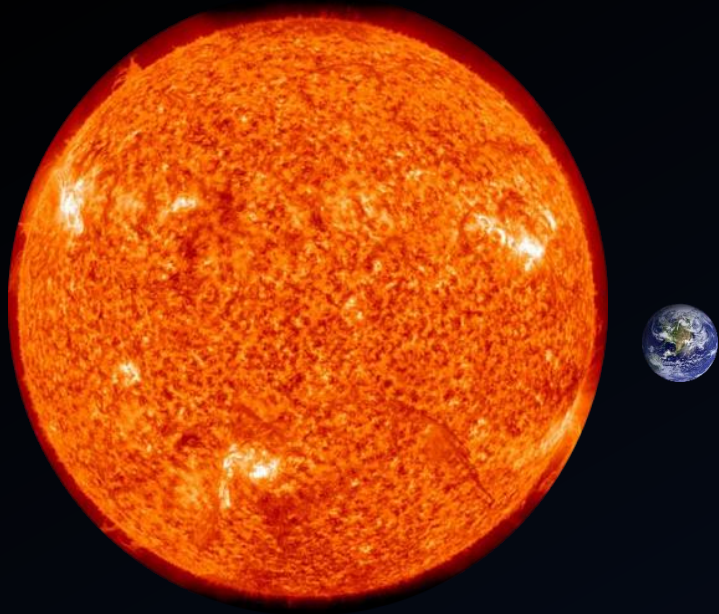


У звезд типа Солнца планеты на орбитах, как в СС, останутся в системе, но орбиты будут шире. Поэтому и наблюдают планеты у белых карликов

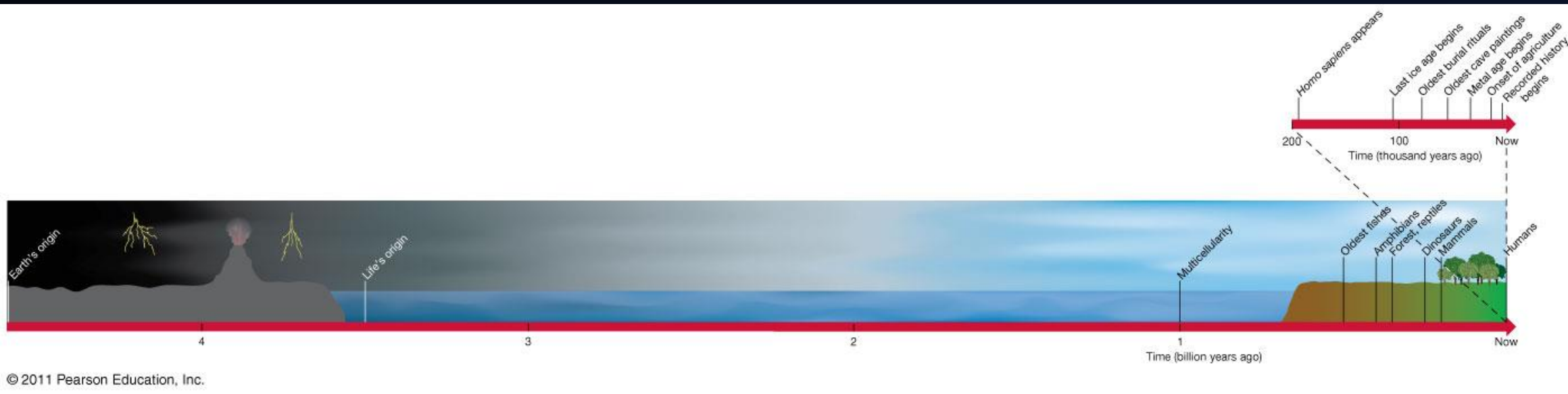
Далекие планеты могут «улетать»



Интересные потери планет могут происходить в двойных системах!

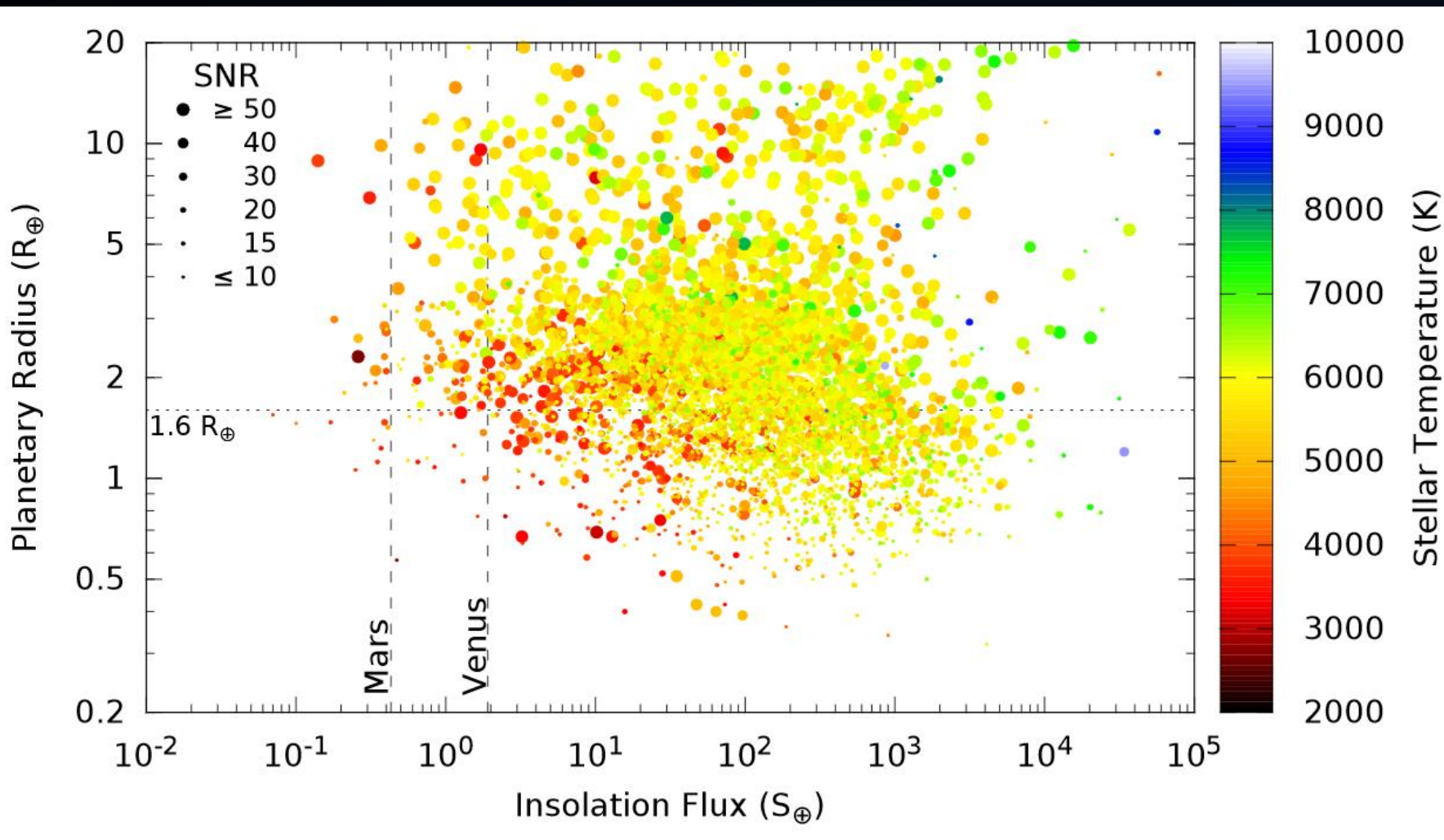


Из 4 с лишним миллиардов лет истории Земли техническая цивилизация видна лишь последние 100. Для ученых с далеких звезд (далее 100 св. лет) мы все еще дикая, но обитаемая планета.



Новый каталог кандидатов Кеплера

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

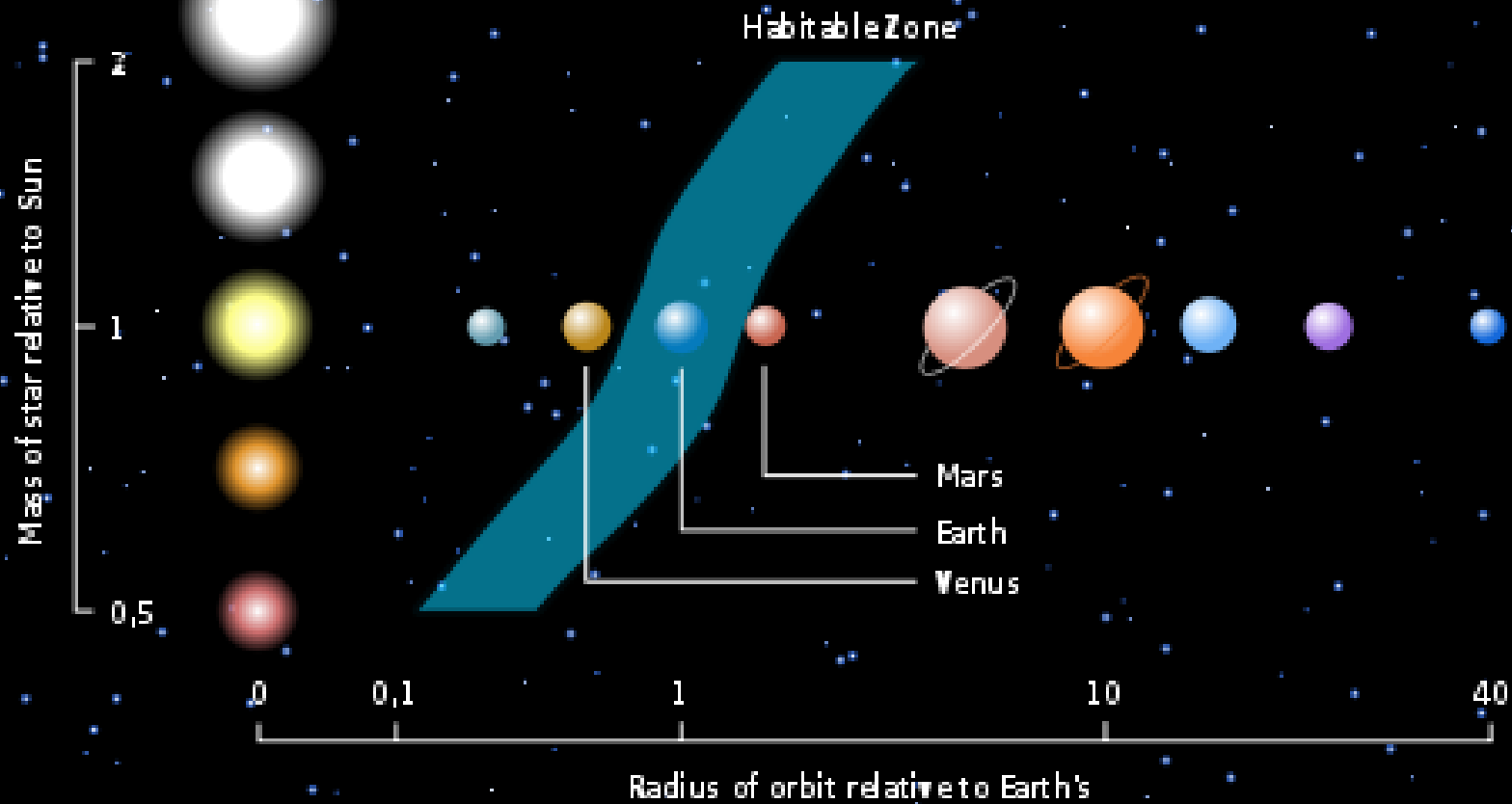


1512.06149

Почти 5000 кандидатов в экзопланеты

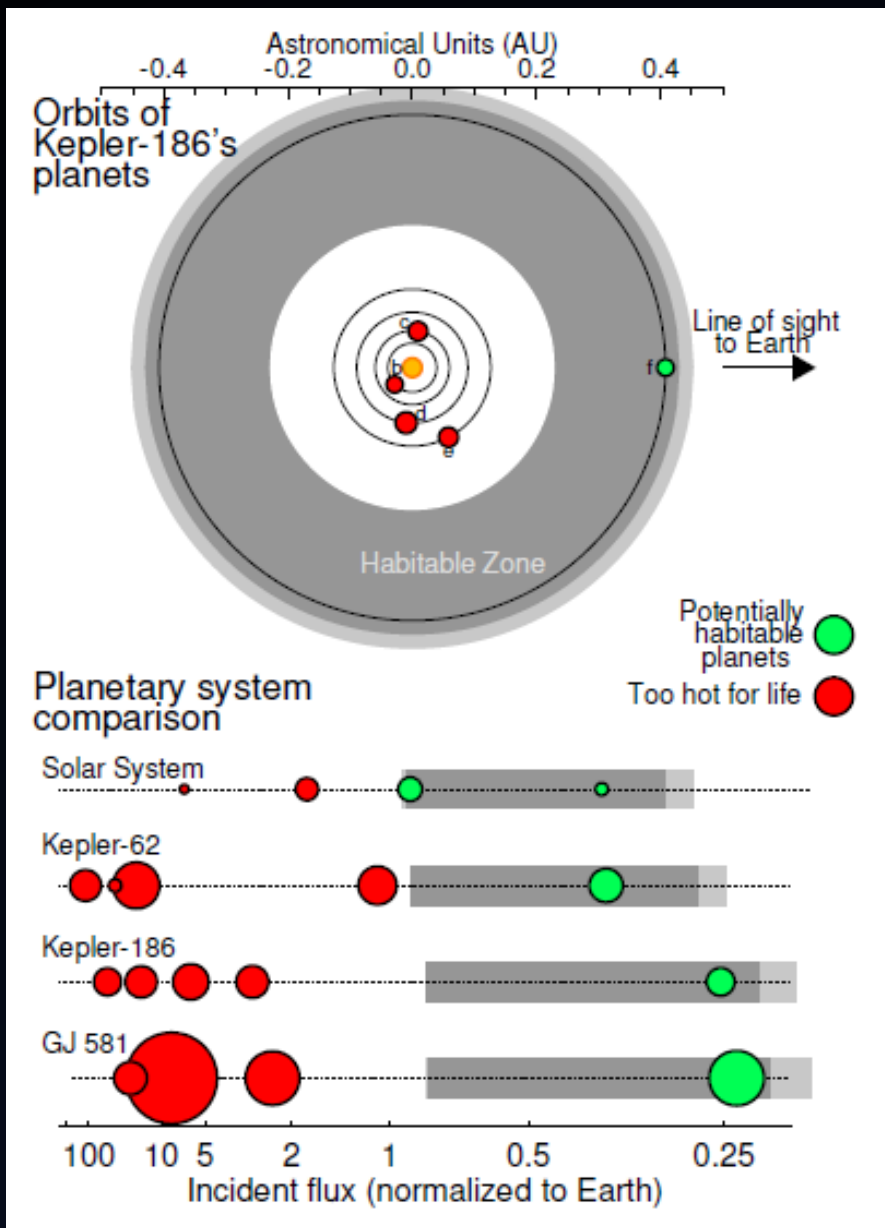
Зона обитаемости

Возможность существования жидкой воды



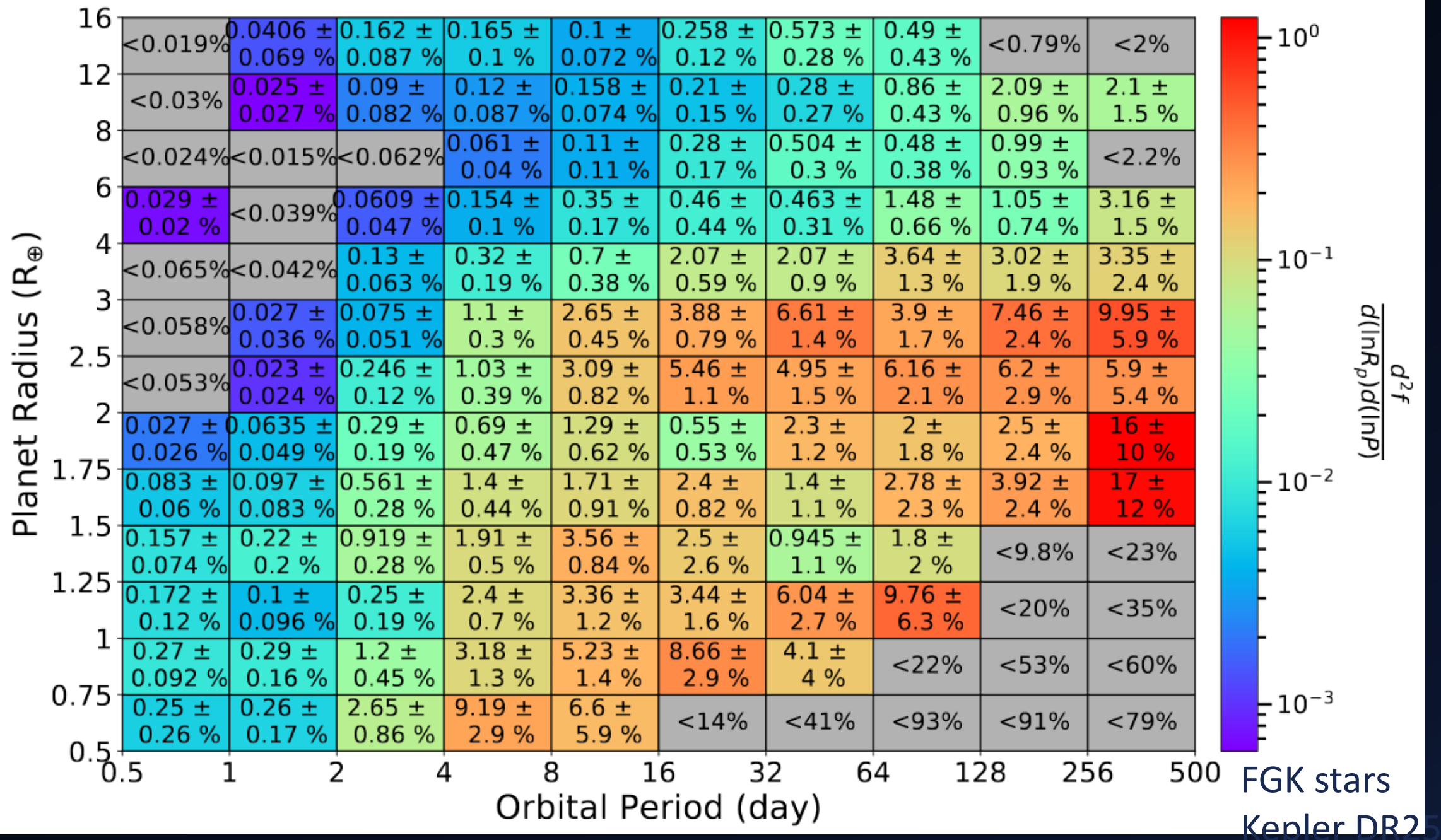
Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

