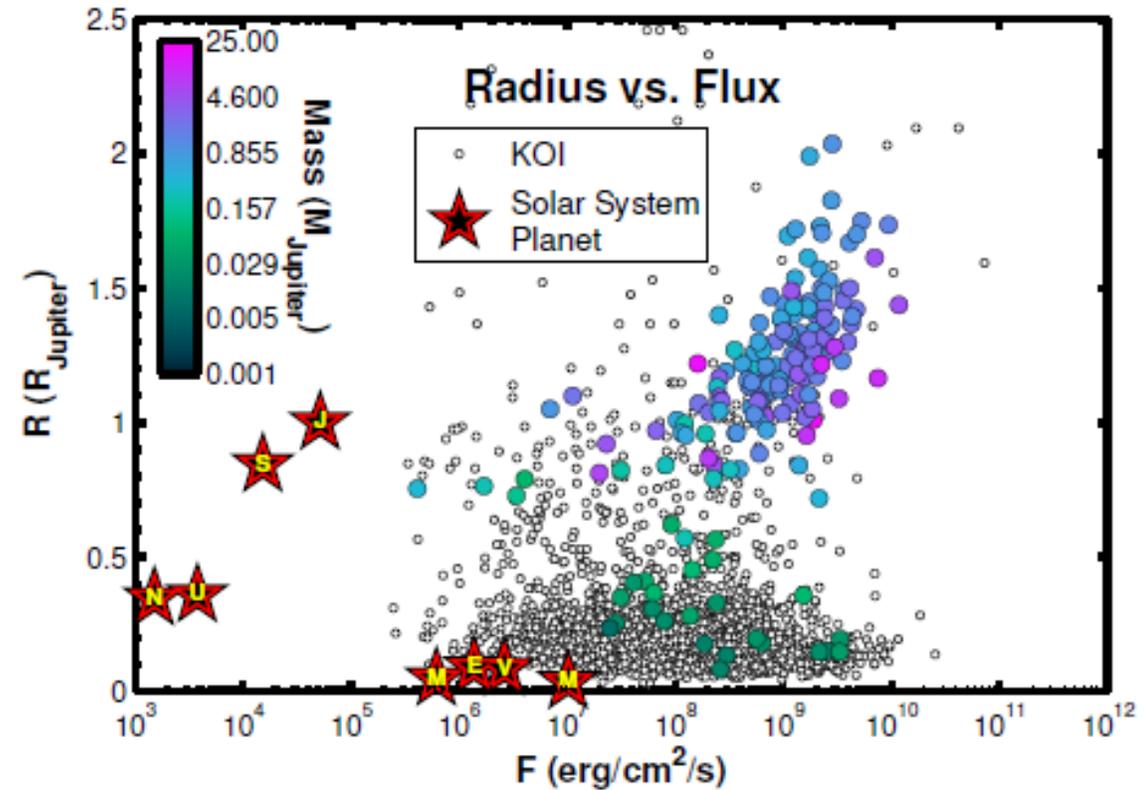
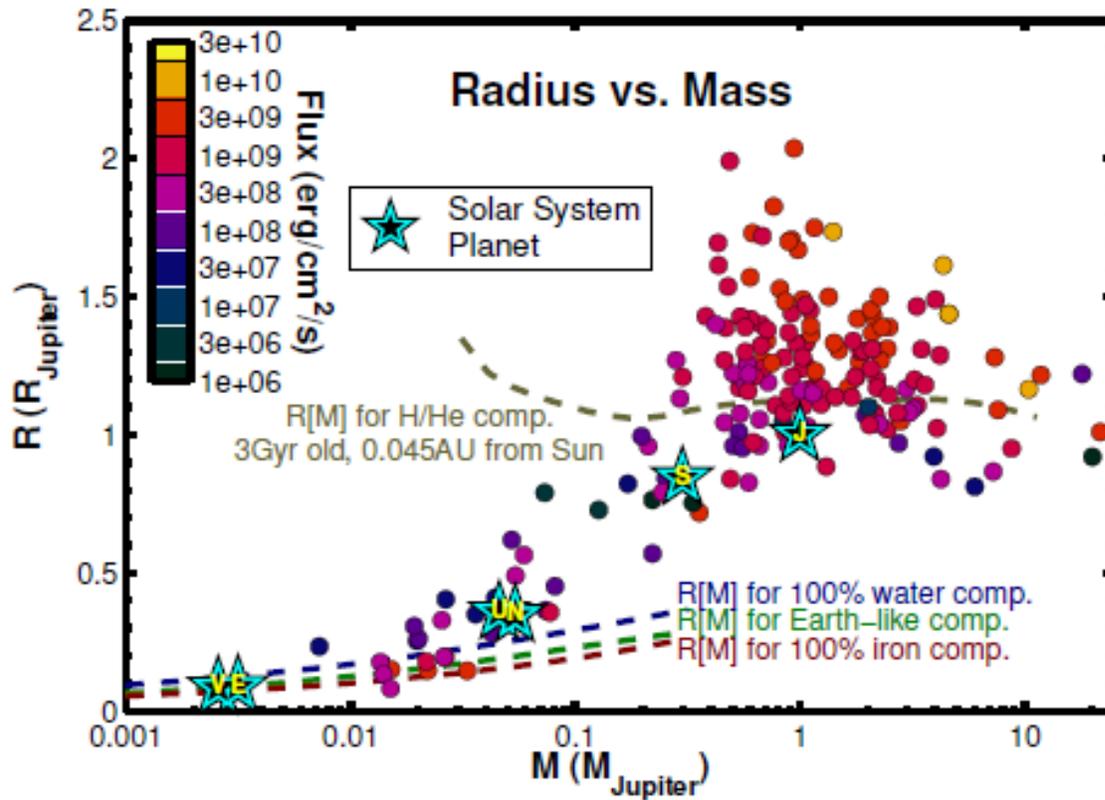
The background features a dark blue gradient with a subtle pattern of white stars. Overlaid on this are several technical diagrams in a light blue/white color. On the left side, there is a large circular scale with numerical markings from 140 to 260 in increments of 10. Several concentric circles and arcs are drawn around this scale, some with arrows indicating direction. In the upper right and lower right areas, there are smaller circular diagrams, some consisting of concentric circles with arrows, and others with dashed lines and arrows, suggesting orbital paths or mechanical components.

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ЭКЗОПЛАНЕТ

РАЗМЕРЫ ПЛАНЕТ



1312.3323

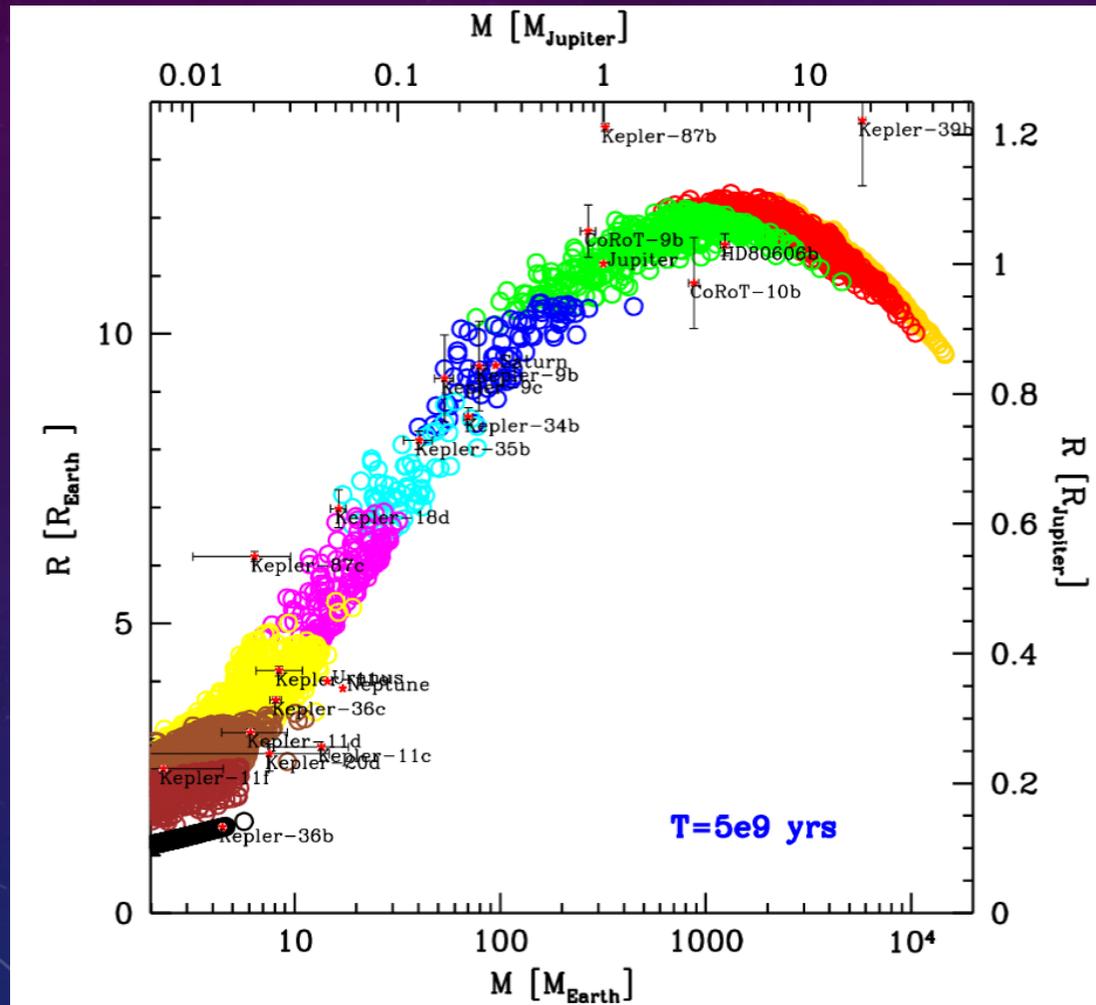
В принципе, по данным о массе и радиусе можно делать некоторые выводы о составе экзопланет. Хотя, как правило, будет несколько вариантов.

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

- возраста
- близости к звезде

ЗАВИСИМОСТЬ МАССА-РАДИУС

1604.07558

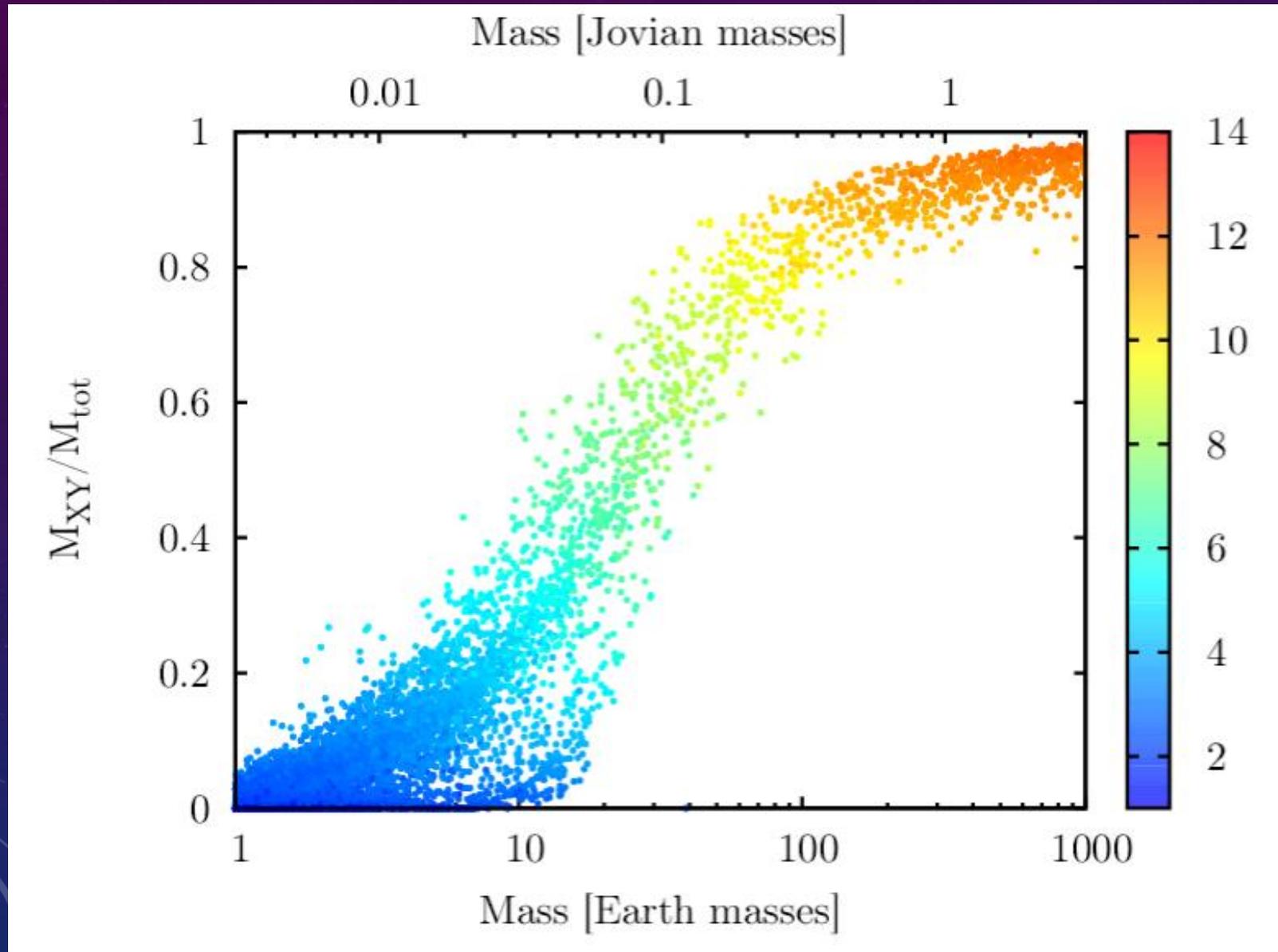


Показаны результаты моделирования и результаты наблюдений.

Цвет кодирует долю легких элементов (водорода и гелия).

Возраст планет – 5 млрд лет.

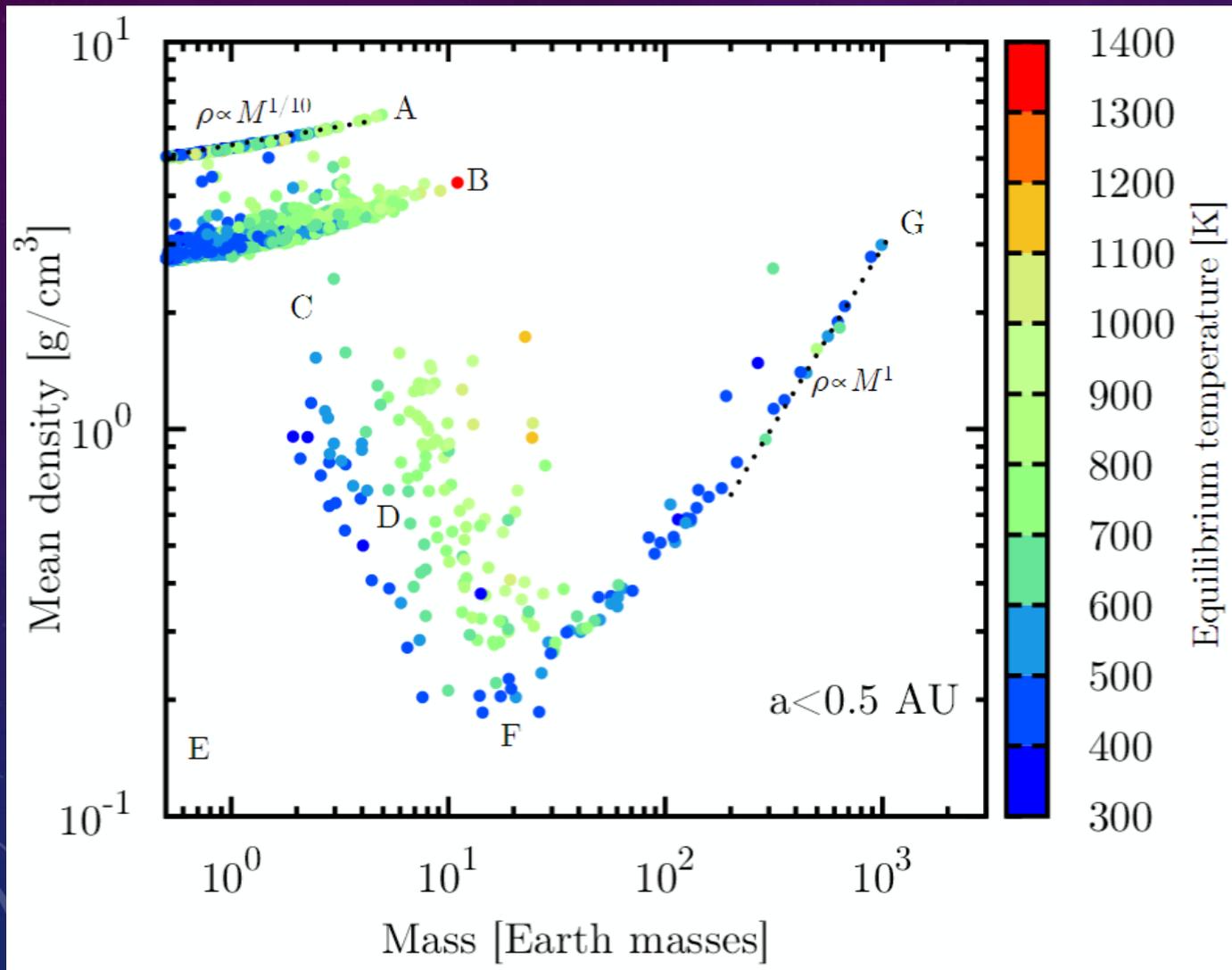
ДОЛЯ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛНОЙ МАССЕ



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.

А – твердые каменные.

В – твердые ледяные.

С – испаряющиеся.

Д – маломассивные планеты с большими ядрами, но с заметной долей H/He.

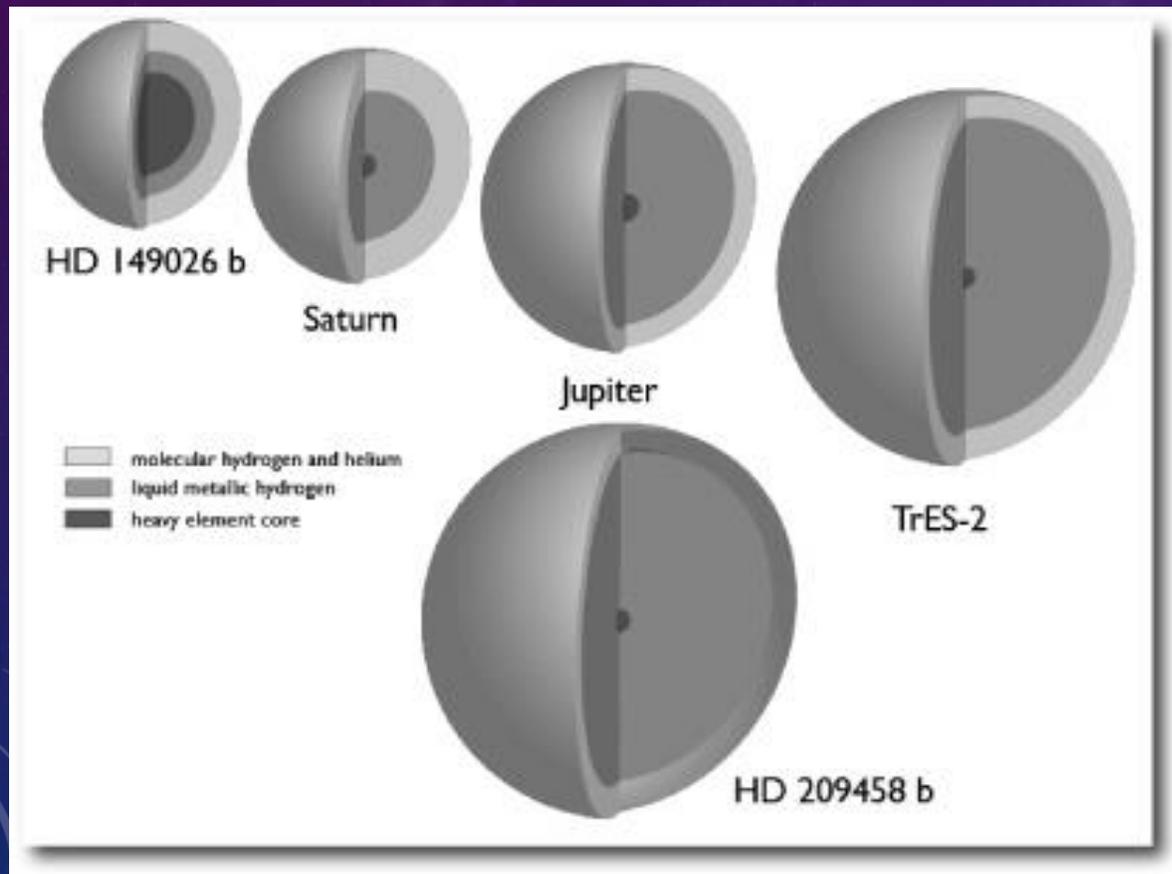
Е – запрещенная зона (испар.)

Ф – переход к гигантам.

Г – планеты-гиганты.

ЗАГАДОЧНЫЙ ГОРЯЧИЙ САТУРН

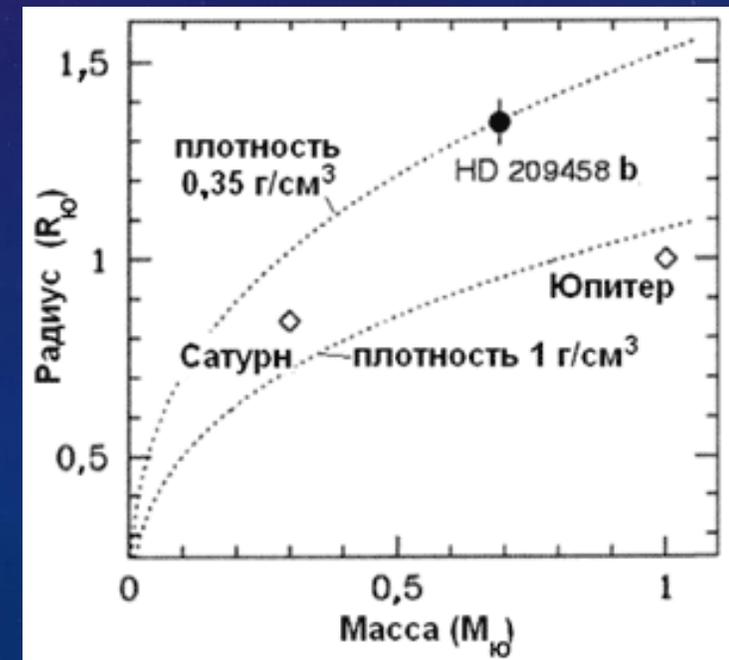
HD 149026 – горячая, но маленькая.
На 20% тяжелее Сатурна,
но на 22% меньше по размеру.



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.



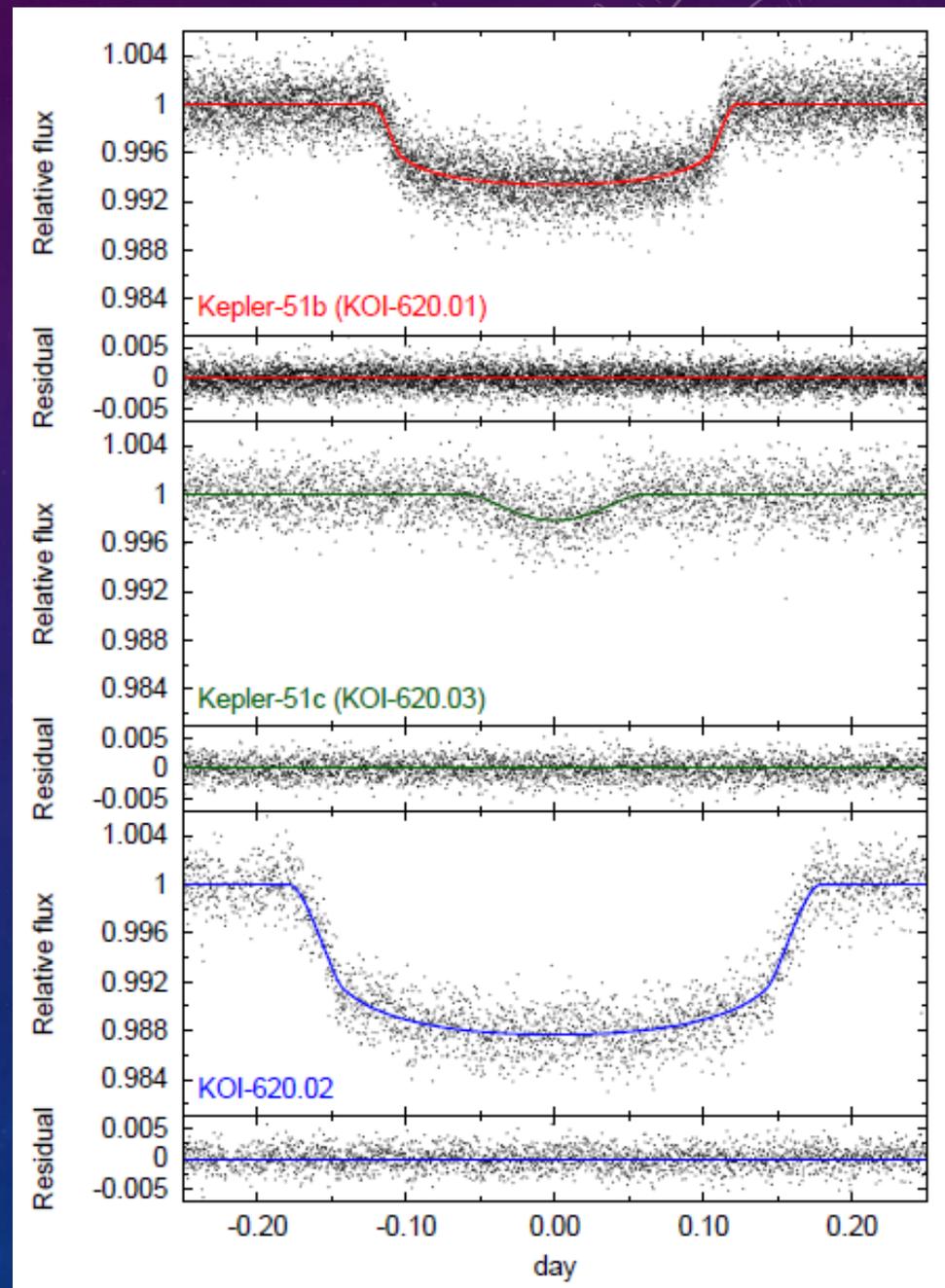
KEPLER-51. РЫХЛЫЕ ПЛАНЕТЫ

Звезда типа Солнца.

