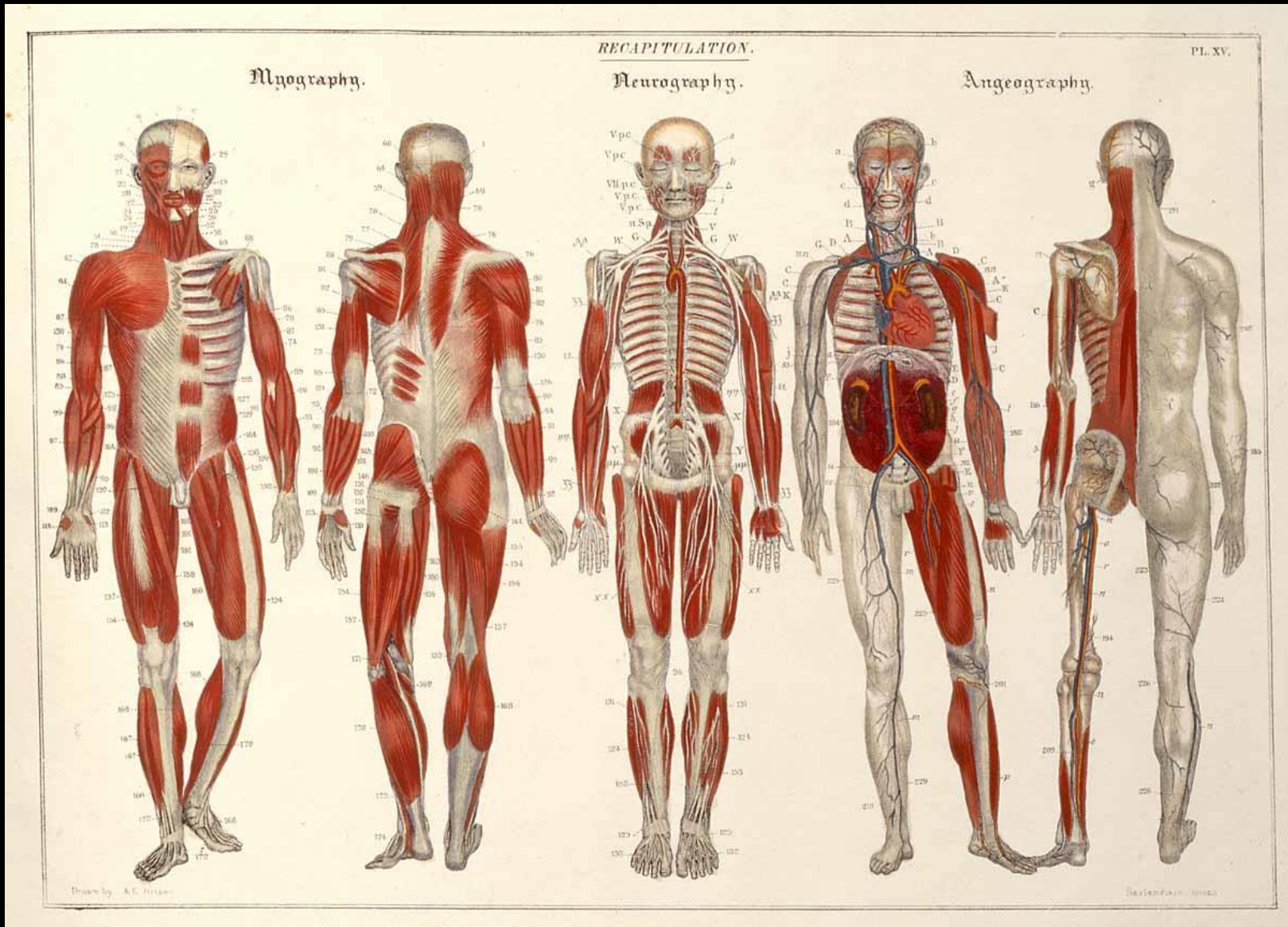


Из чего «сделаны» экзопланеты?

Сергей ПОПОВ
(ГАИШ МГУ)

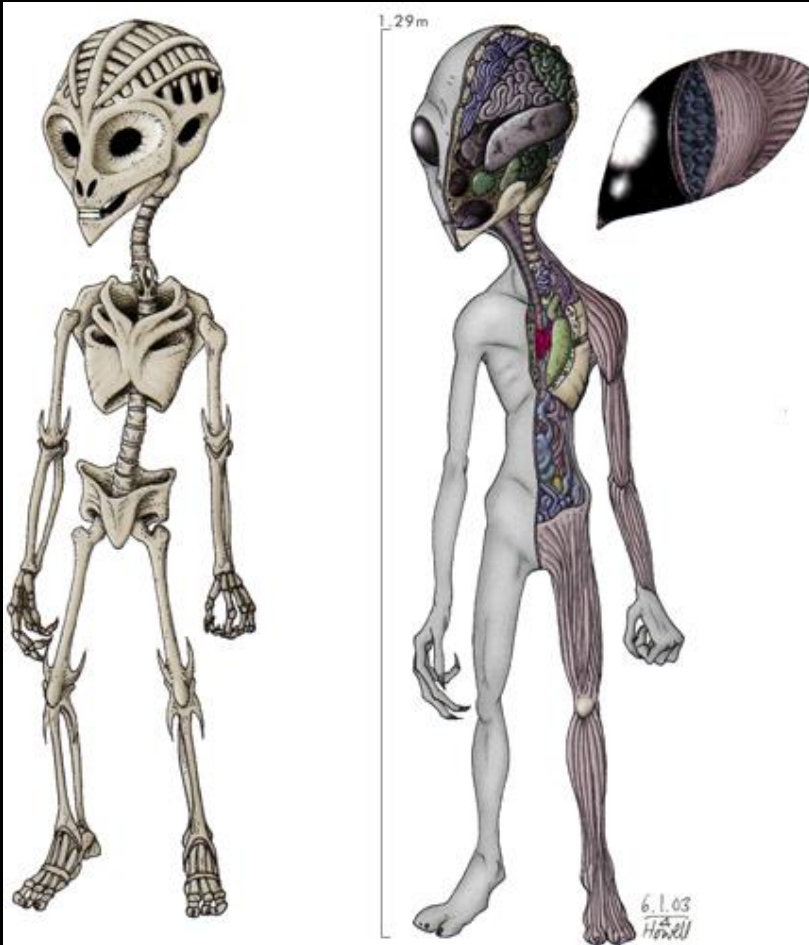


Анатомия планет



Анатомия других планет

<http://www.infoastronomy.co.vu/2013/02/alien-ada-di-bumi-mereka-adalah-kita.html>



Экзопланеты, в отличие от инопланетян, точно существуют. Это облегчает задачу. Тем не менее

Наши знания об экзопланетах достаточно ограничены.

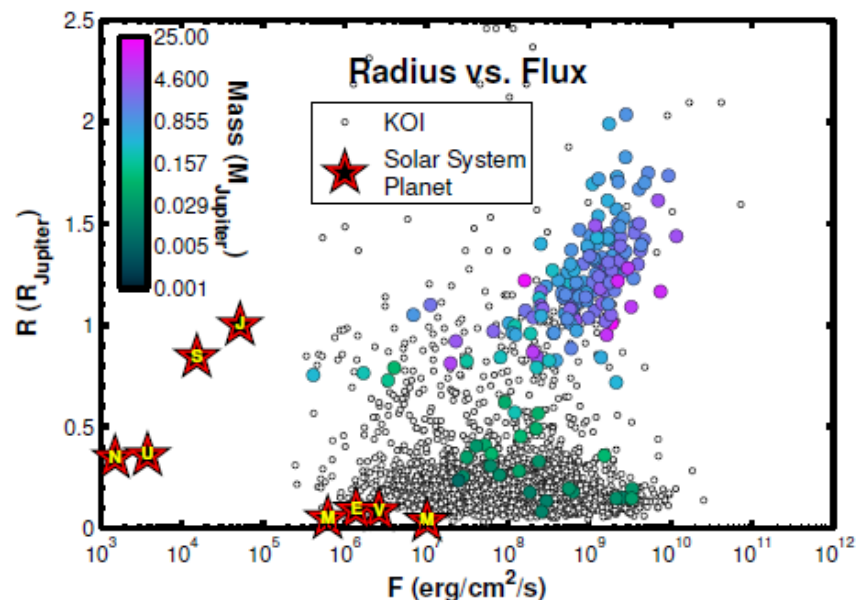
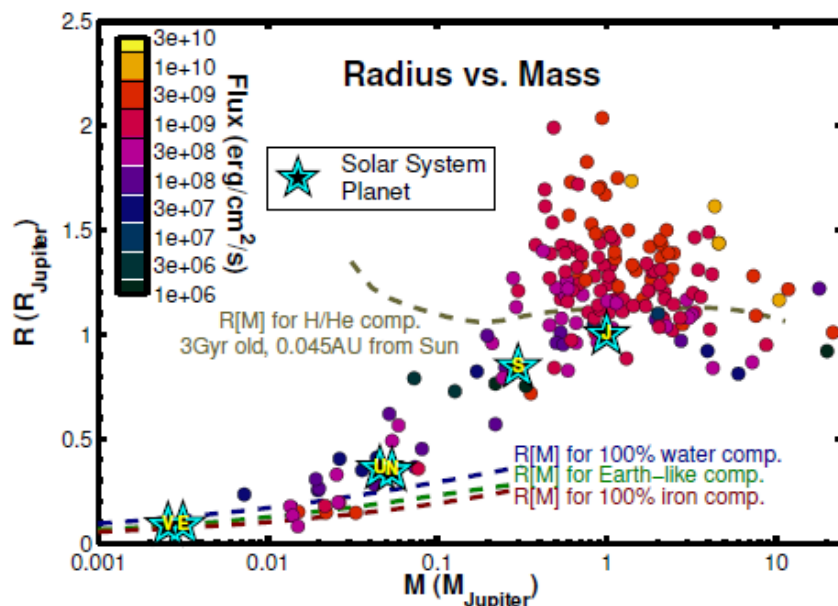
Мы можем измерять:

- массы
- радиусы
- орбитальные периоды
- параметры звезды (отсюда – возраст)

В редких случаях также есть данные об:

- атмосфере
- скорости вращения

Размеры планет

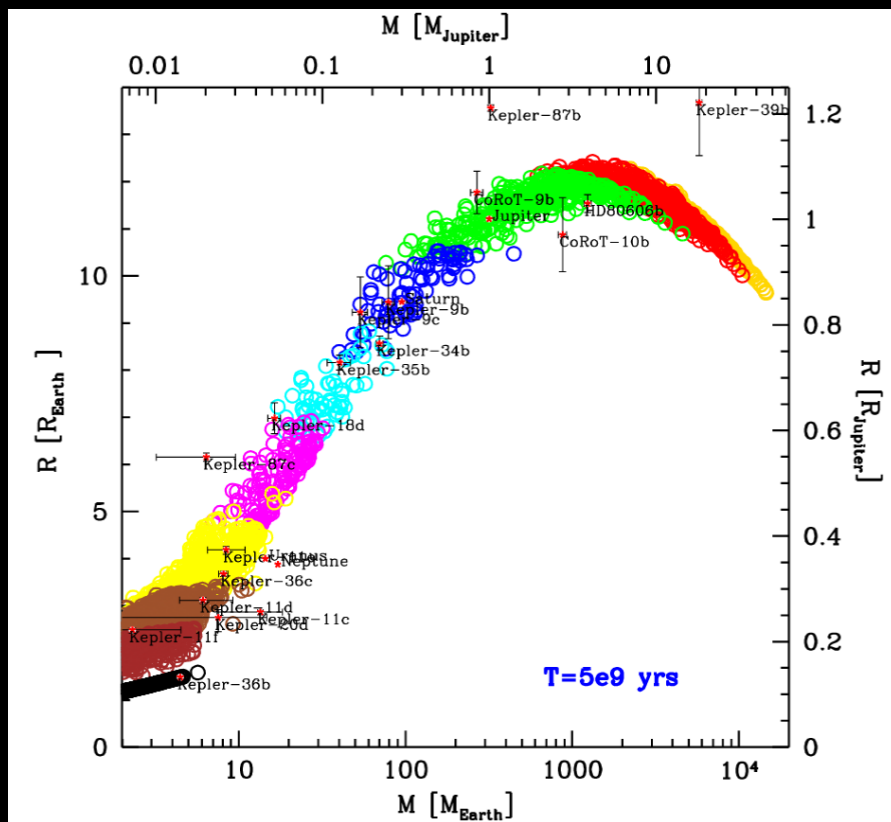


В принципе, по данным о массе и радиусе можно делать некоторые выводы о составе экзопланет. Хотя, как правило, будет несколько вариантов.