Система Кеплер-186



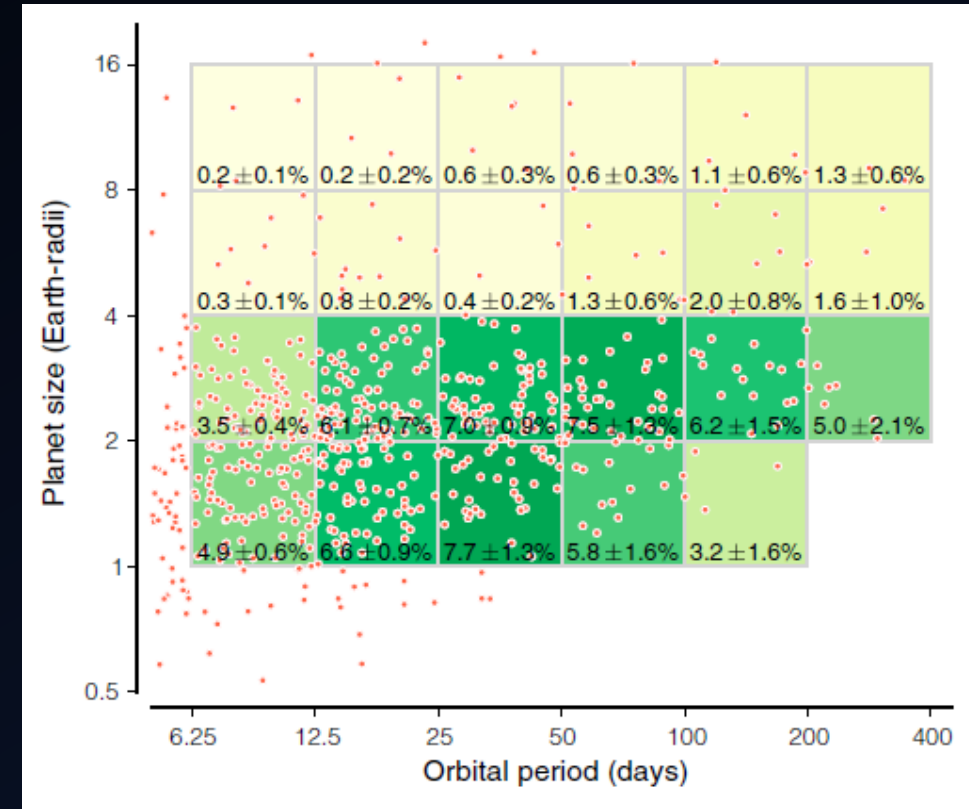
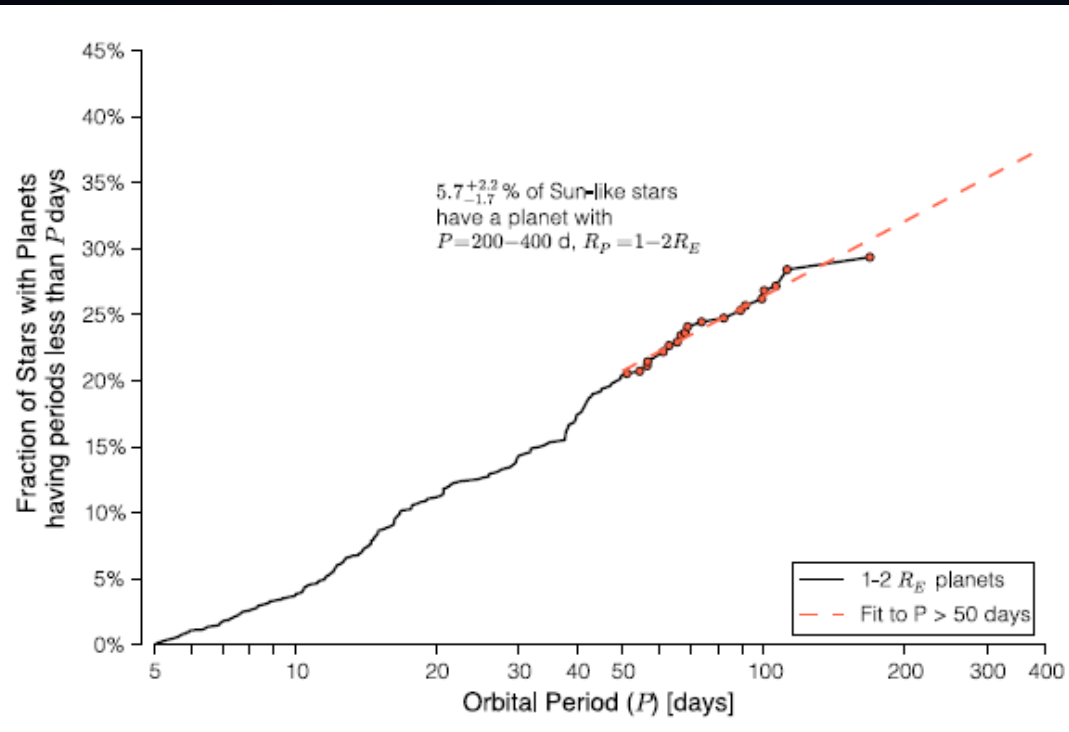
Пять планет вокруг красного карлика.
Все это небольшие планеты.

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



Планеты типа Земли у звезд типа Солнца

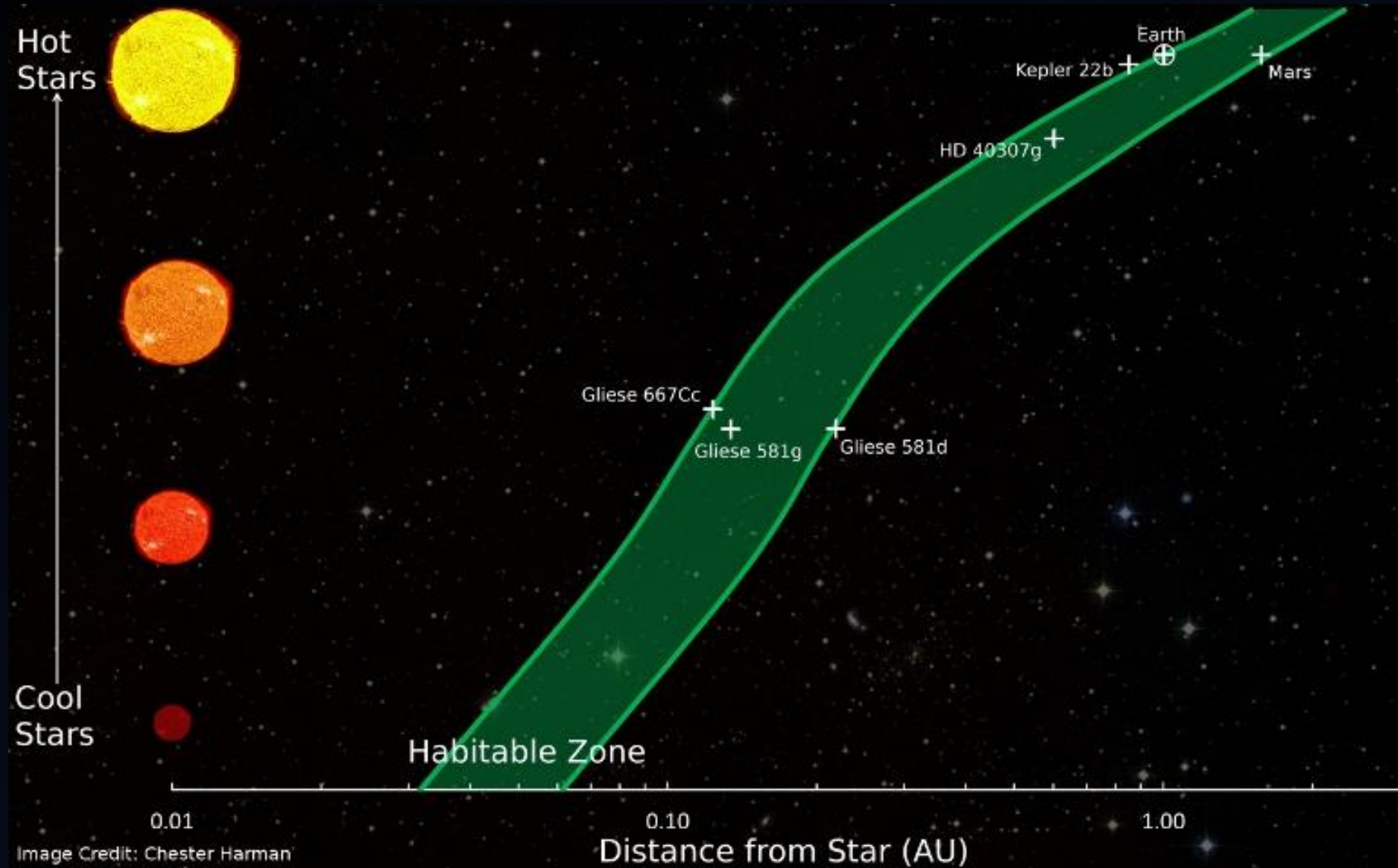
7-15% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли в зонах, где поток излучения отличается от земного менее чем в 4 раза.



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

Более современные данные см. в 2010.14812

Маленькие планеты в зонах обитаемости



Сейчас известно несколько небольших планет в зонах обитаемости

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

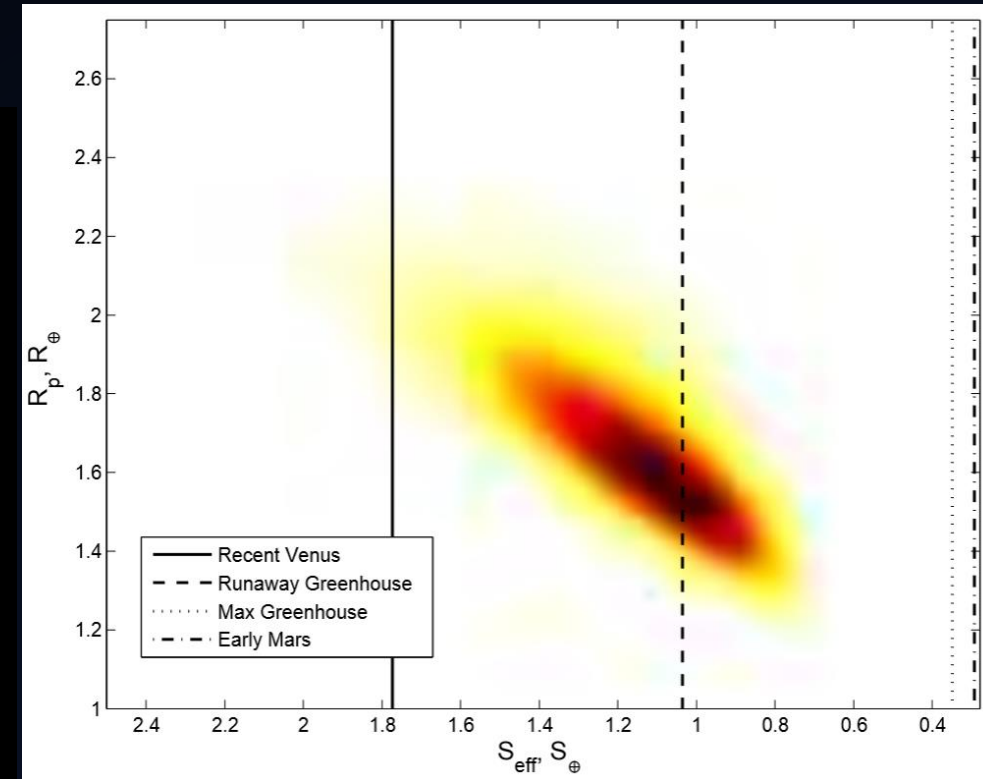


Kepler-442b 155c 235e 62f 62e 283c 440b

M Stars



Kepler-438b 186f 296e 296f

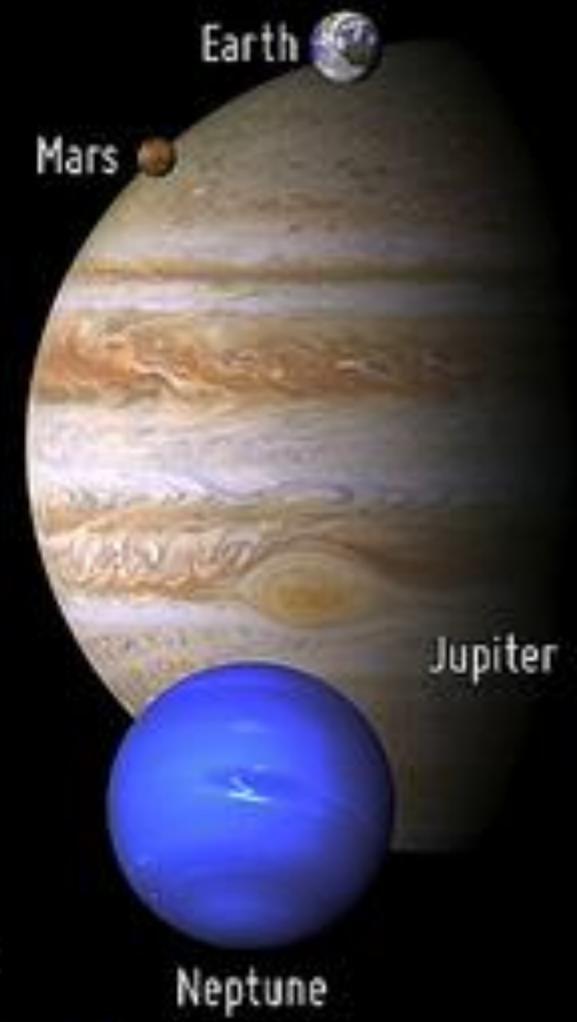
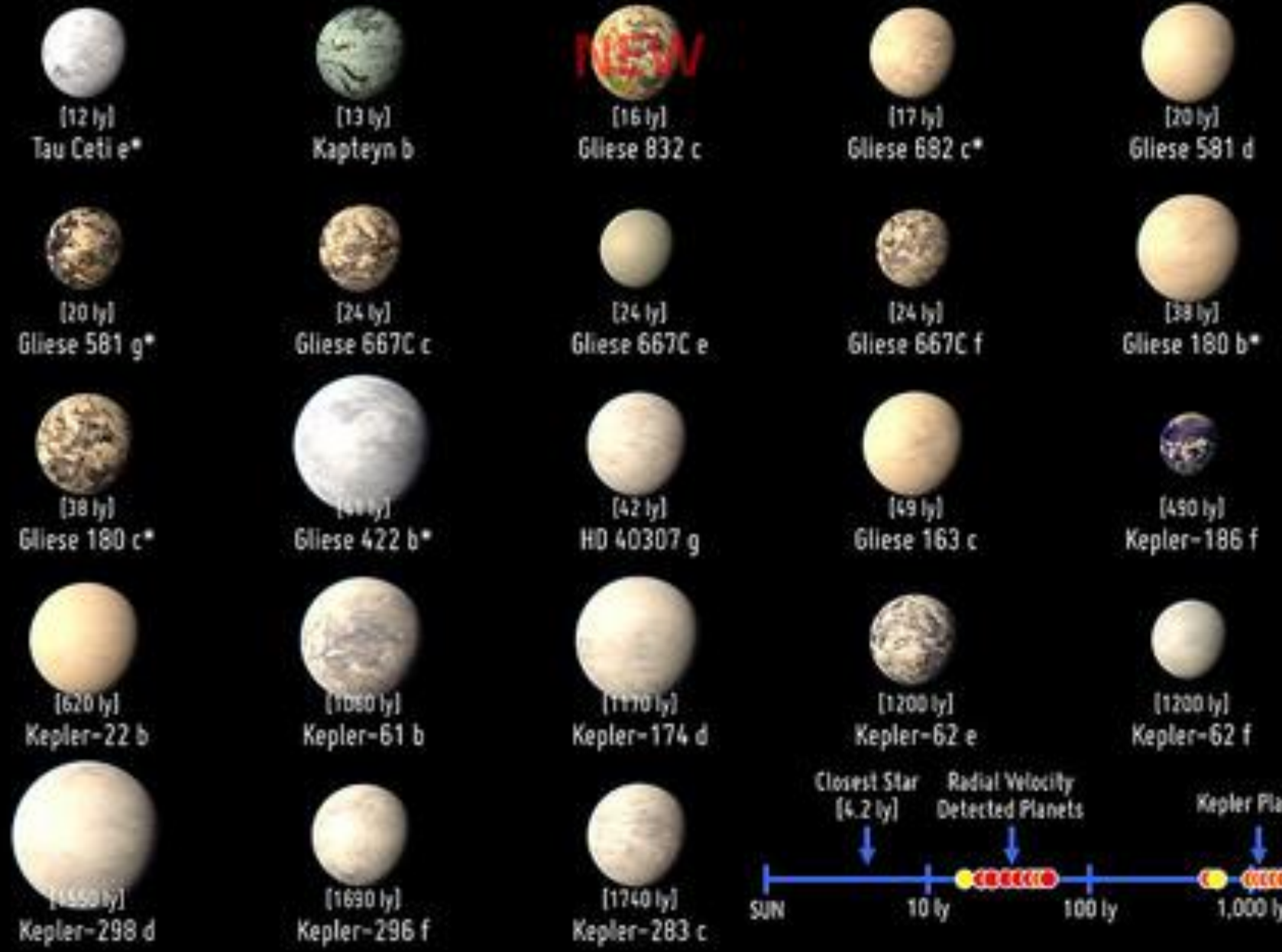


Планета имеет радиус 1.6 земного. Возраст звезды около 6 млрд. лет. Переведена в «кандидаты».

Current Potentially Habitable Exoplanets

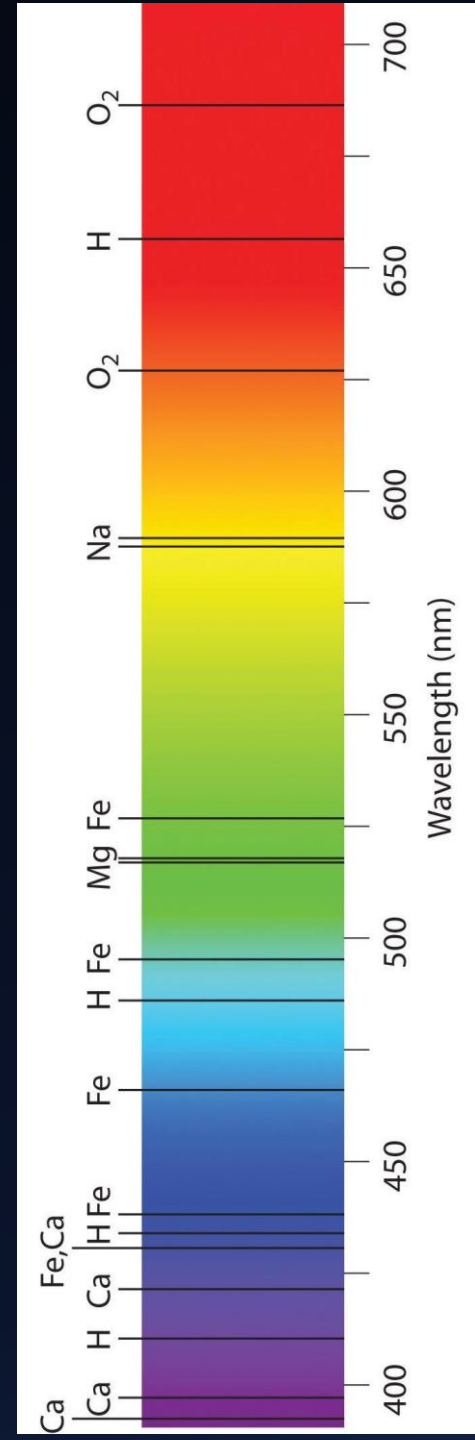
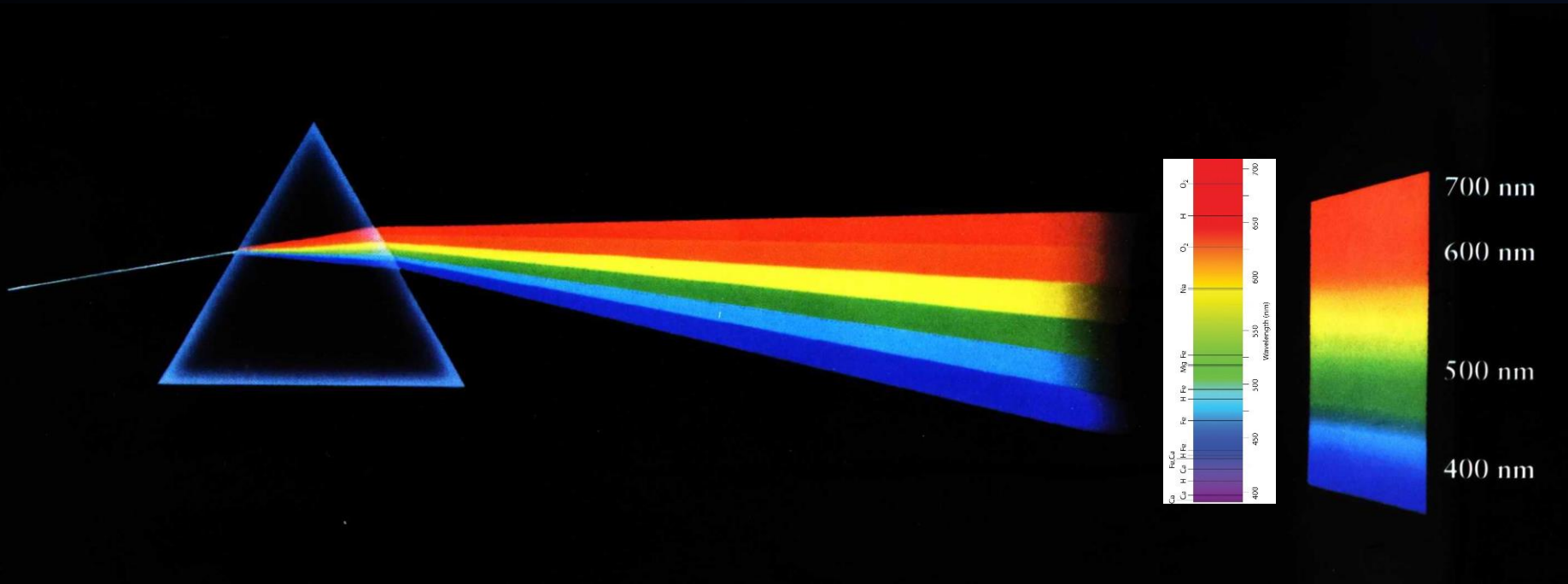