Три планеты с массами 2-8 земных.

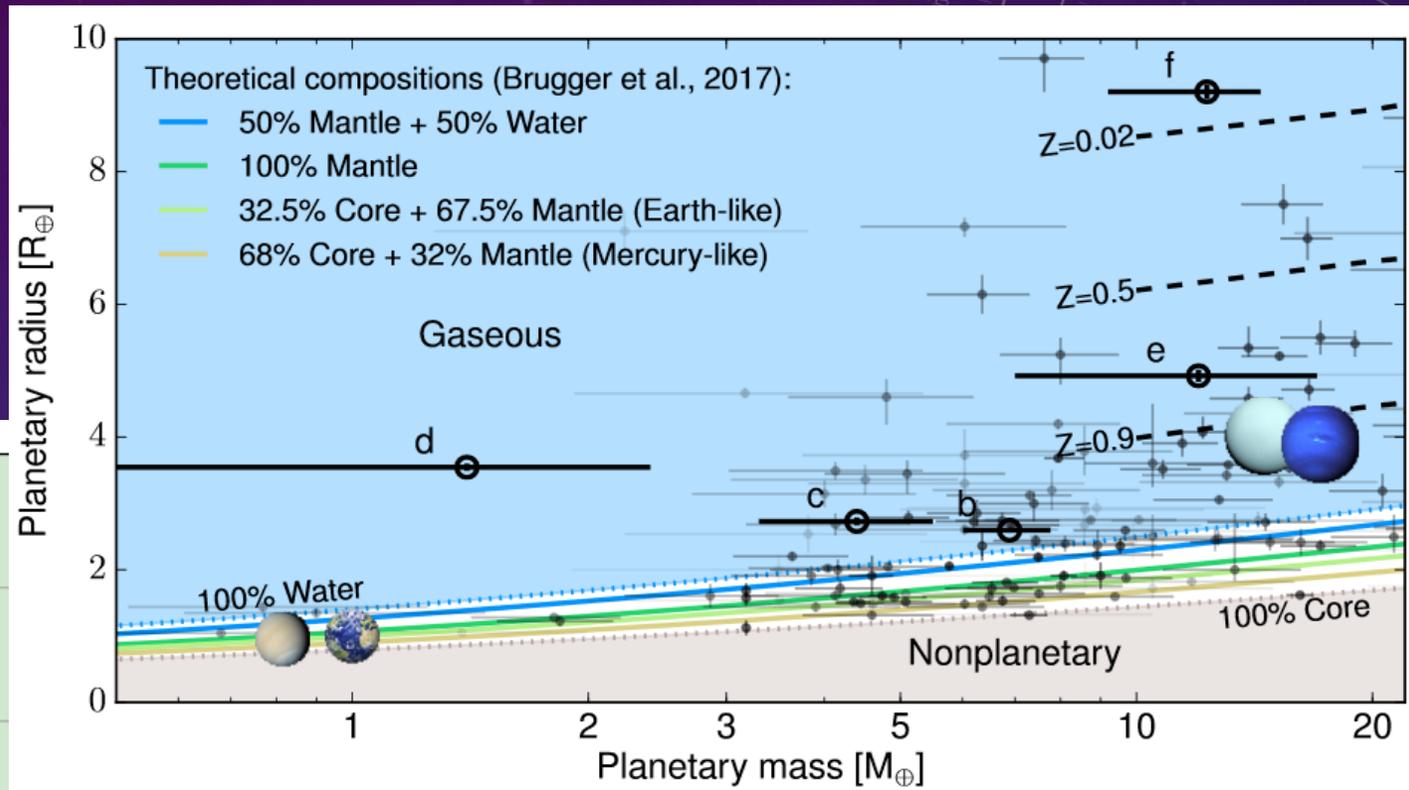
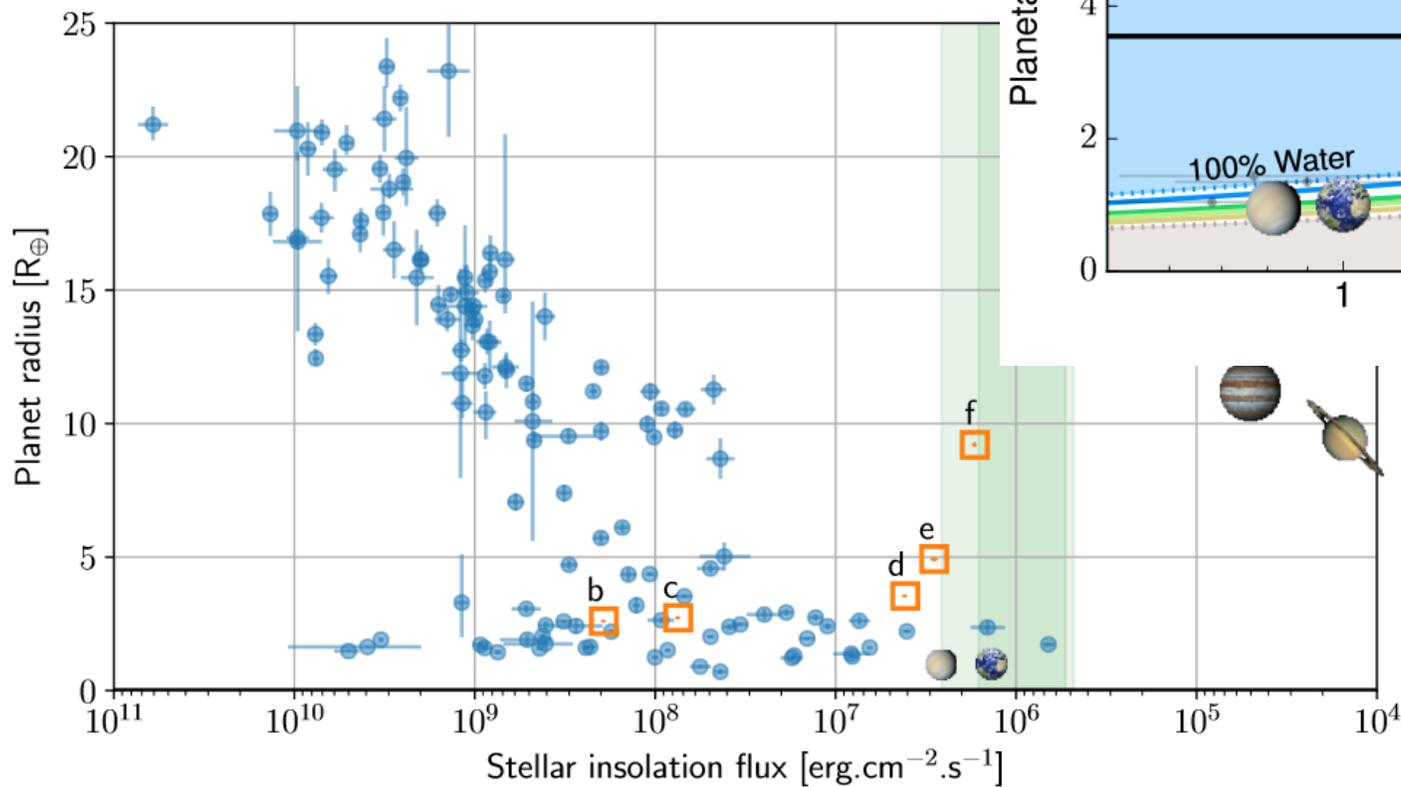
Плотности < 0.05 г/см³

Орбитальные периоды 45-130 дней.



ПРОХЛАДНЫЙ САТУРН НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

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

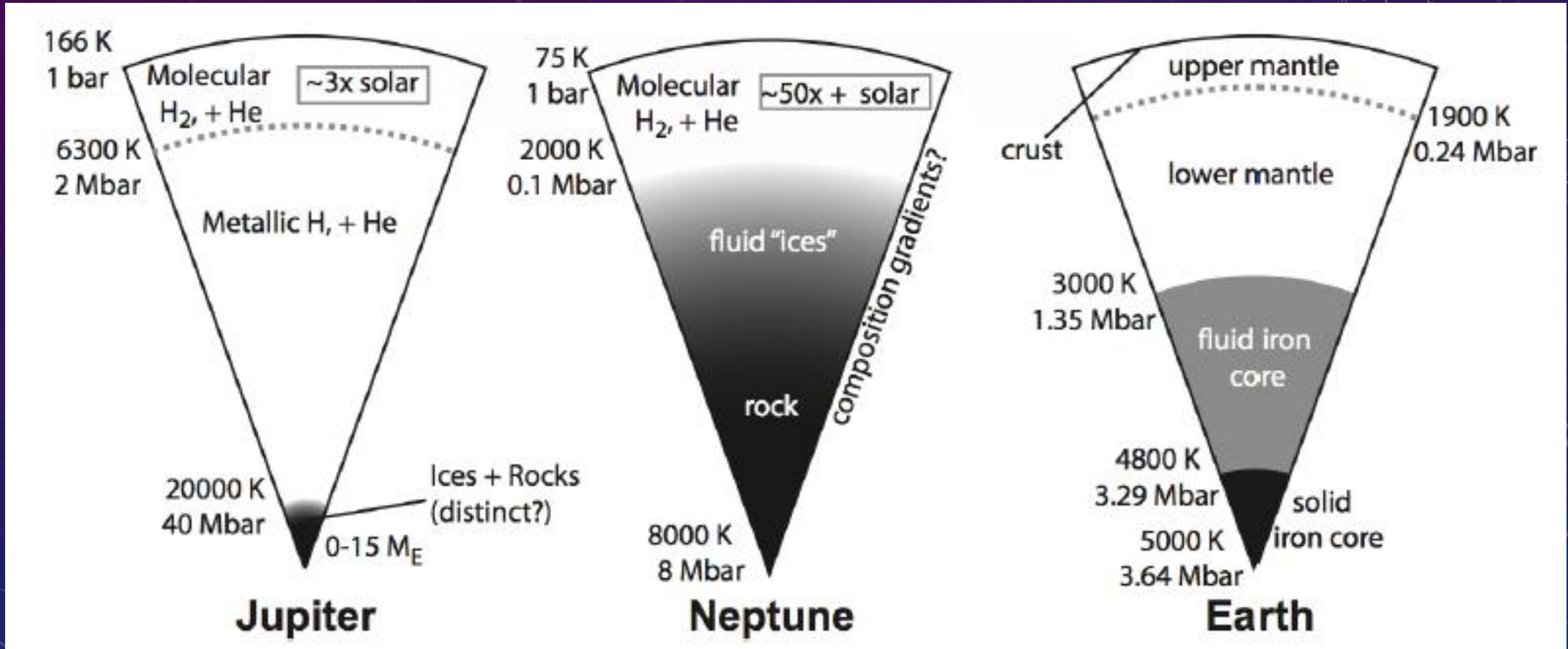


ТРИ ОСНОВНЫХ ТИПА ПЛАНЕТ

Газовые гиганты
H/He

Ледяные гиганты
H/He+лед+ядро

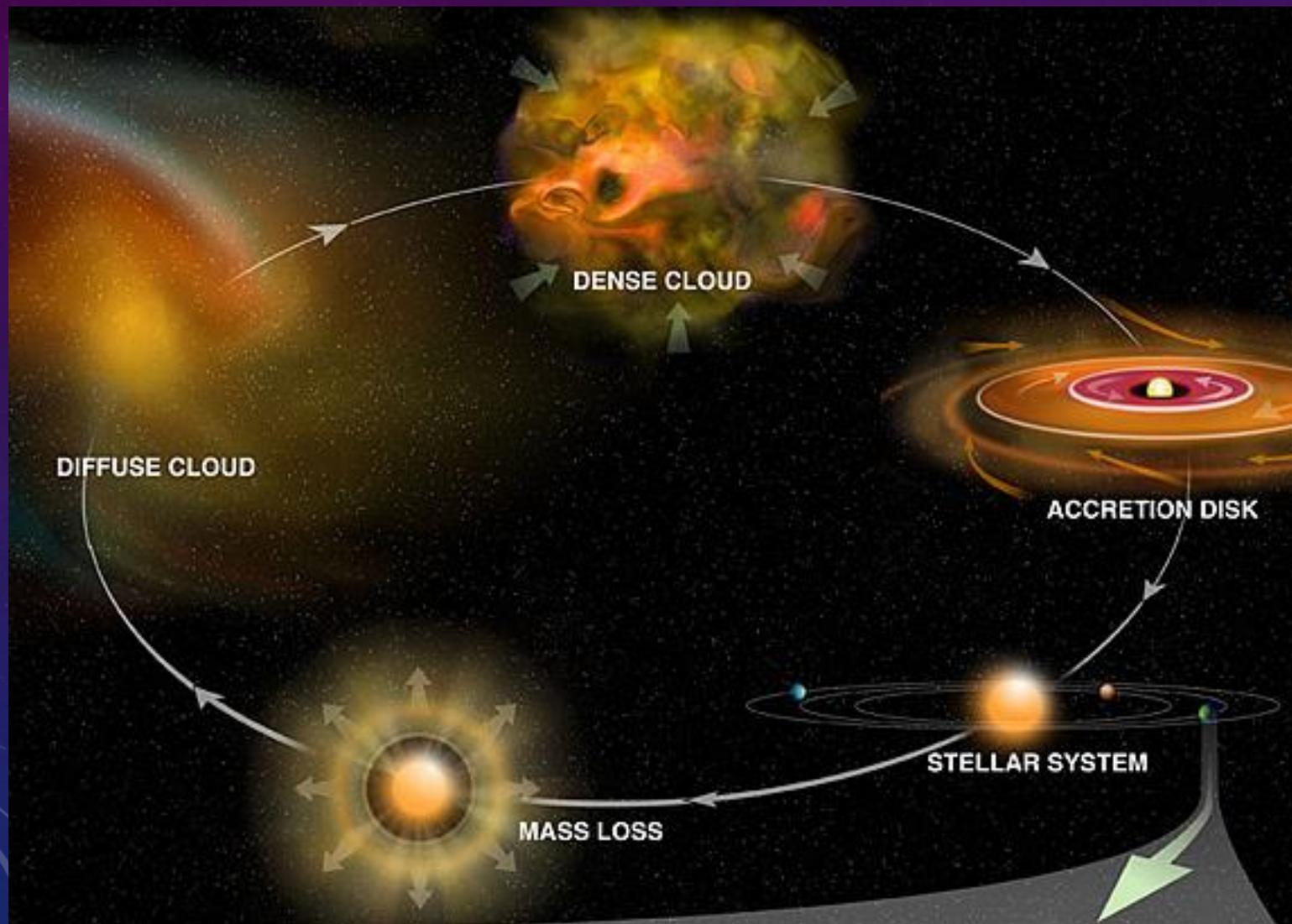
Твердые планеты
Si, Mg, Fe, O, C



1312.3323

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

ГАЛАКТИЧЕСКИЙ СПИРАЛЕВОРОТ

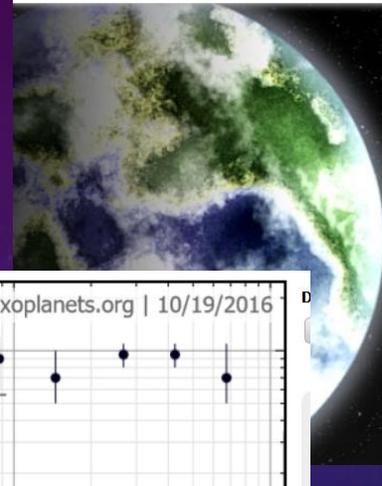


Непрерывно идет процесс образования новых звезд и планетных систем, а также выброса вещества в межзвездную среду.

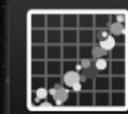
Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

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

Наконец, появилась жизнь.



Table

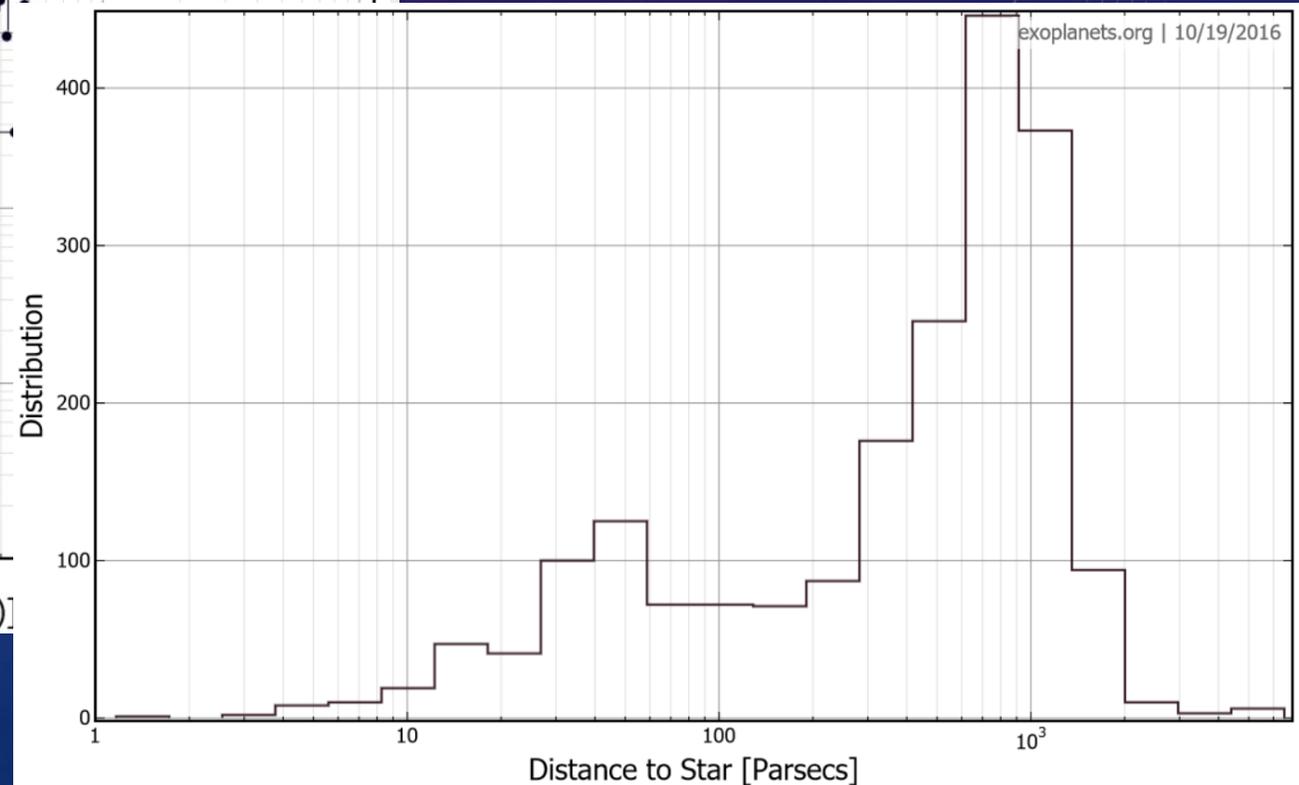
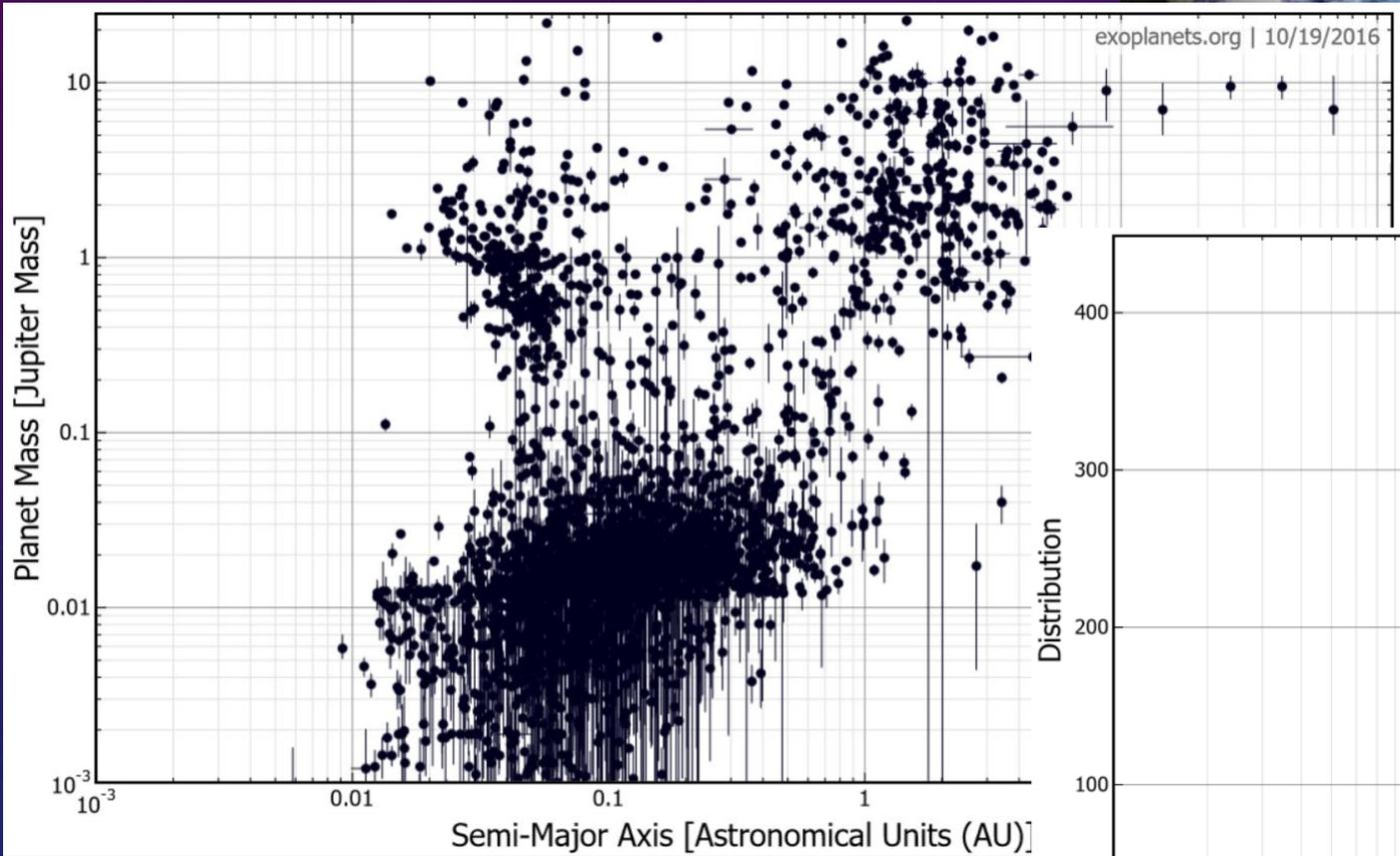