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

- возраста
- близости к звезде

Зависимость Масса-Радиус

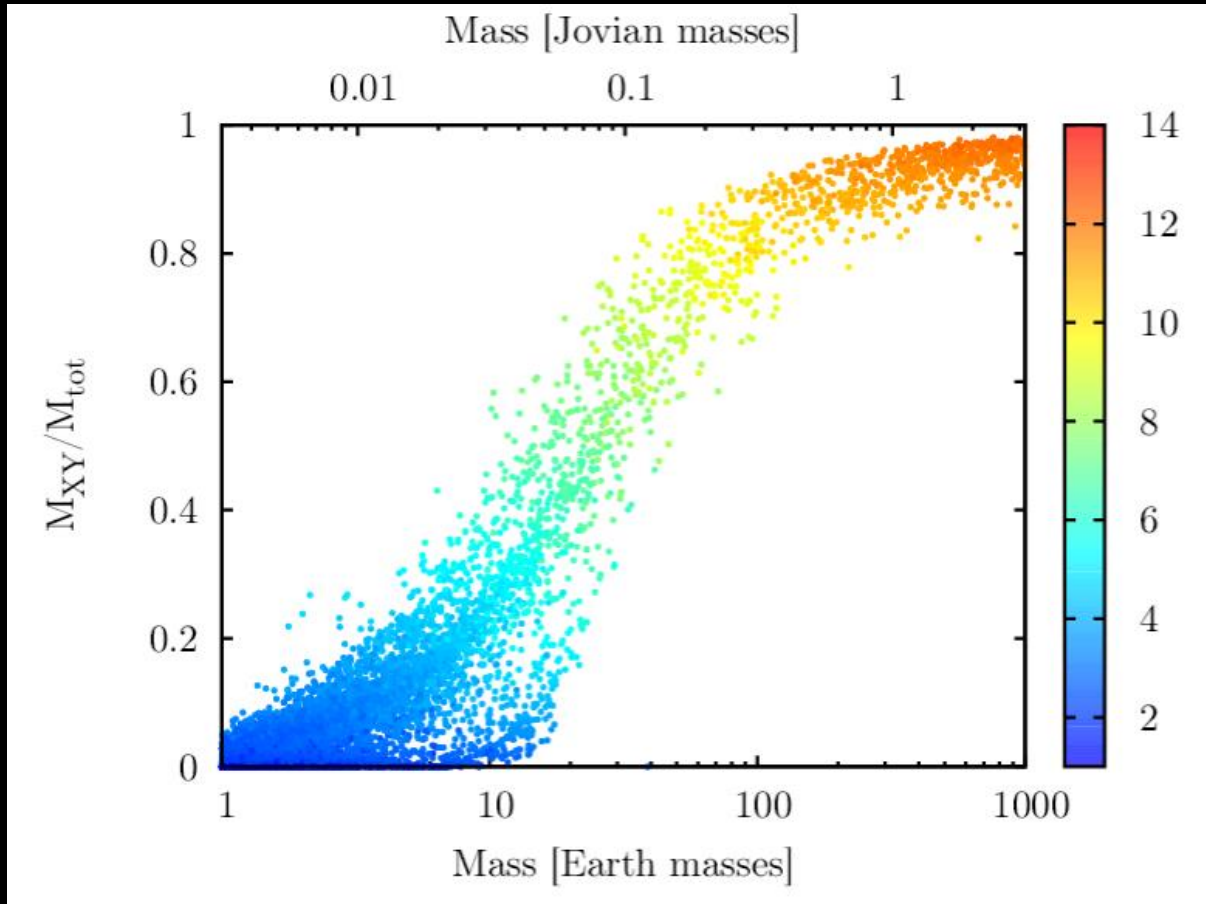


Показаны результаты моделирования и результаты наблюдений.

Цвет кодирует долю легких элементов (водорода и гелия).

Возраст планет — 5 млрд лет.

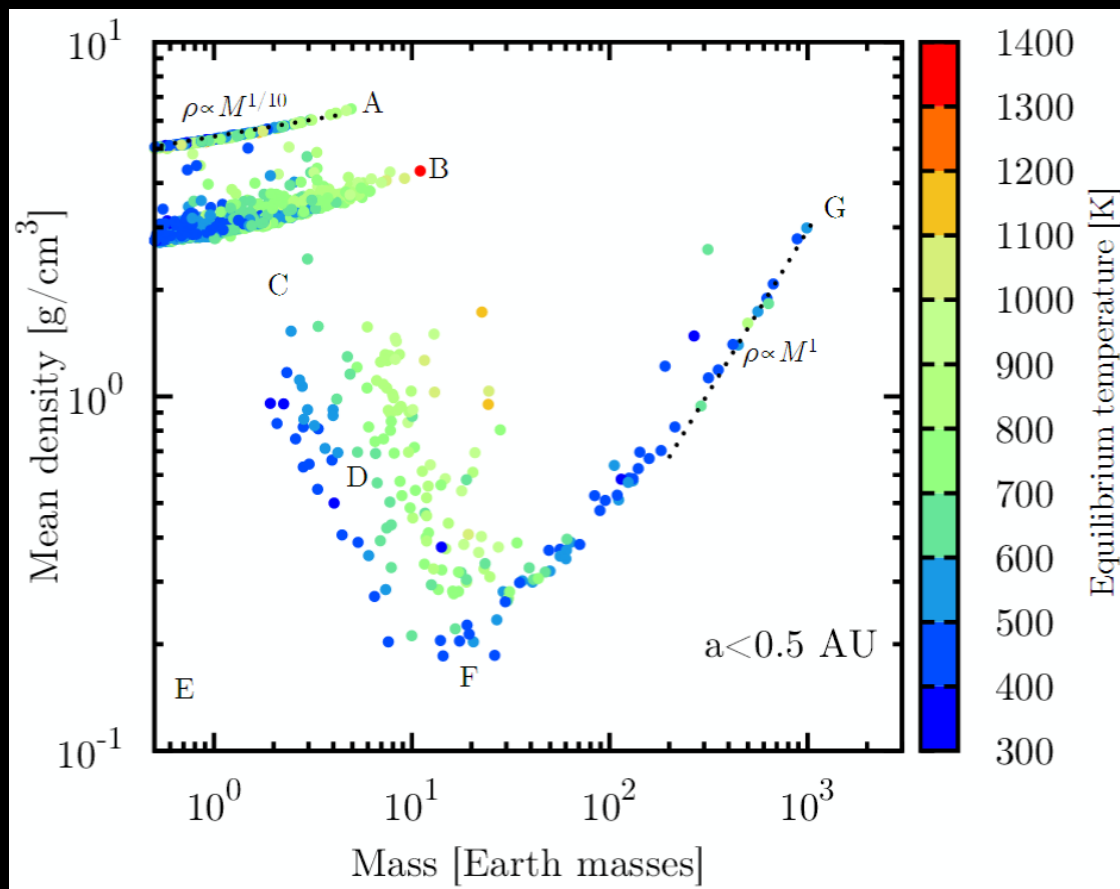
Доля легких элементов в полной массе



Результаты
моделирования.

Смена наклона
на $M=100M_{\text{Earth}}$
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.

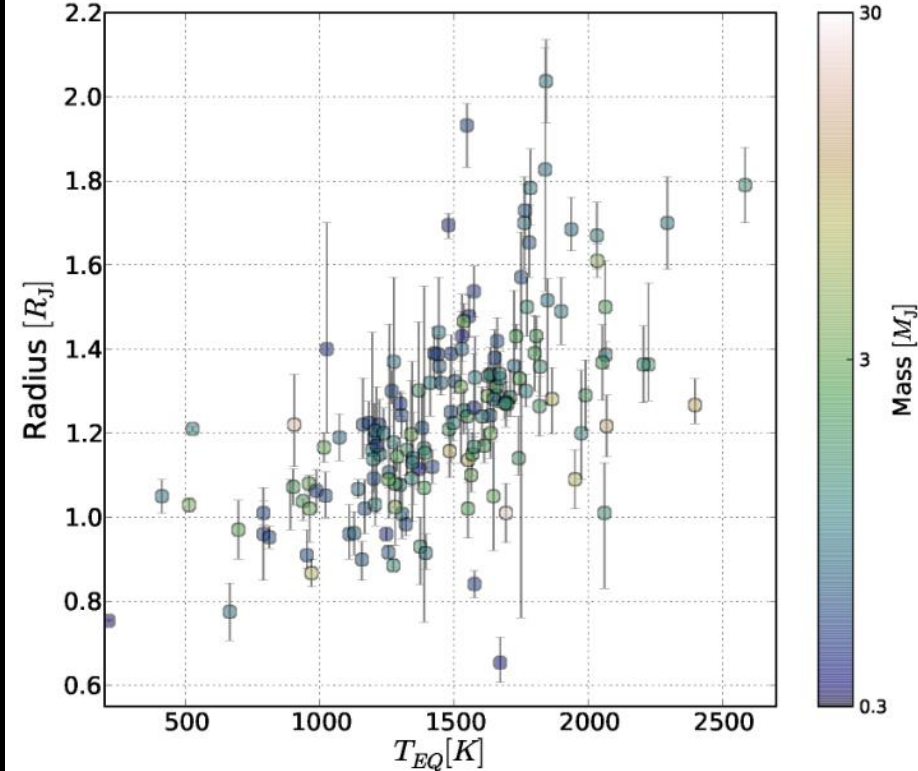
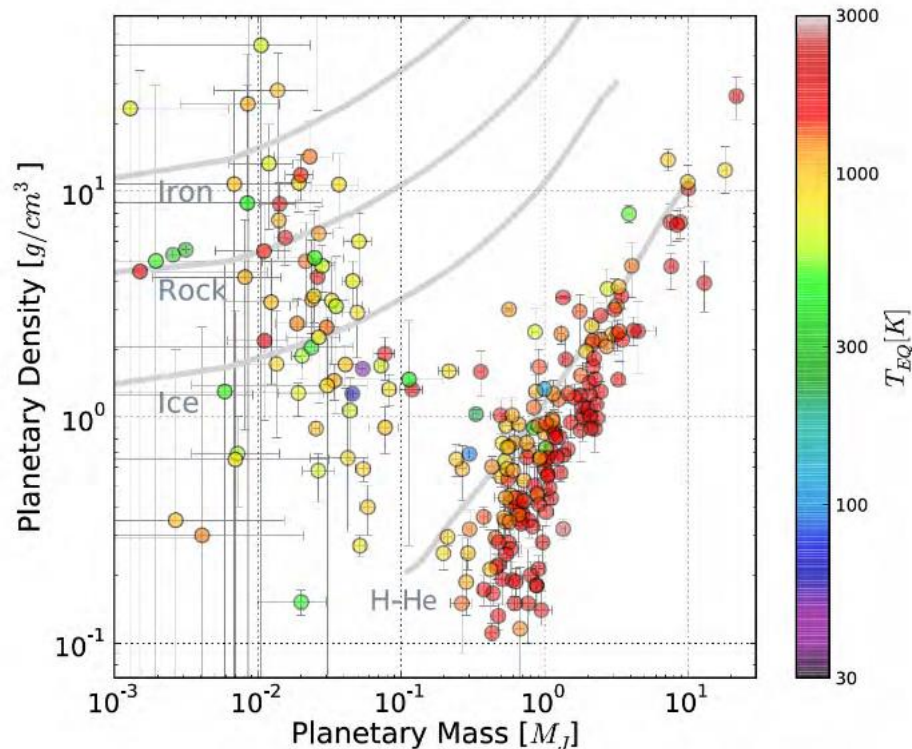
D – маломассивные планеты
с большими ядрами, но
с заметное долей H/He.