Ranked by Distance from Earth in Light Years (ly)



*planet candidates

Спектр

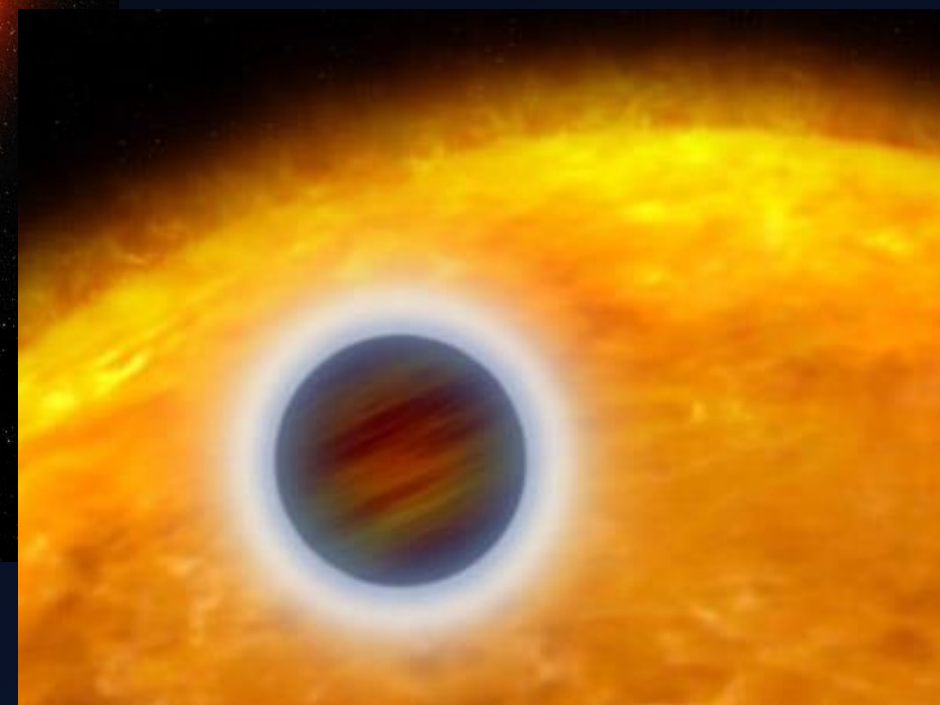
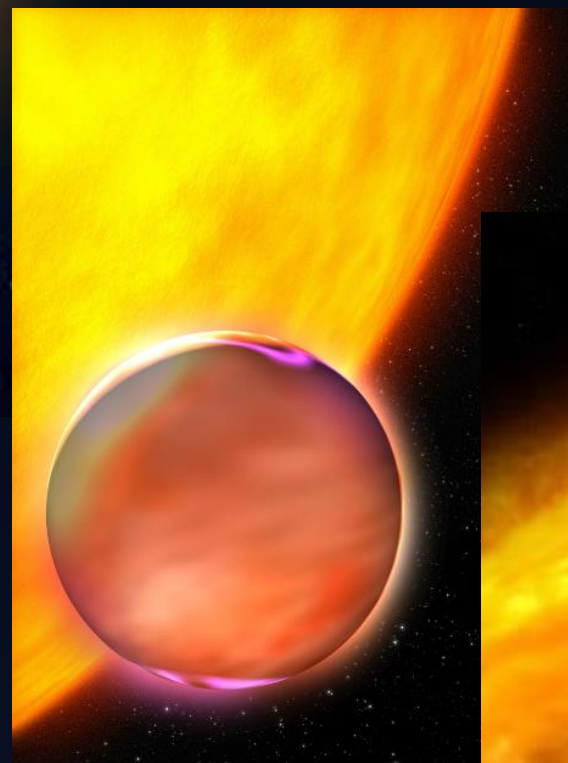


Анализ спектра позволяет установить химический состав атмосфер экзопланет.

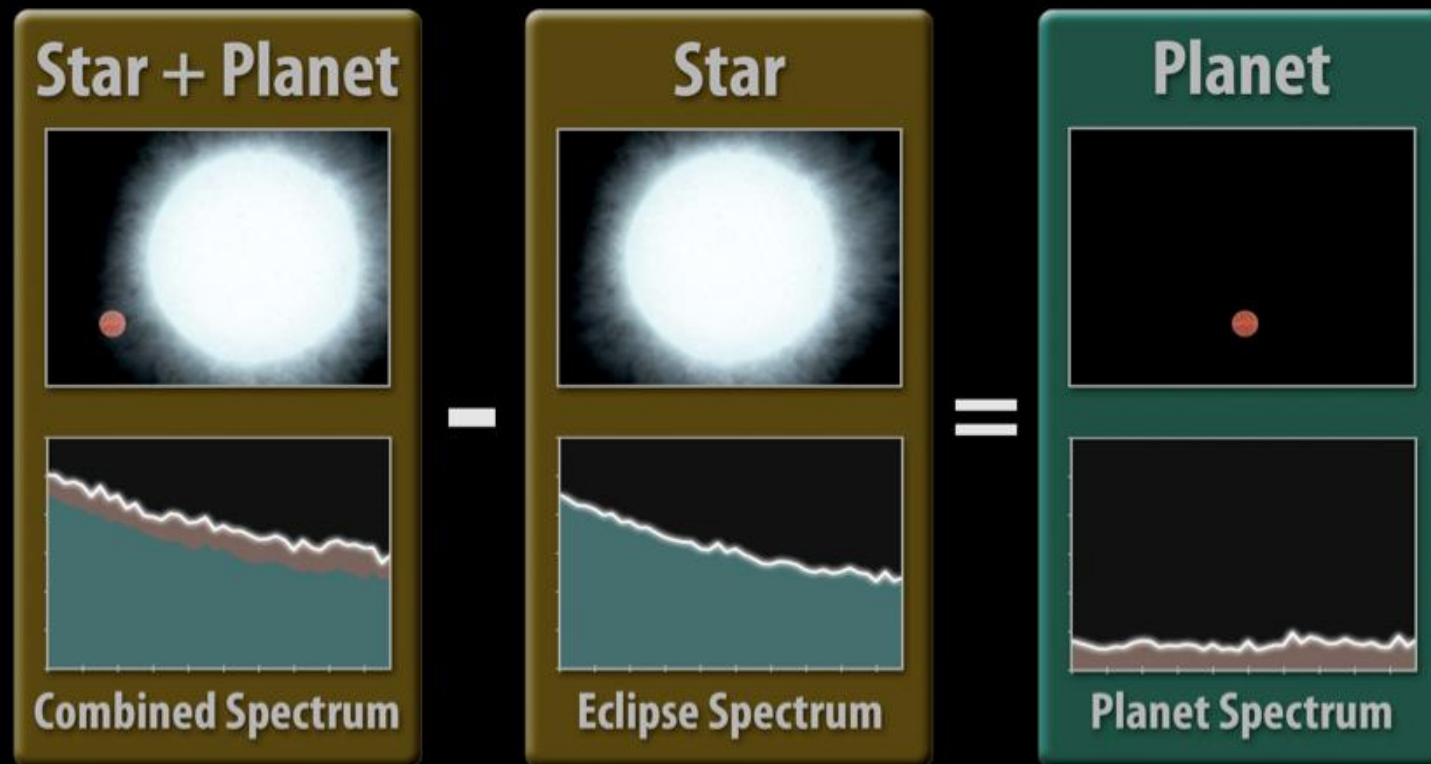
Атмосферы экзопланет



Есть несколько возможностей для получения спектров атмосфер экзопланет.

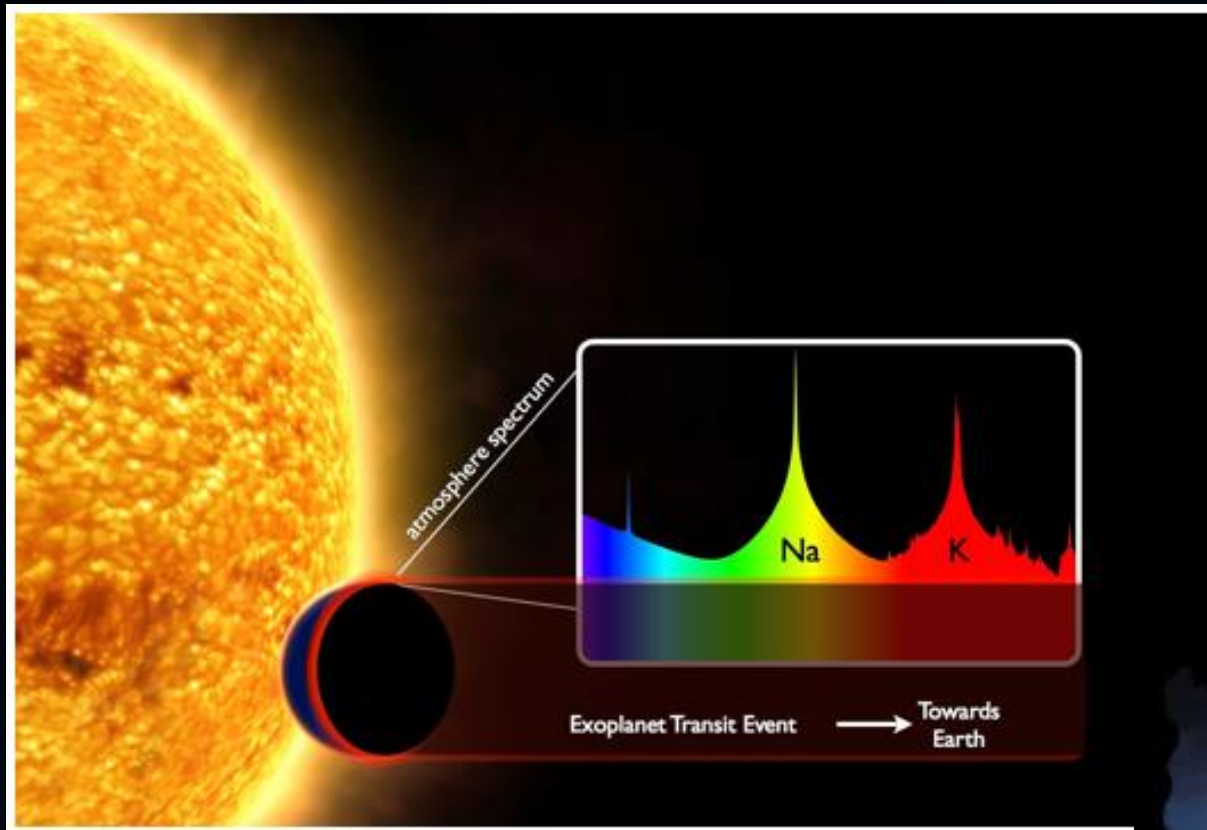


Спектр планеты

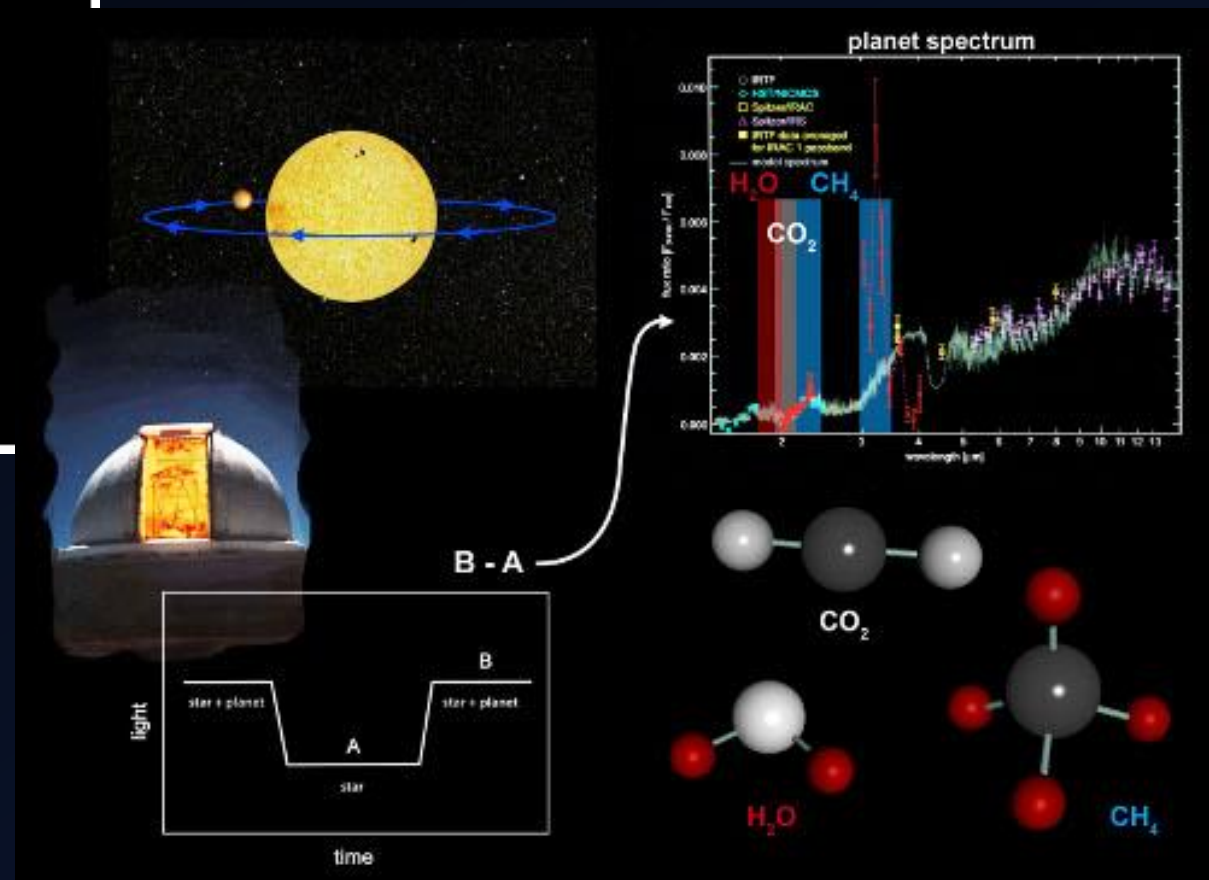


Isolating a Planet's Spectrum

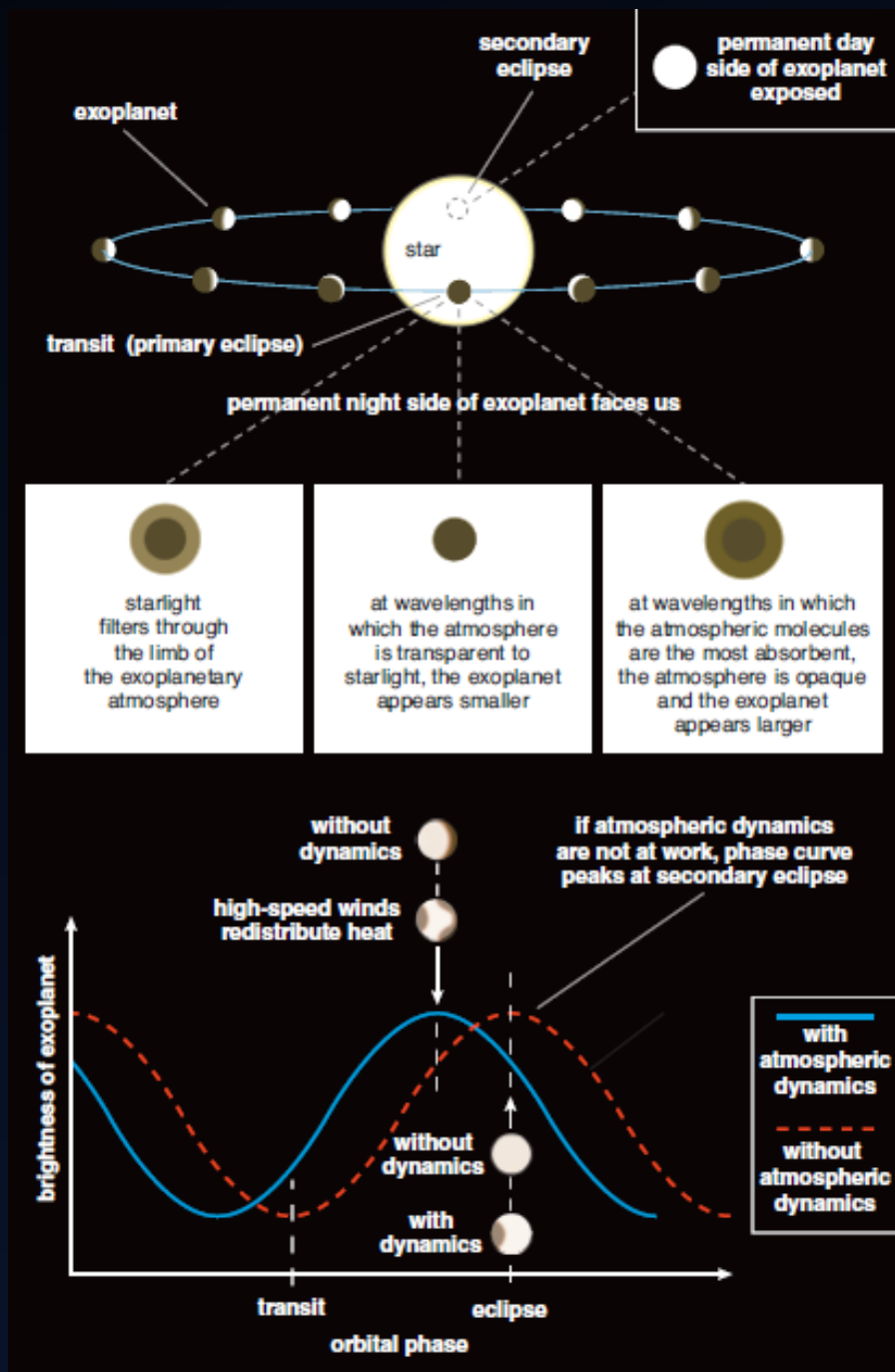
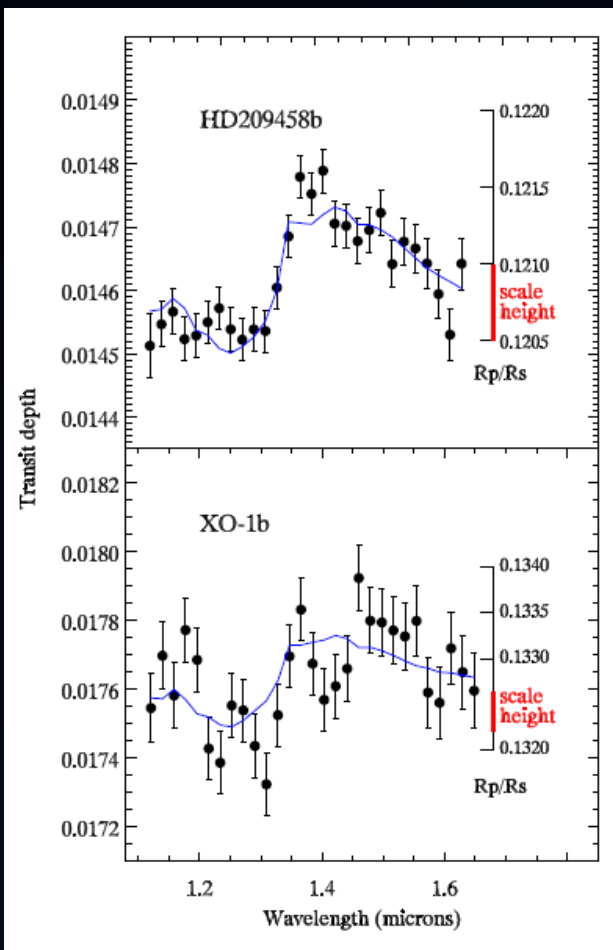
Спектры «напросвет» и прямые