Plots



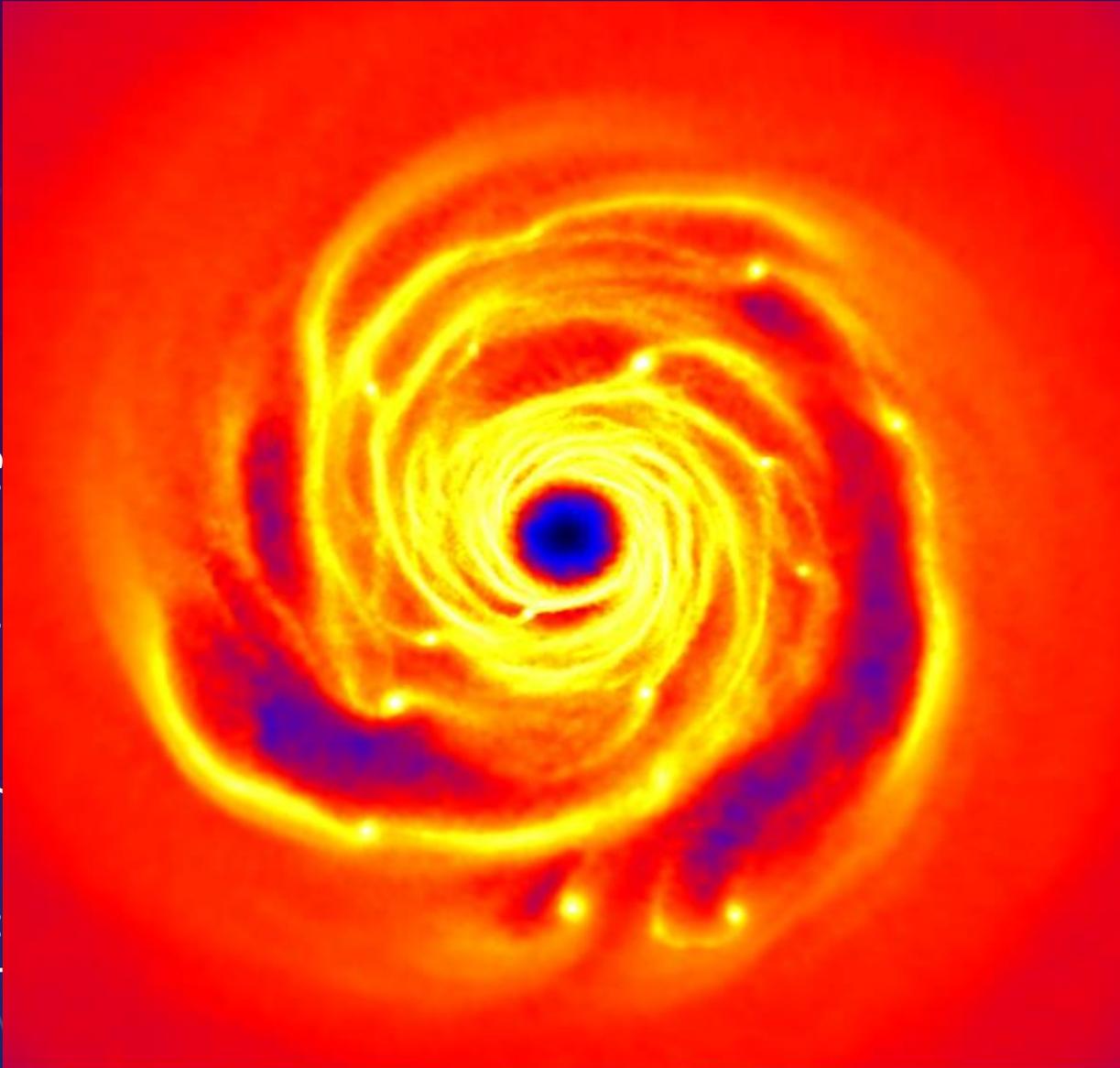
Search BETA

- 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

<http://faculty.ucr.edu/~krice/gravdiscs.html>



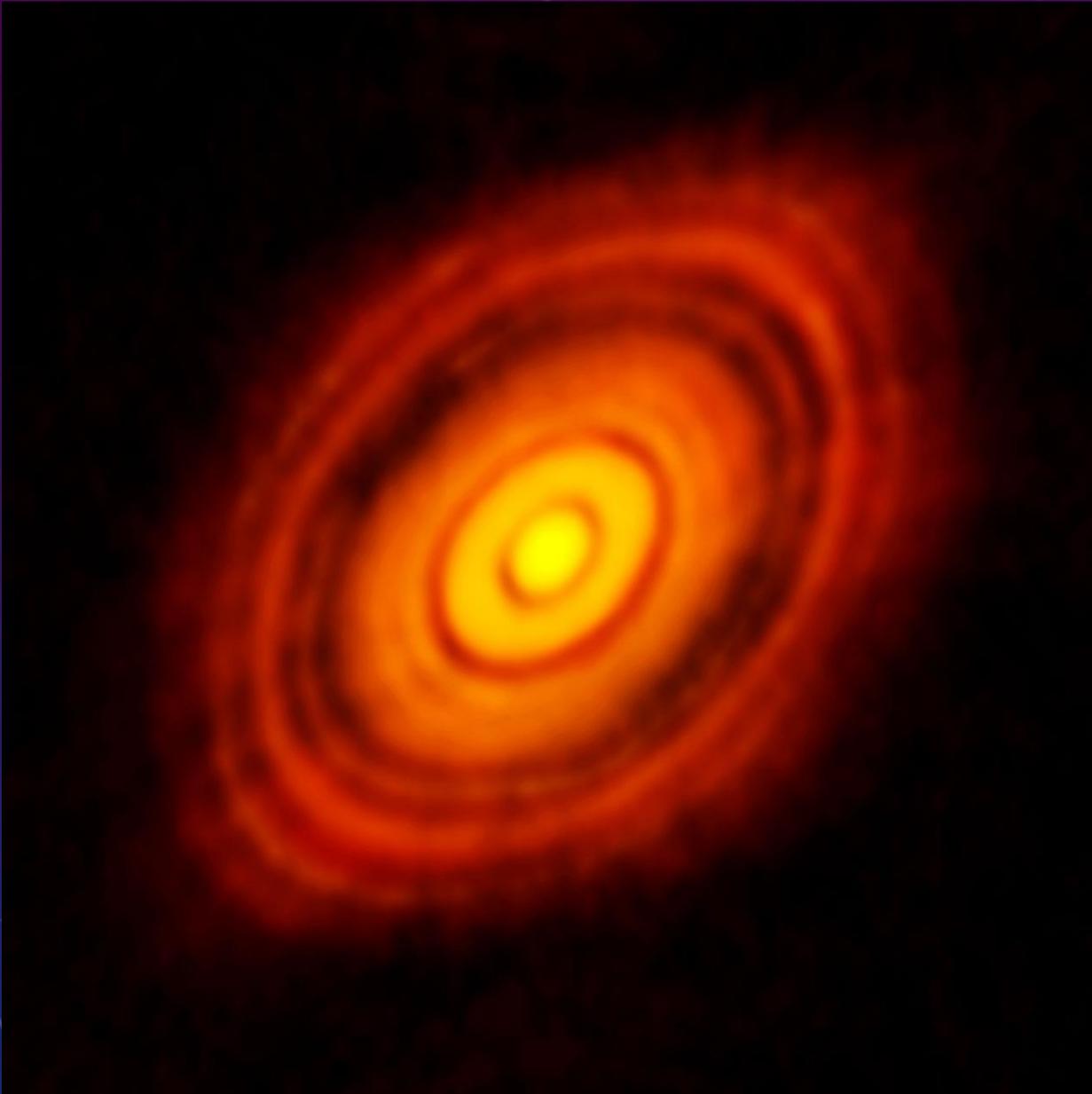
Крупные планеты могут образовываться в результате неустойчивостей в диске.

Это подтверждается некоторыми численными моделями.

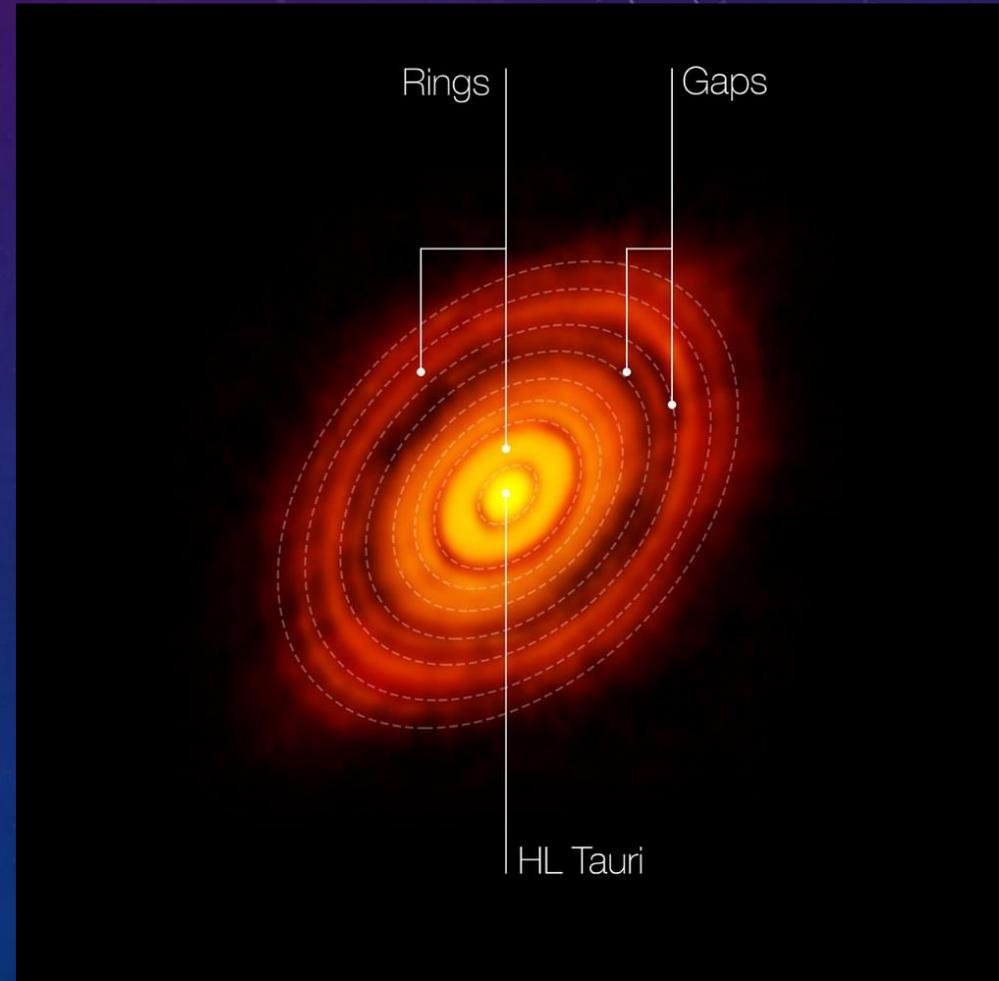
Это происходит на значительном расстоянии от звезды.

ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК HL ТЕЛЬЦА

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

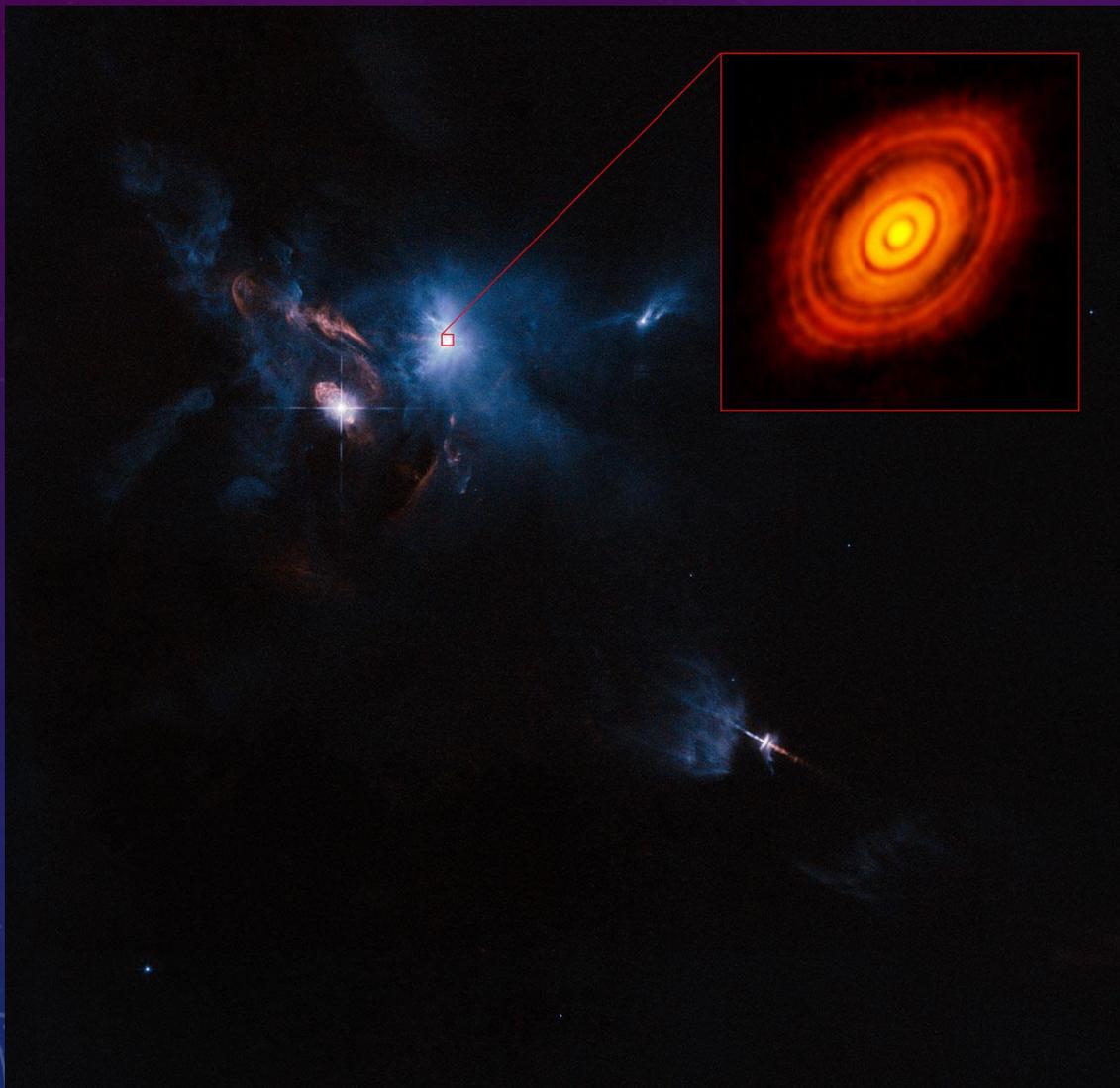


Темные кольца - результат действия массивной планеты в диске



МЕСТО, ГДЕ РОЖДАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ И ПЛАНЕТЫ

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

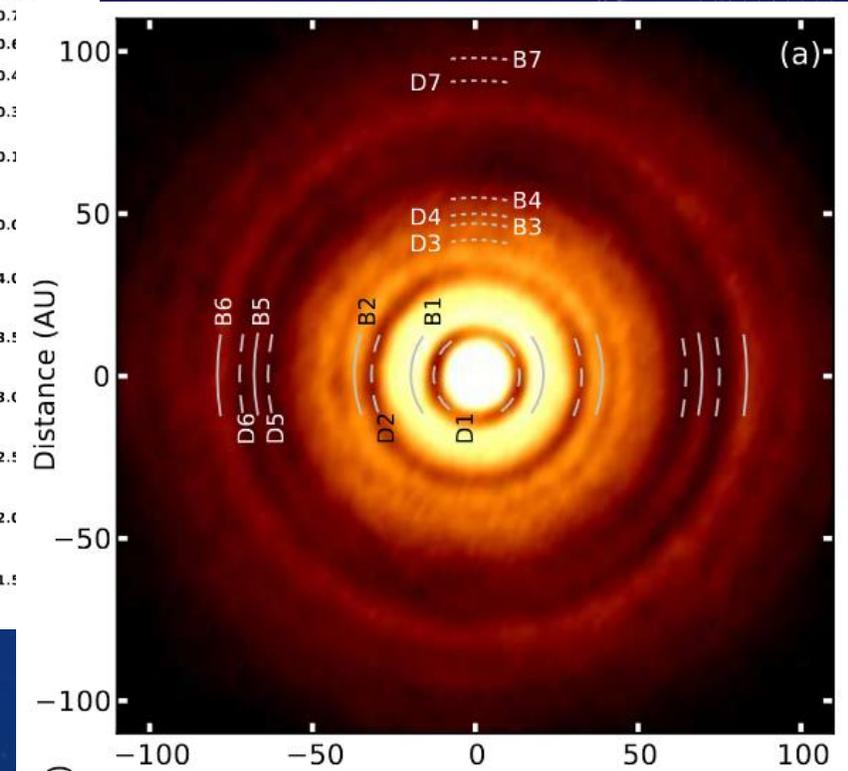
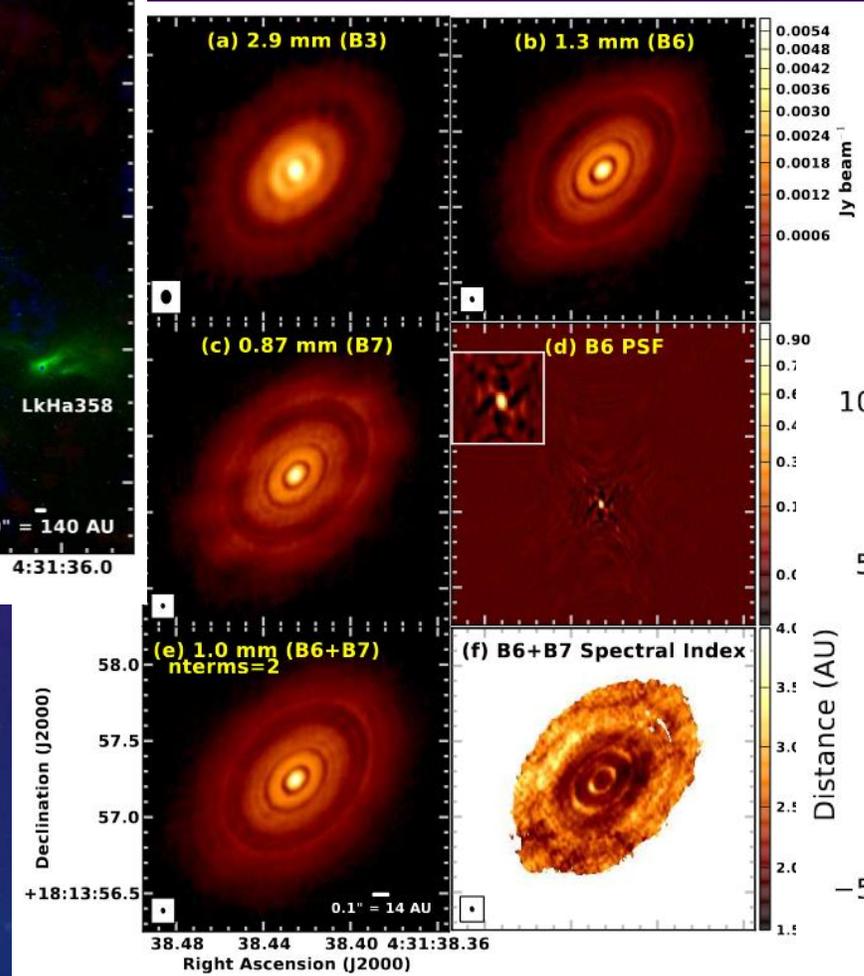
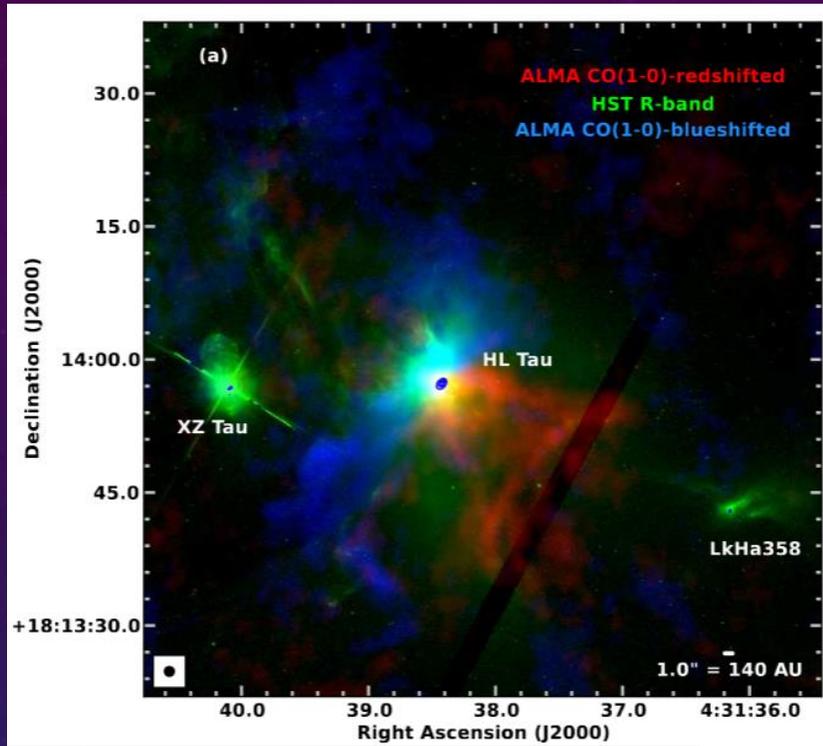


Наблюдения проводились
на установке ALMA.

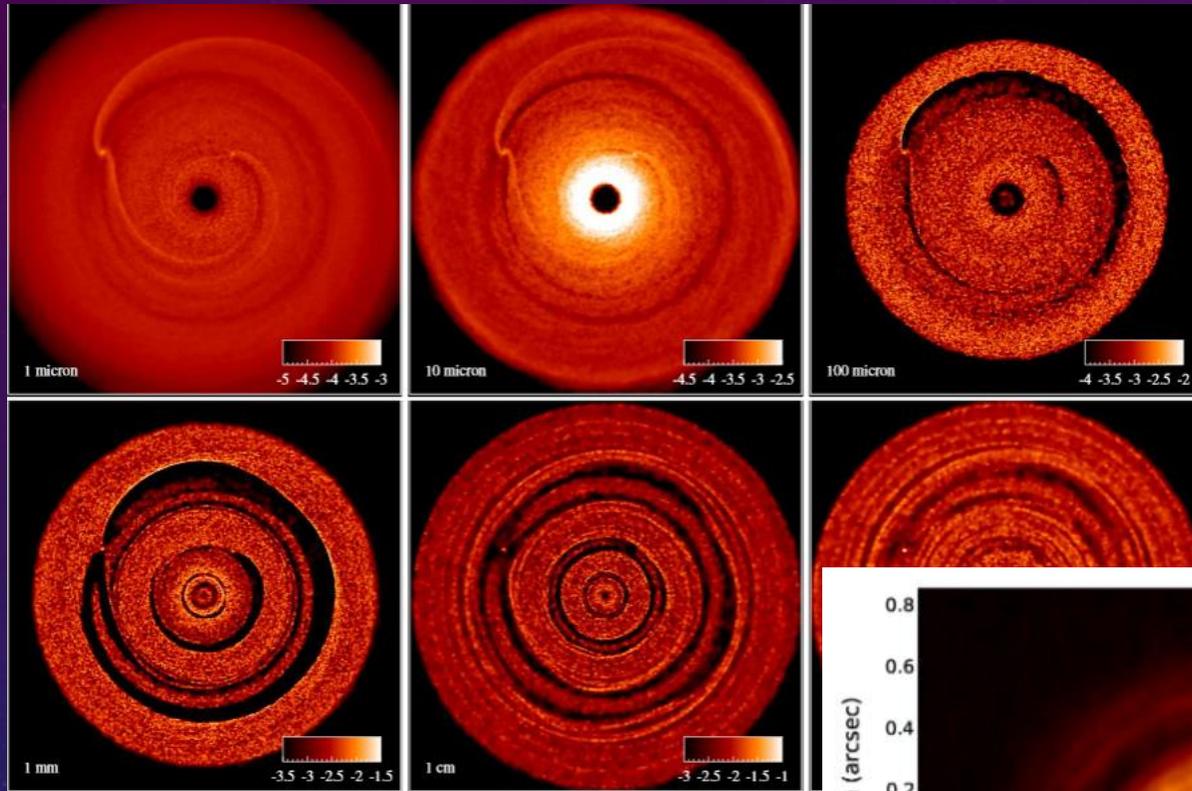


<https://public.nrao.edu/AlmaExtras/>

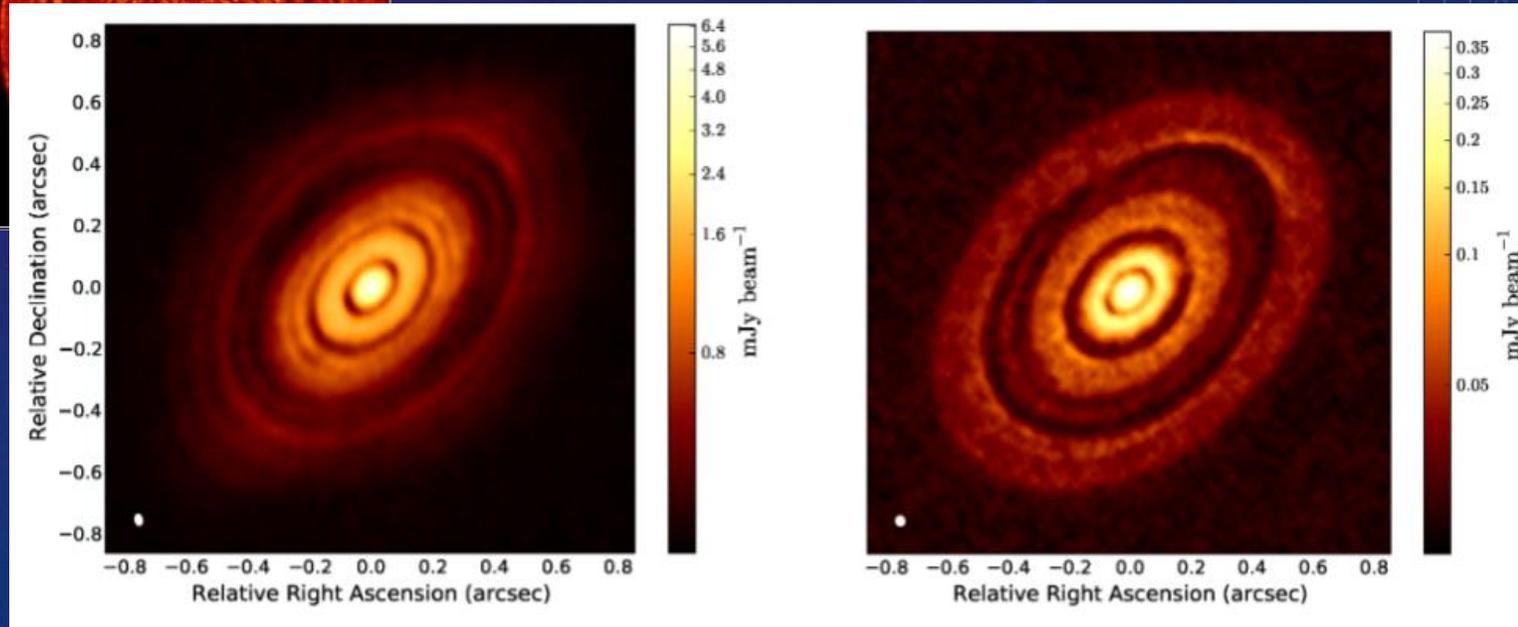
ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК HL TAU