E – запрещенная зона (испар.)

F – переход к гигантам.

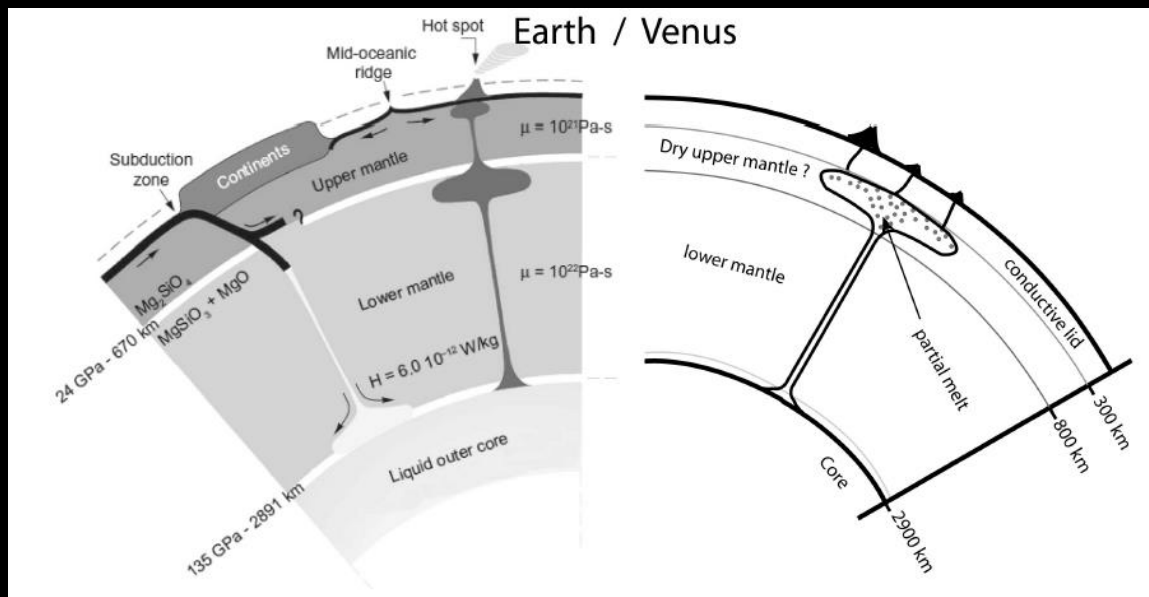
G – планеты-гиганты.

Масса-плотность. Нагрев.

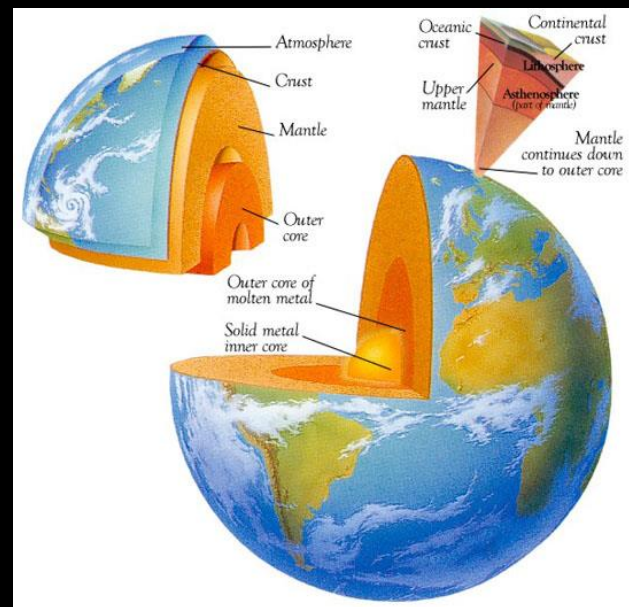


1501.05685

Структура планет



Даже изучая структуру нашей планеты, мы не имеем прямых данных.



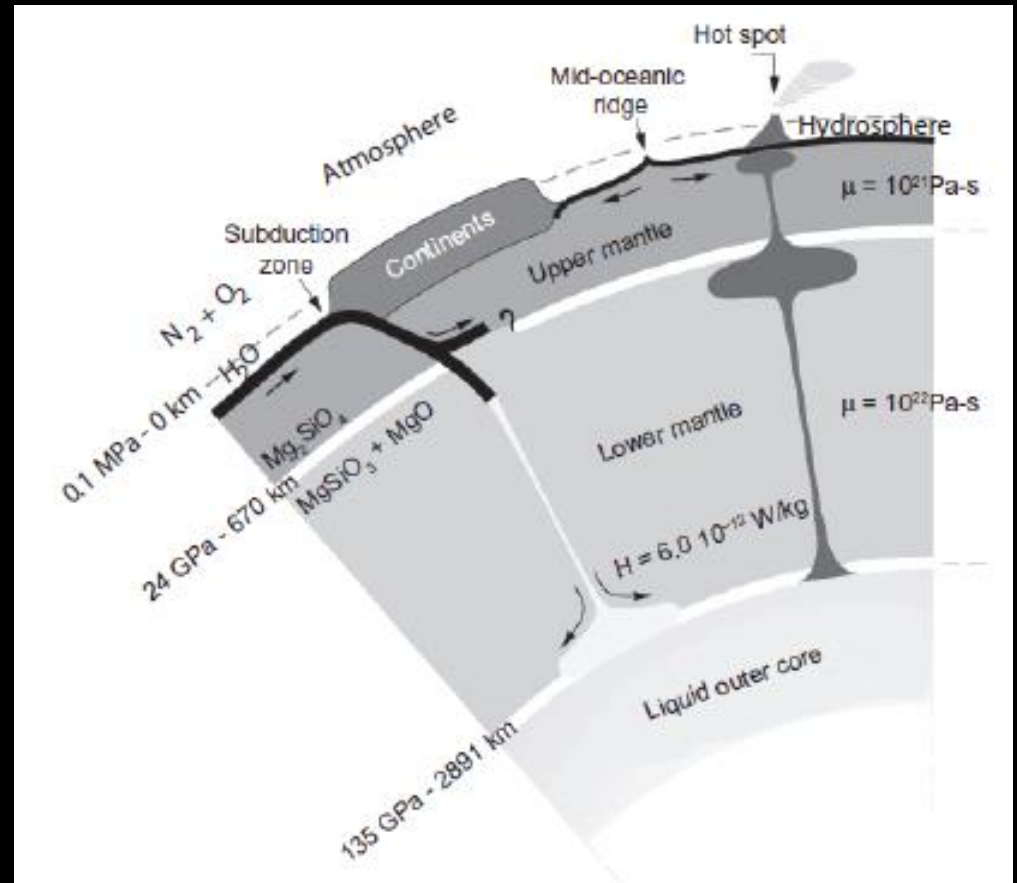
Мы недостаточно хорошо знаем даже Землю.
Дальше идут тела Солнечной системы.
А еще дальше – экзопланеты.

Земля издалека

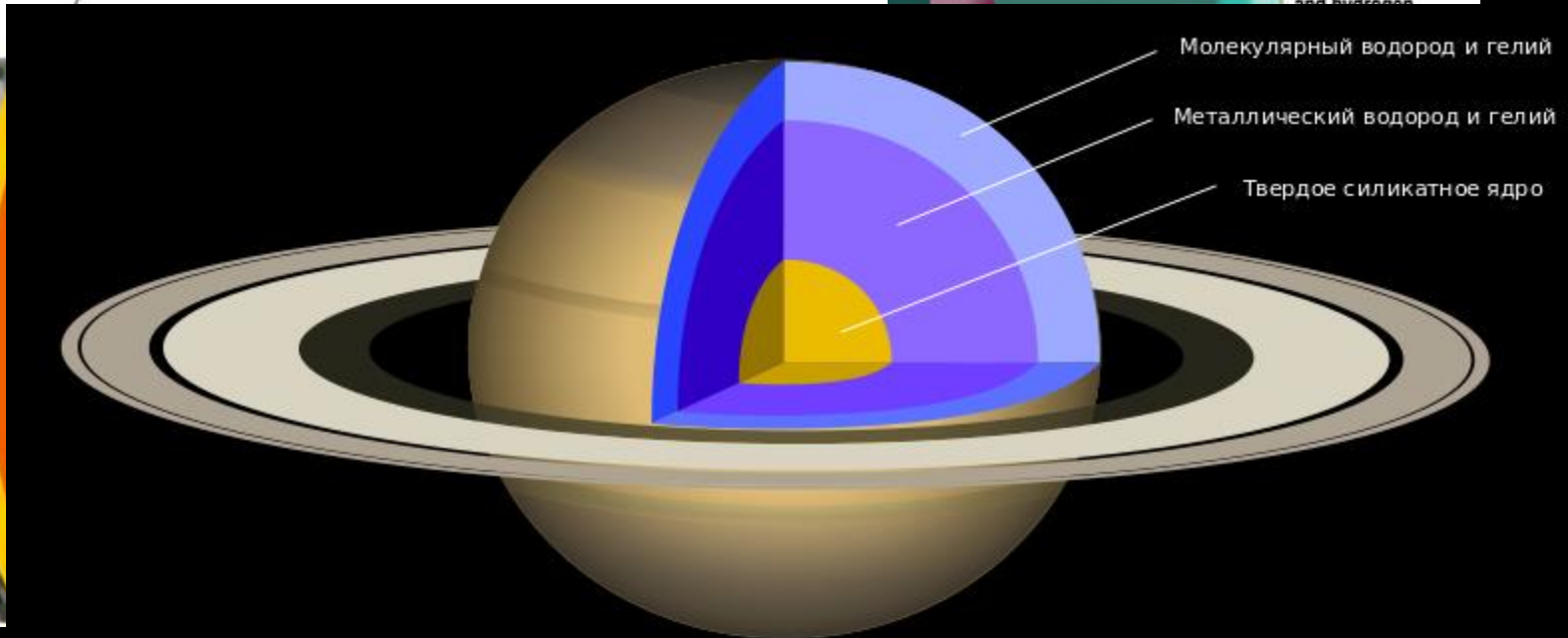
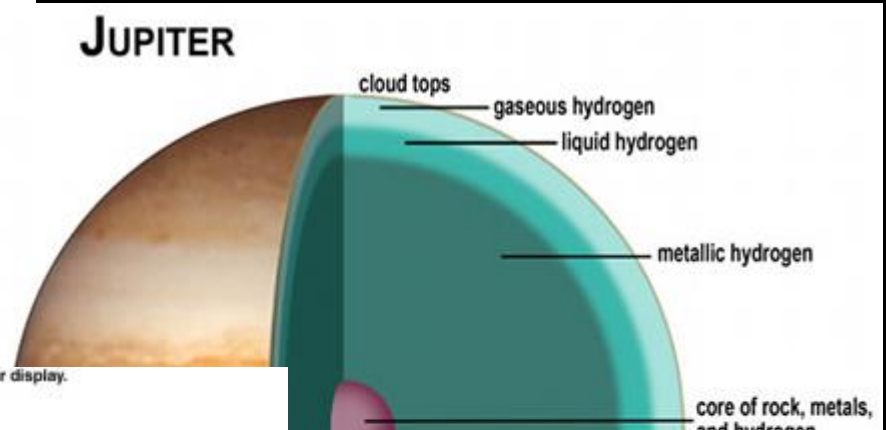
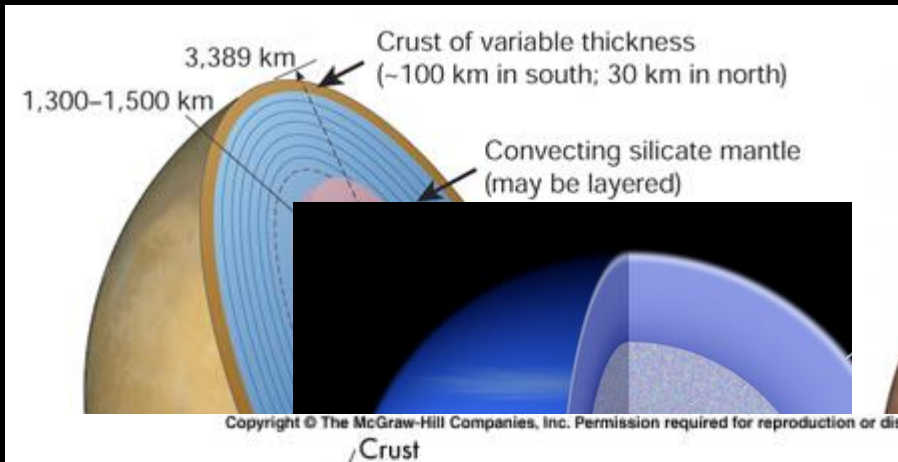
Если бы мы наблюдали Землю, как экзопланету, т.е. у нас были бы данные только по ее массе и радиусу, мы не смогли бы ничего сказать об:

- атмосфере
- гидросфере
- коре

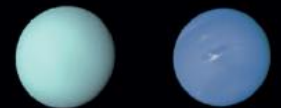
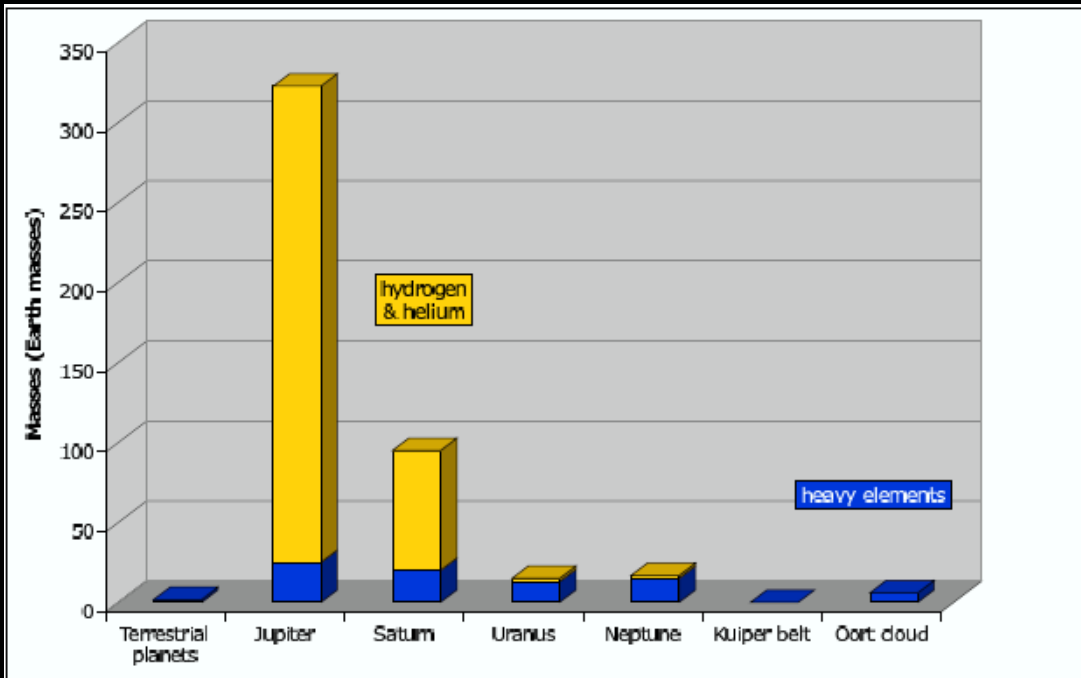
Важно, что все вещества ведут себя по-разному, при сильно изменяющихся давлении и температуре!



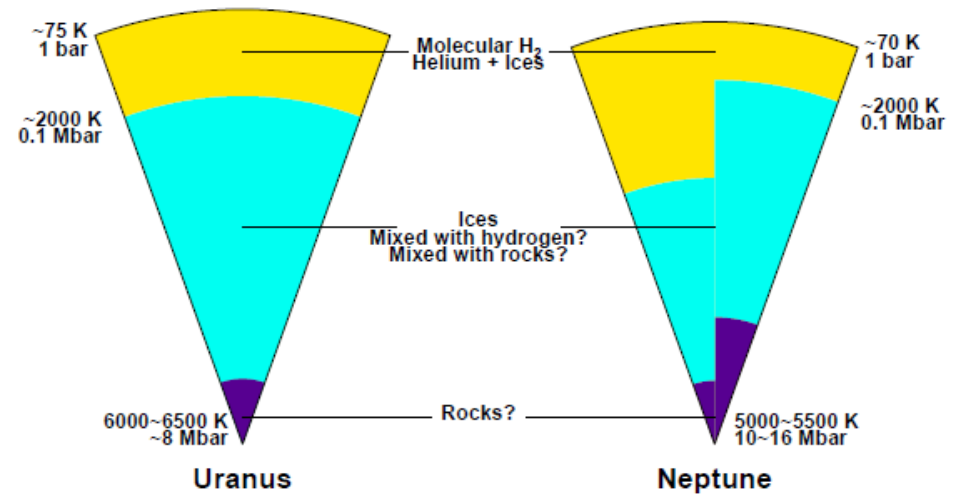
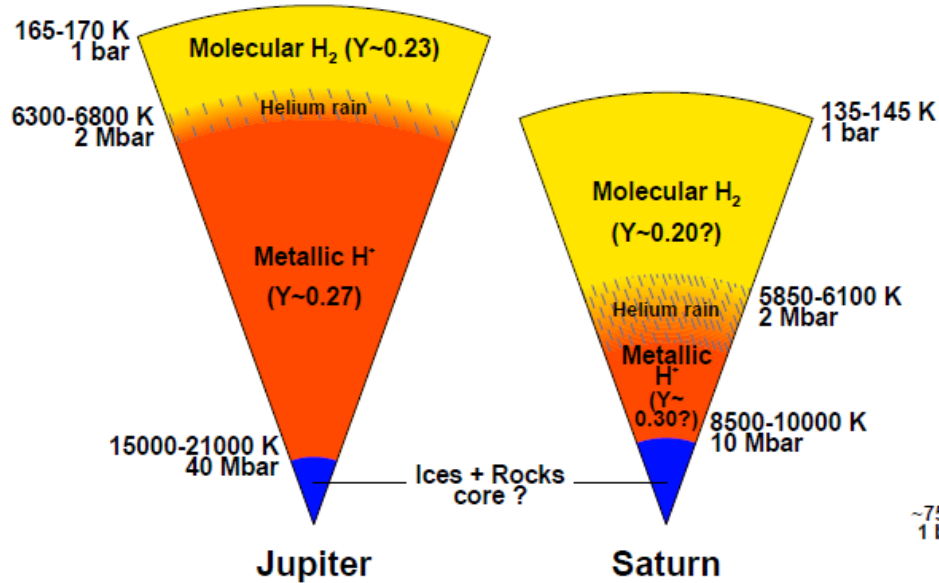
Структура наших планет