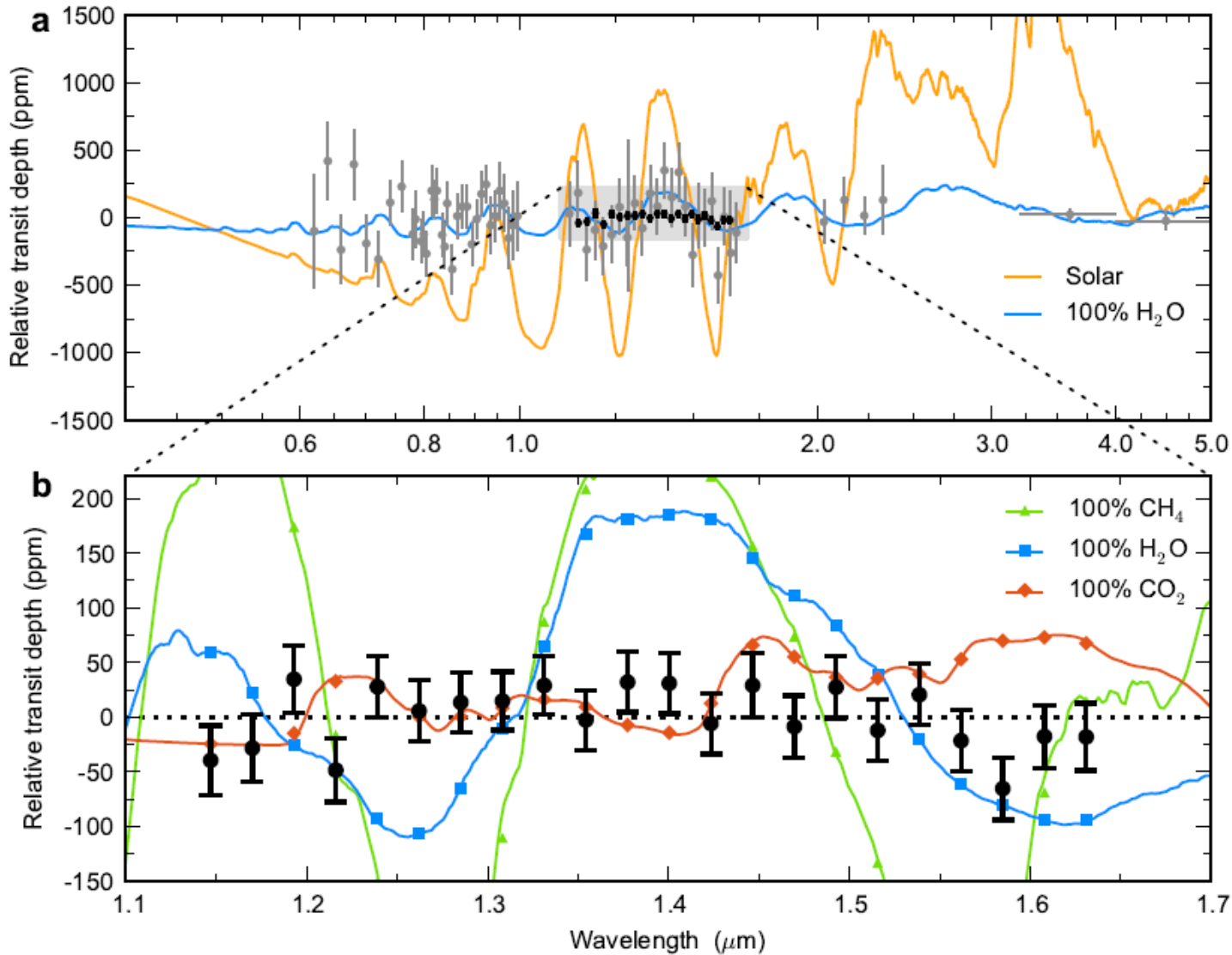
Иногда получают спектр дневной стороны планеты, а иногда изучают атмосферу «напросвет», когда планета проходит между звездой и нами.



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

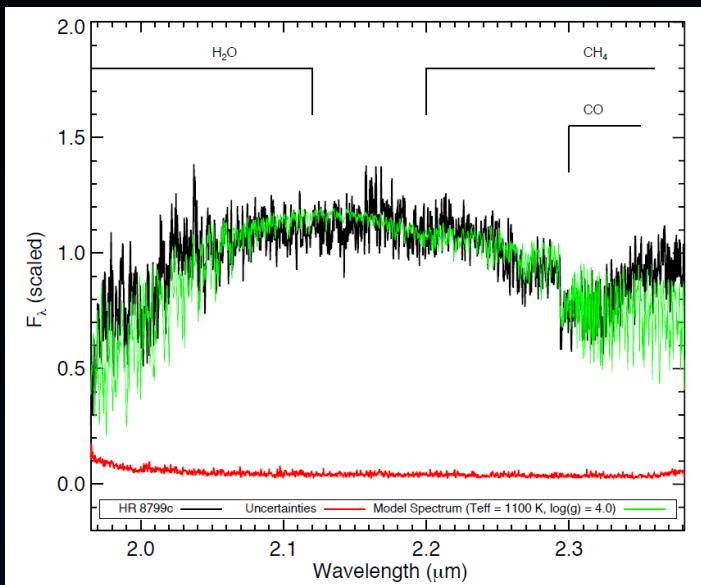


С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

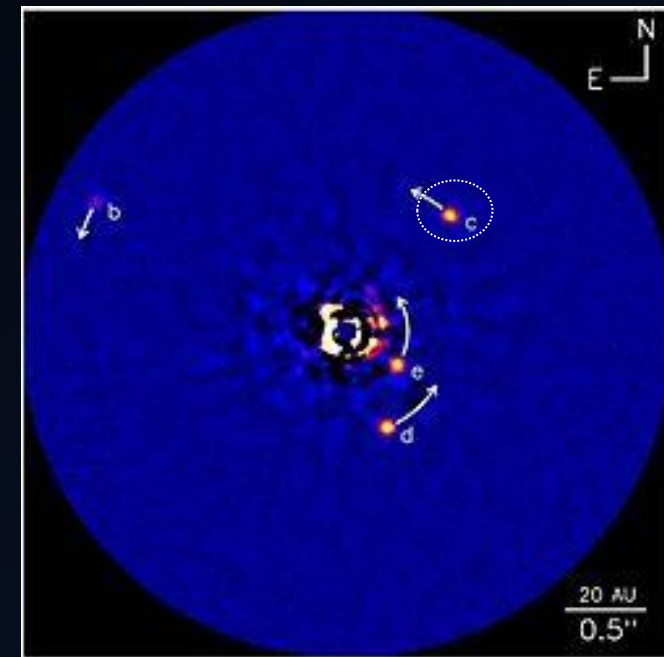
Это можно объяснить высокими облаками.

Вода и СО в спектре планеты



ИК-спектр HR 8799

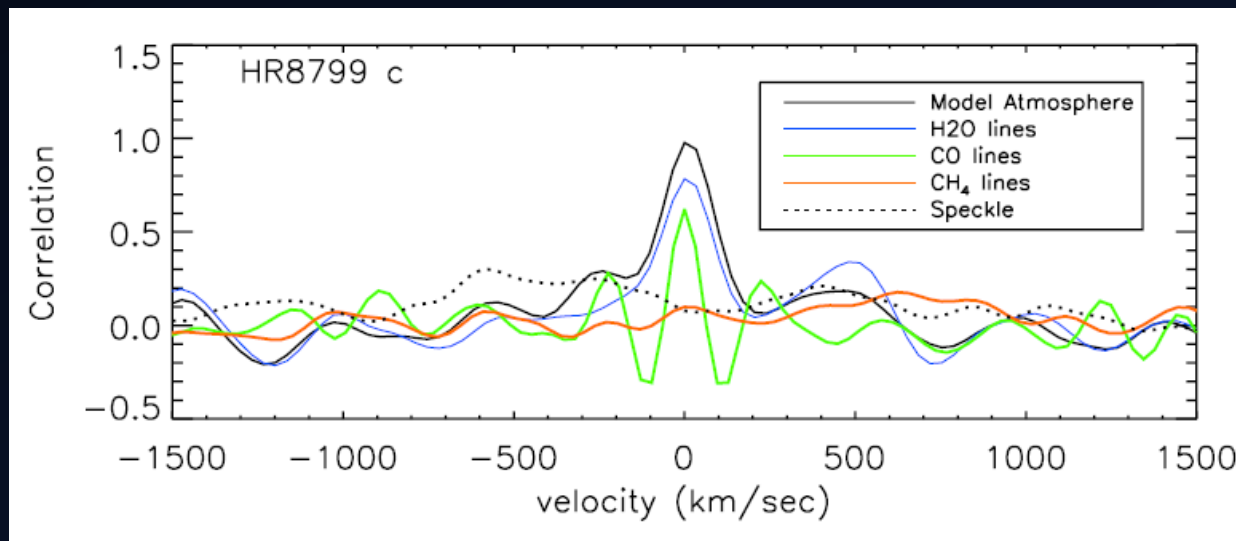
Детальная обработка показала наличие спектральных деталей, связанных с присутствием воды и монооксида углерода в атмосфере планеты HR 8799c.



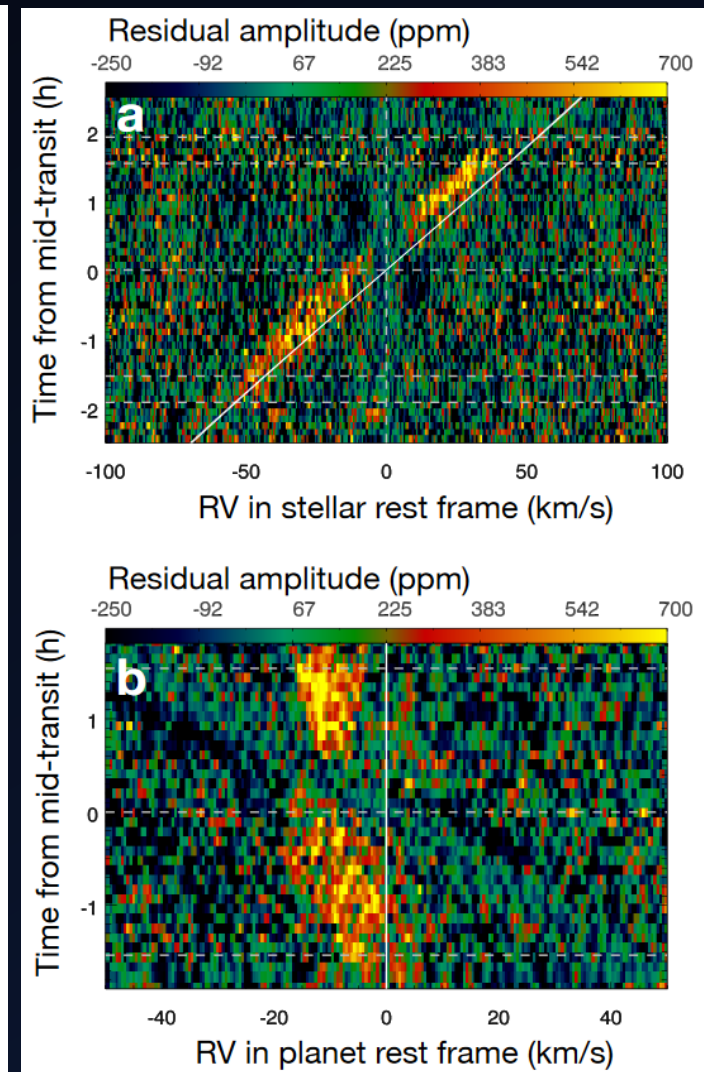
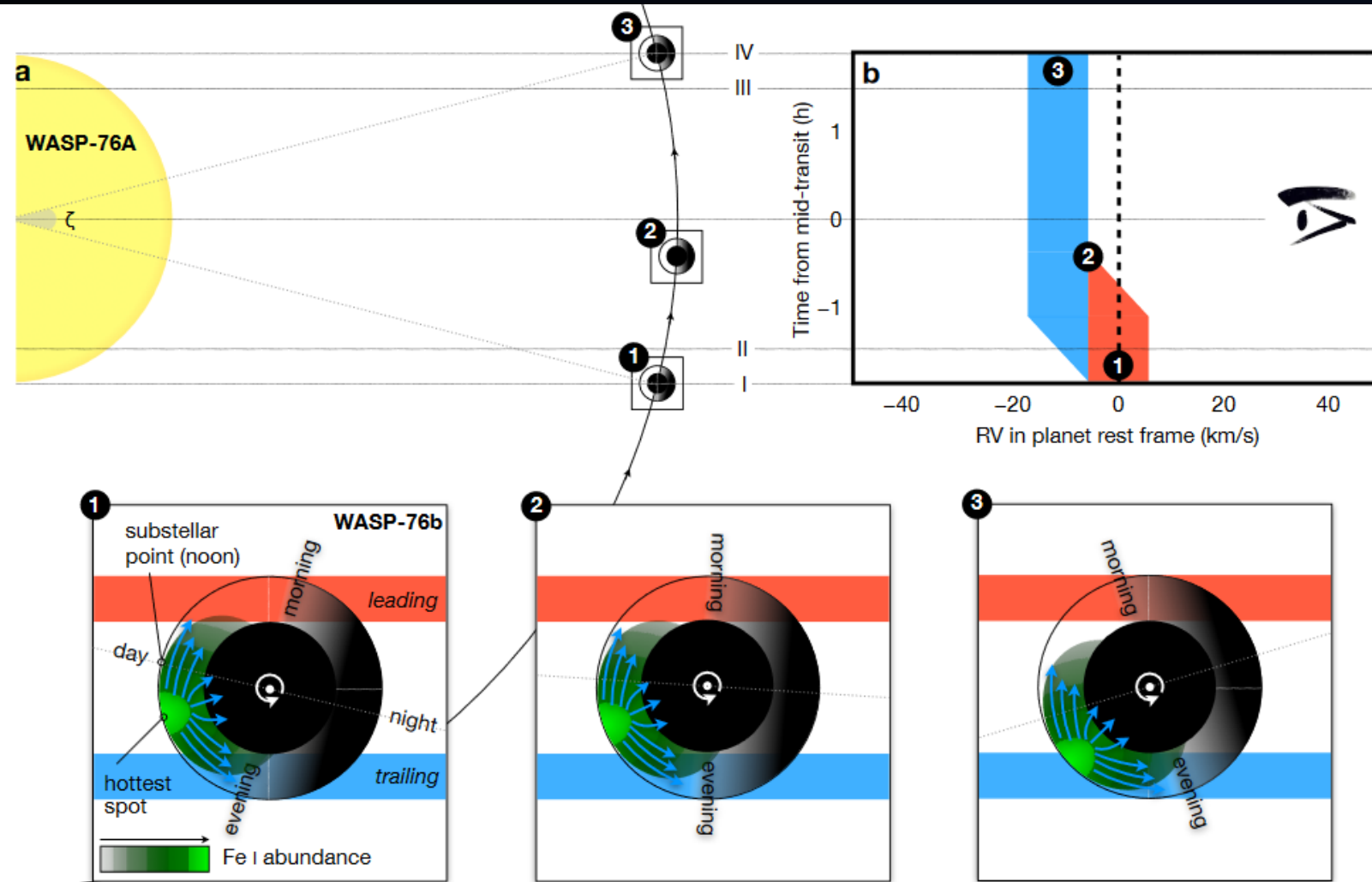
HR 8799



Наблюдения на Keck II



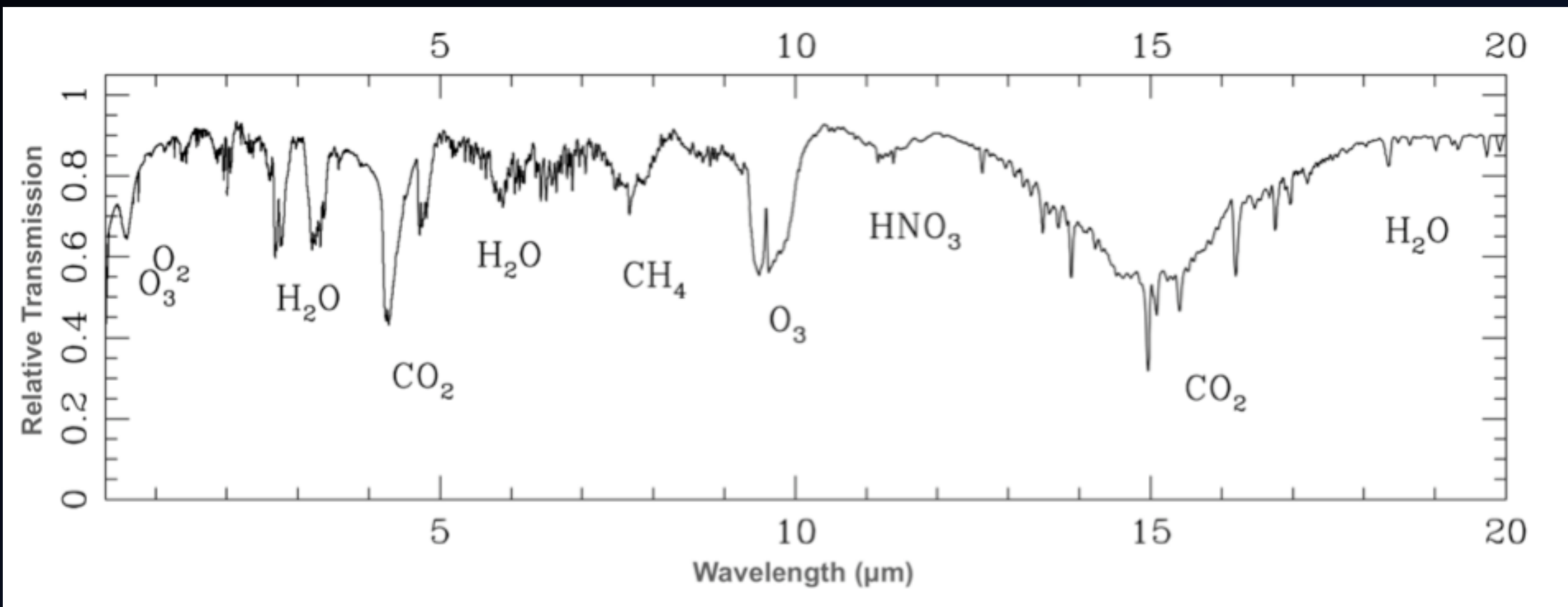
Конденсат железа на ночной стороне



Биомаркеры

Спектр Земли с указанными биомаркерами:

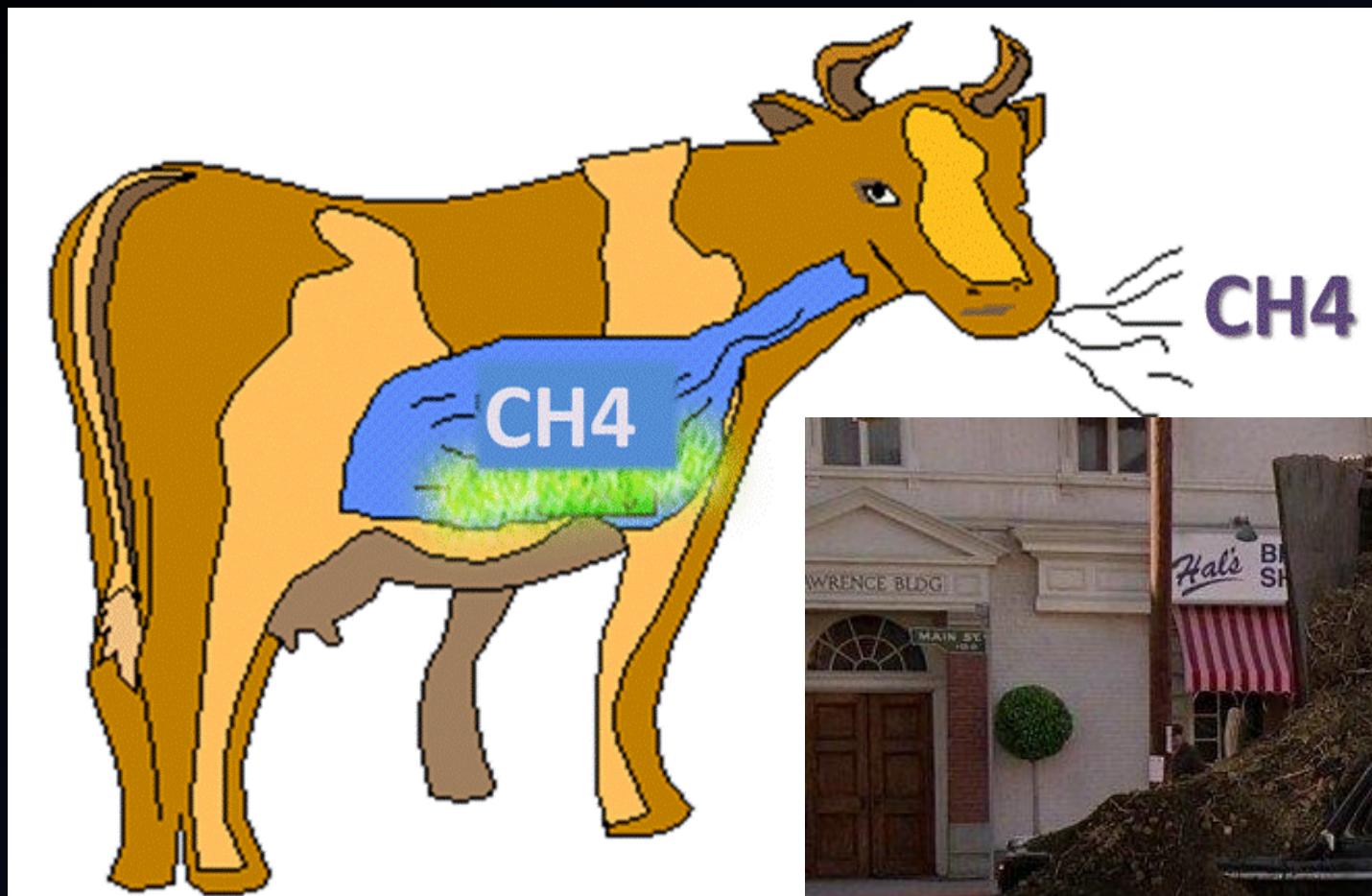
- кислород,
- озон,
- углекислый газ,
- метан,
- вода