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКА HL TAU



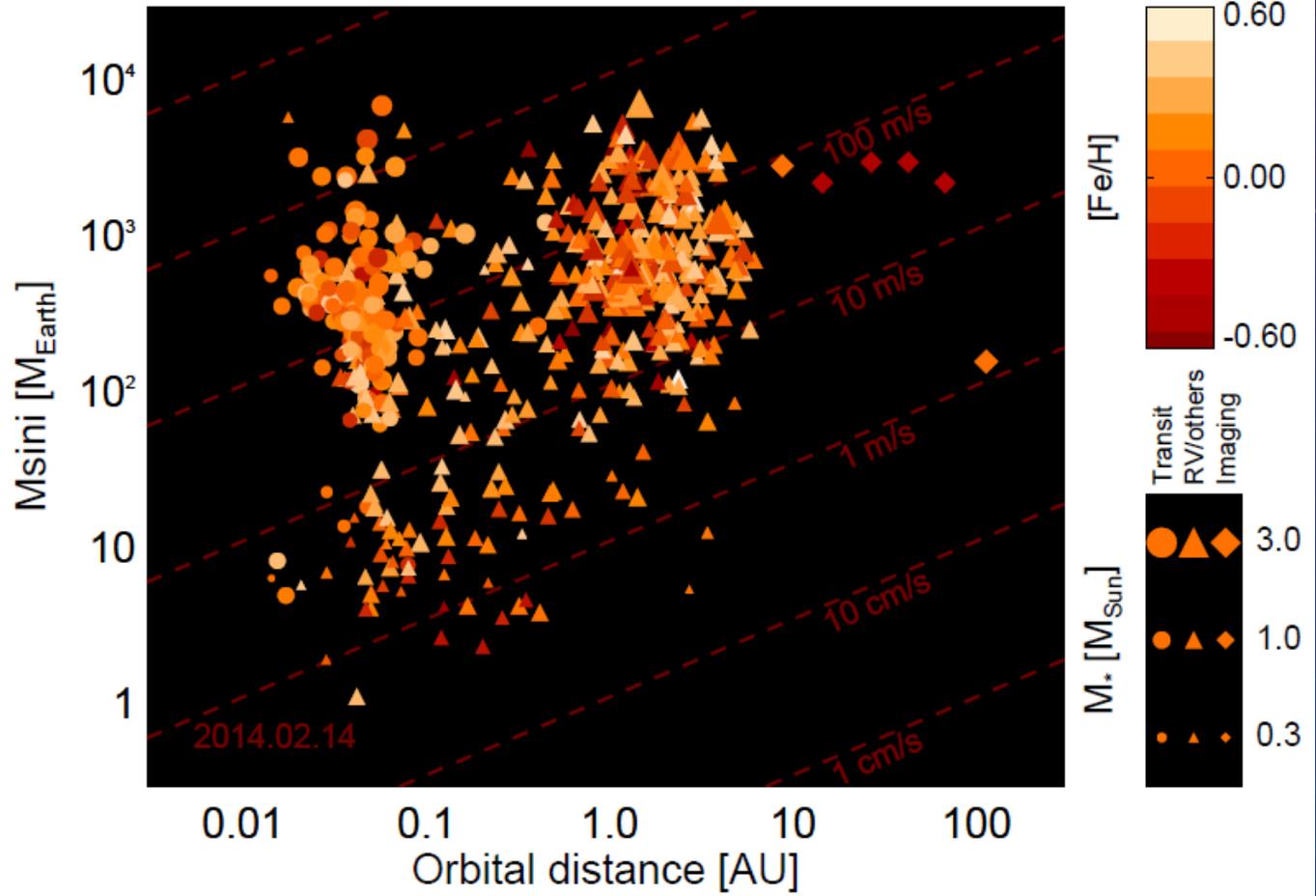
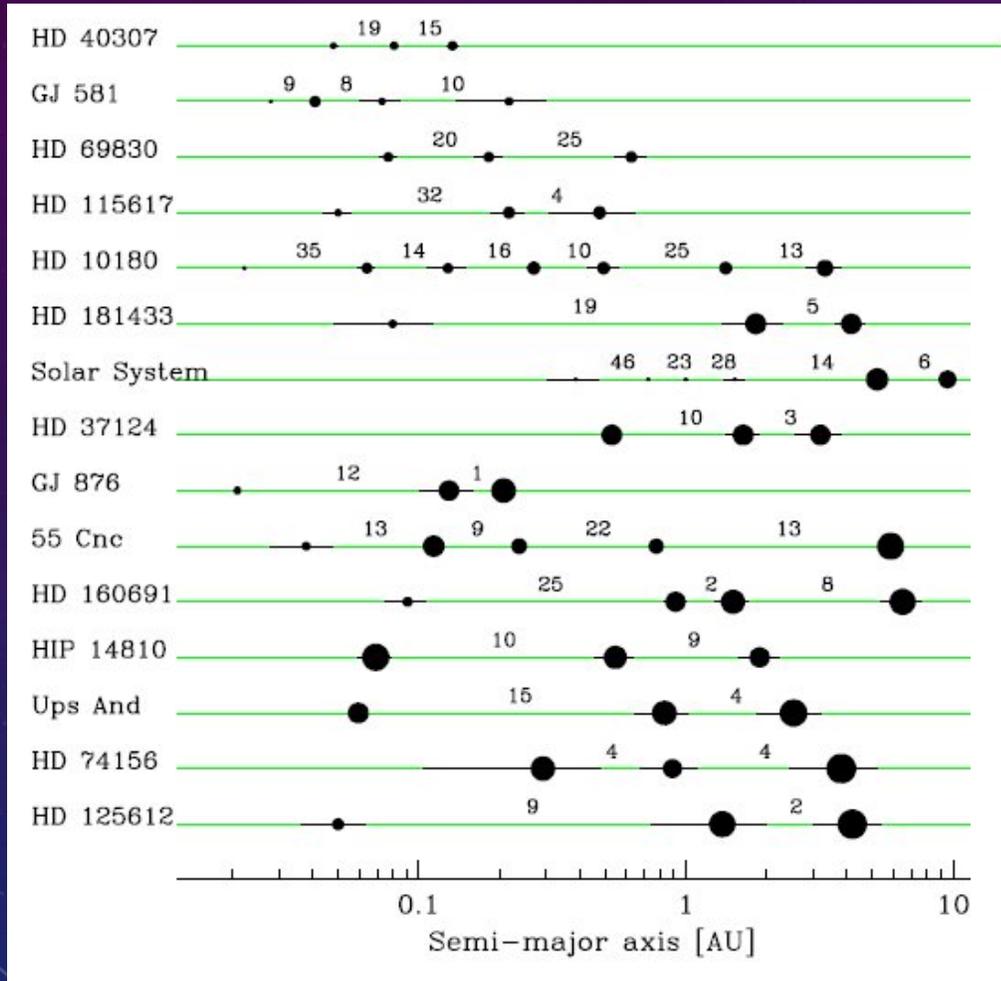
Три планеты с массами от 0.2 юпитерианских до 0.55. На нижнем рисунке сравниваются Результаты наблюдений (слева) с результатами моделирования.



1507.06719

ГАЗОВЫЕ И ЛЕДЯНЫЕ ПЛАНЕТЫ ВБЛИЗИ СВОИХ ЗВЕЗД

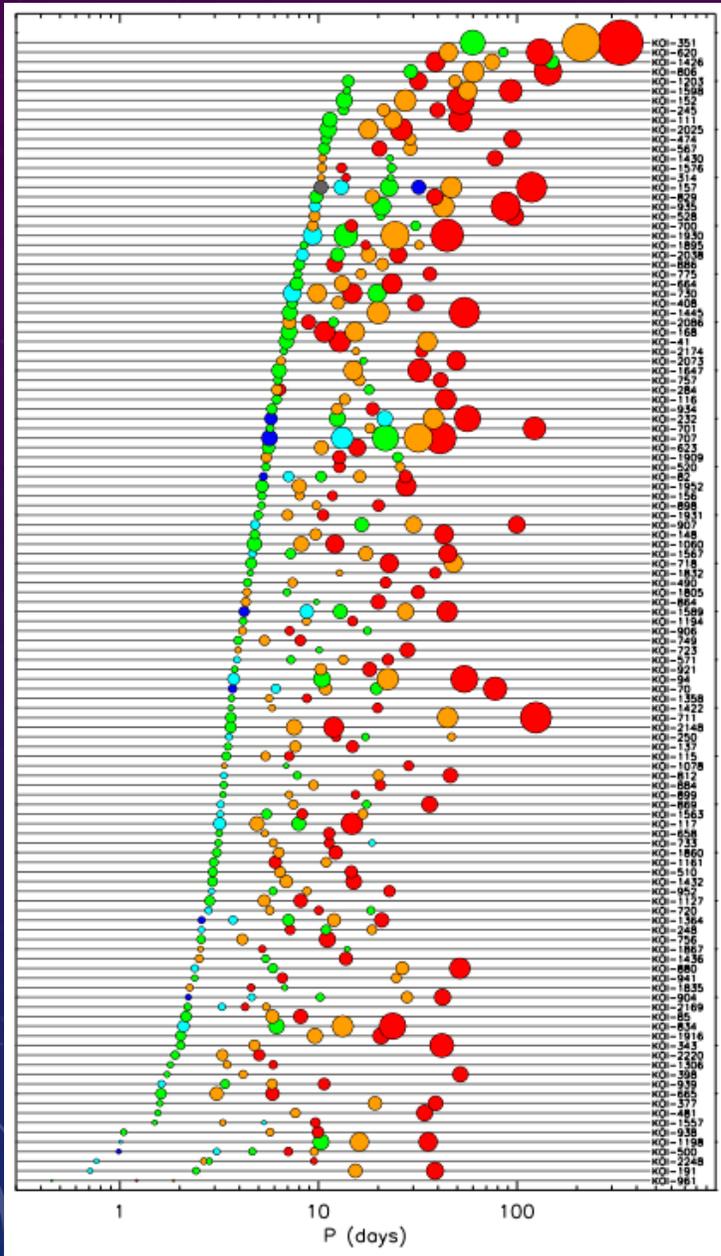
1405.3752



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.

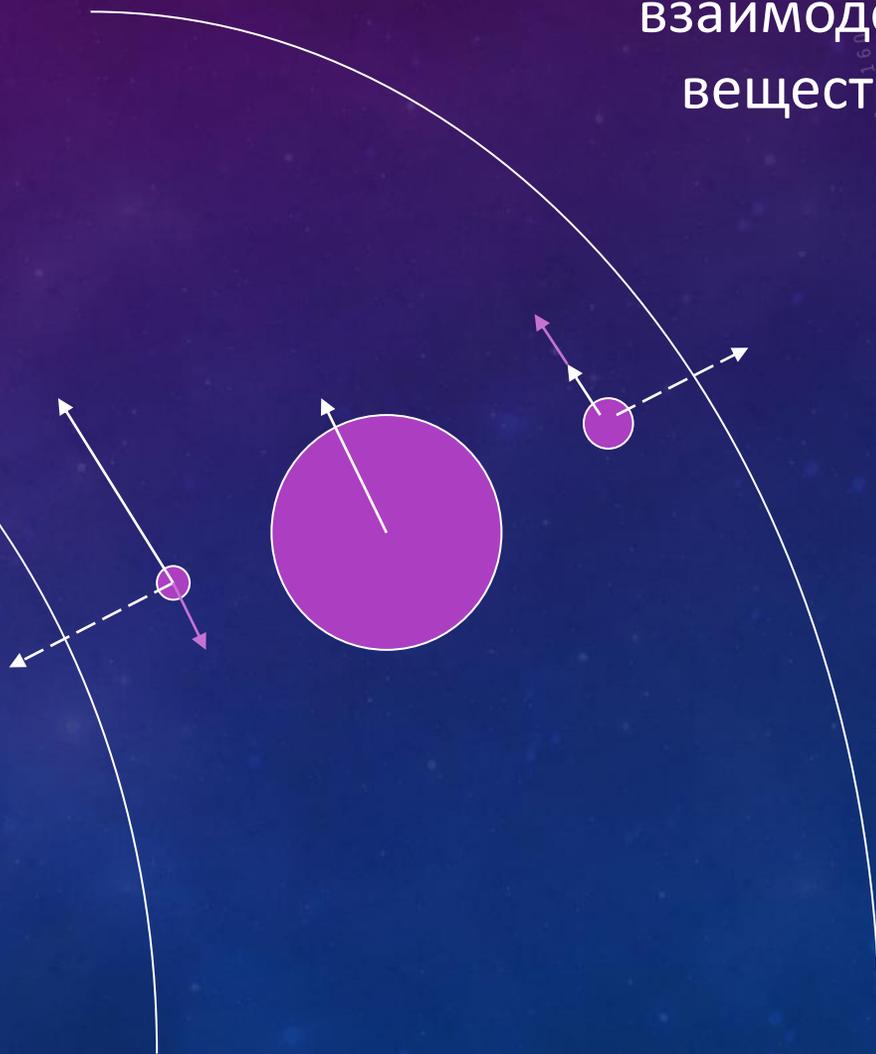
Еще важно, что более крупные планеты в системе лежат снаружи, а более мелкие – внутри.

МИГРАЦИЯ ПЛАНЕТ

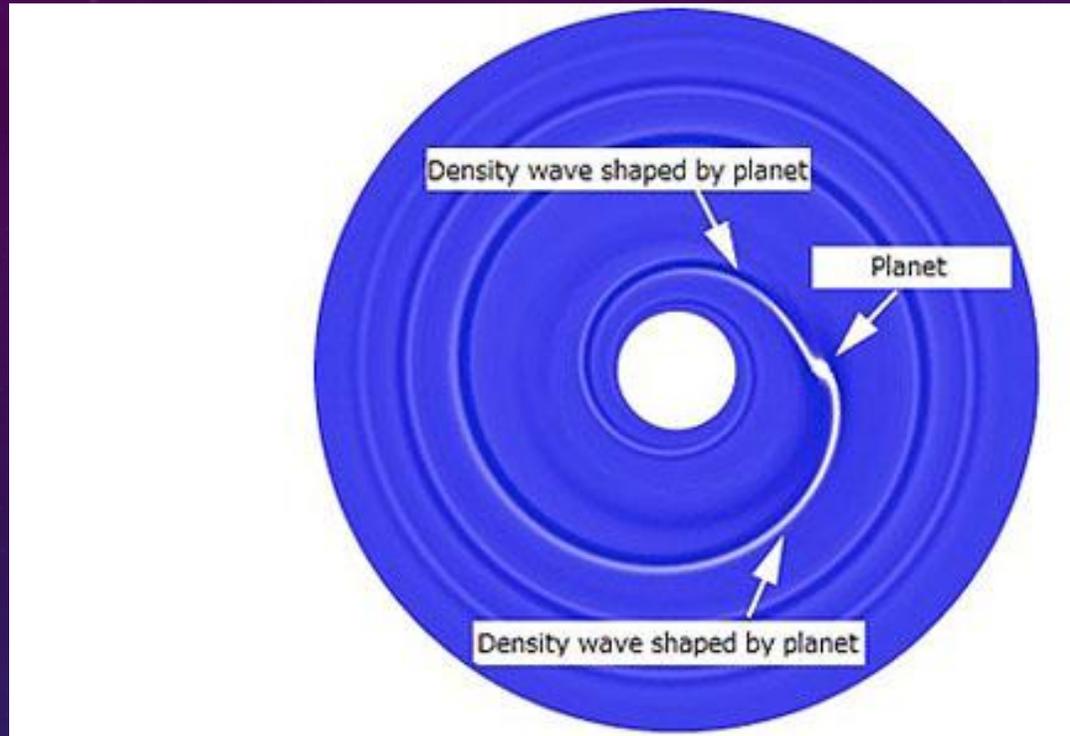
Планета может менять свою орбиту, за счет взаимодействия с веществом диска.

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

Чаще планеты в итоге двигаются ближе к звезде.

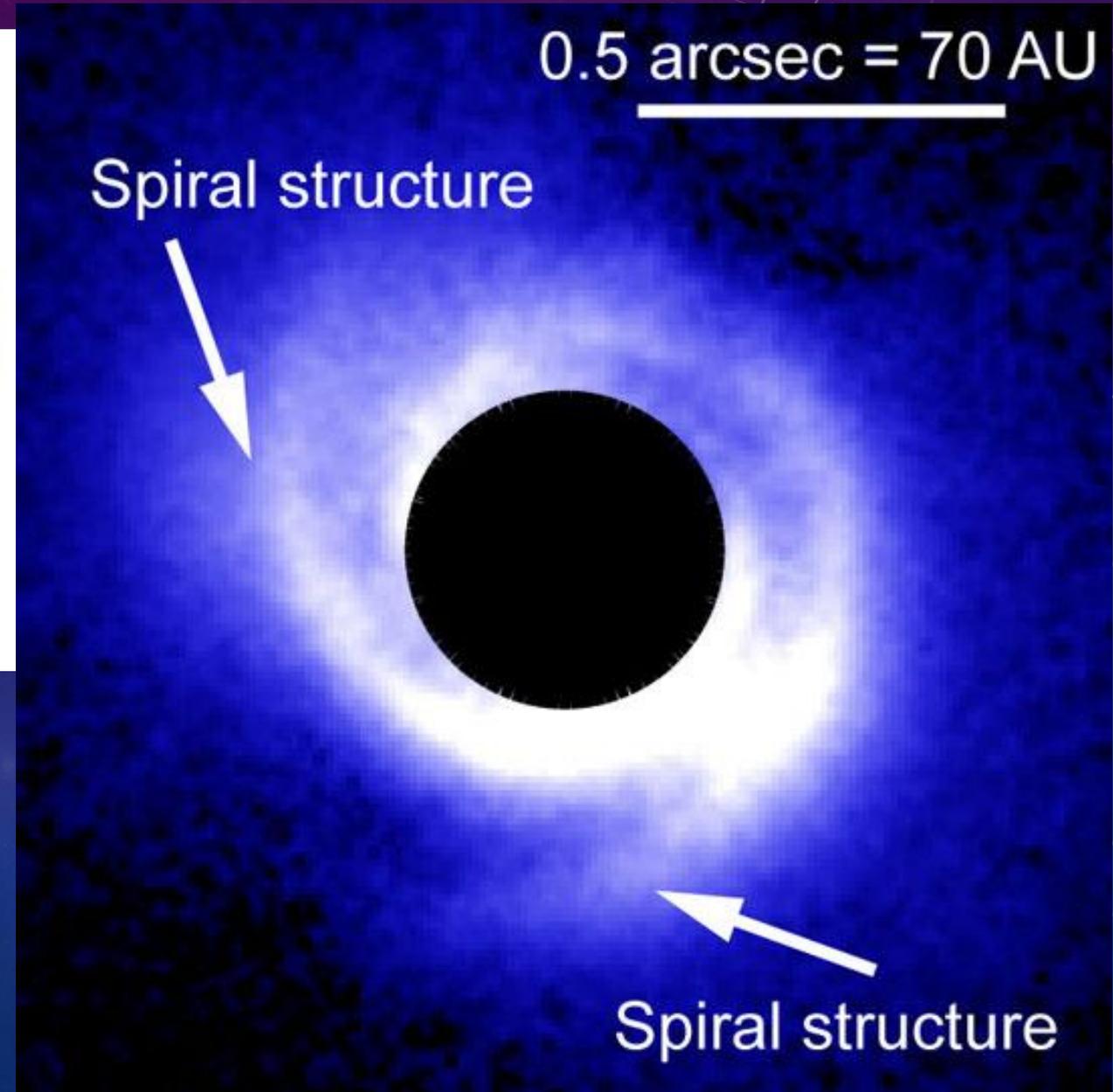


СТРУКТУРЫ В ДИСКЕ

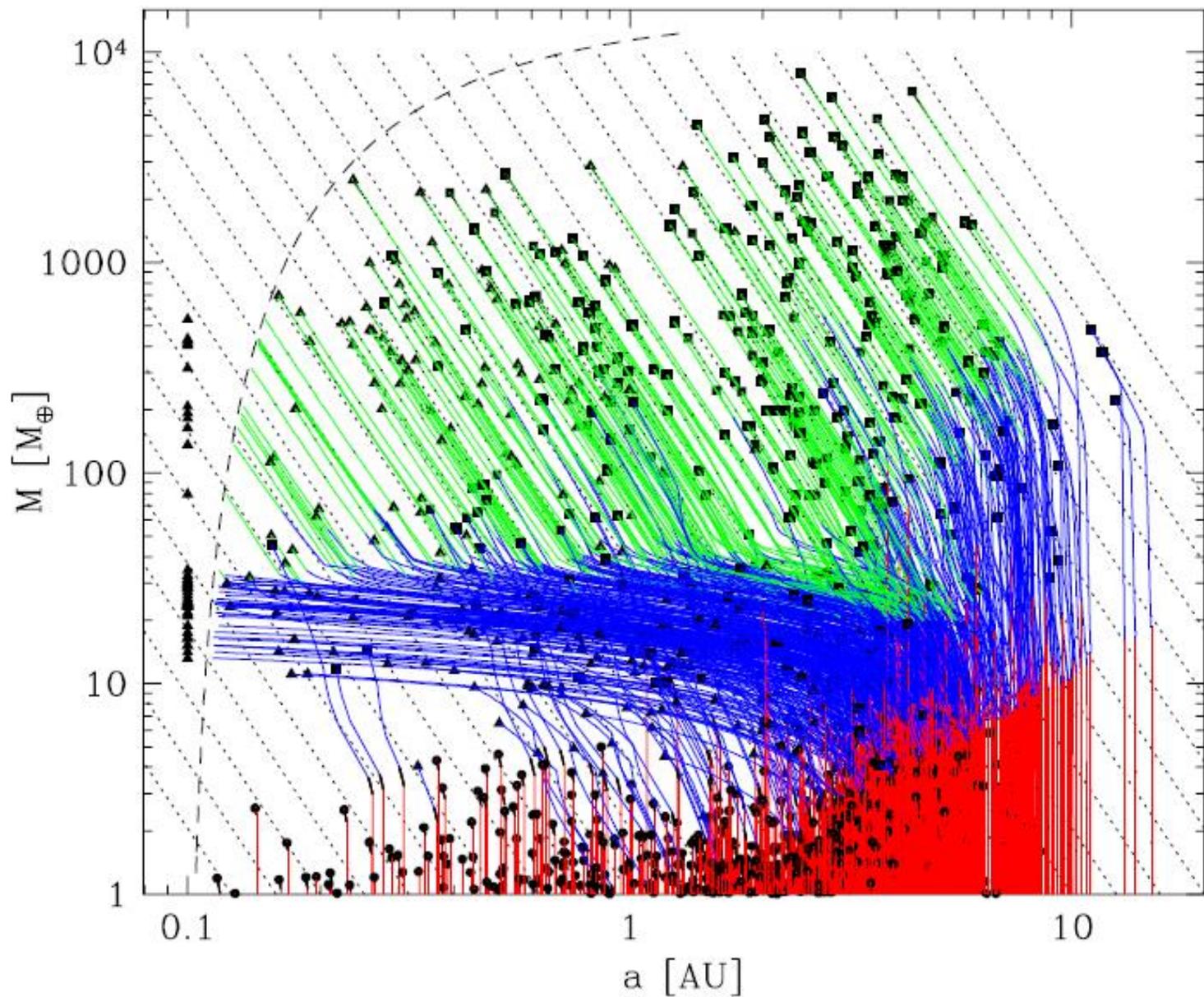


Планета рождает в диске структуру и взаимодействует с ней.

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



МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ

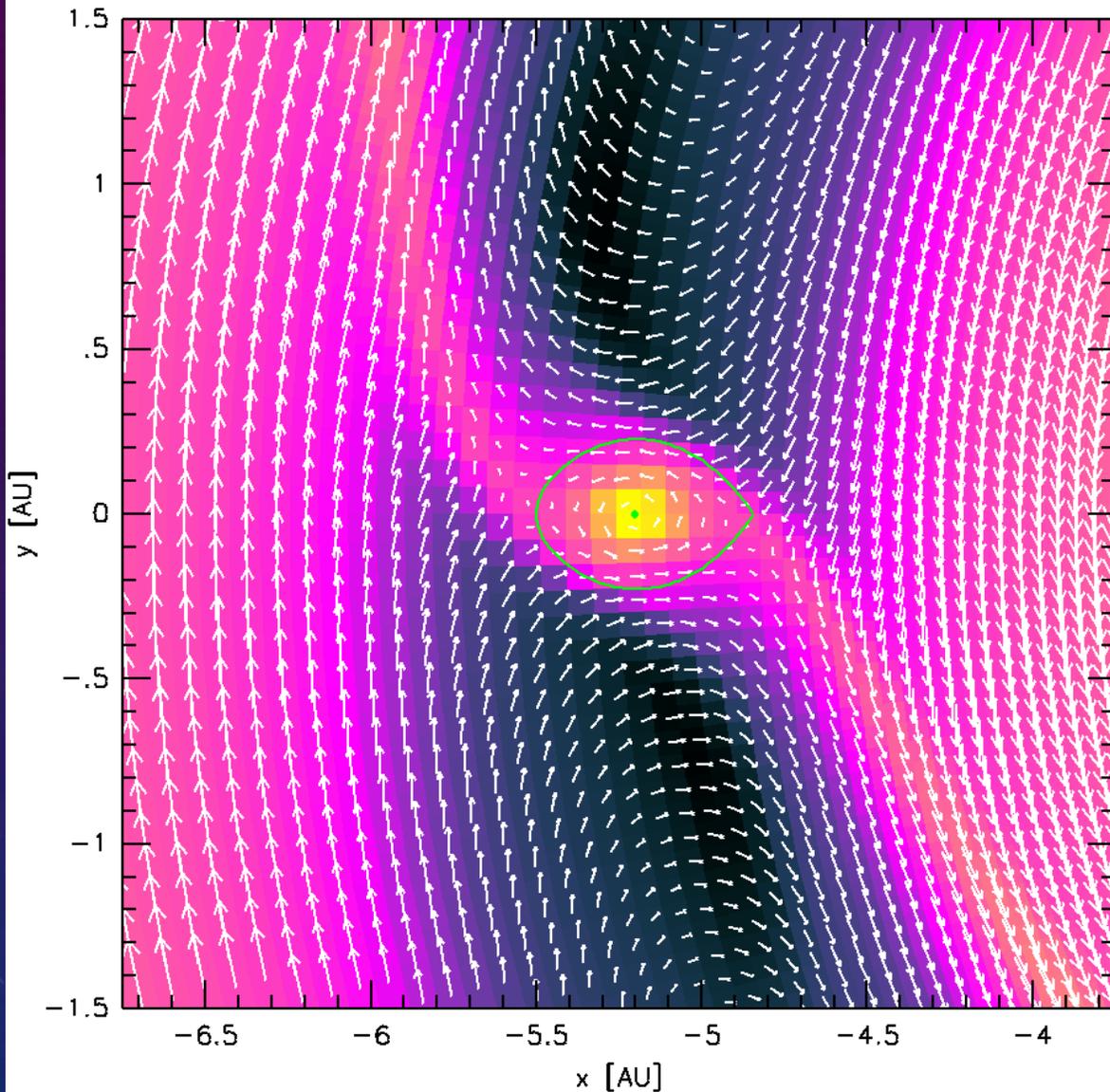


Миграция настолько важна, что может полностью поменять вид системы.

Показано, как планеты меняют свою массу и орбиту.

Ясно выделяются три типа миграции.