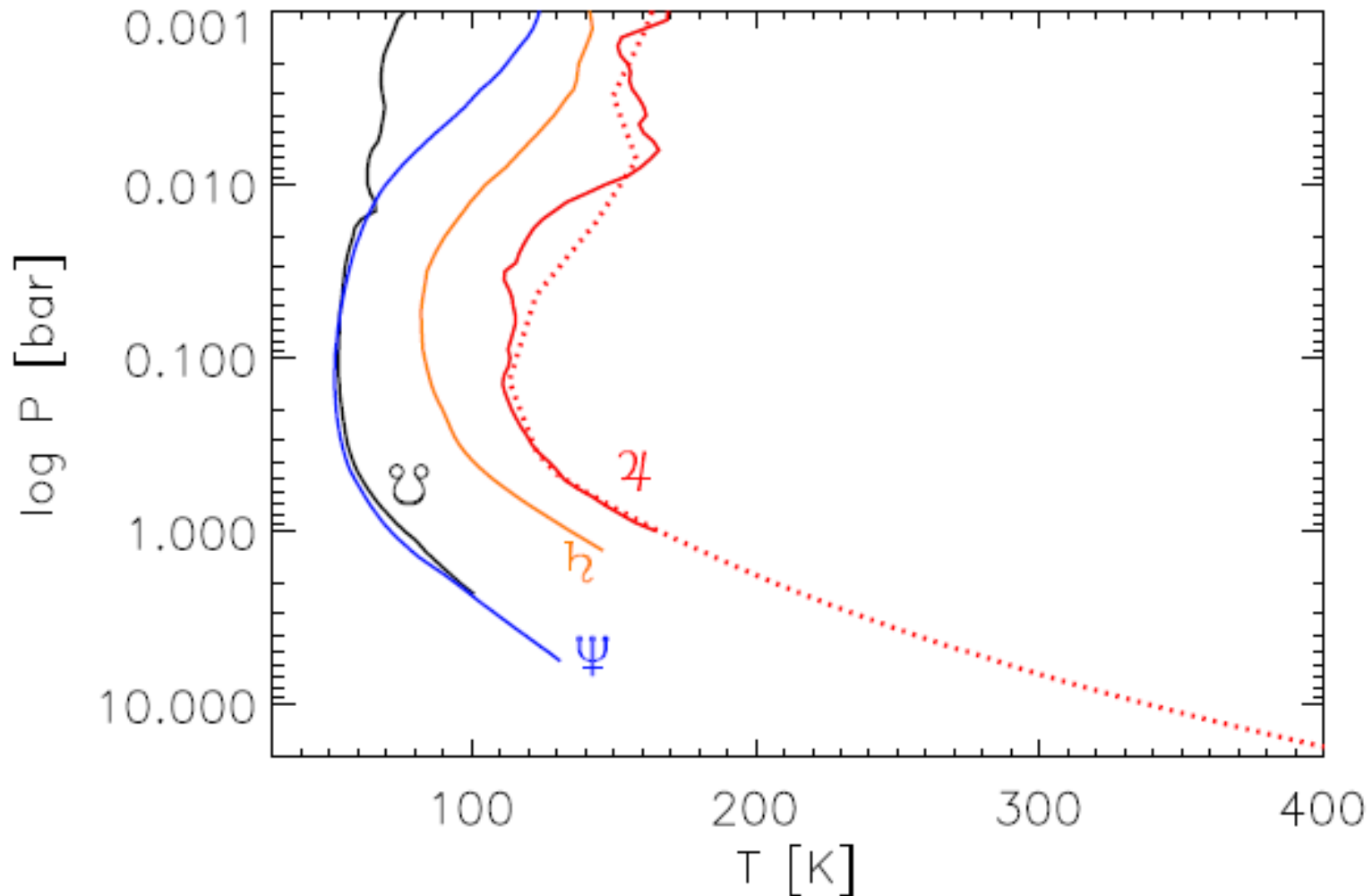
Легкие и тяжелые



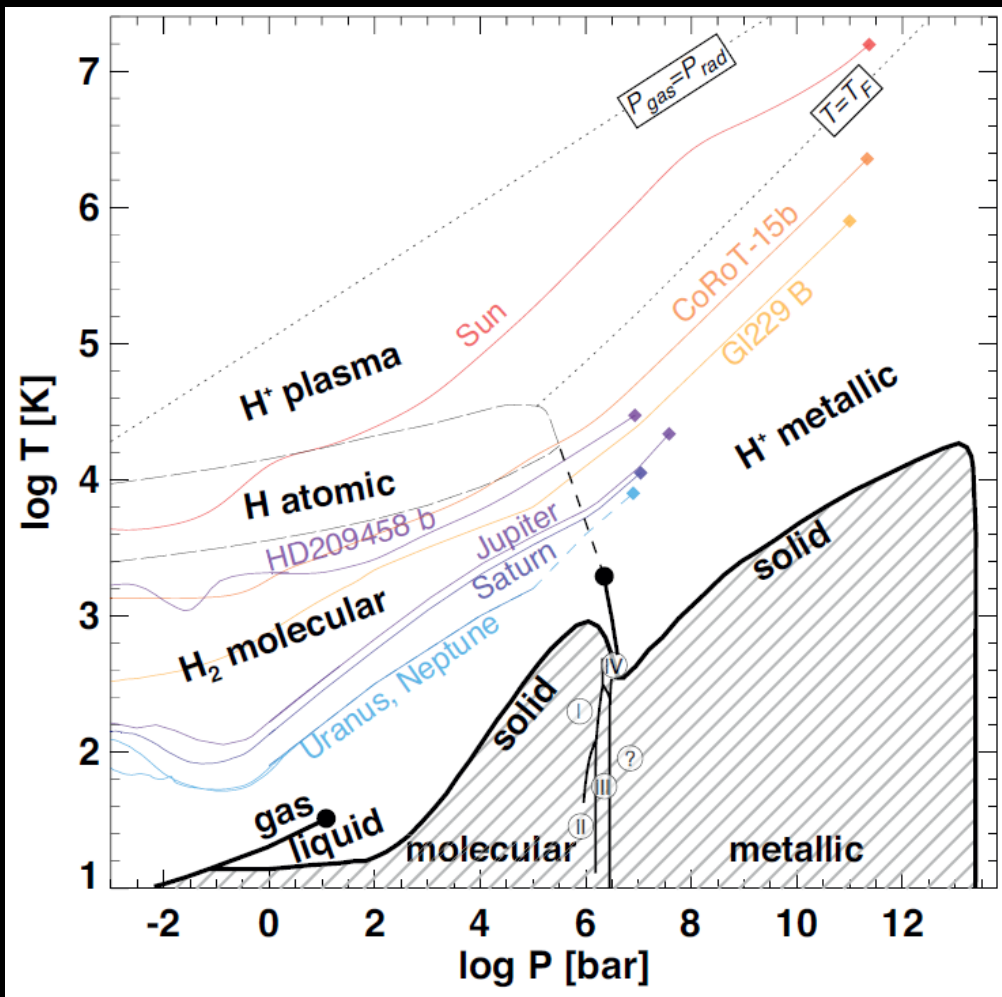
Структура гигантов



Температура и давление в атмосферах гигантов

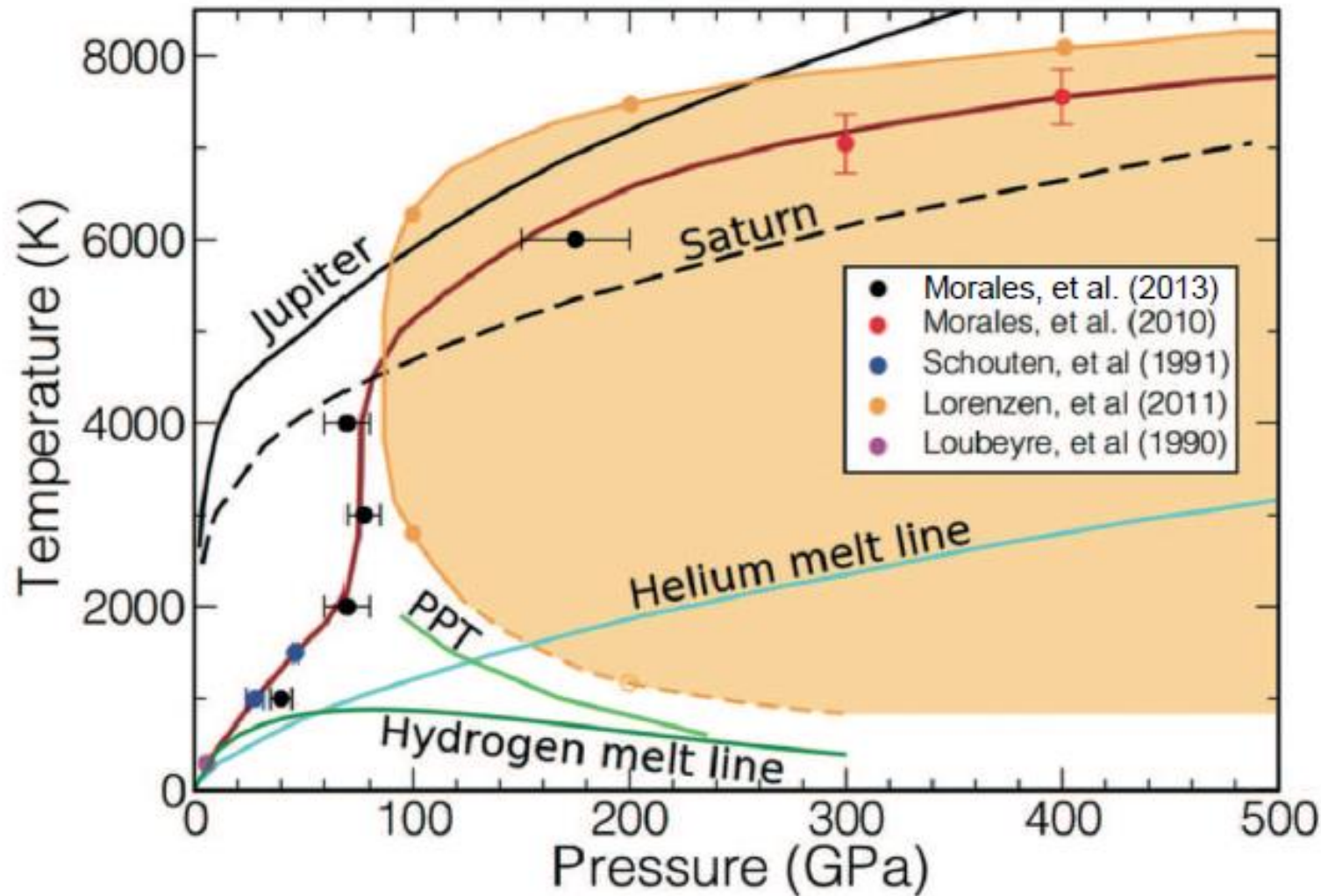


Уравнение состояния водорода

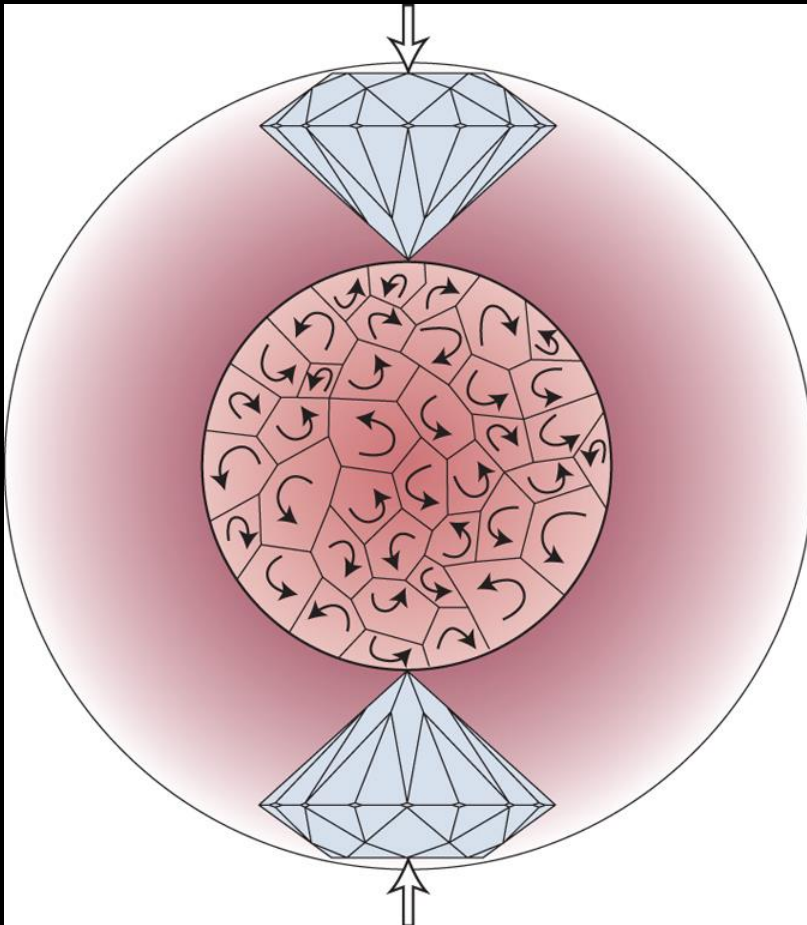


Даже водород – самый простой элемент таблицы Менделеева – имеет очень сложное поведение в разных условиях. Некоторые режимы изучены нами довольно плохо.