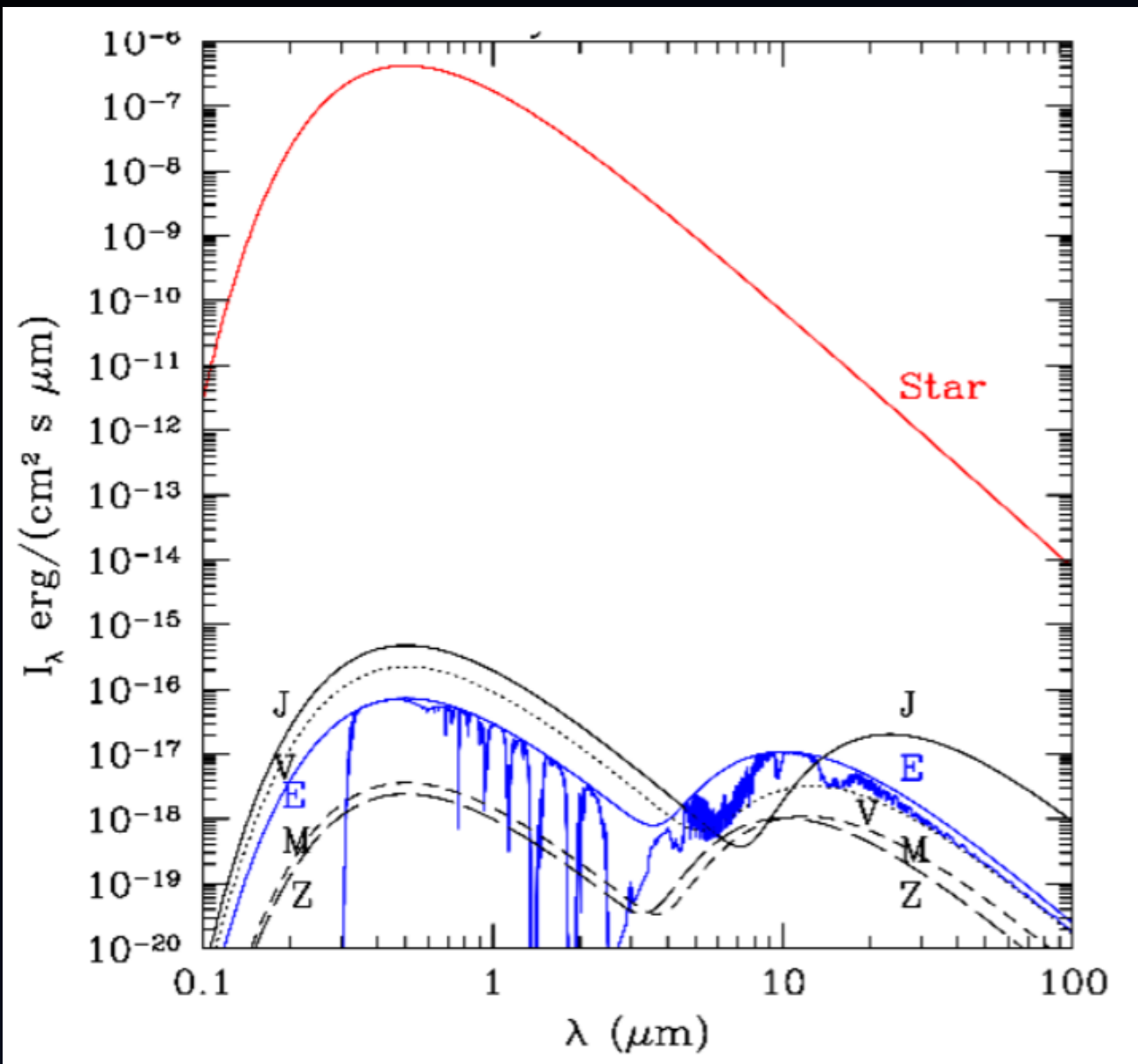
Кислород на Земле



Происхождение метана на Земле

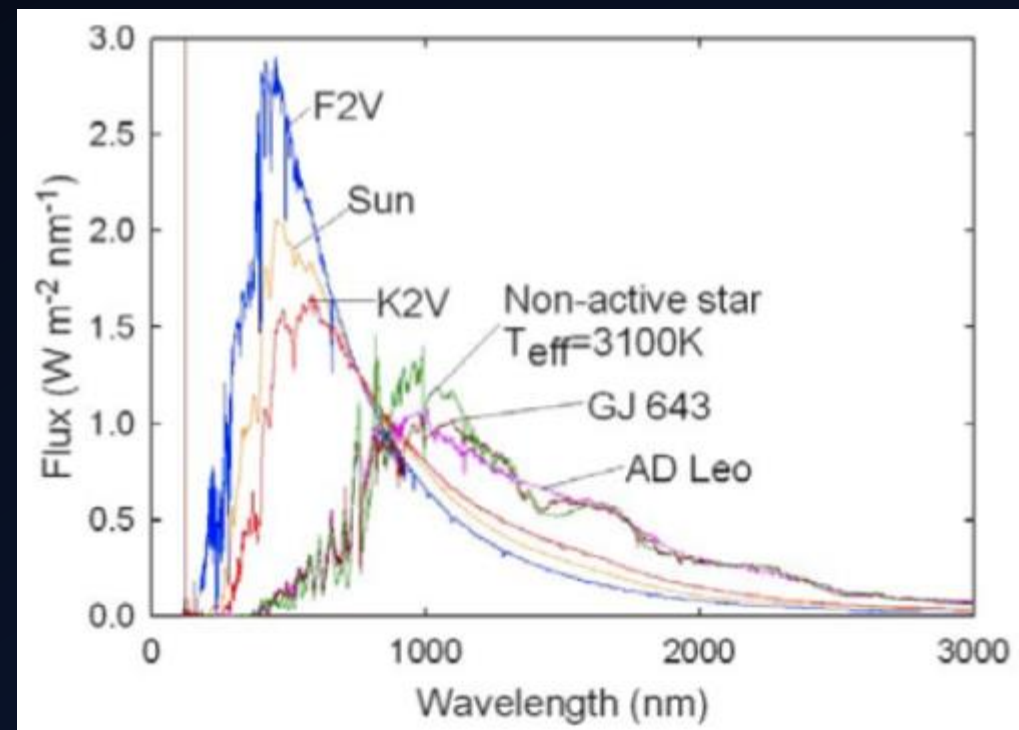


Солнце и планеты



Выделение спектра планеты на фоне излучения звезды является трудной задачей.

Спектры звезд различаются.

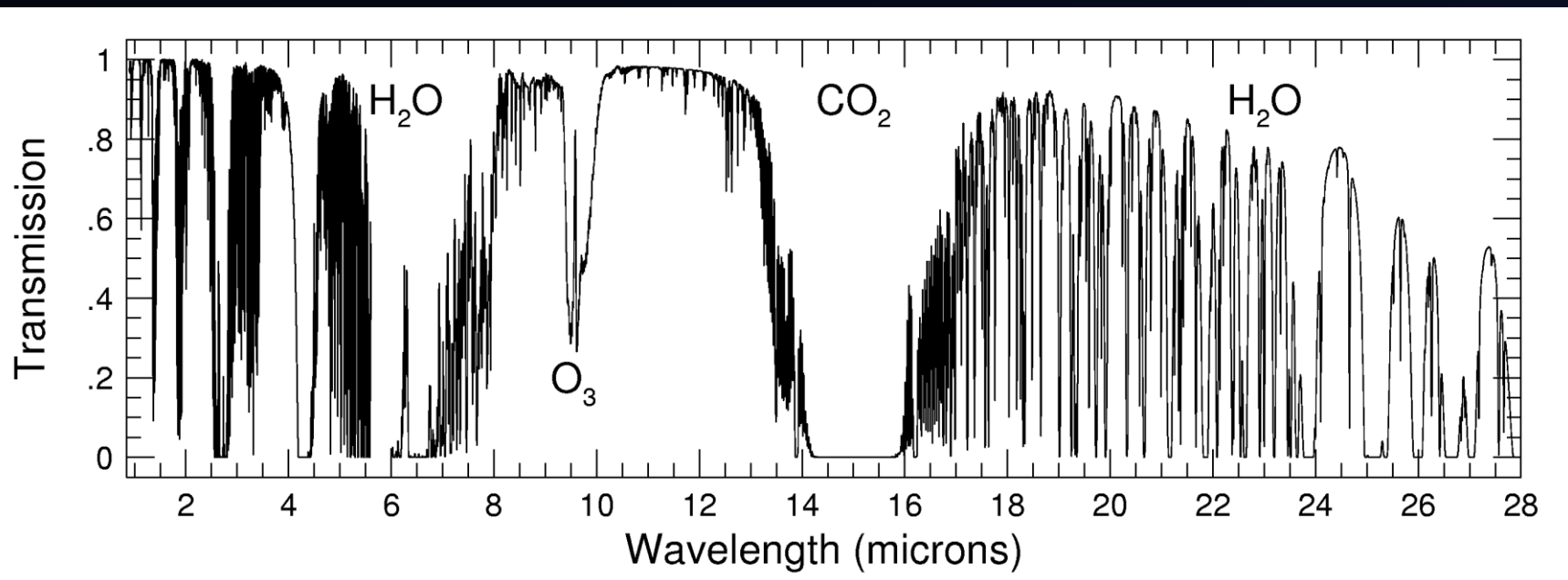
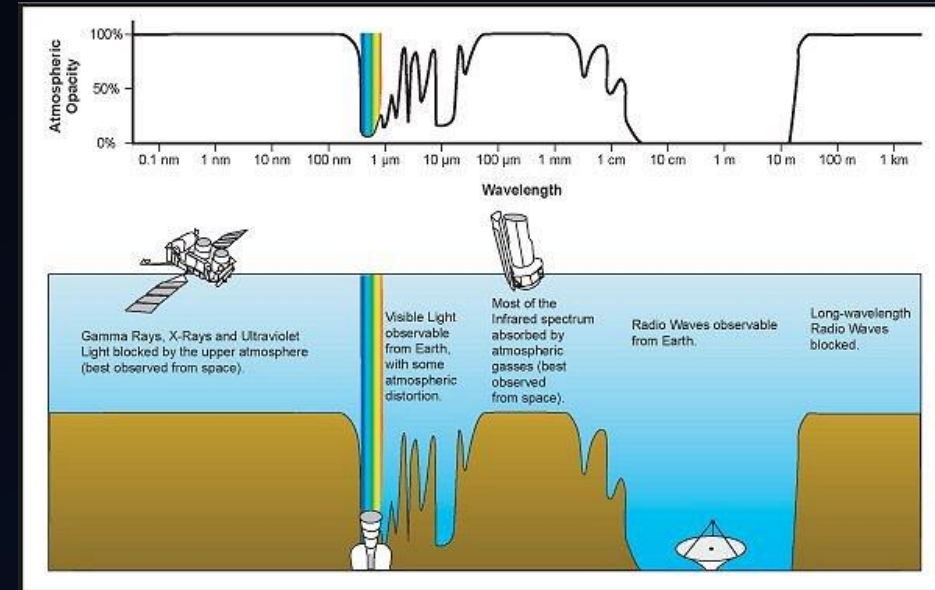


Прозрачность и яркость атмосферы Земли

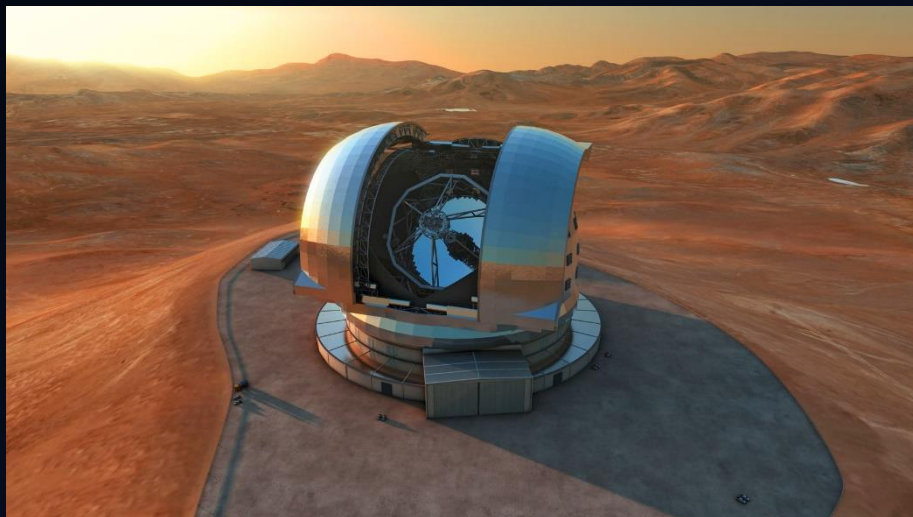
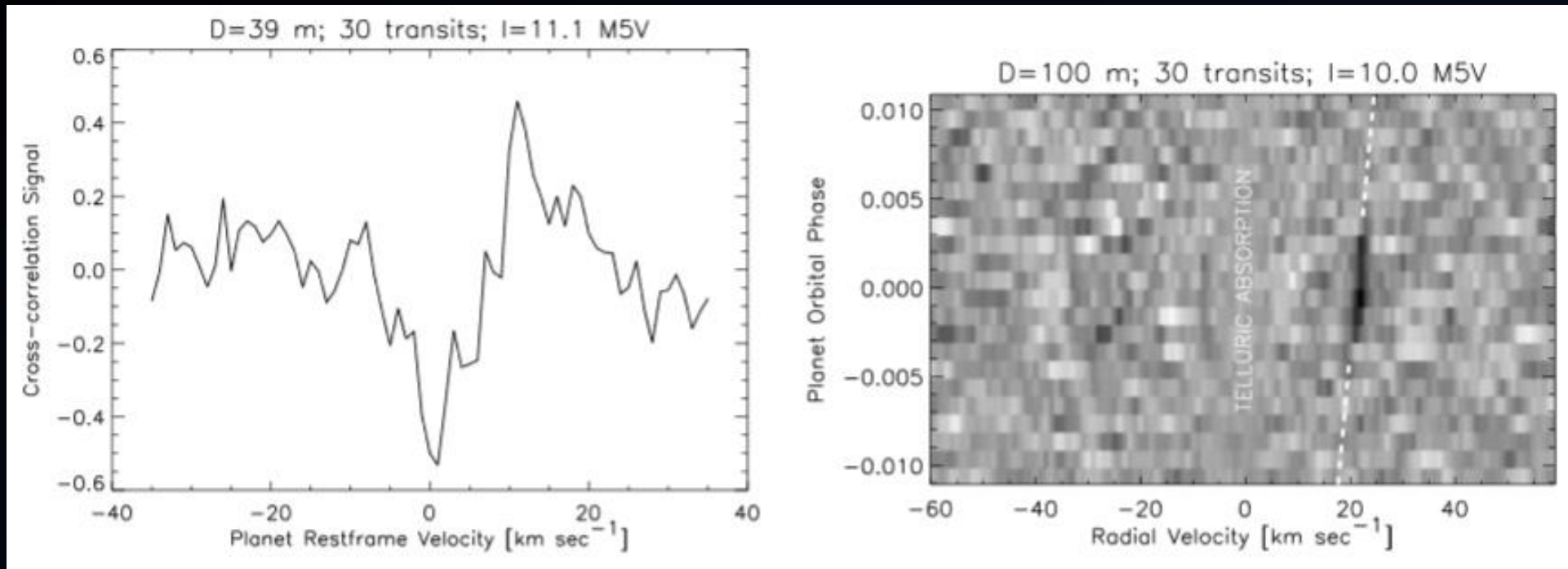
На длинах волн более 5 микрон атмосфера Земли мешает наблюдать.

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

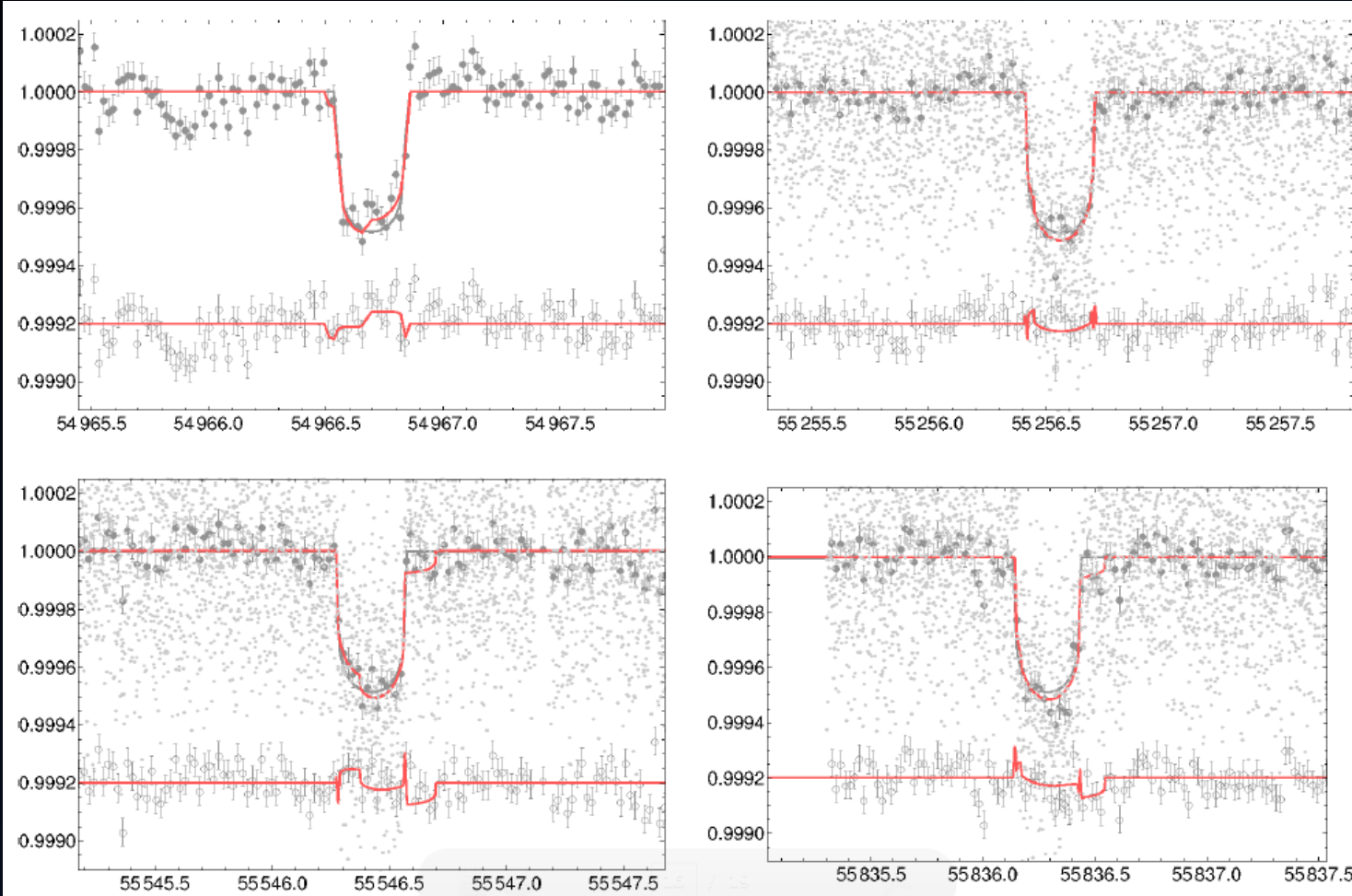


Несколько лет наблюдений на E-ELT позволят обнаружить кислород на планете типа Земли, вращающейся вокруг красного карлика.