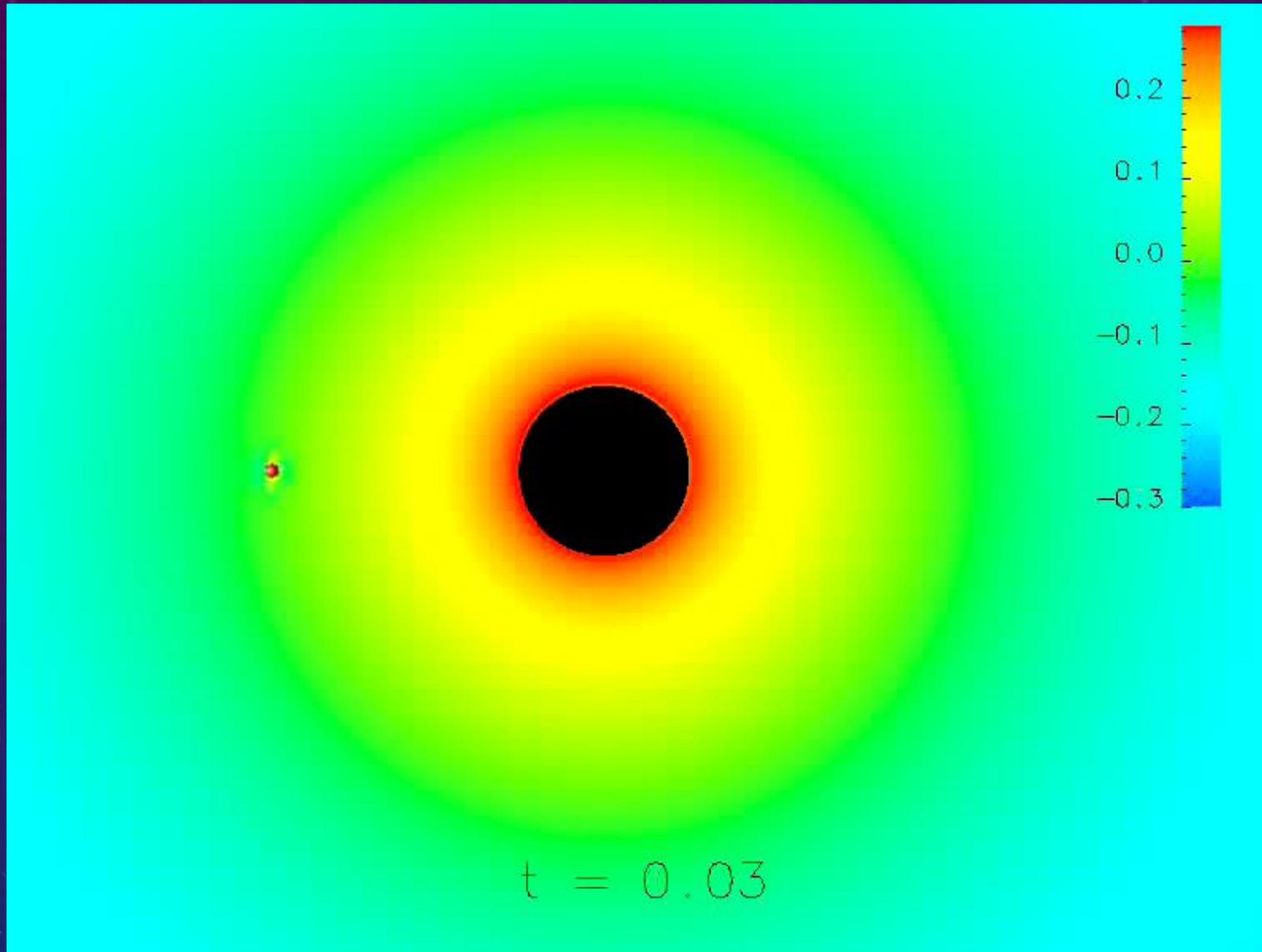
ЩЕЛИ И МОСТЫ



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/



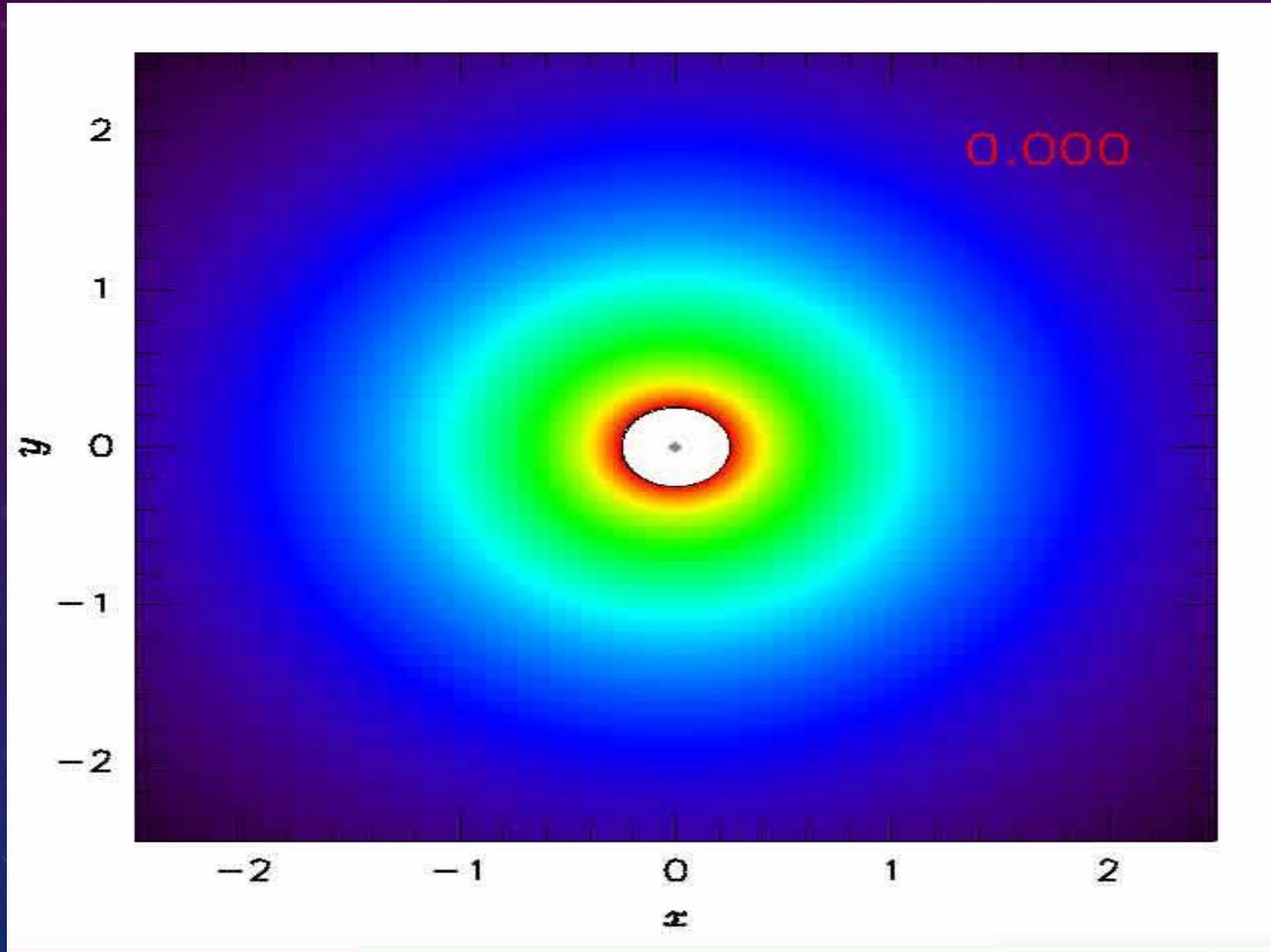
Планета движется против часовой стрелки, но выбрана такая система отсчета, в которой мы видим ее покоящейся.

Возникают спиральные волны, и постепенно открывается щель.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

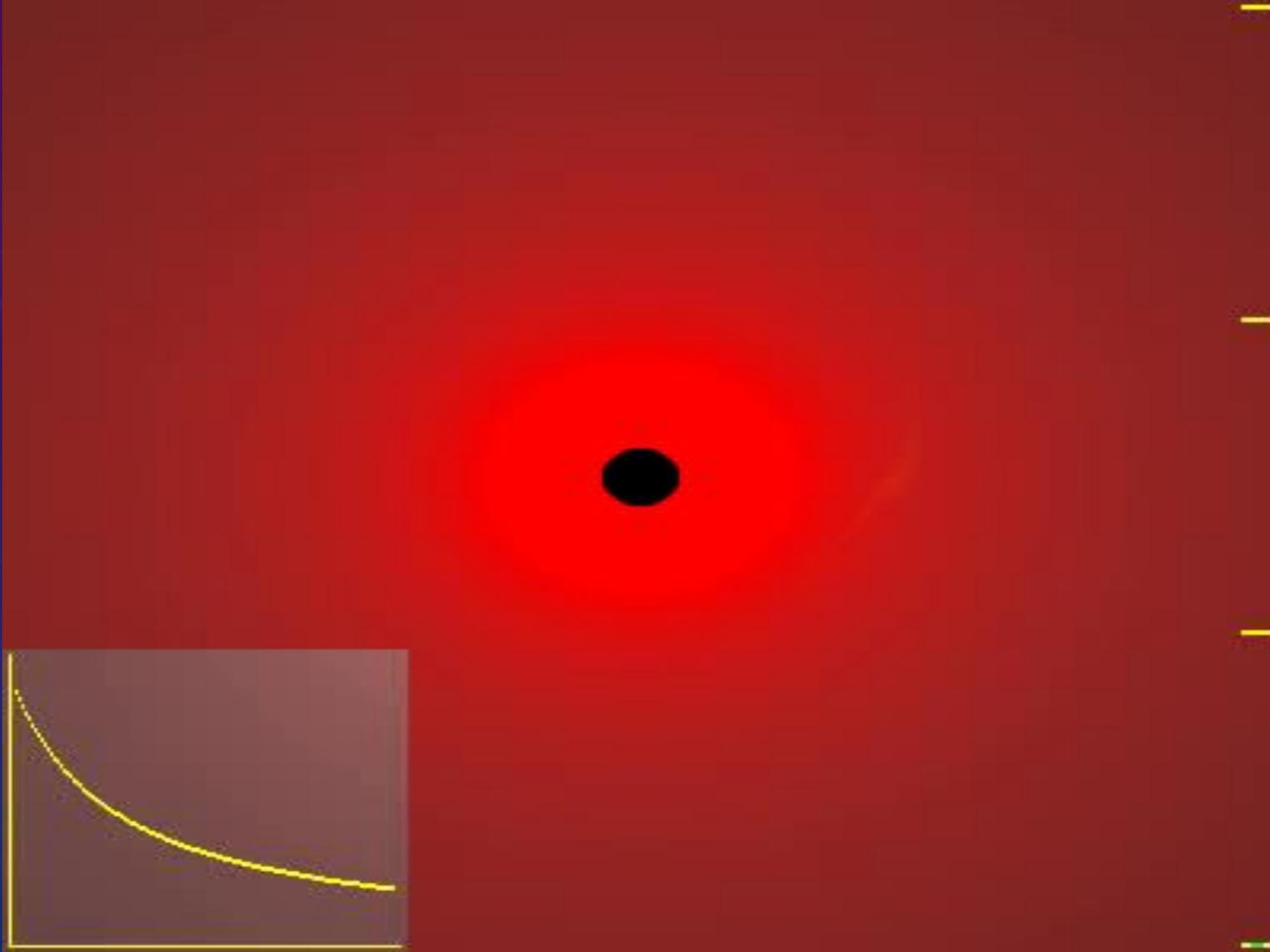
www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley/



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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Armitage

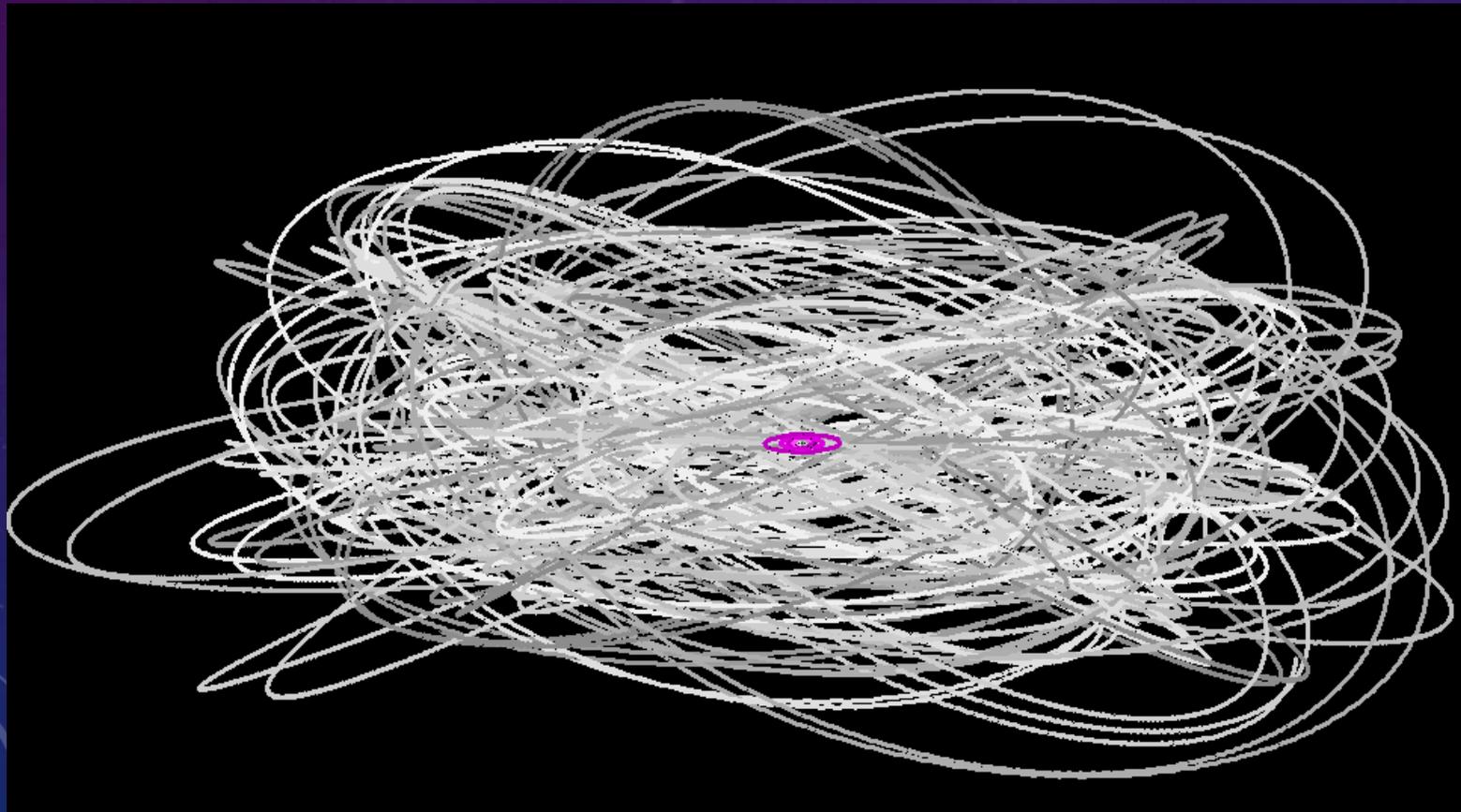


ЭФФЕКТ ЛИДОВА-КОЗАИ

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

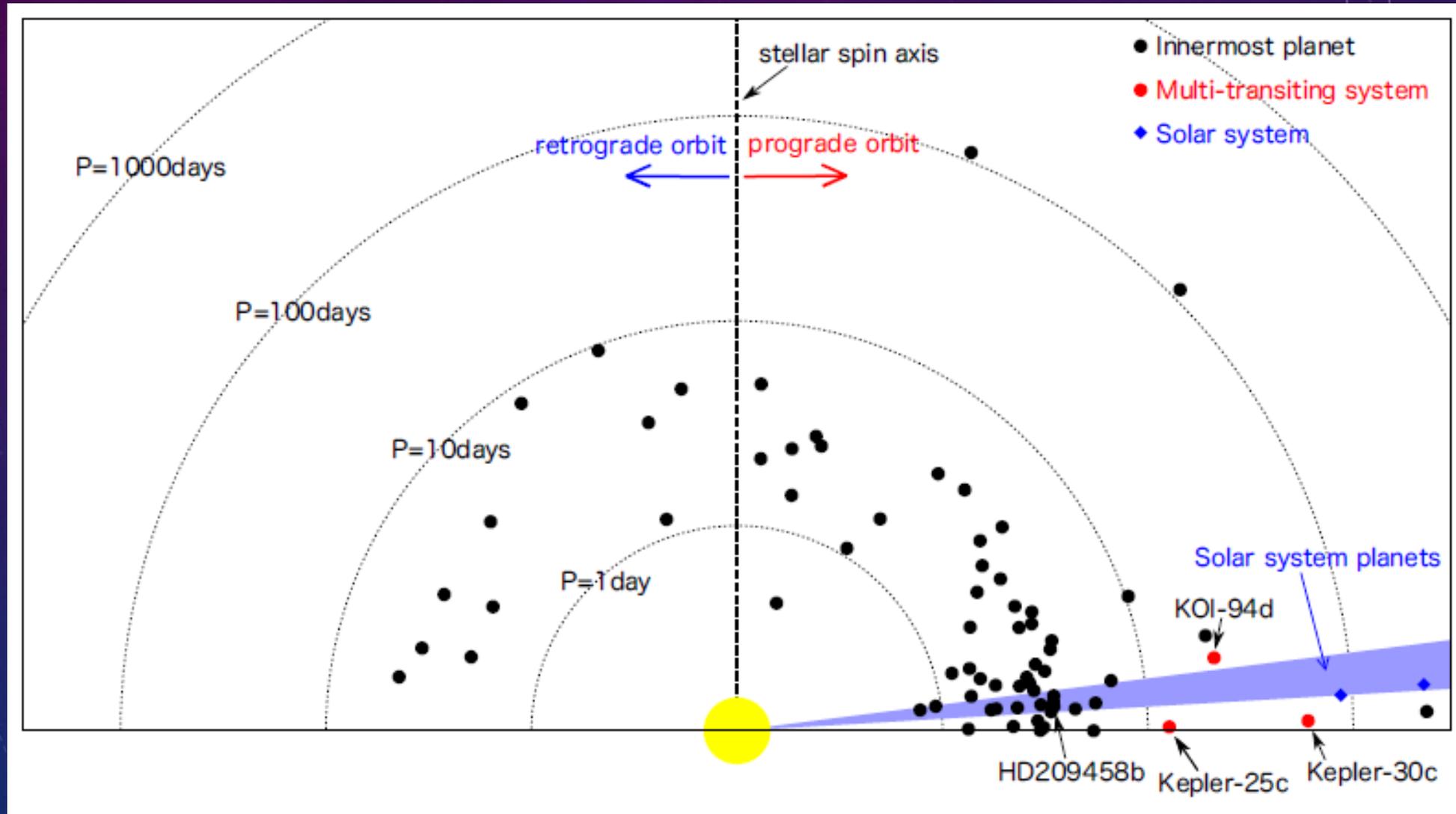
$$e_{\max} \approx \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0}$$



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

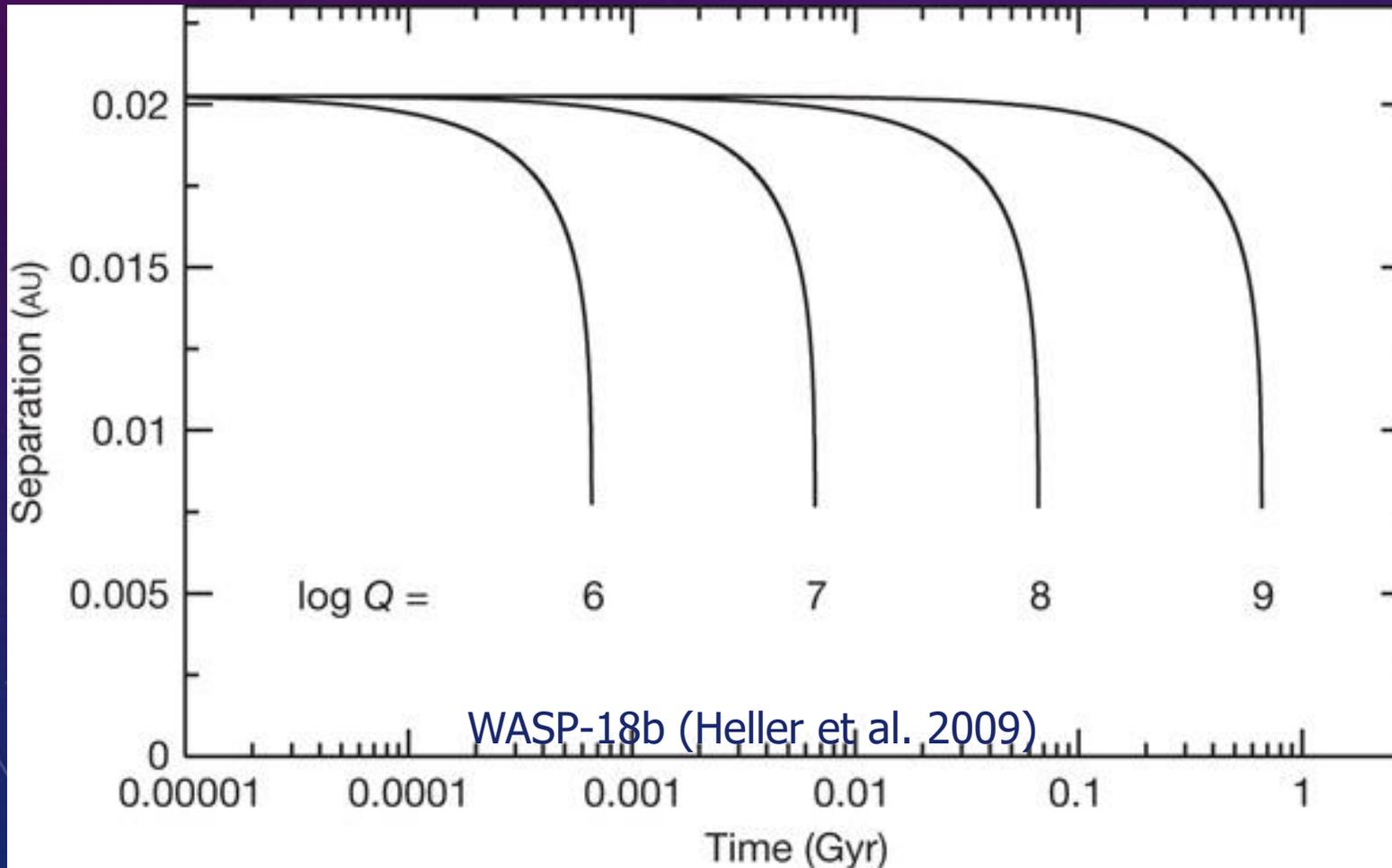
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНЕТ ПО ОРИЕНТАЦИИ ОРБИТЫ

Есть планеты с полярными и даже обратными орбитами.



ПРИЛИВЫ

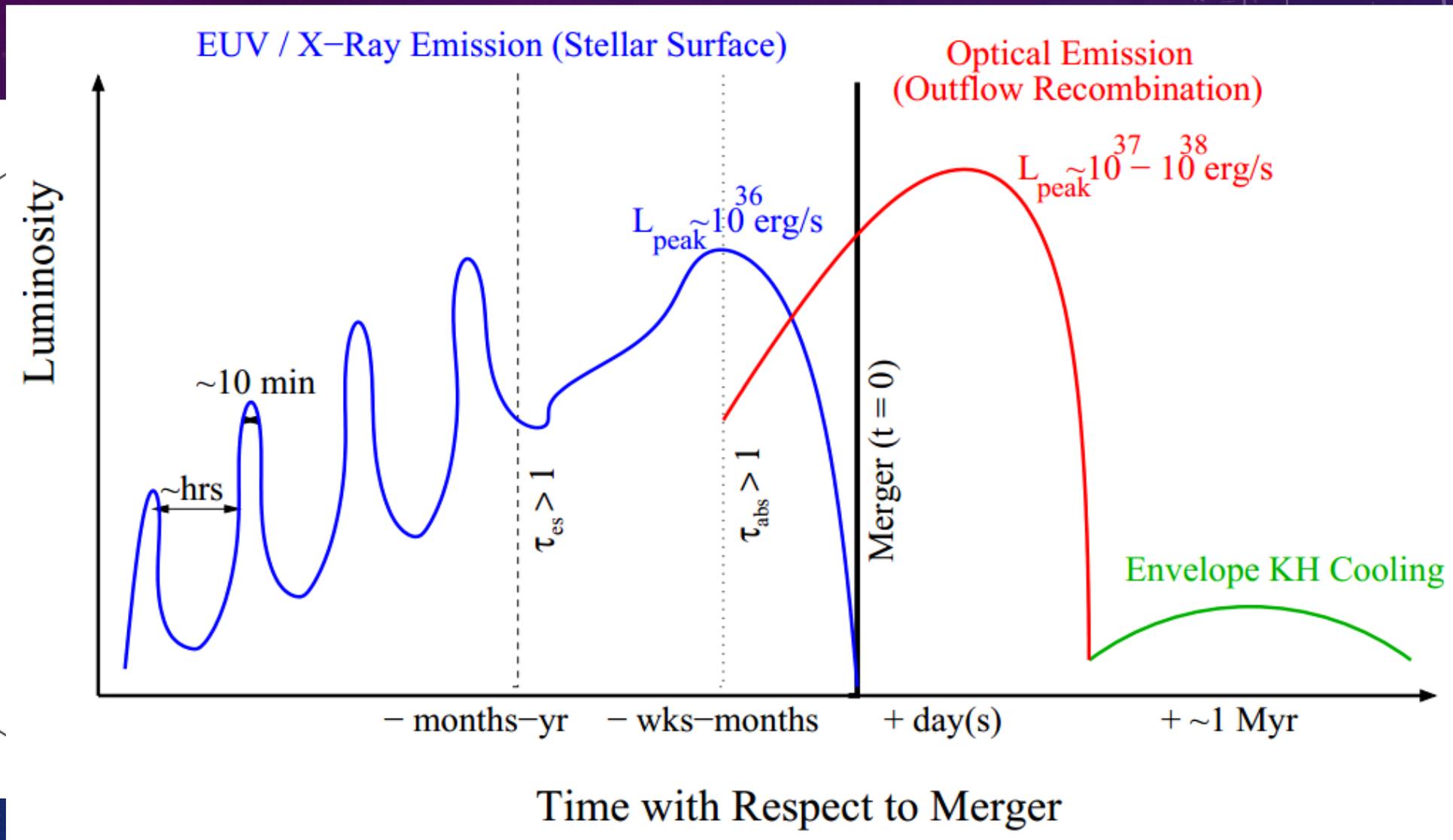
Планеты и звезды (а также планеты друг с другом) могут активно взаимодействовать за счет приливов. Это будет приводить к изменению орбиты и скорости собственного вращения.