Смесь водорода и гелия

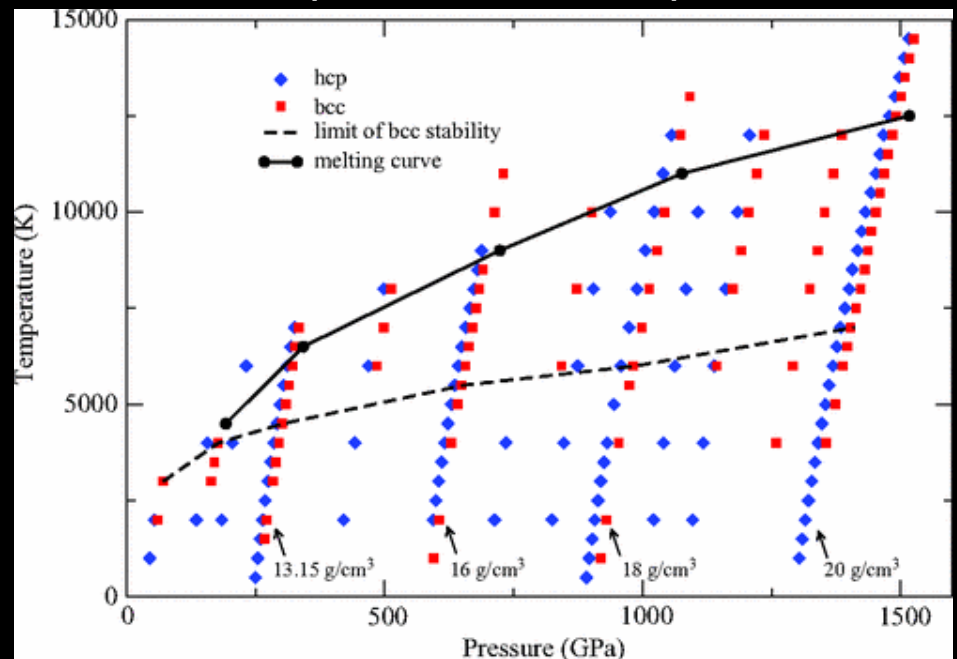


Уравнение состояния



Merkel (2013)

В лабораторных экспериментах уравнение состояния изучают, сжимая вещество в алмазных ячейках. Но пока достичь высоких плотностей и температур не получается. На помощь приходит моделирование.



Bouchet et al. (2013)

Алмазные наковальни

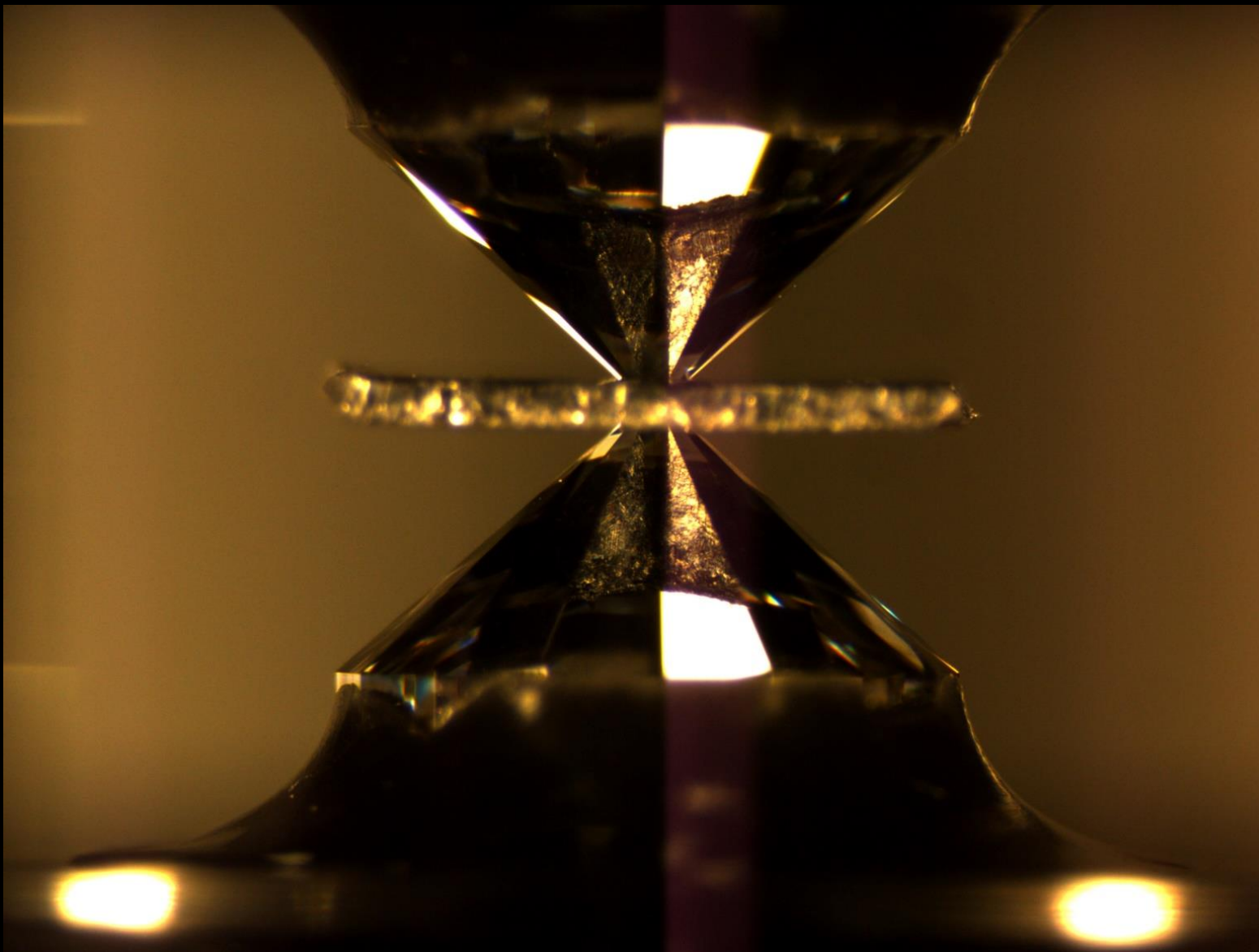
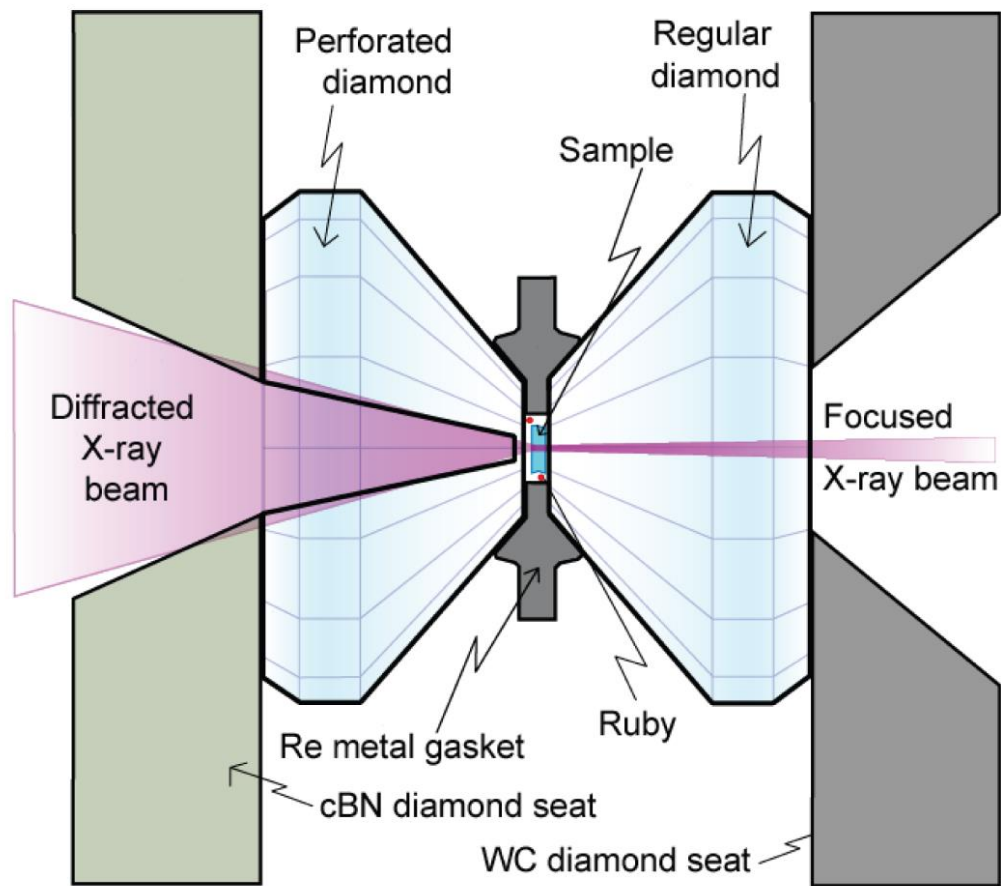


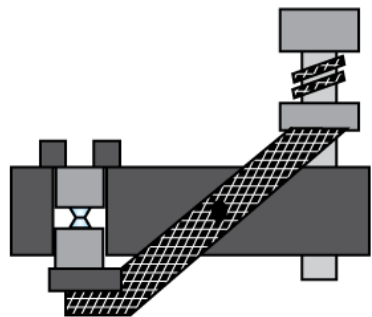
Схема эксперимента



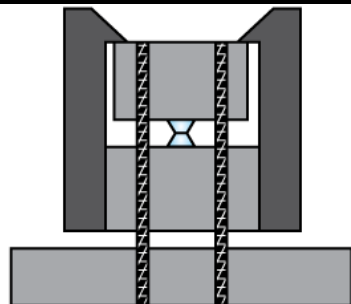
Diamond Anvil Cell Assembly



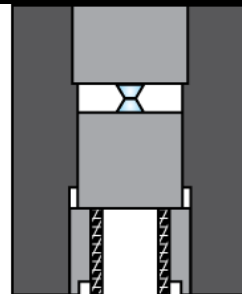
Как давить?



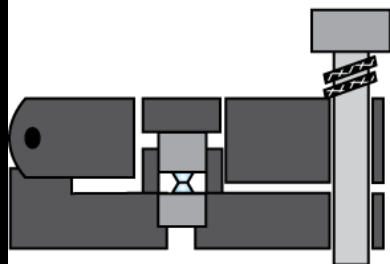
1st class lever drive



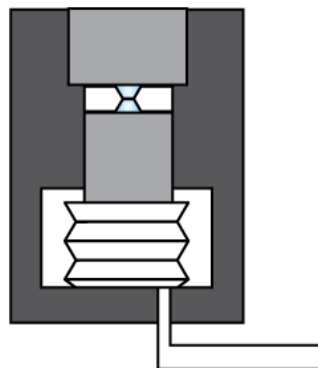
Pin - guide screw drive



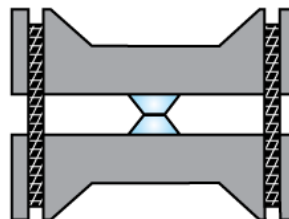
Screw piston drive



2nd class lever drive

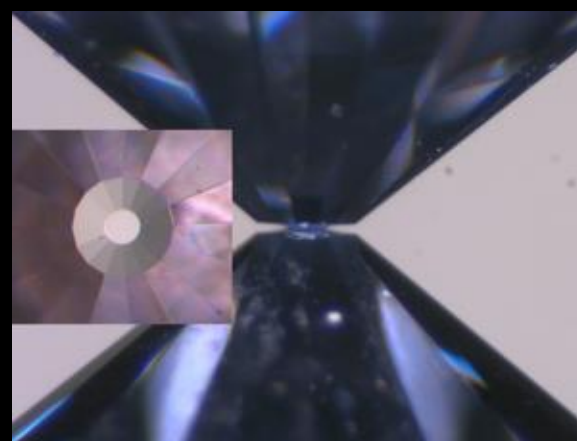
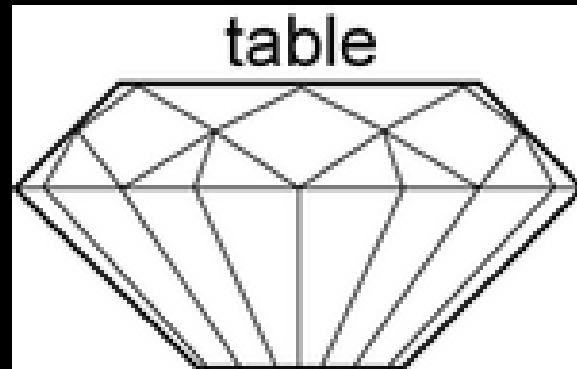