А можно строить специальные телескопы для таких исследований.

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.
Спутник по крайней мере
вдвое легче Земли.

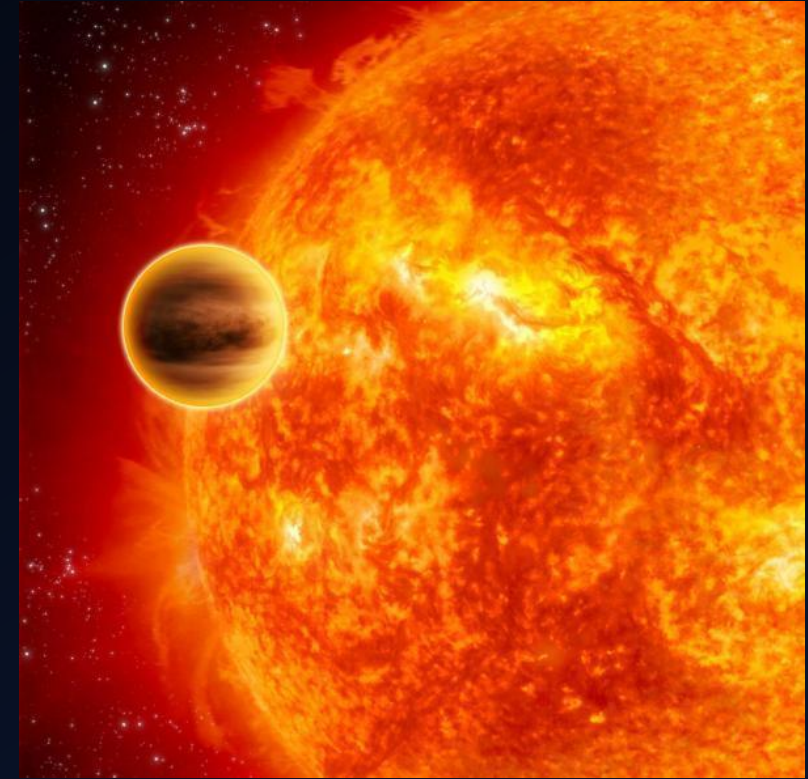
У каких планет могут быть «хорошие» экзолуны?

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



Следует выбирать системы, где много планет.

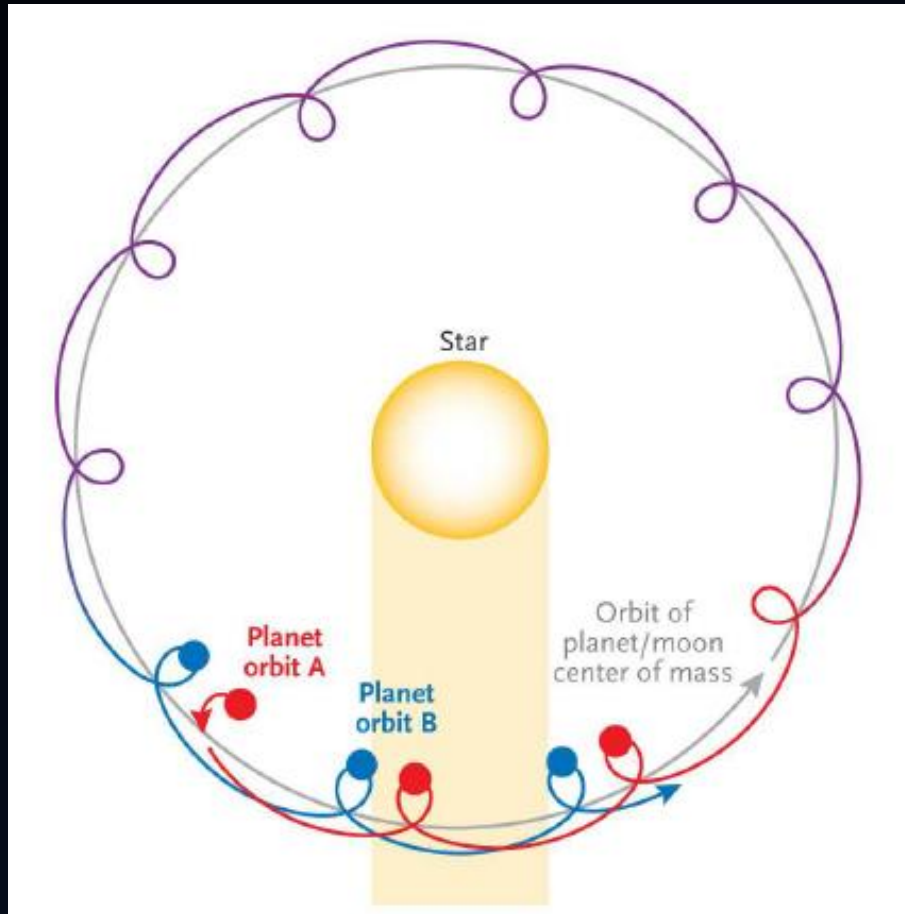
Большие луны должны быть у больших планет.



Горячие юпитеры должны растерять свои спутники пока мигрируют к звезде

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.

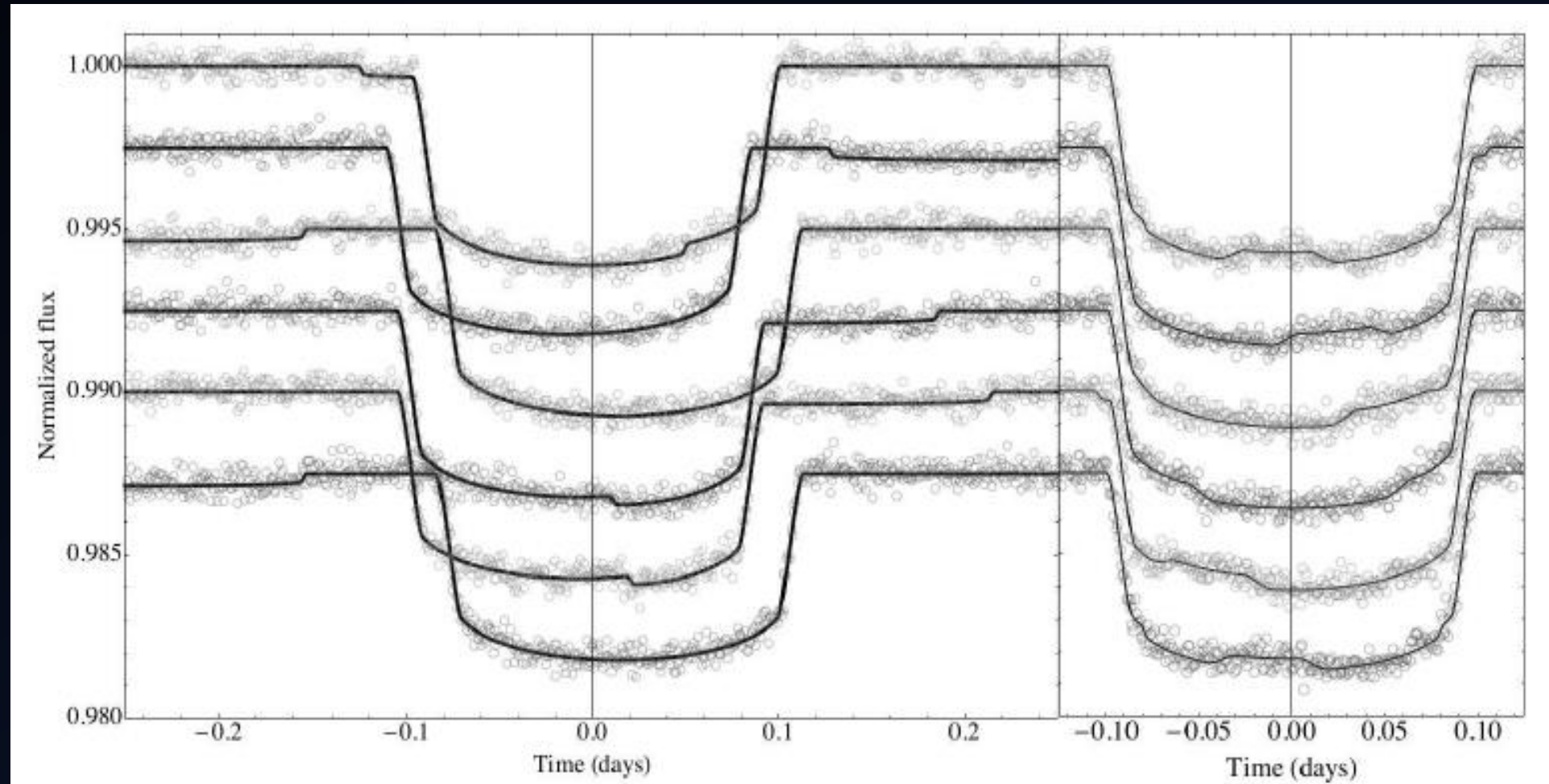
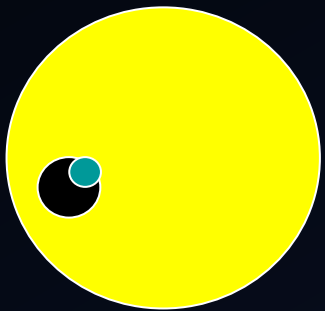
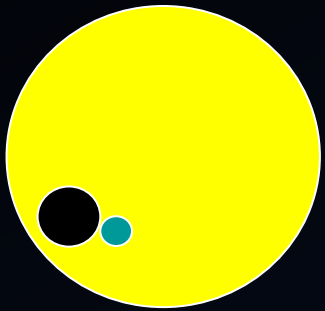
Из-за этого меняется длительность транзита.

3. Сдвиг плоскости орбиты

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

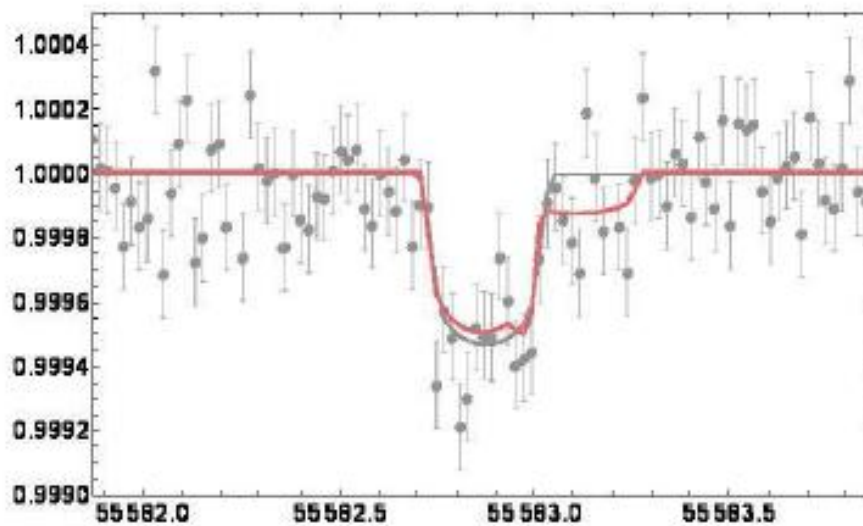
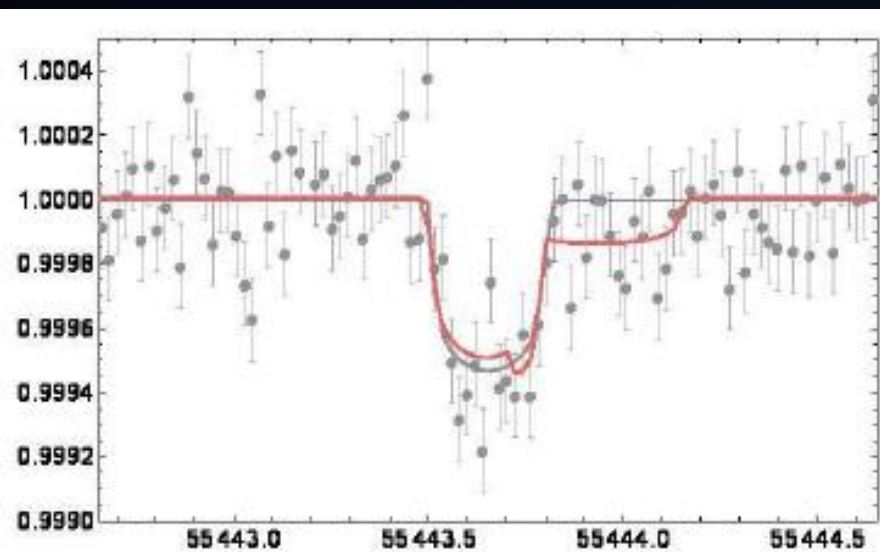
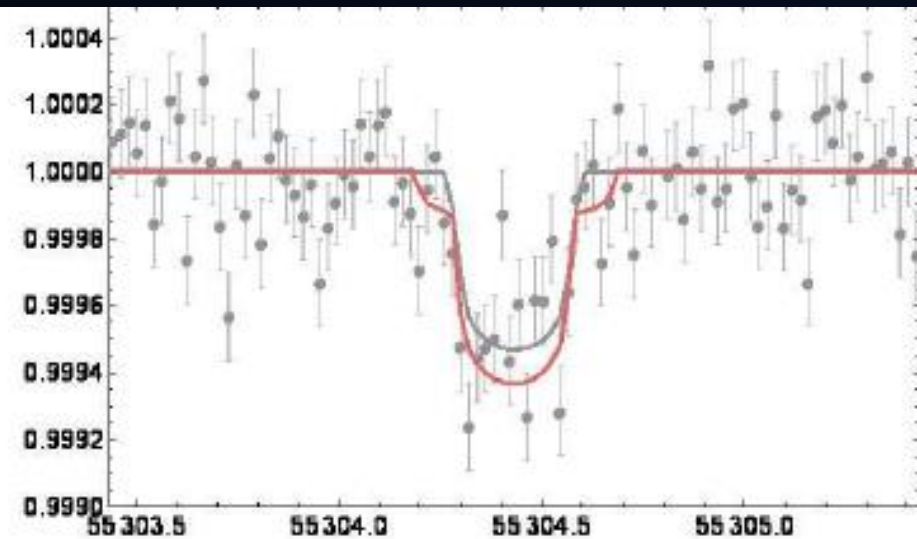
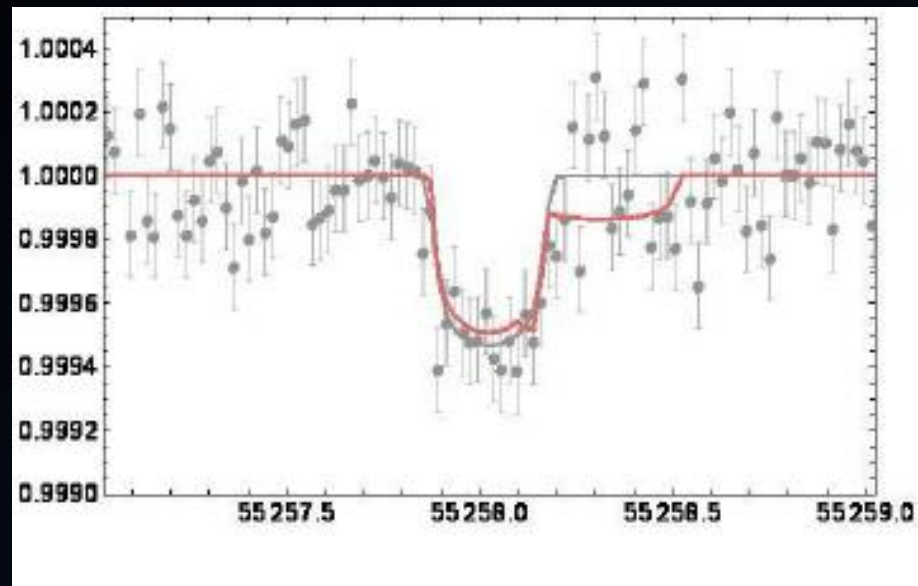
Совместные затмения

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



1405.1455

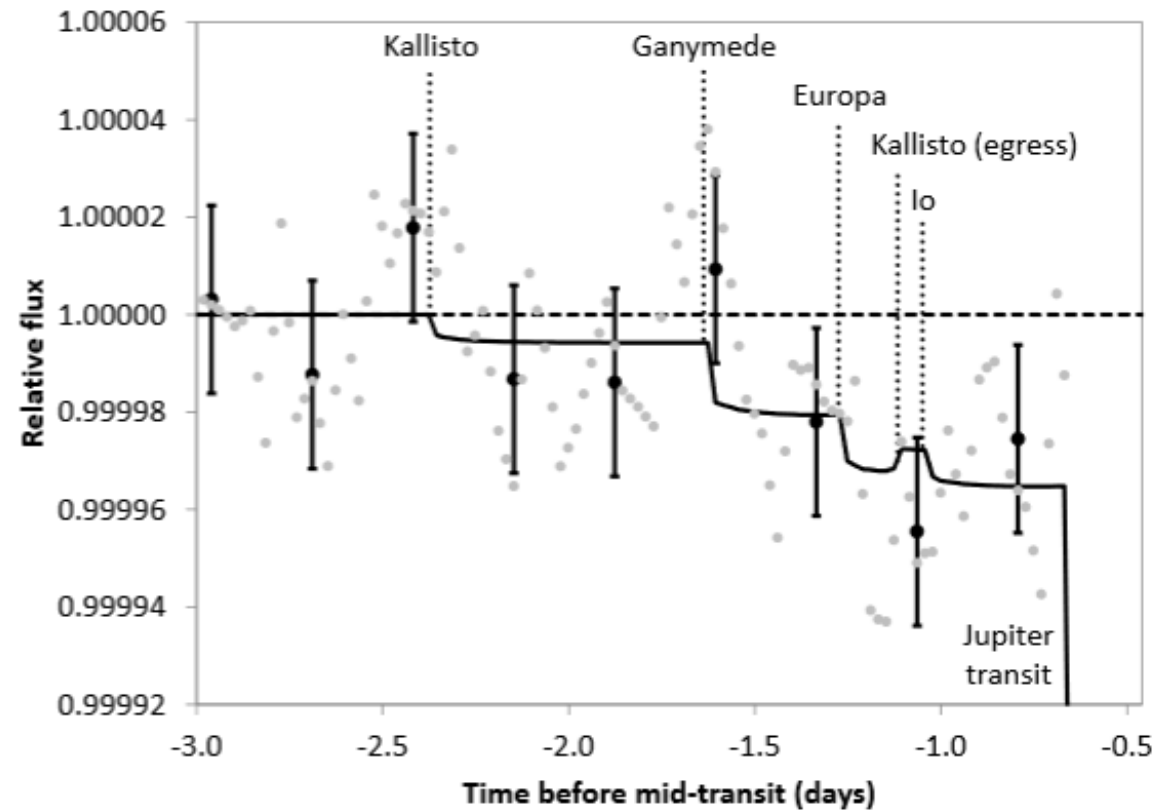
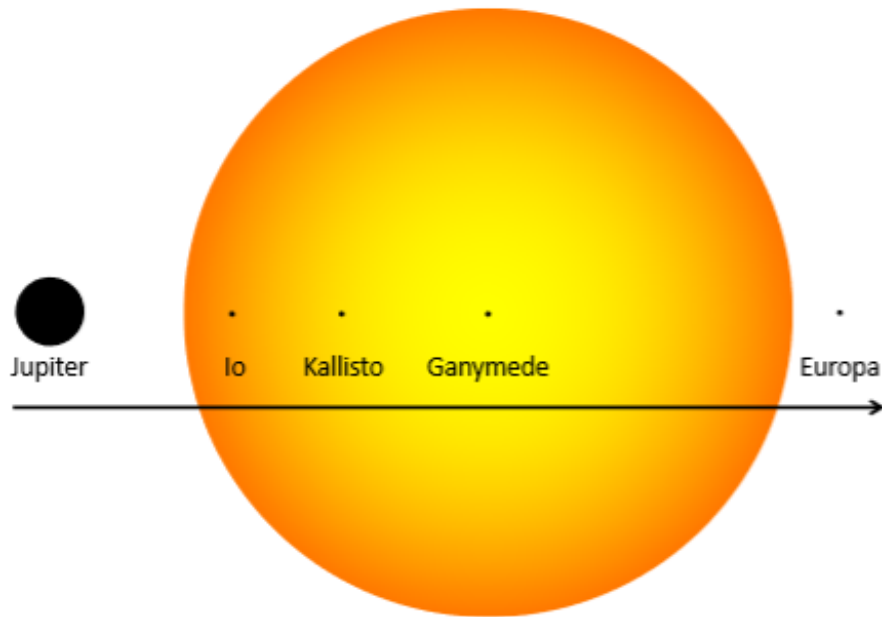
Примеры поиска