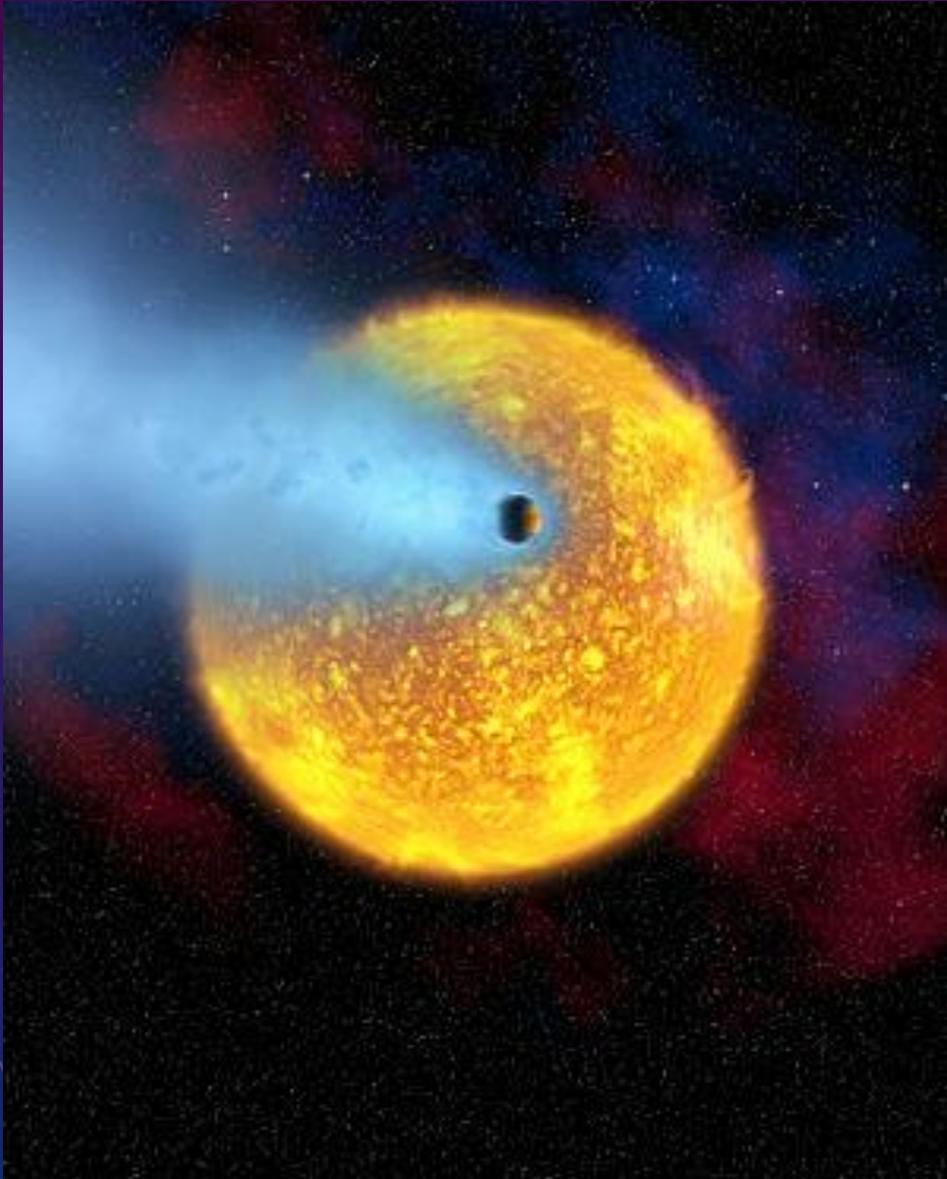
При орбитальном периоде короче нескольких дней (орбита менее 0.02 а.е.) невозможно равновесие, и орбита планеты постоянно сокращается, пока планета не будет разрушена и/или поглощена.

СЛИЯНИЯ ЗВЕЗД И ПЛАНЕТ

Раз в несколько десятков лет в Галактике или реже.



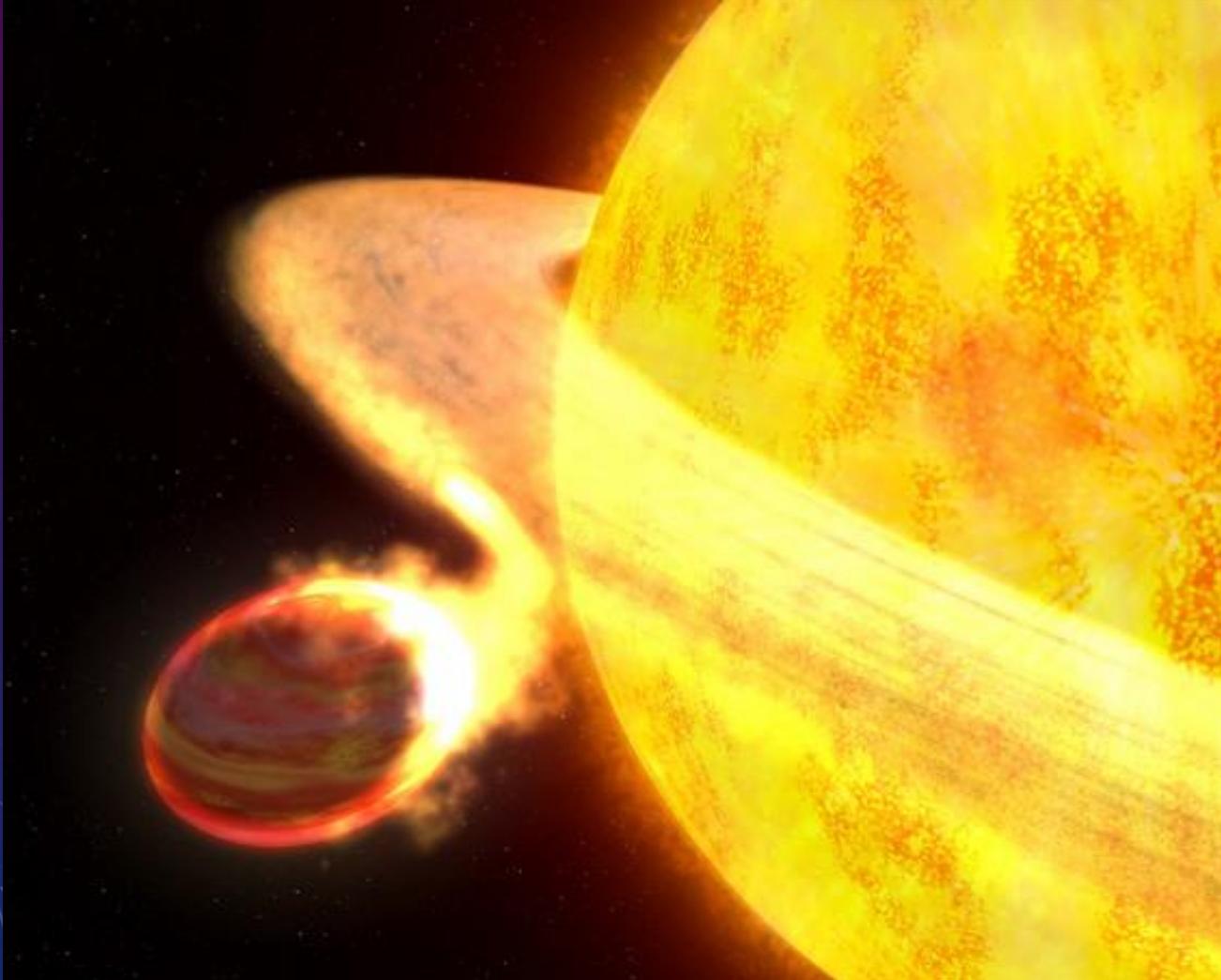
ИСПАРЕНИЕ HD209458 В



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/>



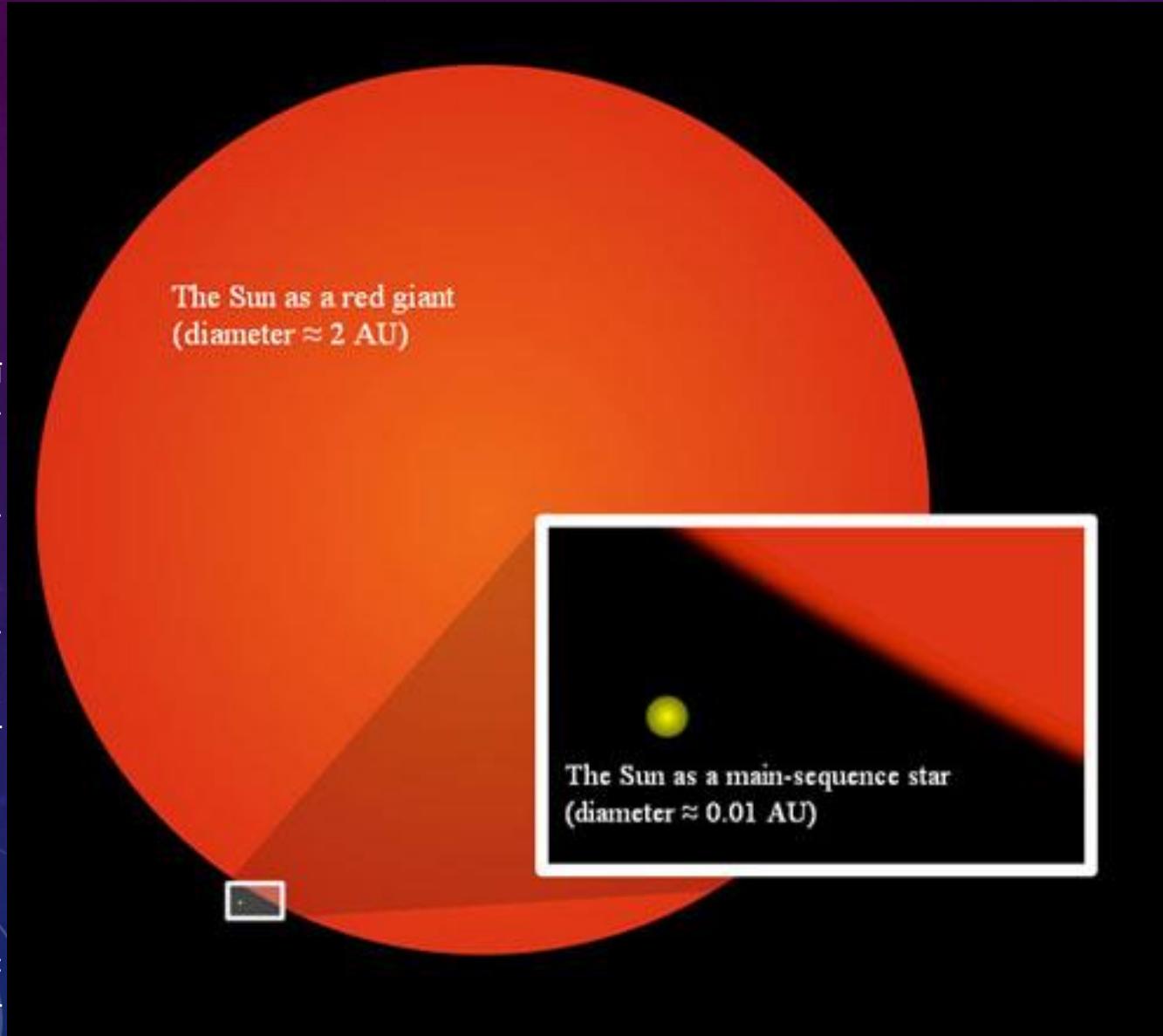
Приблизившись совсем близко к звезде, планета может начать терять свое вещество.

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.

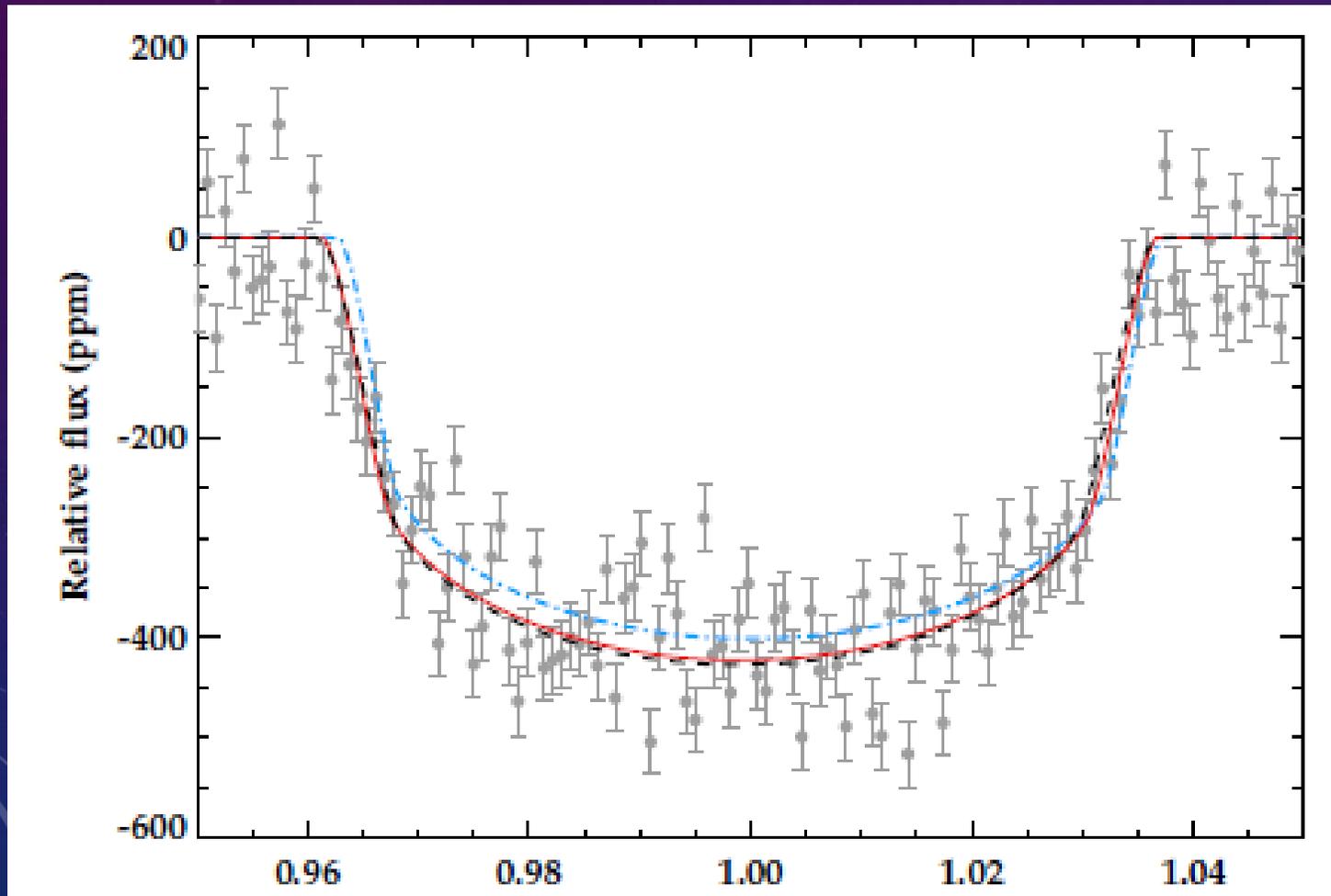
https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l6_p2.html



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

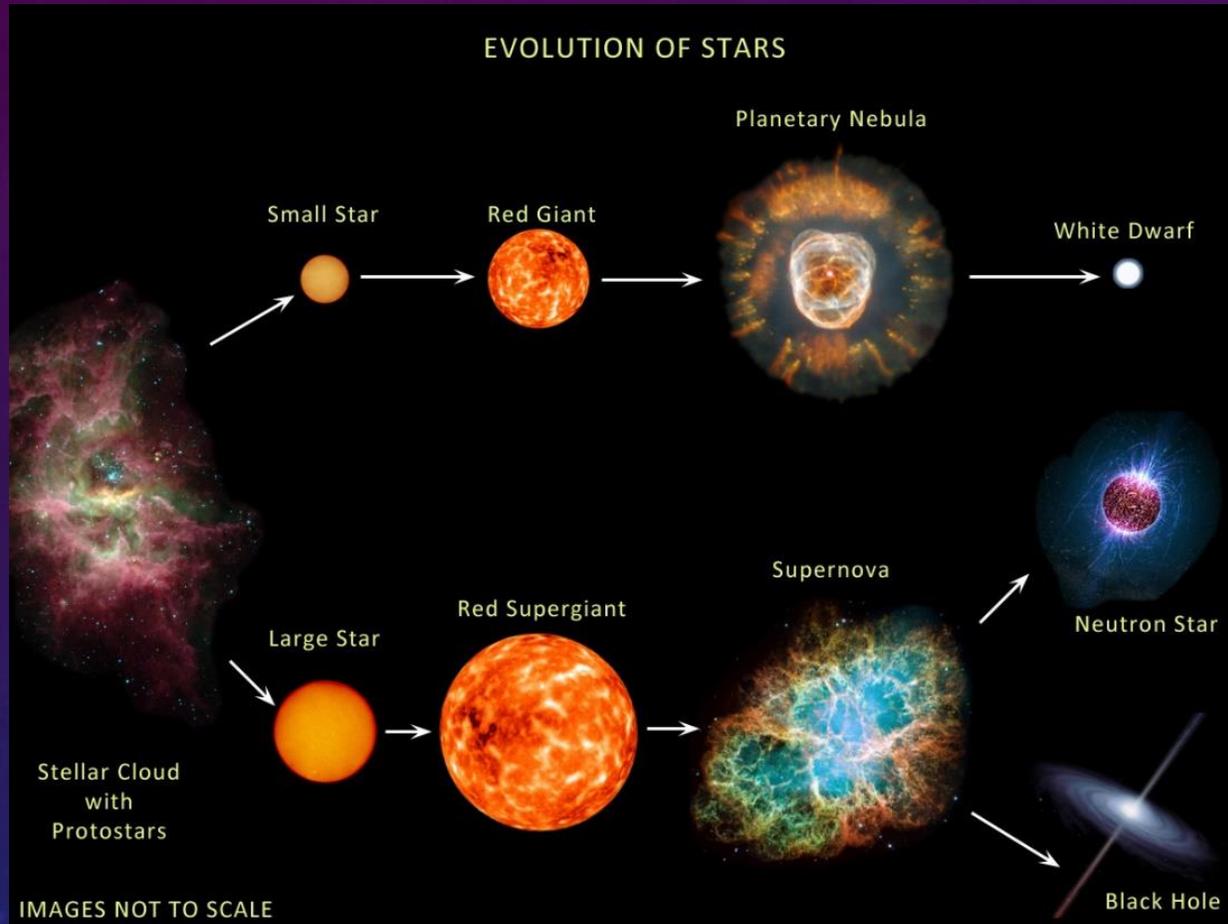


Планета Кеплер-91b, во-первых, является самой близкой к звезде среди планет у гигантов (<1.5 радиуса звезды над поверхностью). Звезда закрывает 10% неба!

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

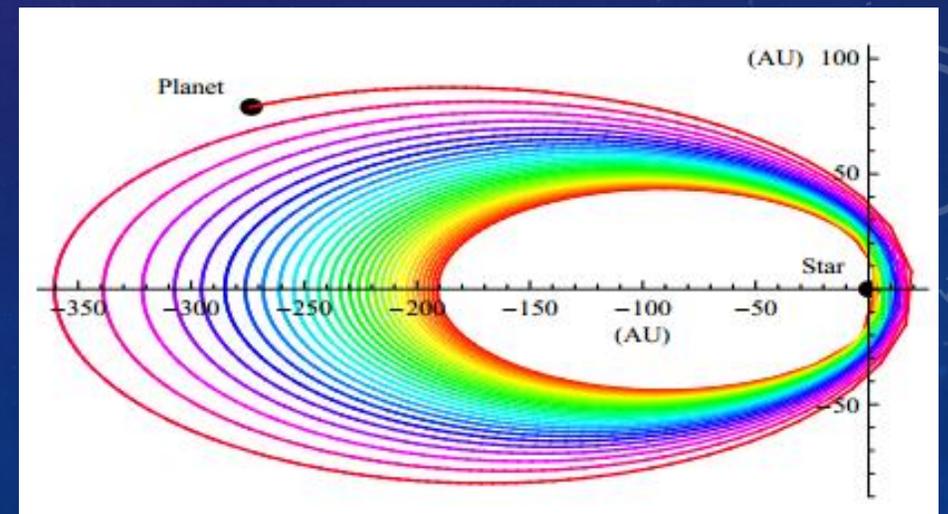
ВЫБРОС ПЛАНЕТ ЗВЕЗДАМИ

Что происходит с планетами
когда звезда теряет массу?



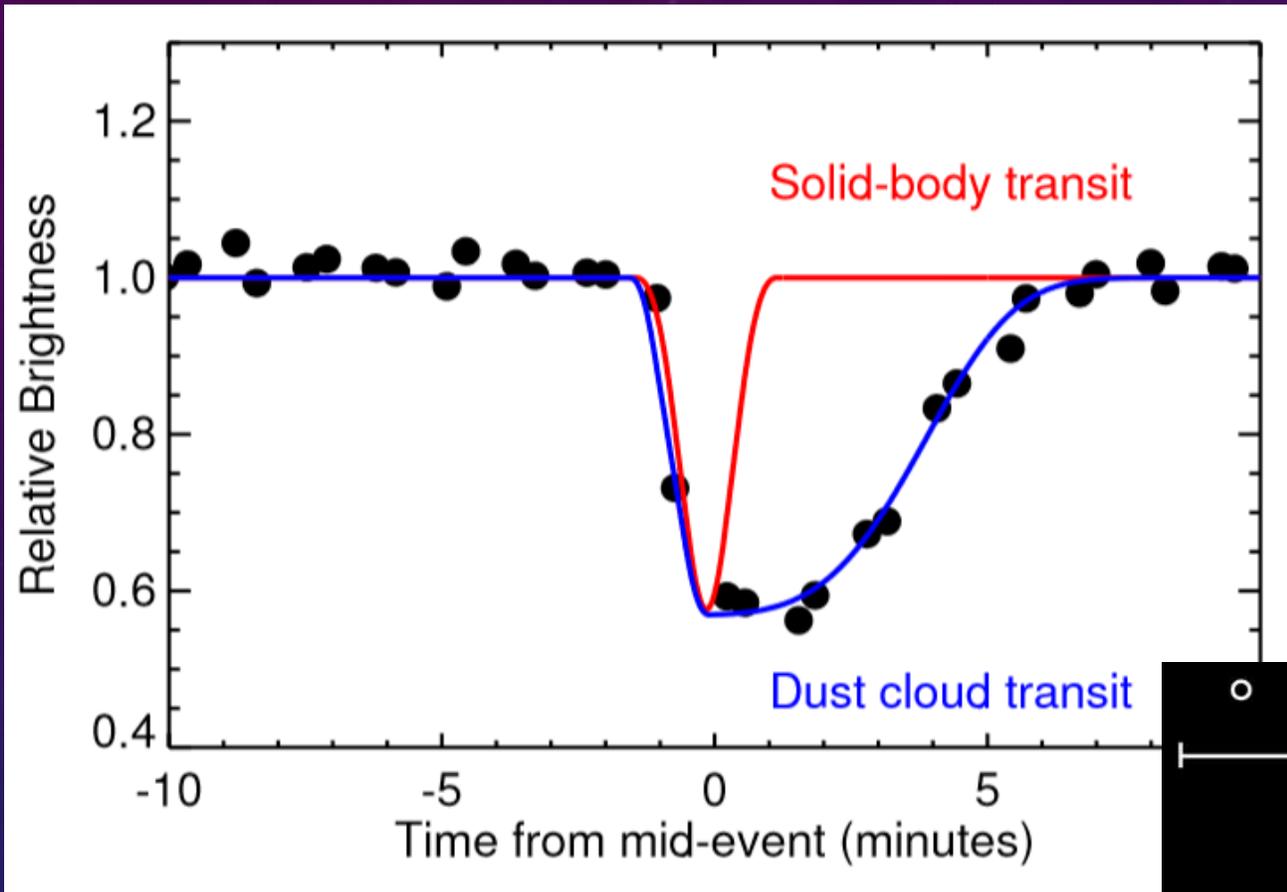
У звезд типа Солнца
планеты на орбитах, как в СС,
останутся в системе, но
орбиты будут шире.
Поэтому и наблюдают планеты
у белых карликов

Далекie планеты могут «улетать»



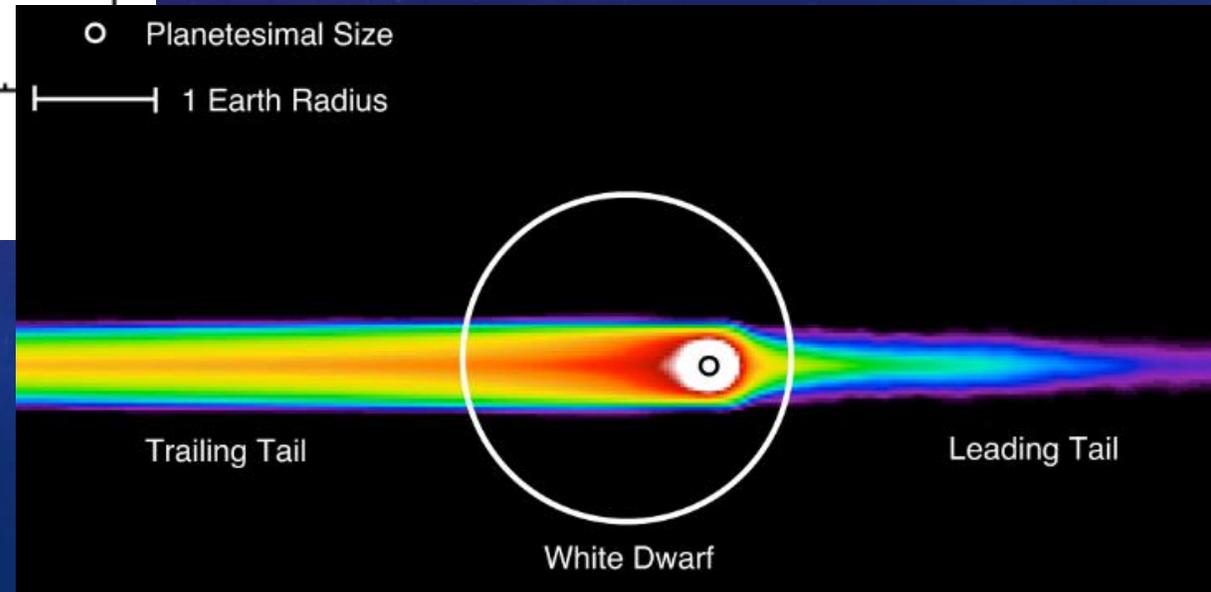
Интересные потери планет могут
происходить в двойных системах!