Fluid - bellows drive

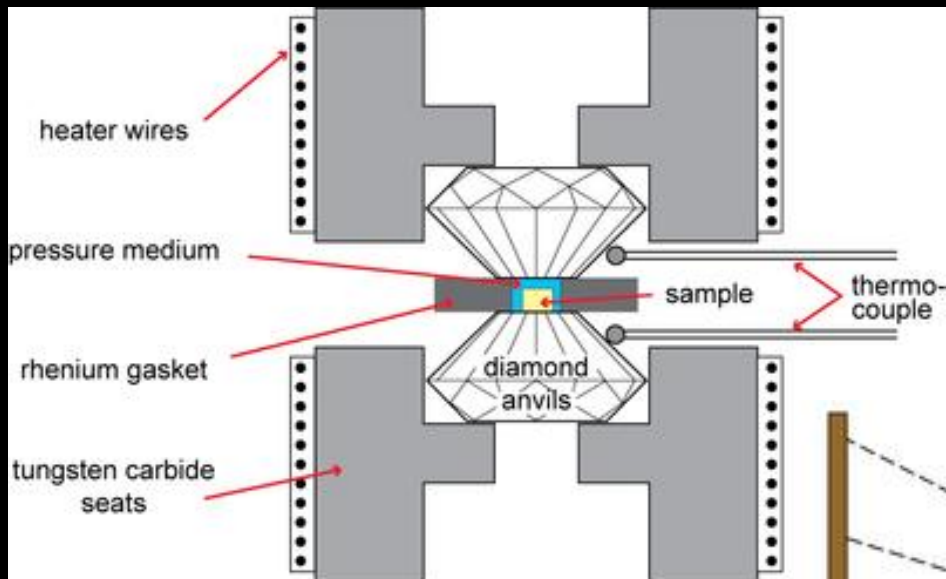


pull - platen drive

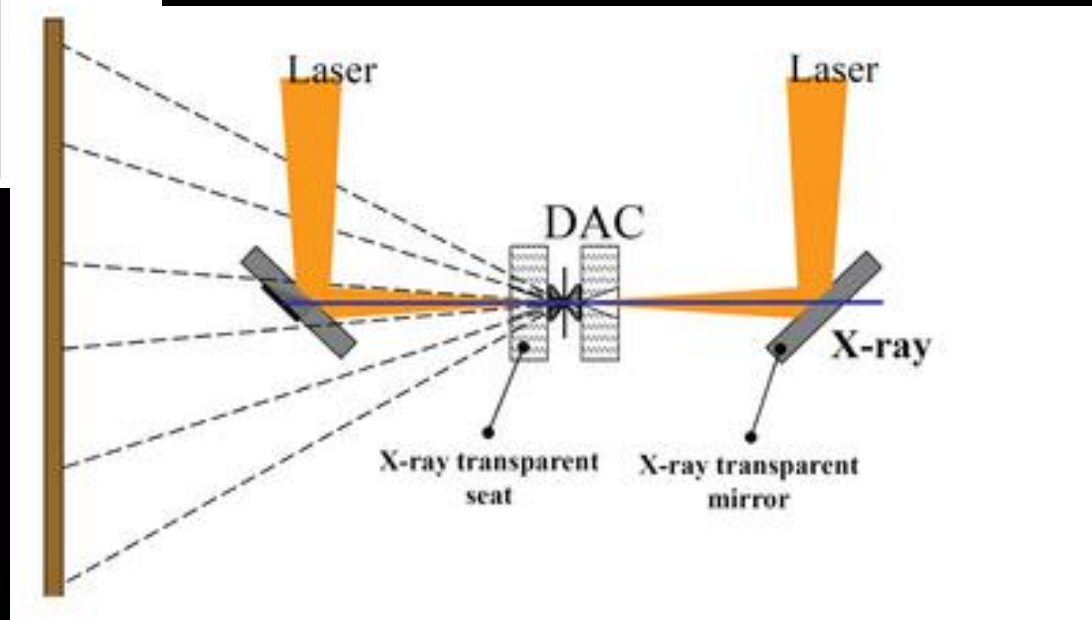
six basis ways of providing force in the DAC (Bassett, 1979)



Как нагреть?

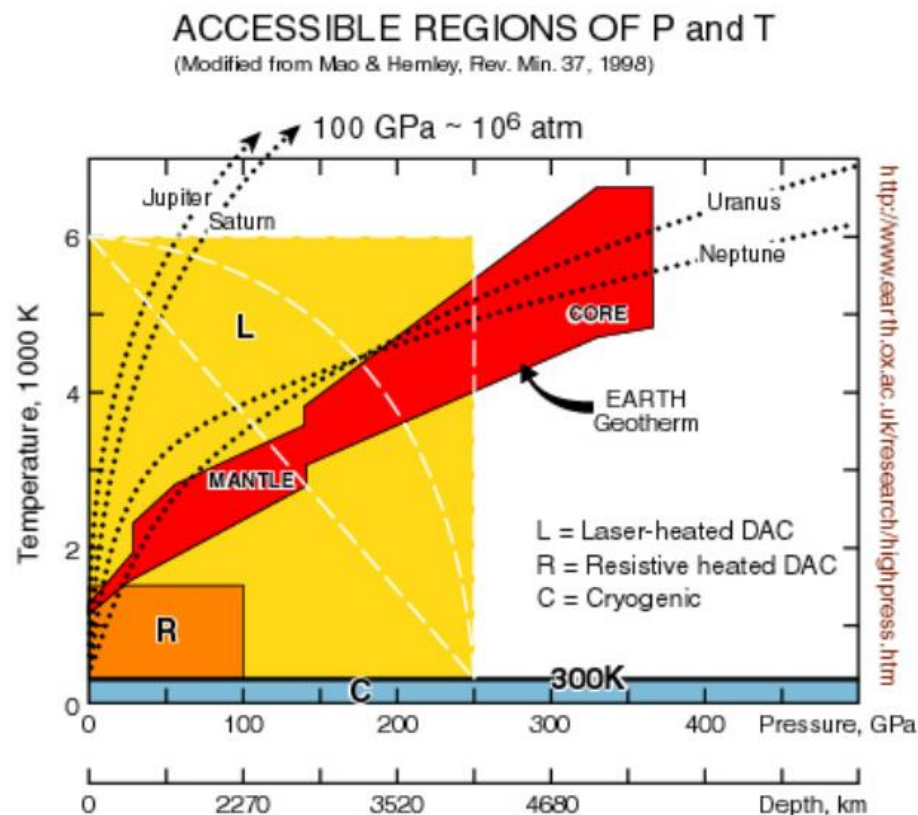
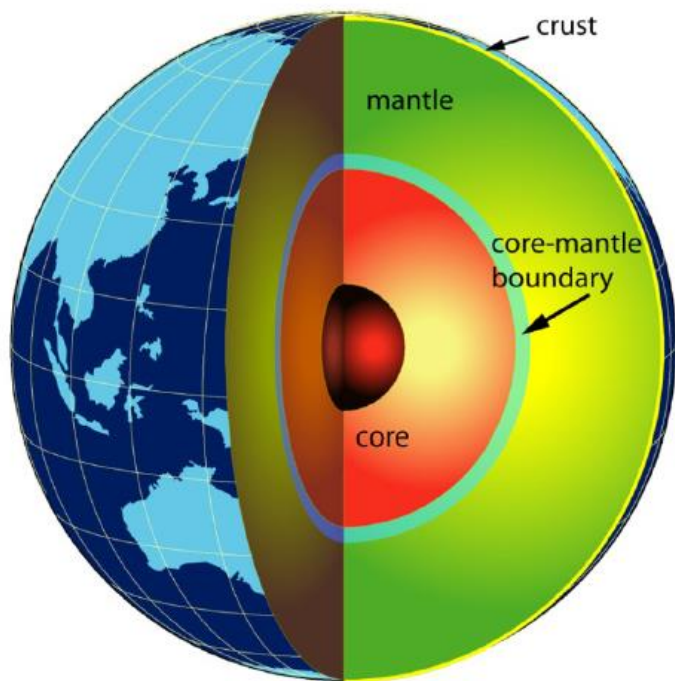


До 1300K

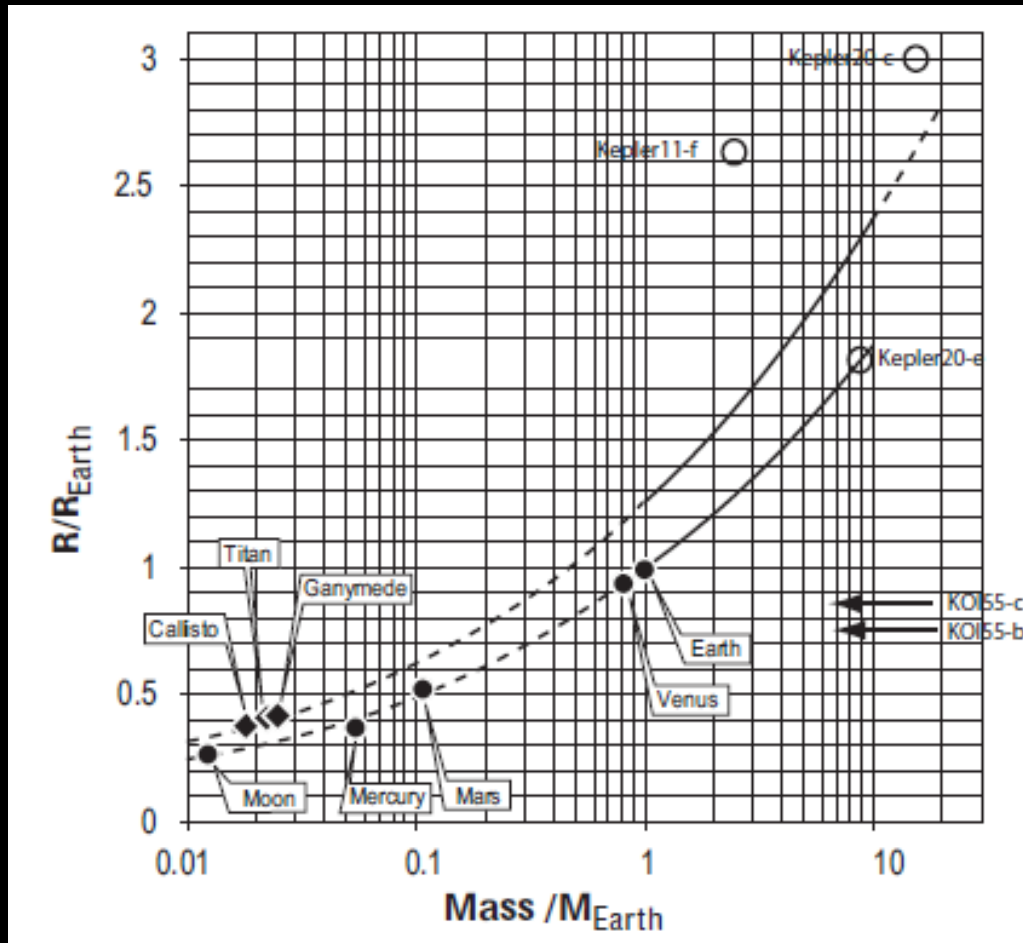


Выше 1300K

Приложение к недрам Земли



Масса-радиус для планет земного типа



Простая модель, в которой рассчитываются данные лишь по 8 элементам, дает хорошие результаты для объектов Солнечной системы.