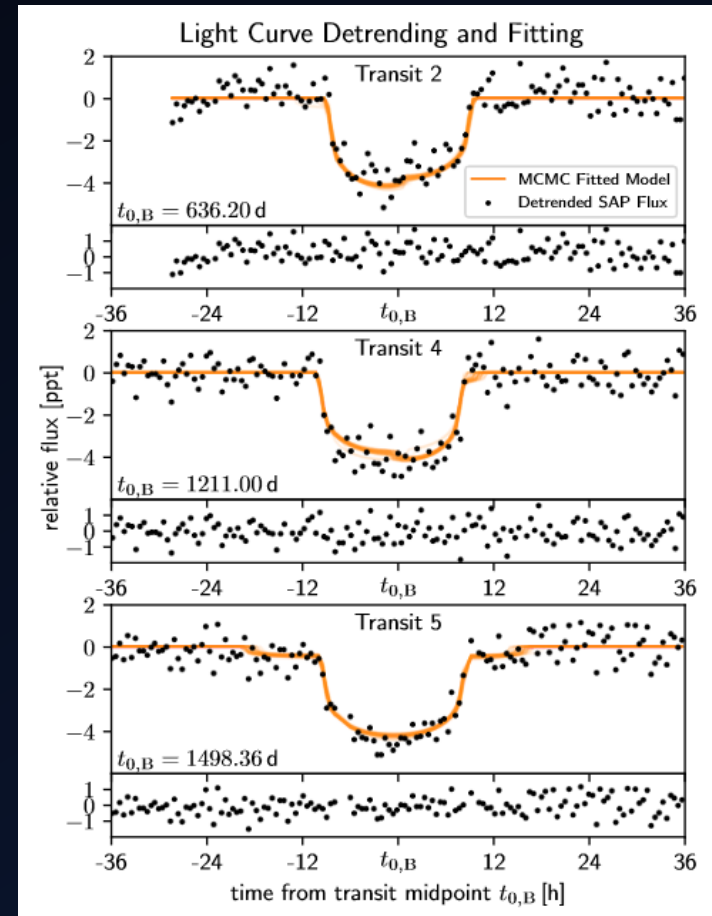
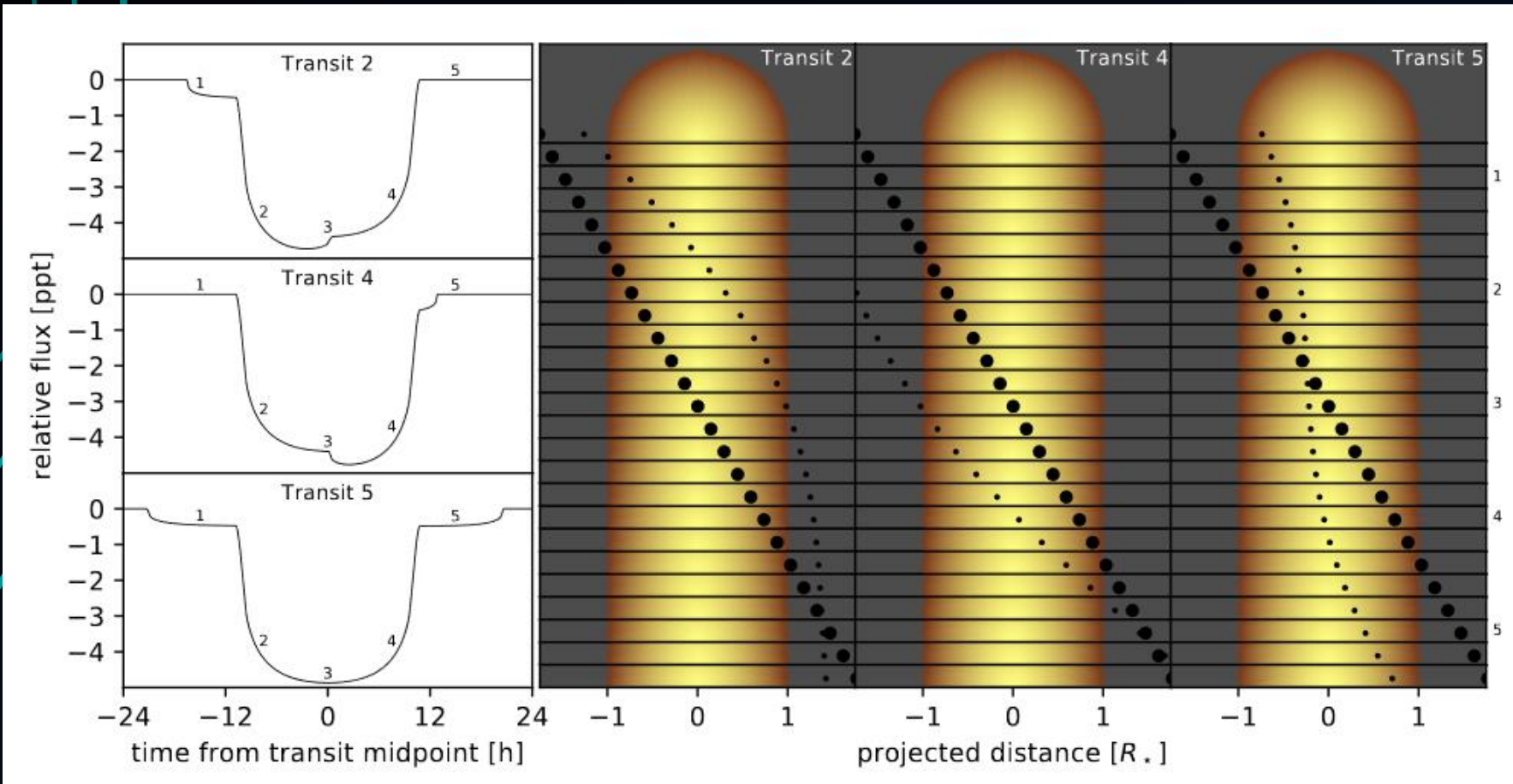
Серая кривая —
если луны нет.
Красная —
если есть.

Возможность обнаружить аналог Солнечной системы

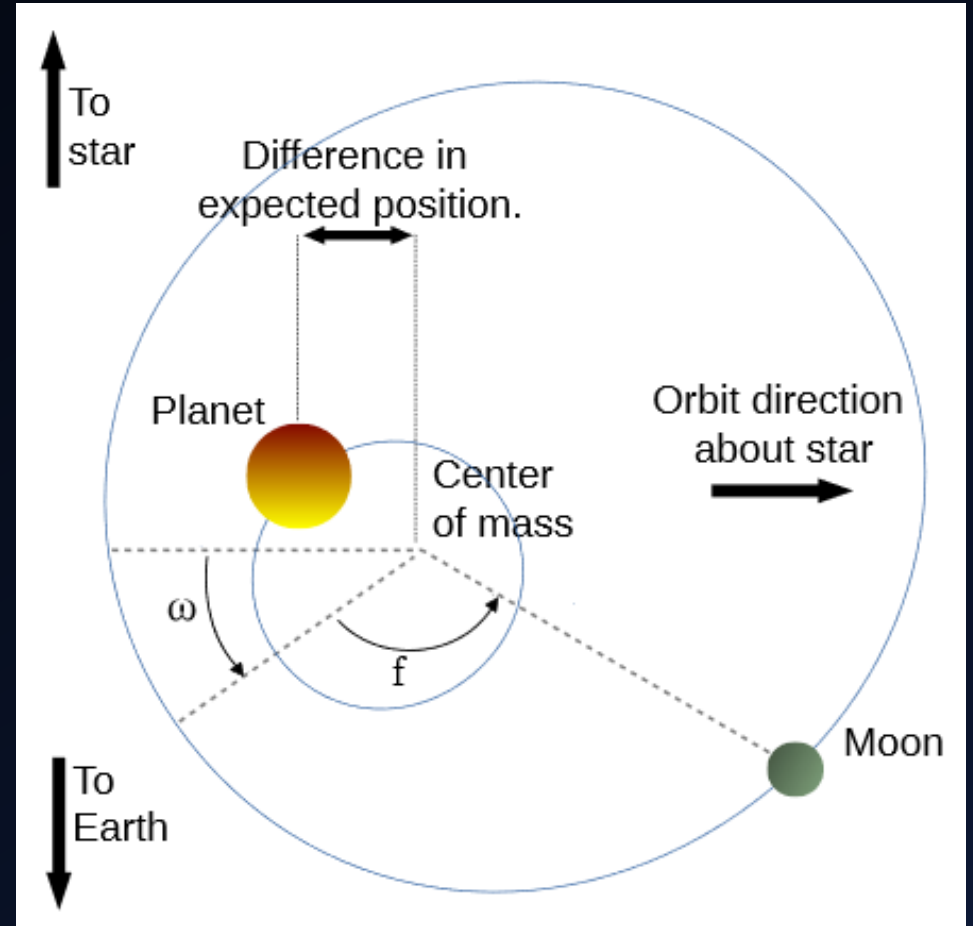
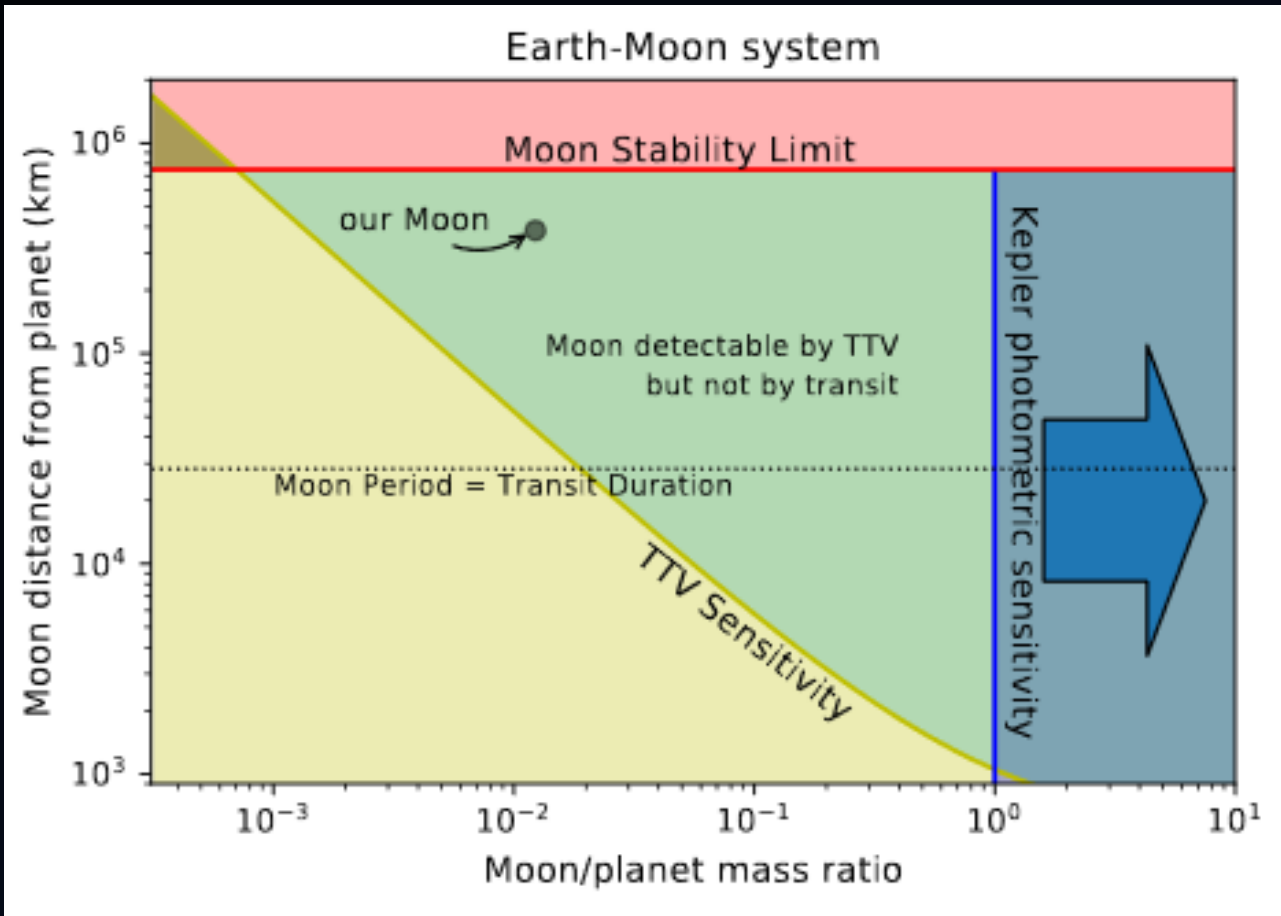
Расчеты для спутника PLATO



Новые данные подтверждают?

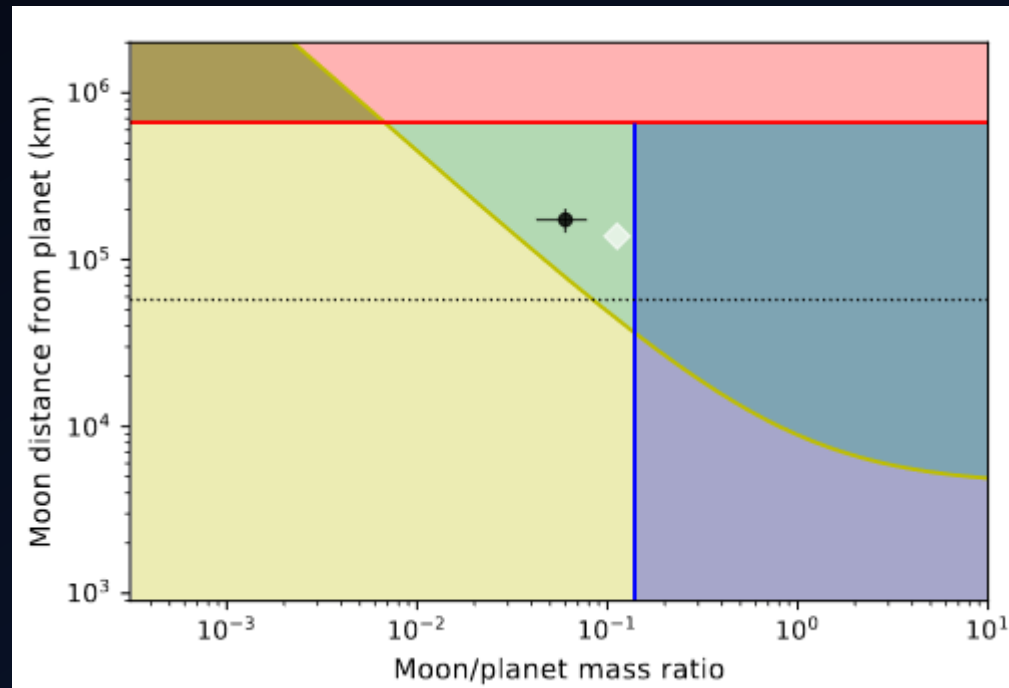
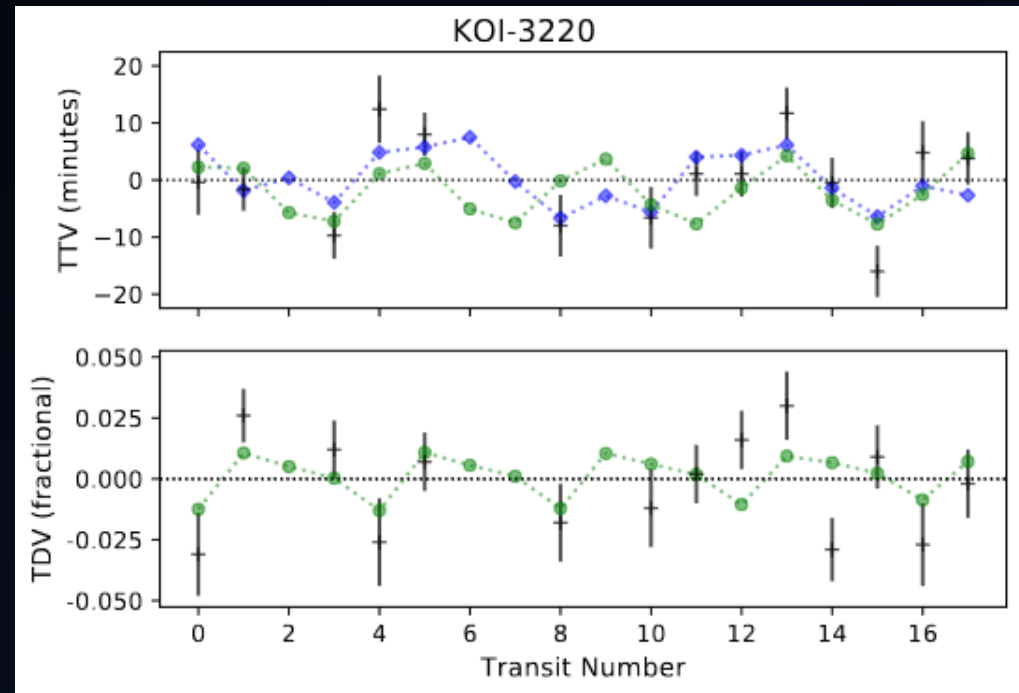