РАЗРУШЕНИЕ ПЛАНЕТЫ БЕЛЫМ КАРЛИКОМ



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

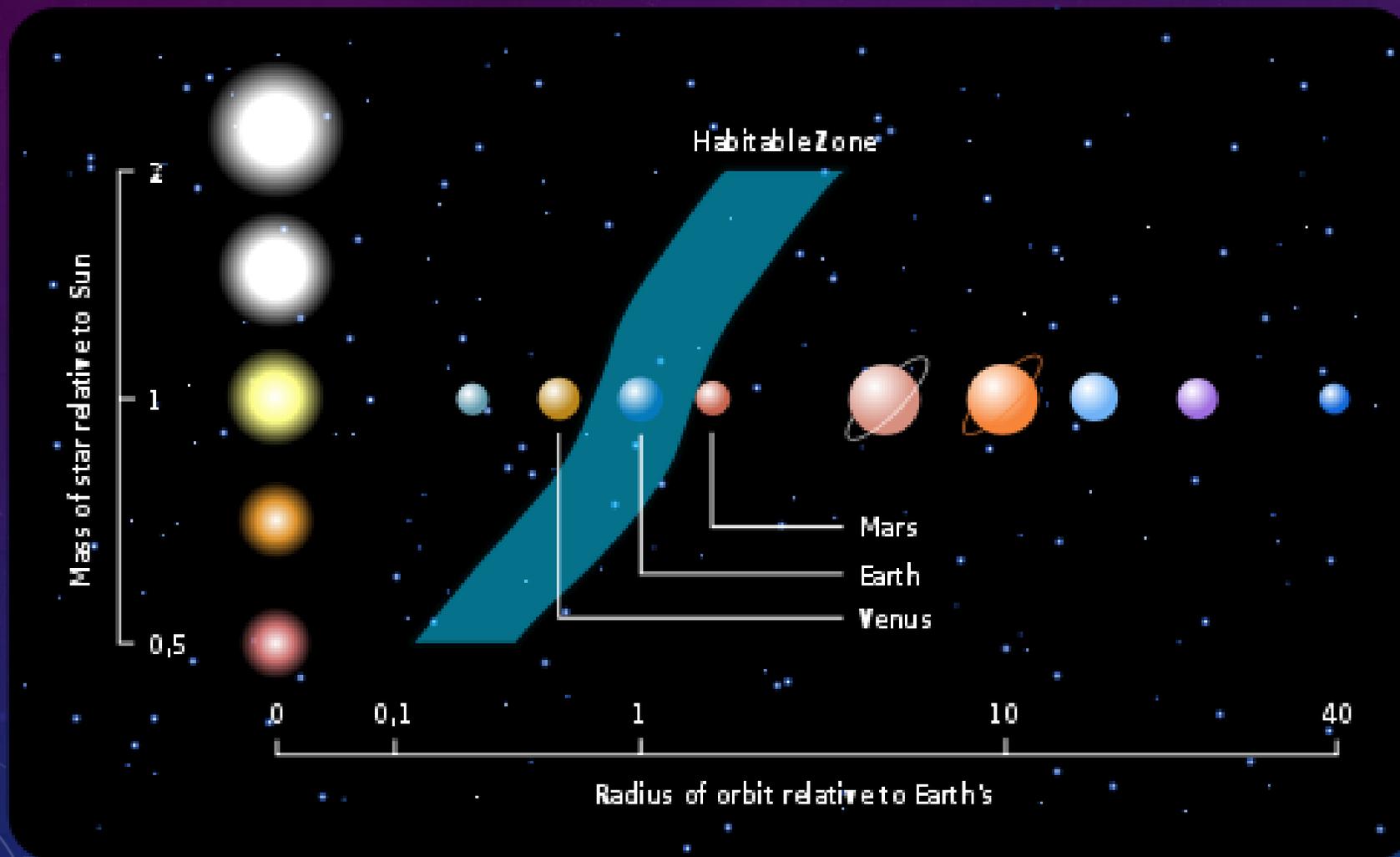
Наиболее вероятно, что было разорвано тело планетной массы. Хотя, может быть, и несколько тел типа крупных астероидов.



1510.06387

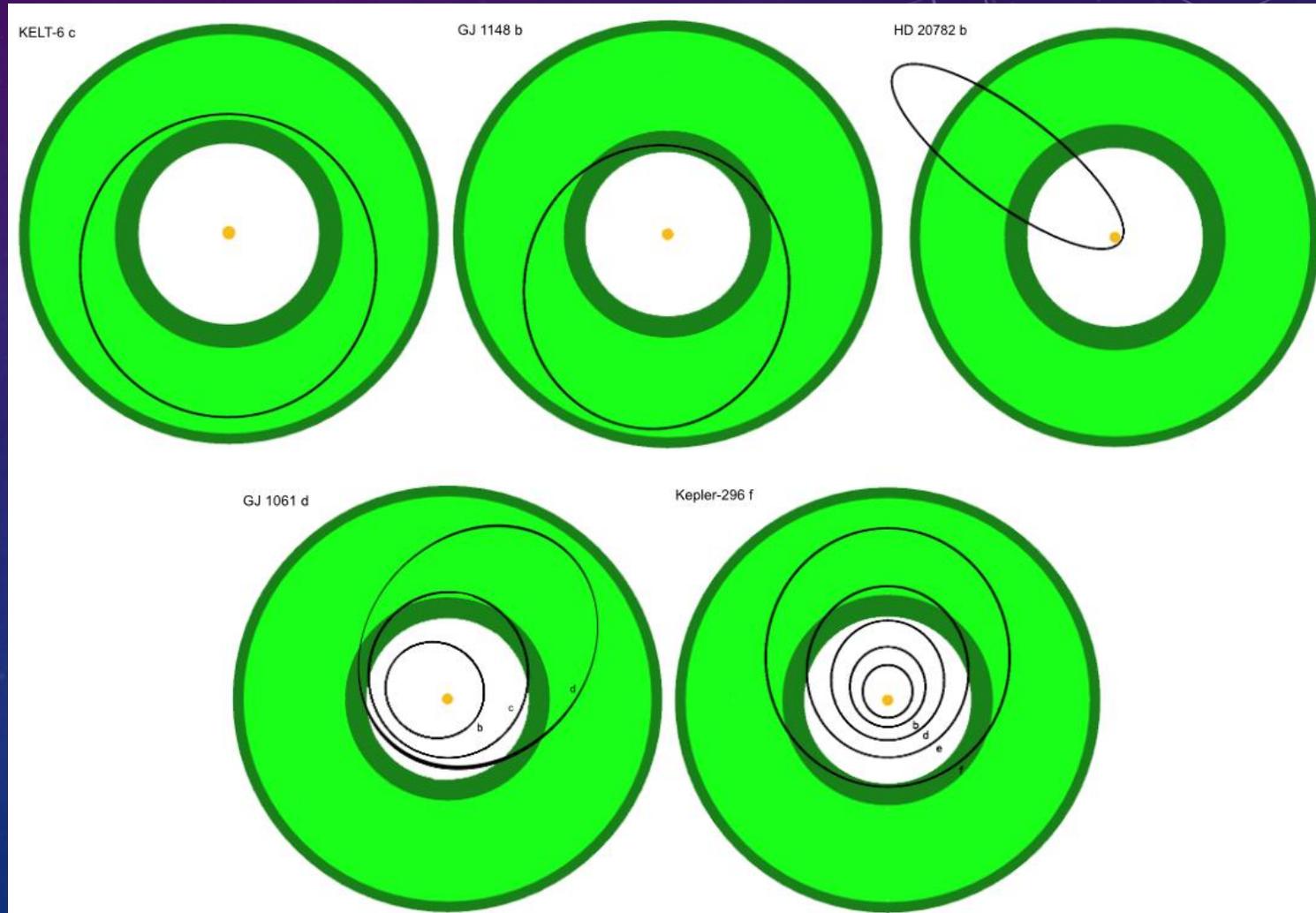
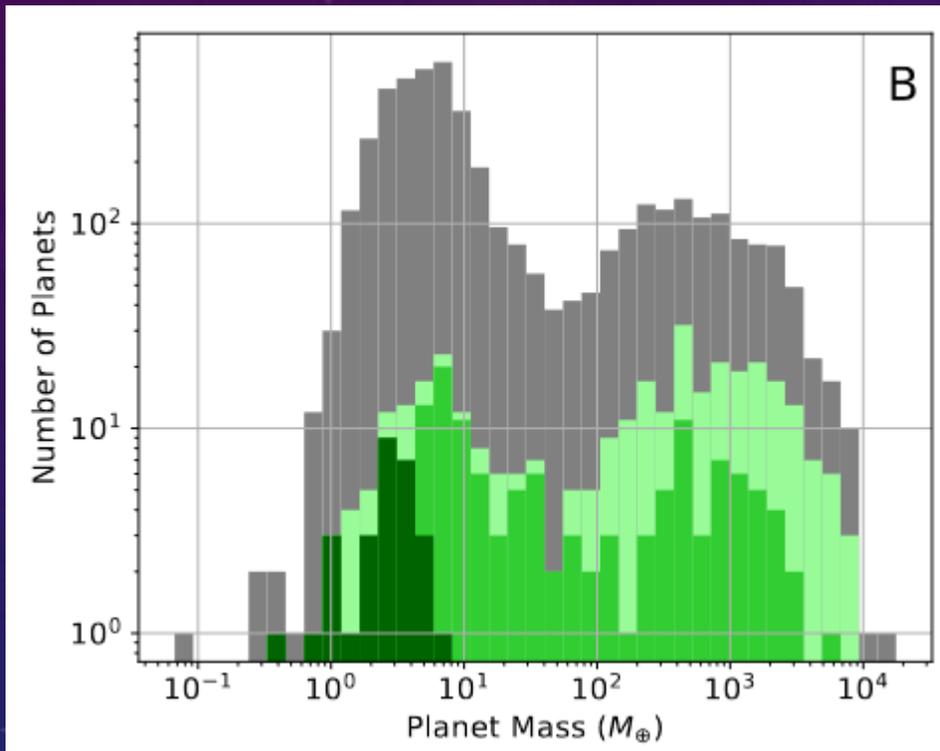
ЗОНА ОБИТАЕМОСТИ

Возможность существования жидкой воды

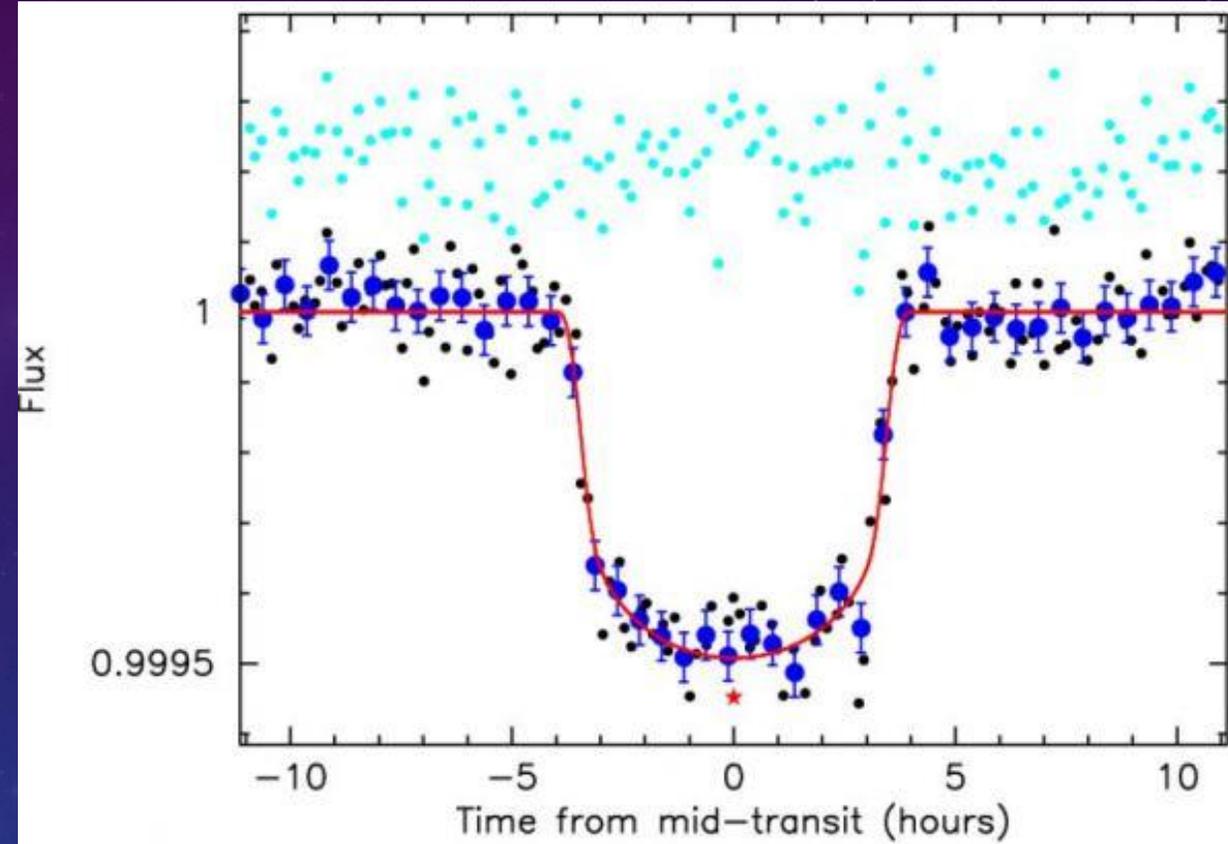
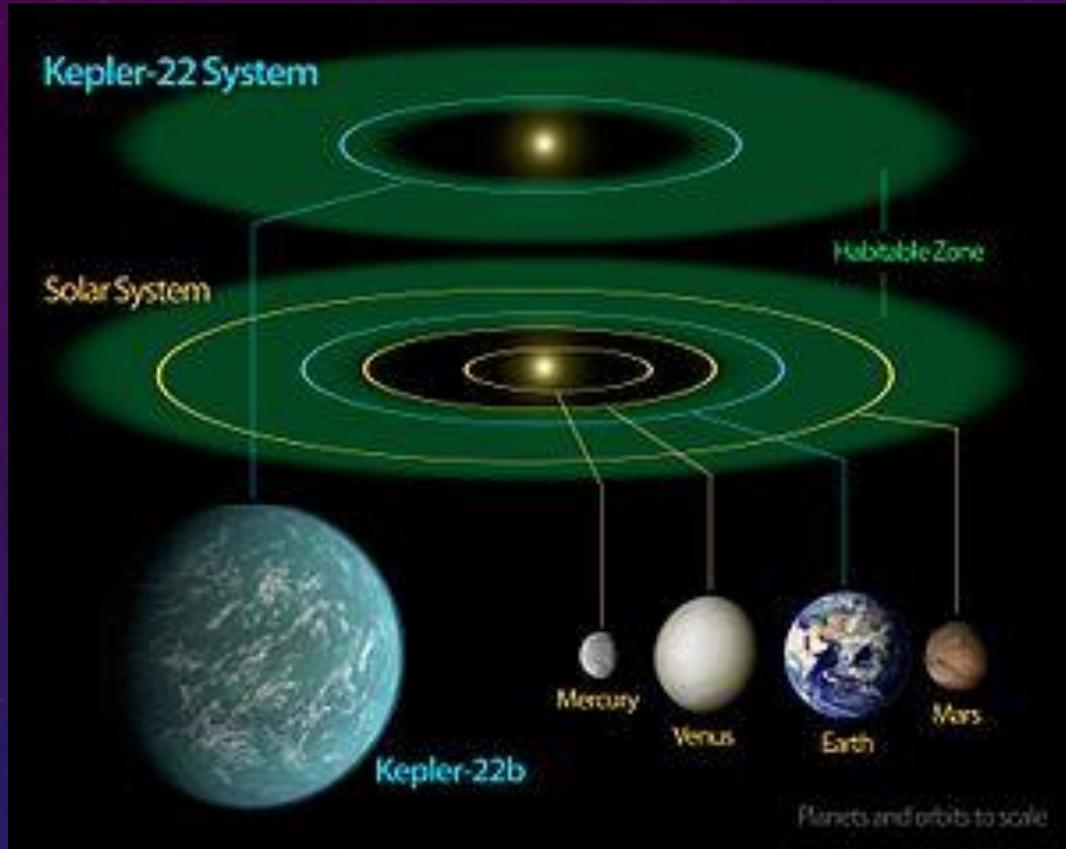


Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

ПЛАНЕТЫ В ЗОНЕ ОБИТАЕМОСТИ



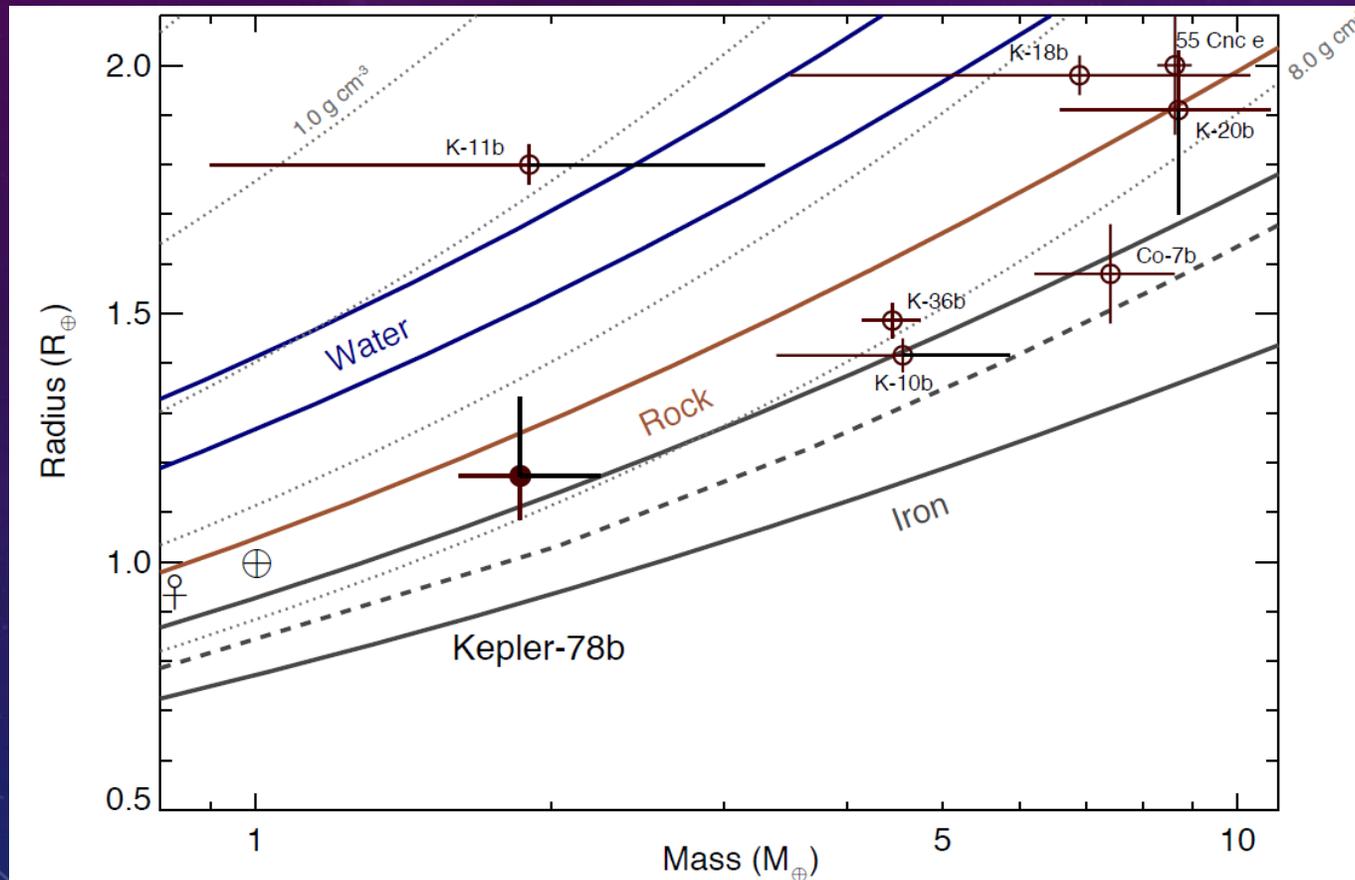
ПЛАНЕТА KEPLER-22B



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:

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

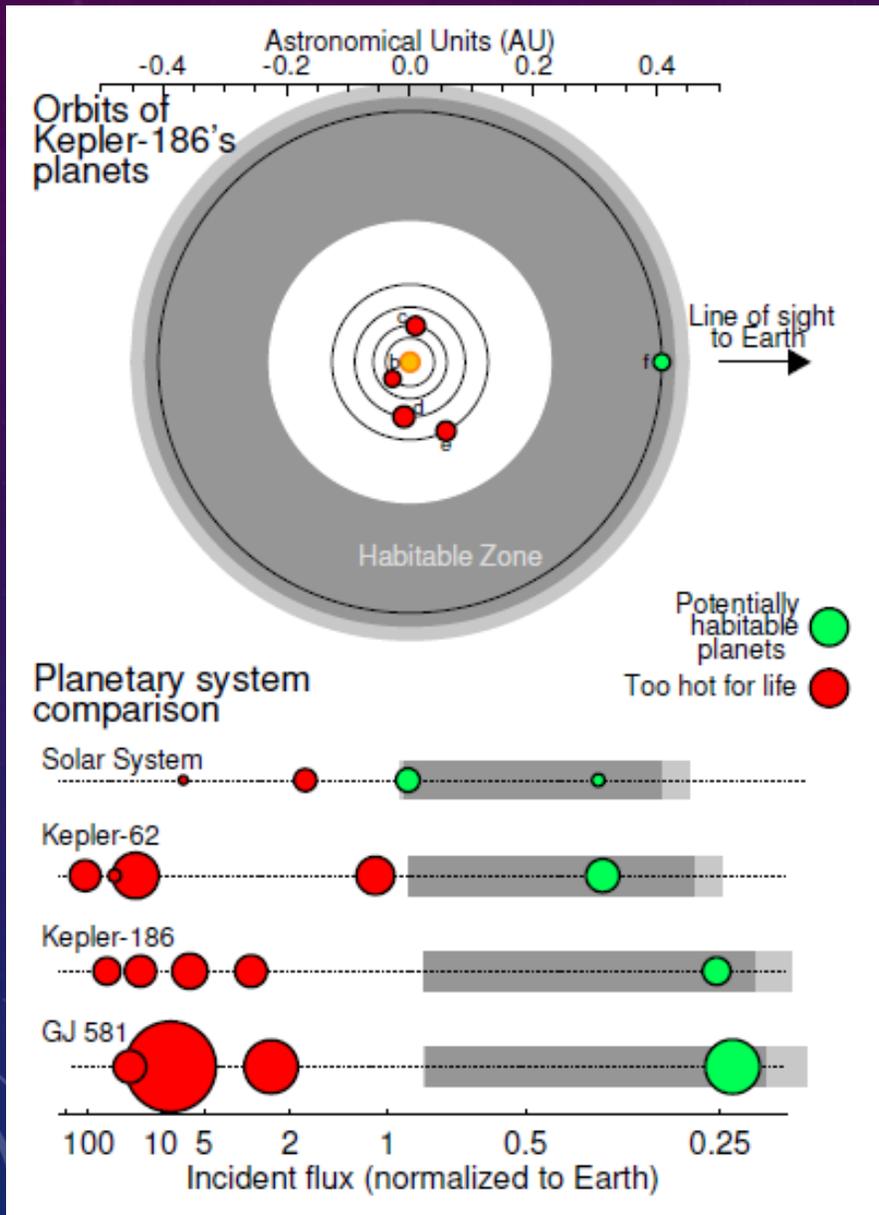
$R \sim 1.16 R_{\text{Earth}}$

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

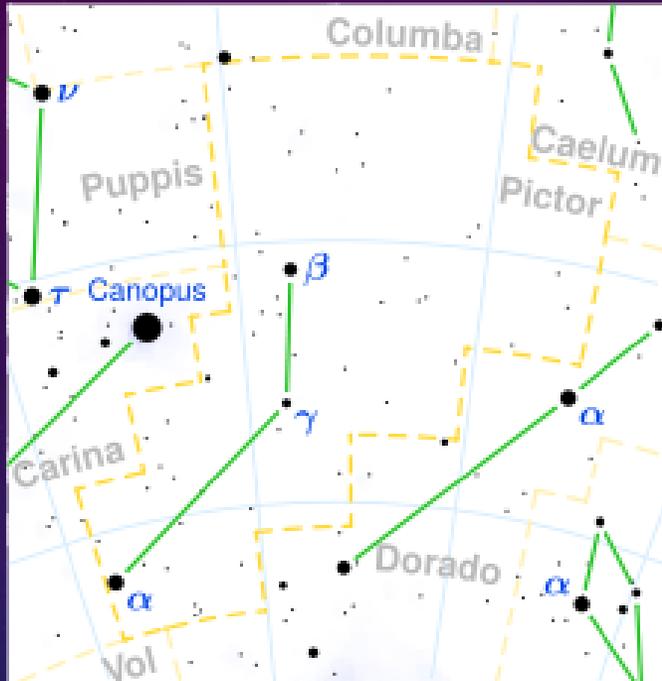


Пять планет вокруг красного карлика.
Все это небольшие планеты.

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

ПЛАНЕТЫ У ЗВЕЗДЫ КАПТЕЙНА

Звезда Каптейна



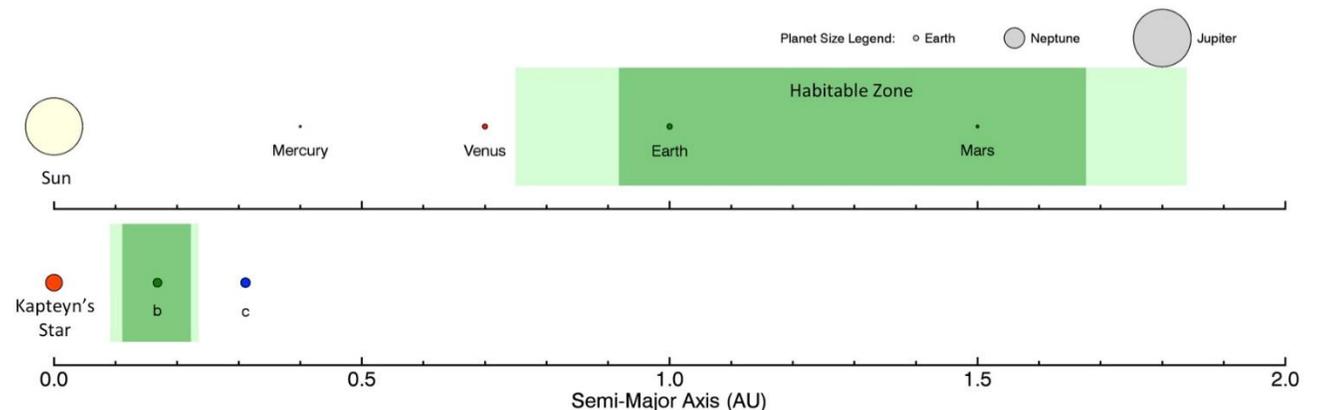
Звезда с очень большим собственным движением (второе место после Барнарда). Это звезда гало, поэтому у нее большая скорость.

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

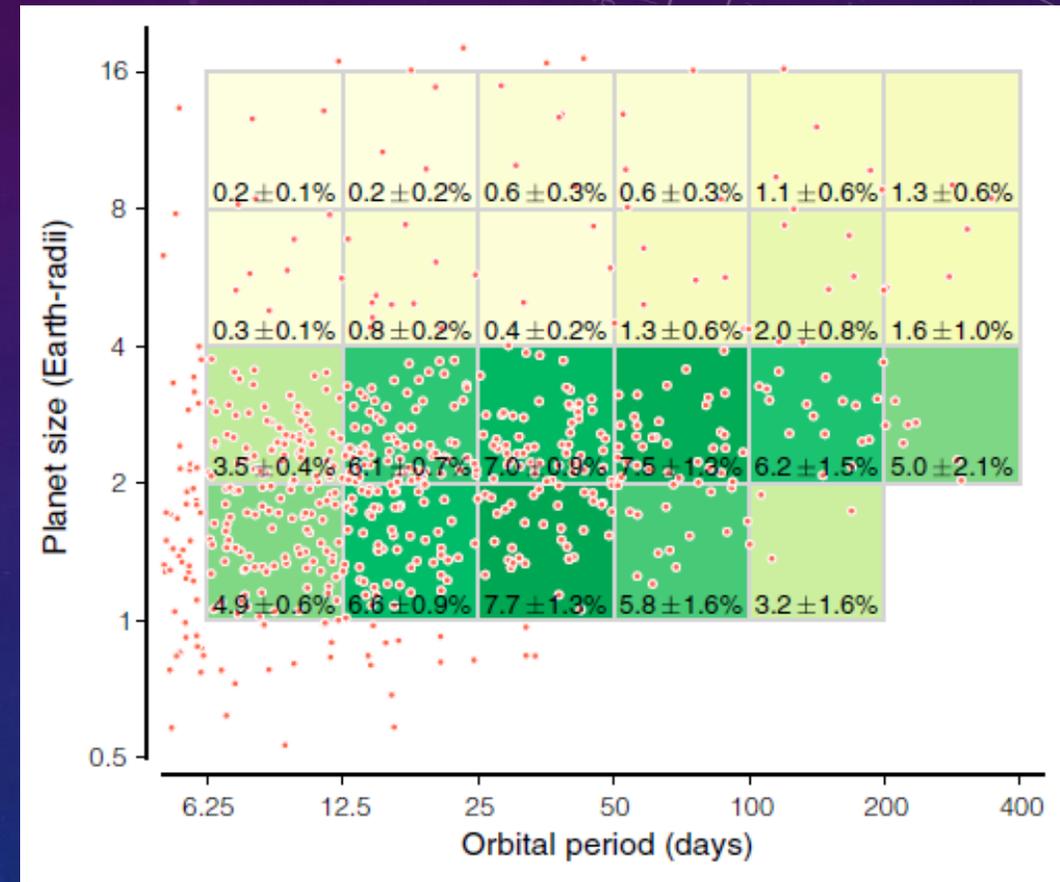
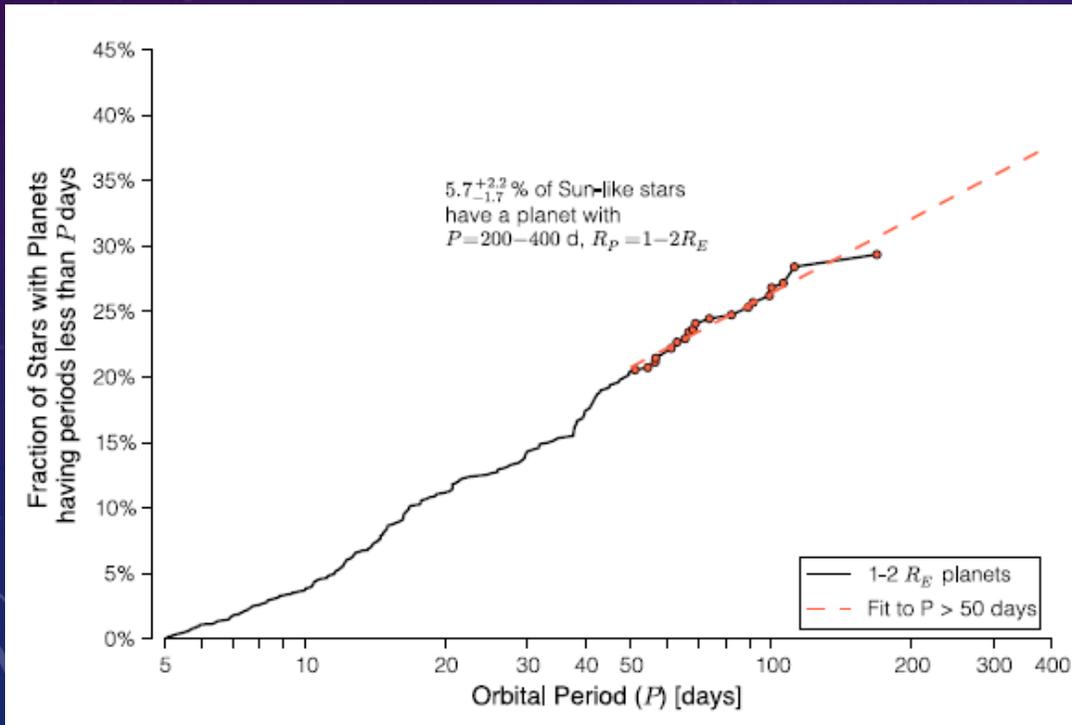


Stars Magnified x10, Planets Magnified x100

Credit: PHL @ UPR Arecibo

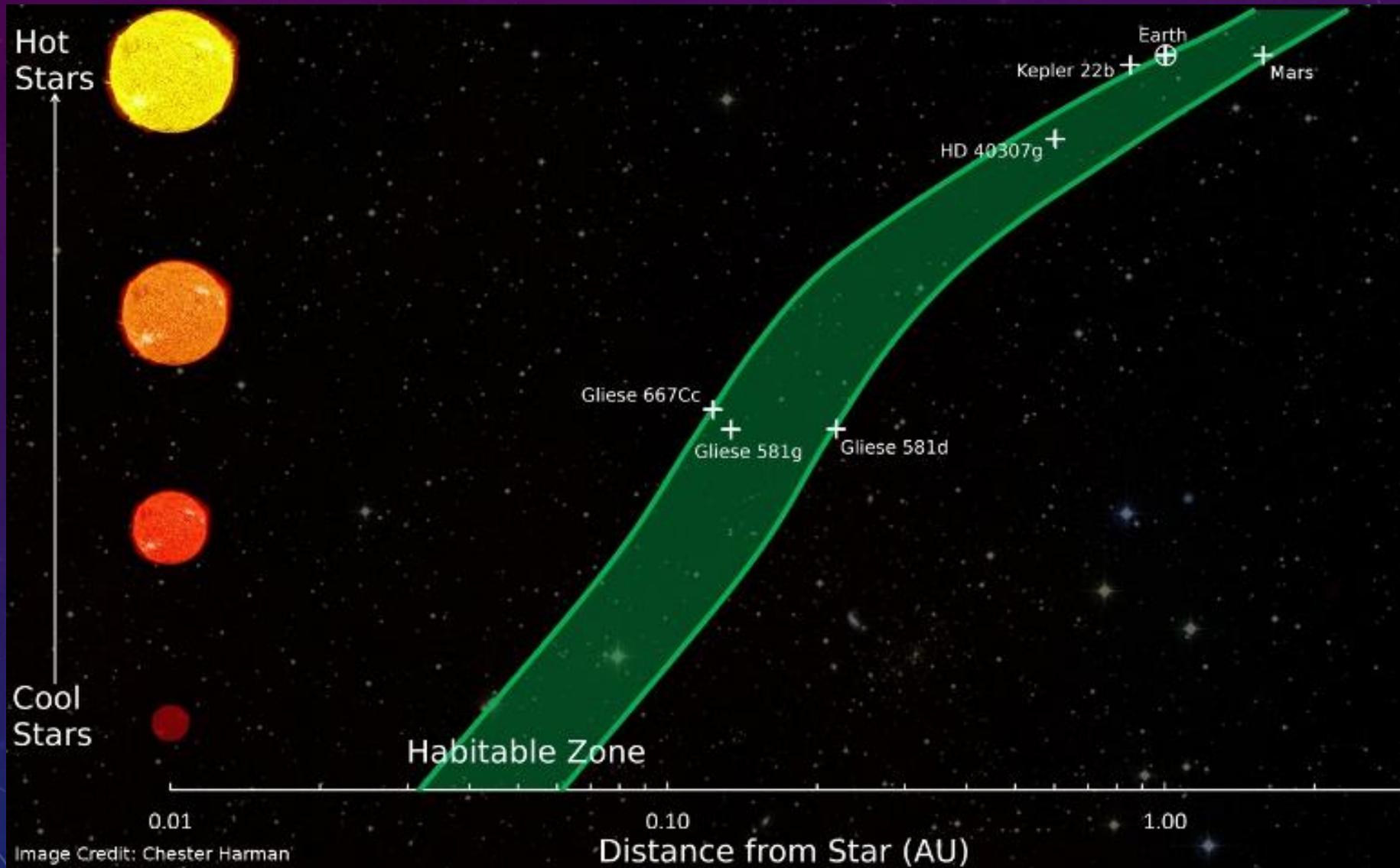
ПЛАНЕТЫ ТИПА ЗЕМЛИ У ЗВЕЗД ТИПА СОЛНЦА

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



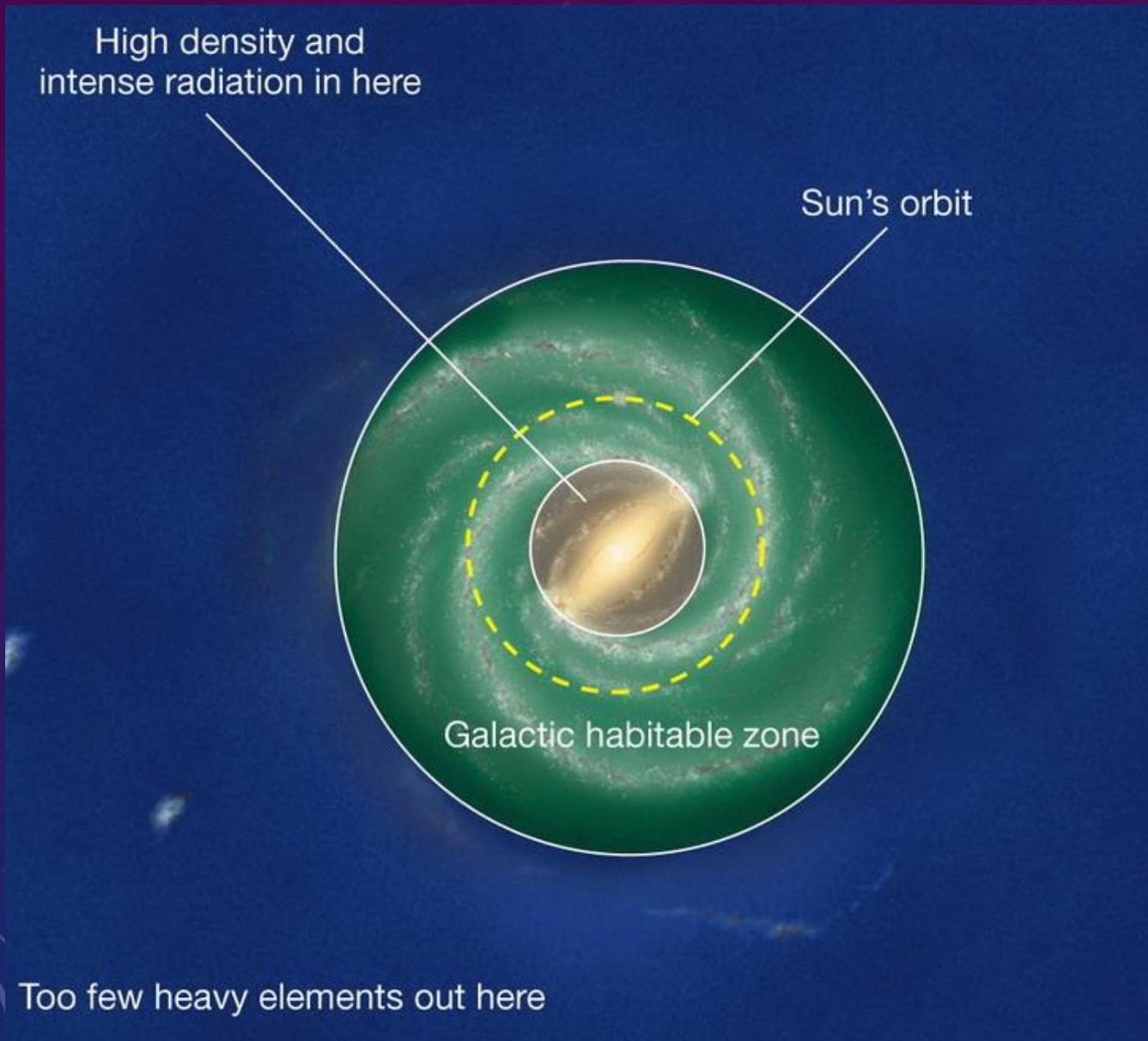
3.5-7.5% звезд типа Солнца имеют планеты типа Земли с орбитальными периодами 200-400 дней.

МАЛЕНЬКИЕ ПЛАНЕТЫ В ЗОНАХ ОБИТАЕМОСТИ



Сейчас известно несколько небольших планет в зонах обитаемости

ГАЛАКТИЧЕСКАЯ ЗОНА ОБИТАЕМОСТИ



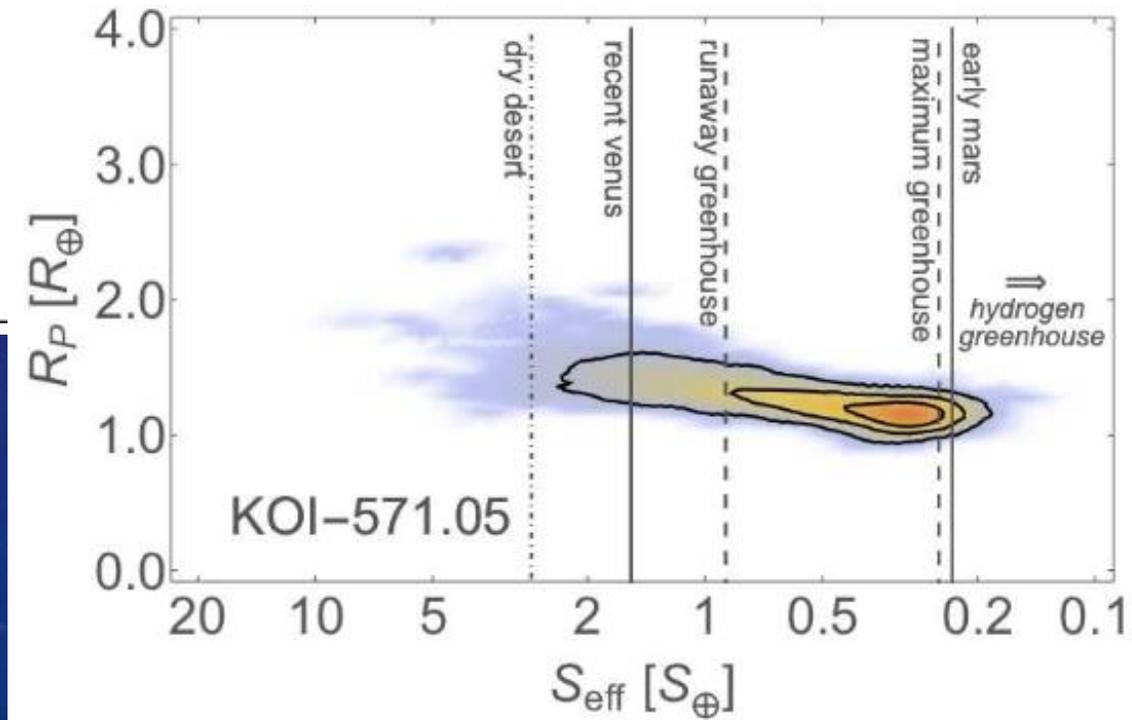
Примерно от 4 до 10 кпк от центра.
Но определение очень нечеткое,
особенно для внешней границы.

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	$3.2^{+7.5}_{-0.4}$	$0.738^{+0.033}_{-0.029}$	$0.706^{+0.028}_{-0.024}$	$4.614^{+0.016}_{-0.029}$					



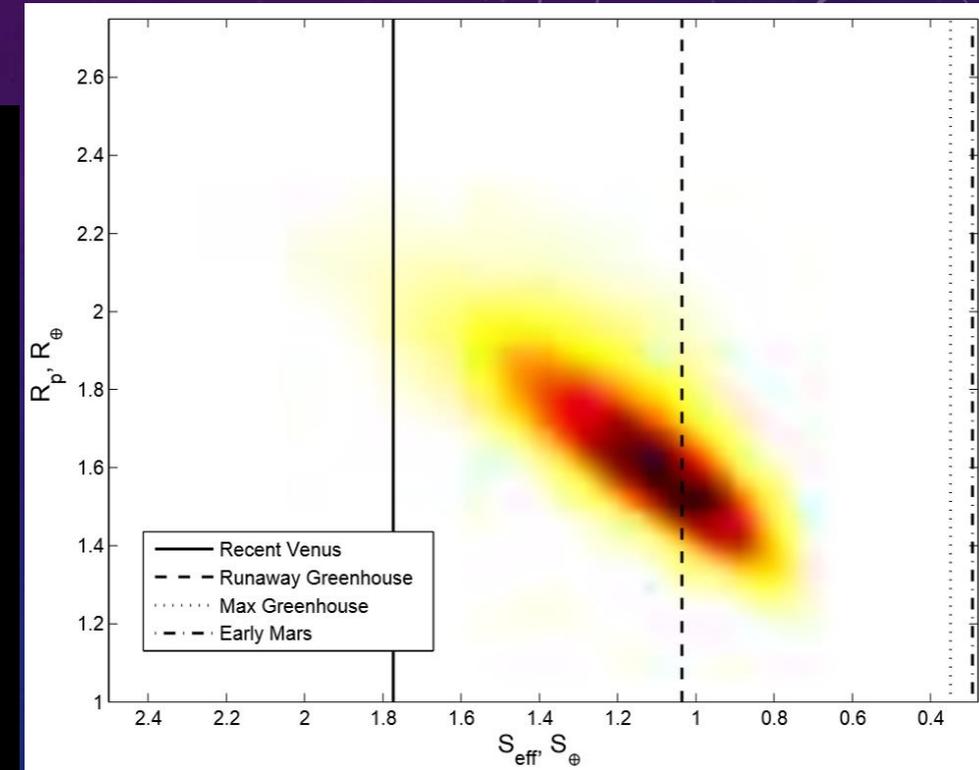
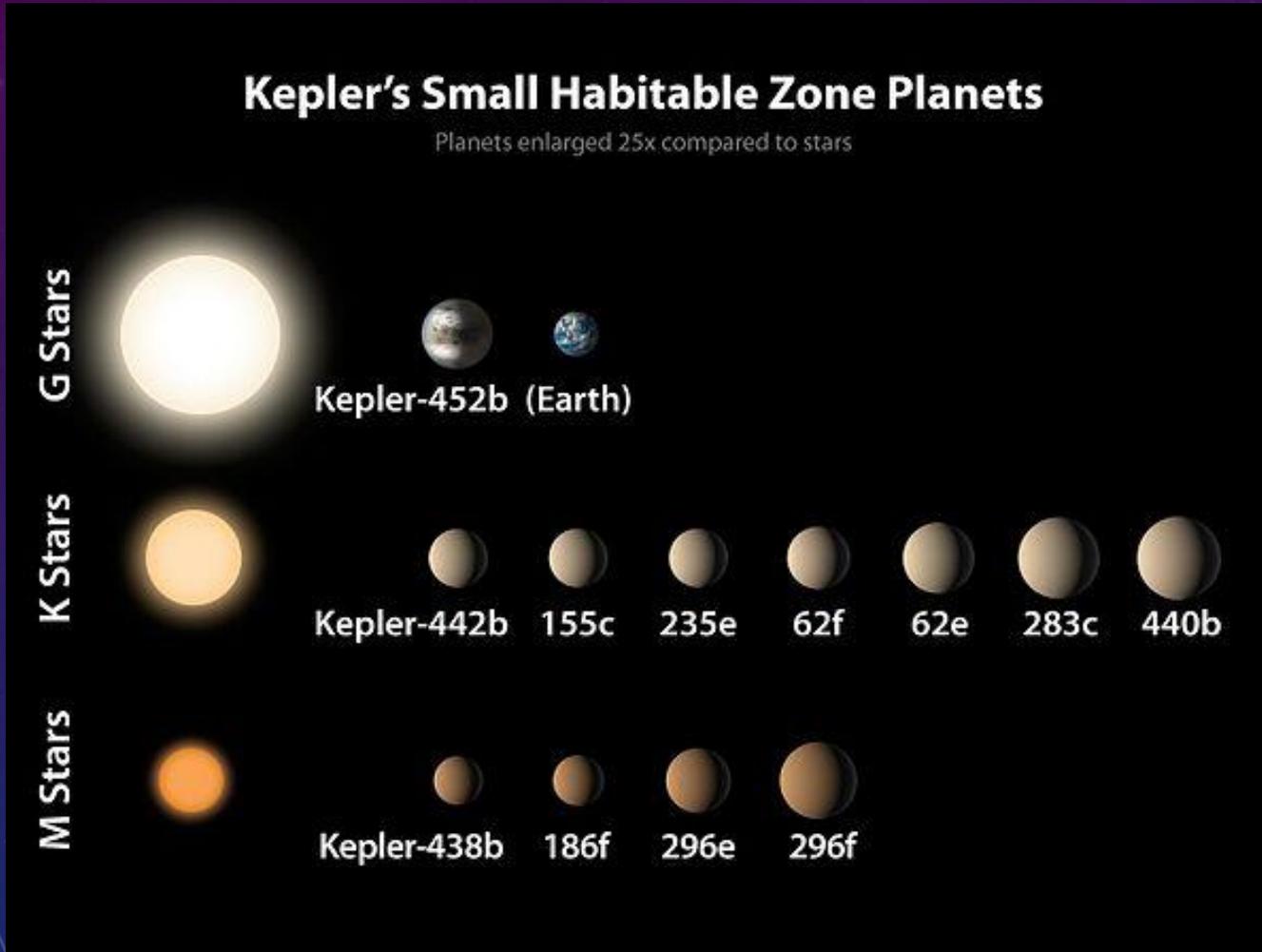
12 планет.
 Все в зонах обитаемости.
 9 достаточно невелики,
 чтобы быть железно-каменными.

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

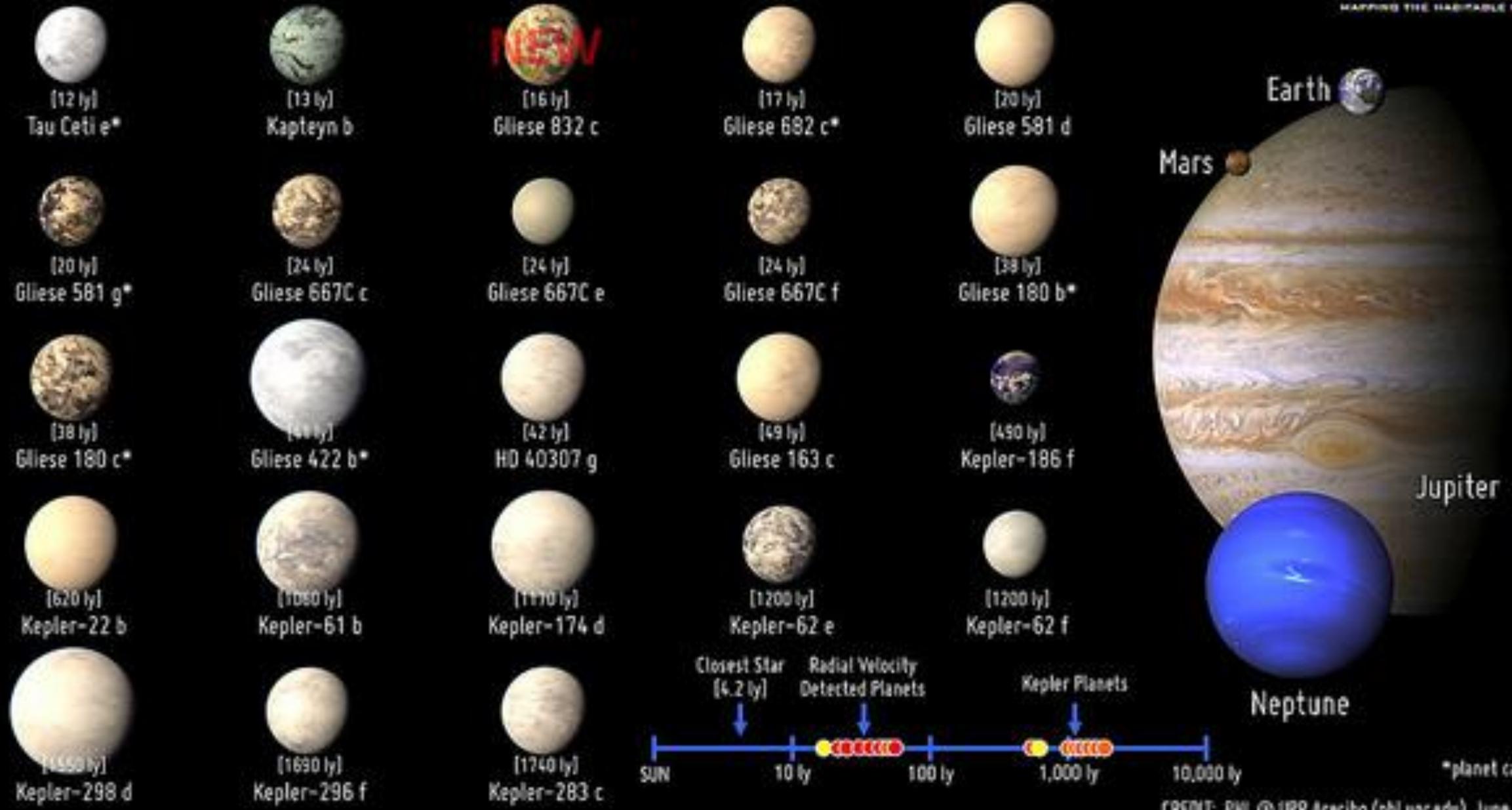


Планета имеет радиус 1.6 земного.
Возраст звезды около 6 млрд. лет.

Current Potentially Habitable Exoplanets



Ranked by Distance from Earth in Light Years (ly)



*planet candidates