TTV и экзолуны

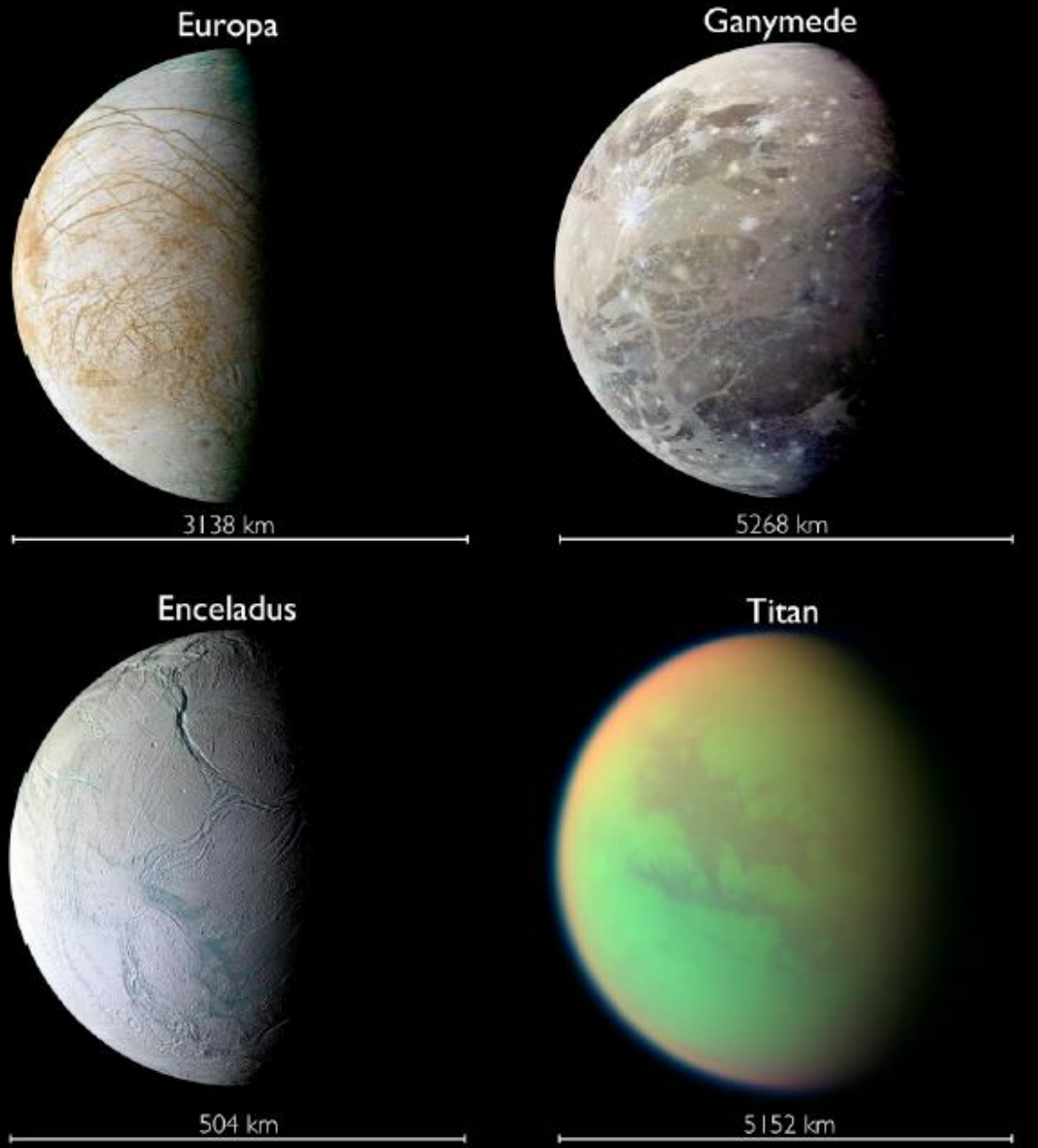


Кандидаты в экзолуны по TTV

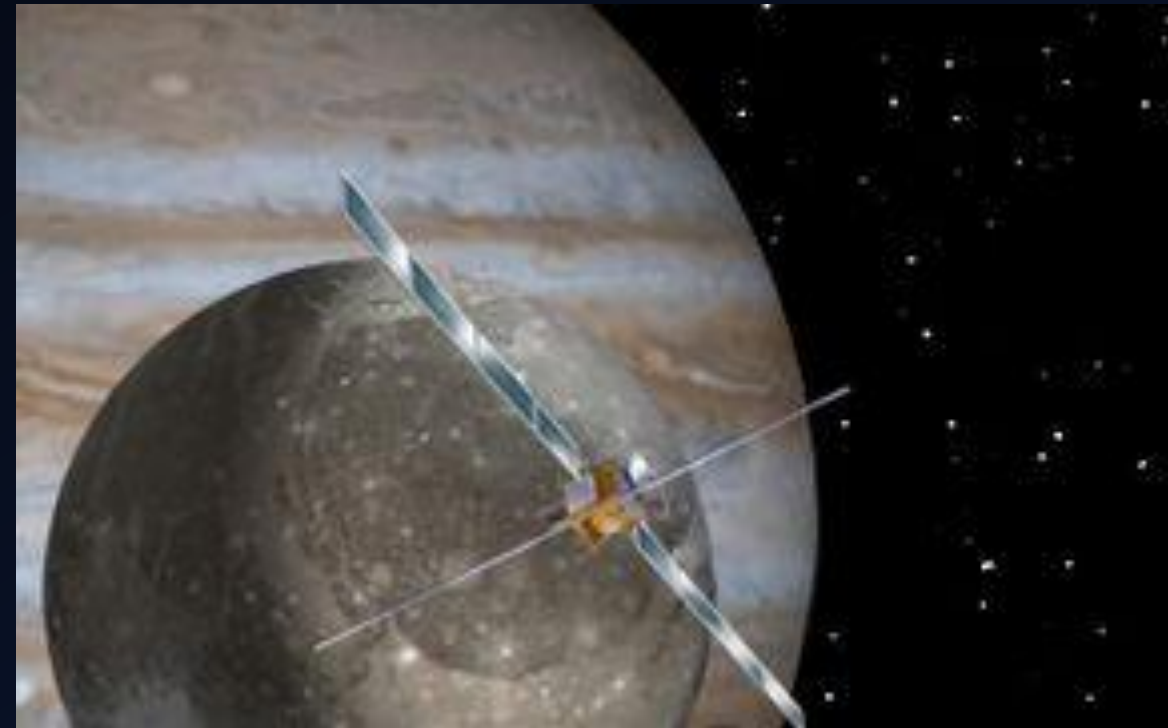
KOI	# Data Points	TTV		Planet χ^2/N	Moon χ^2/N	Likely Cause of TTVs
		SNR	(min)			
268.01	11	2.37	0.579	1.514	planet or moon	
303.01	21	1.56	0.581	0.793	planet or moon	
1503.01	10	1.56	0.181	0.629	planet	
1888.01	12	1.84	0.883	0.682	planet or moon	
1925.01	11	1.57	0.656	0.622	planet or moon	
1980.01	15	1.69	0.313	0.644	planet	
2728.01	20	1.71	0.427	0.748	planet or moon	
3220.01	14	1.67	0.566	0.826	planet or moon	



... и в Солнечной системе ...



Потенциально обитаемыми
Считаются четыре объекта:
спутники Юпитера и Сатурна.

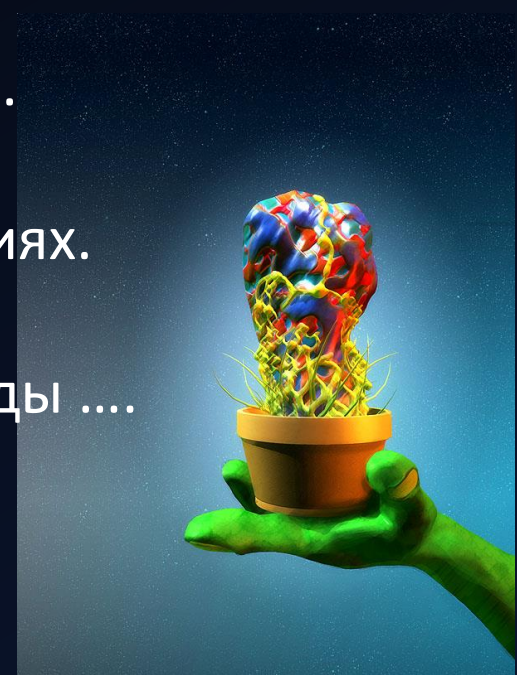
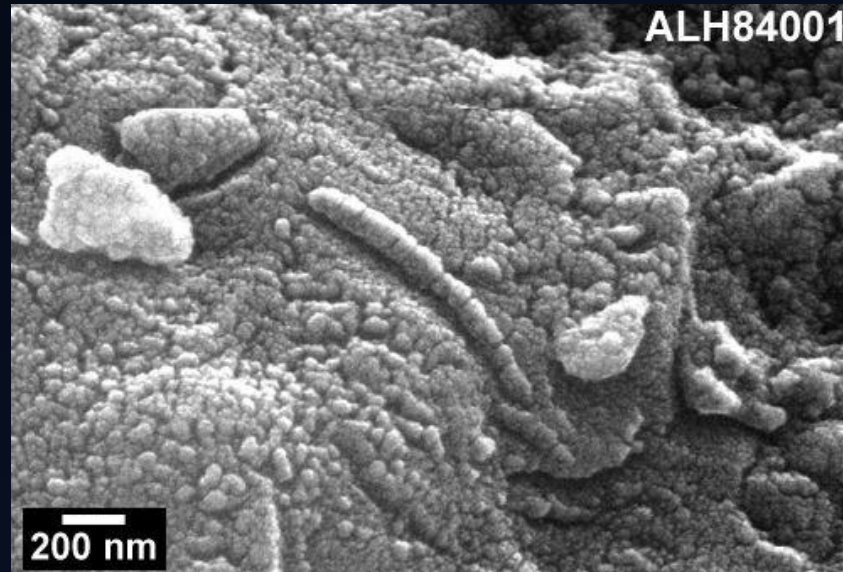


Ждем JUICE (2022-...)

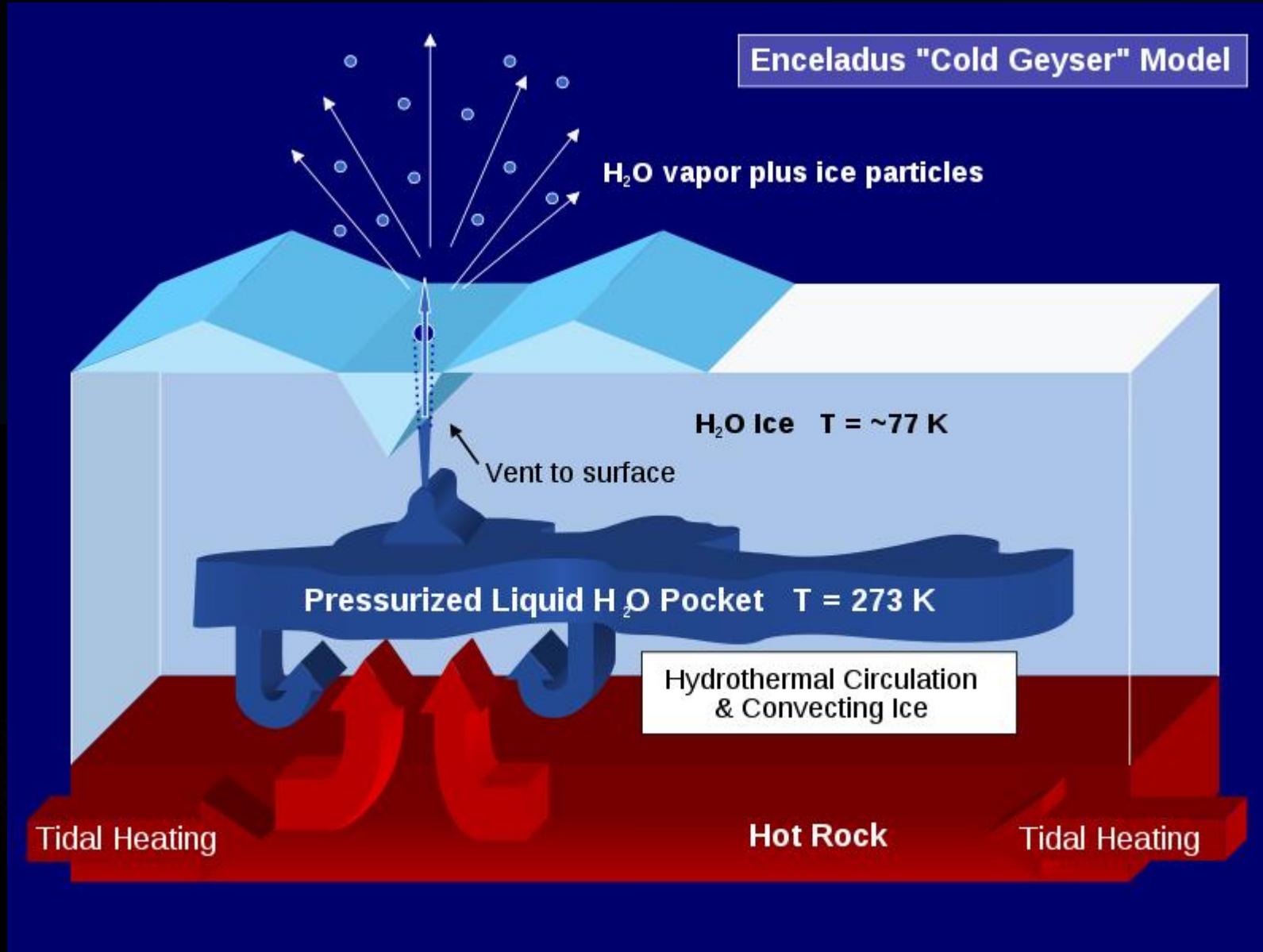
Жизнь в Солнечной системе



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

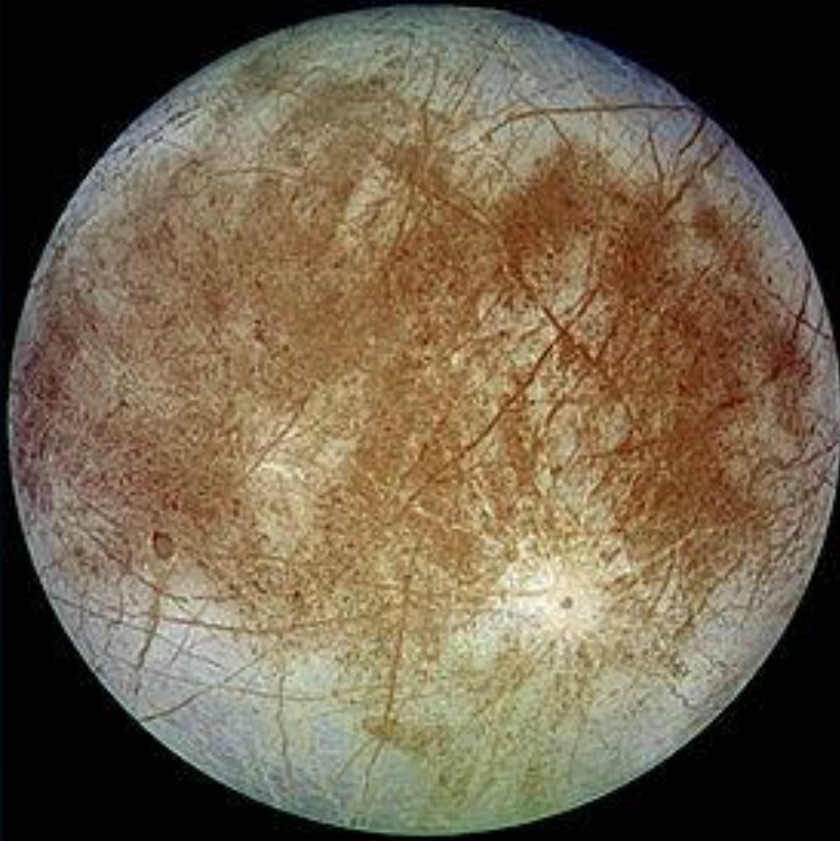


Энцелад – спутник Сатурна



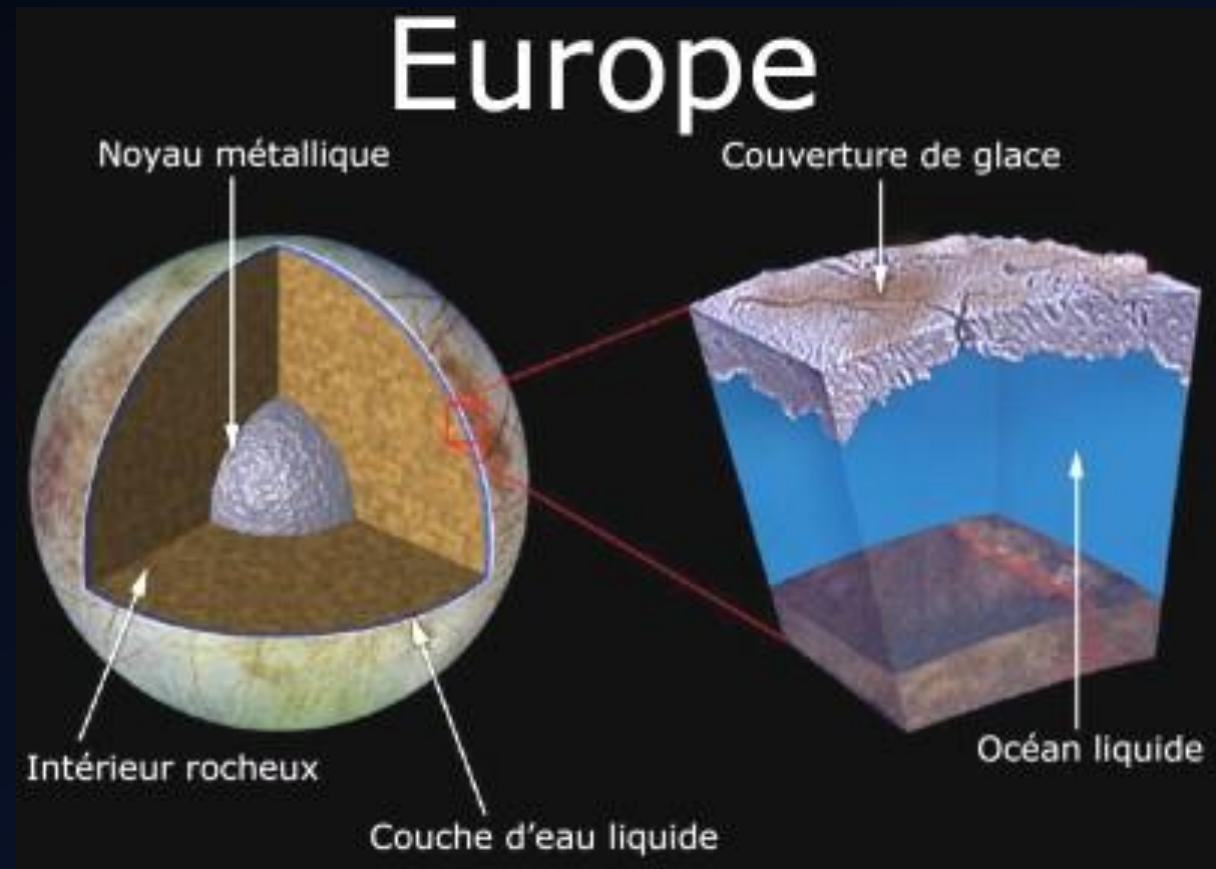
Спутник Кассини открыл выбросы, в которых оказалось много воды.

Европа – спутник Юпитера

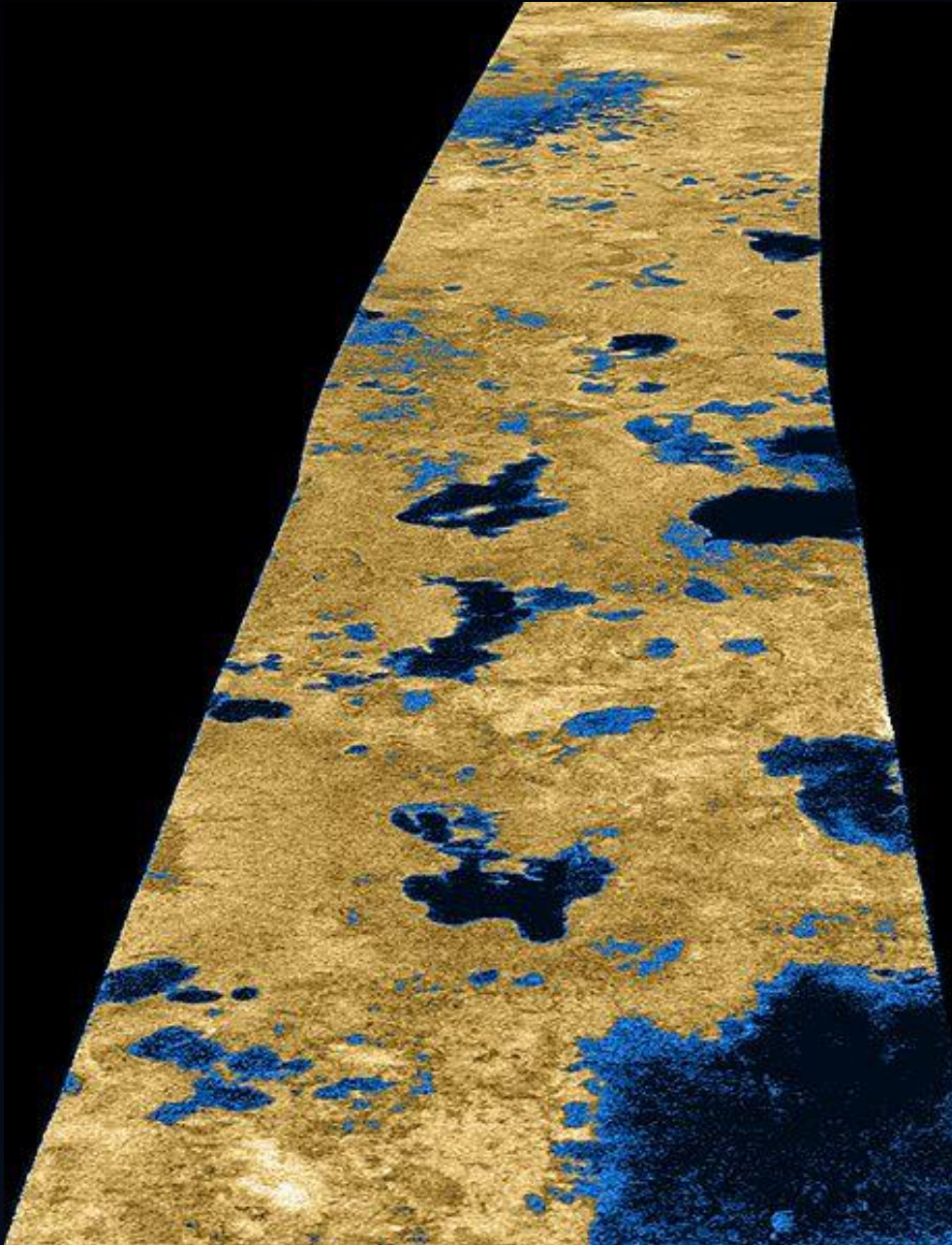


Первый хороший кандидат в обитаемые объекты

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».