Массы, орбиты и звезды

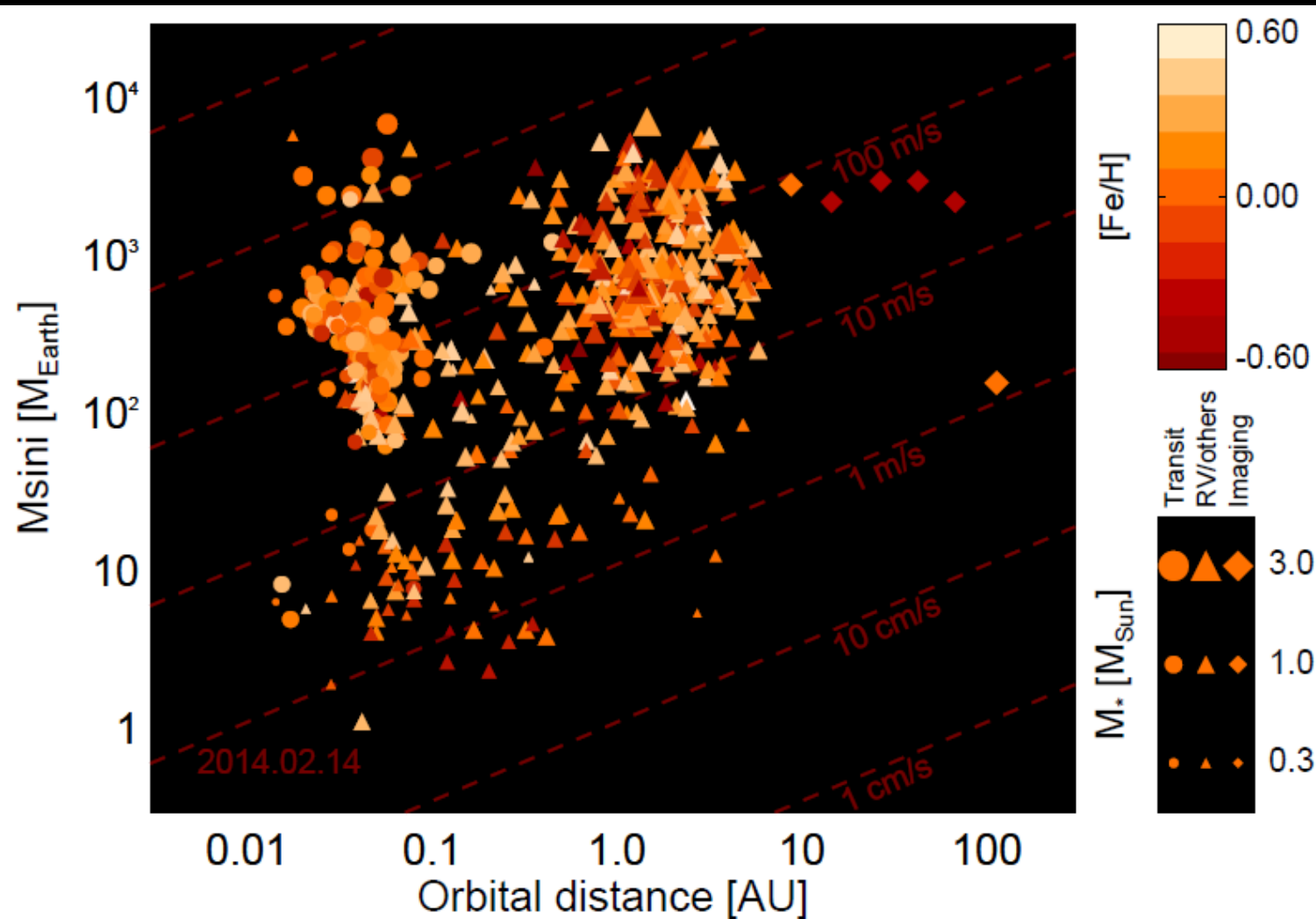
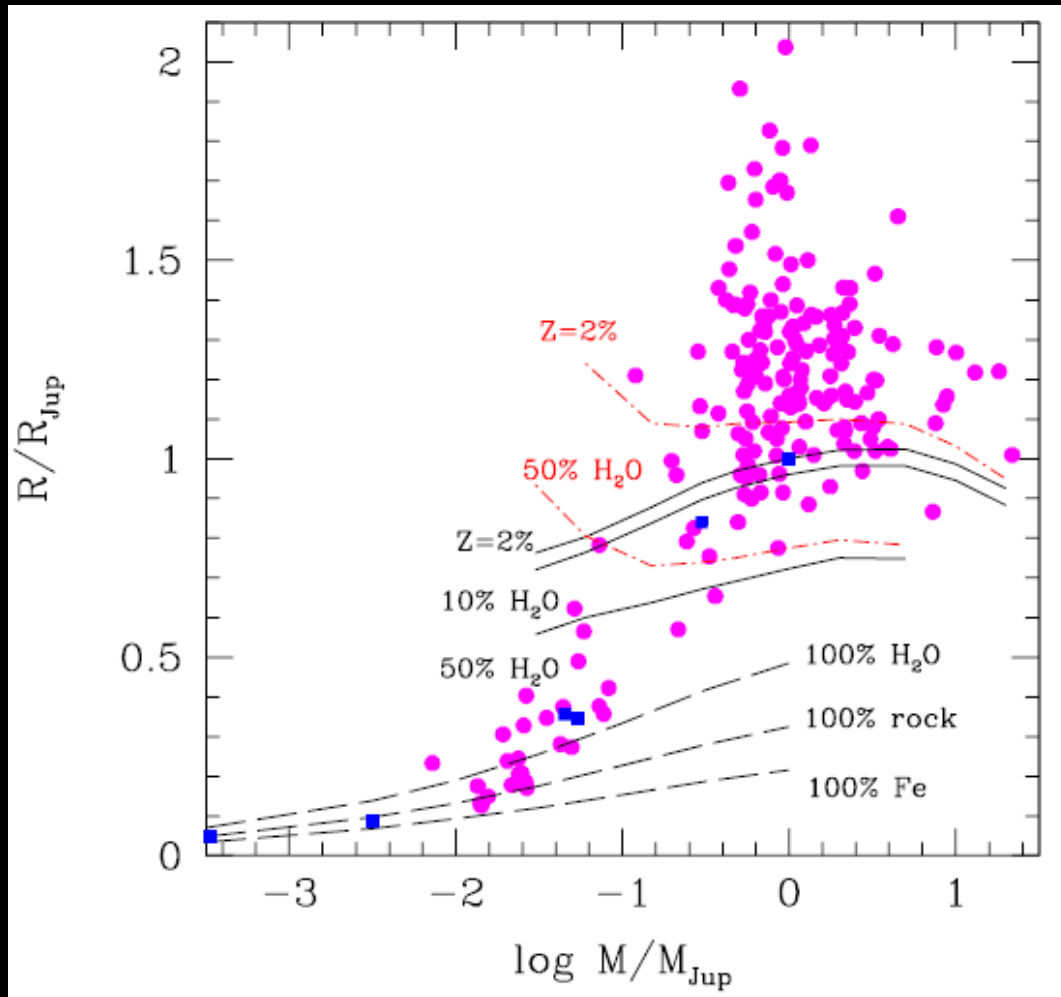


Диаграмма масса-радиус



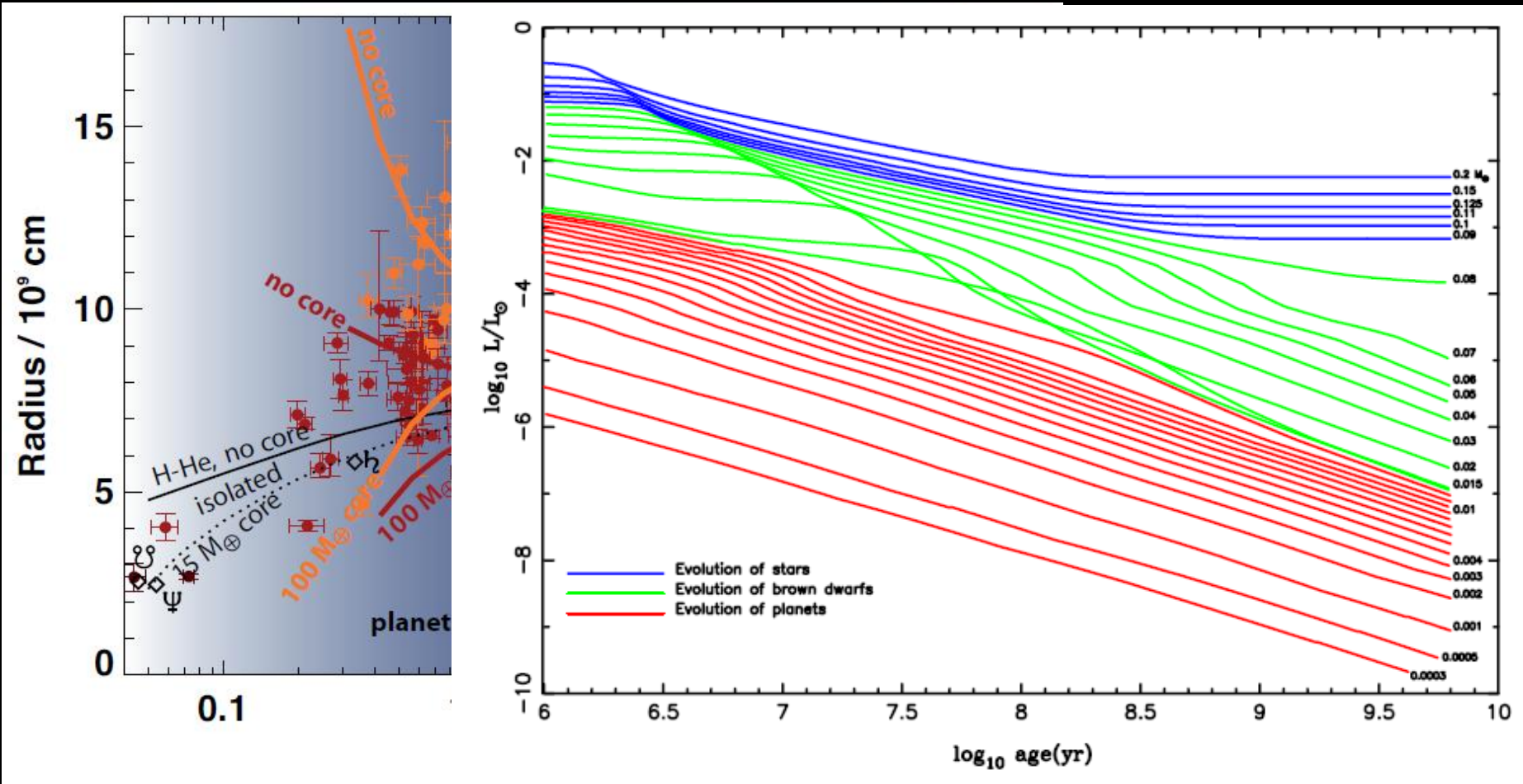
Во-первых, радиус планеты при данной массе зависит от ее состава.

Легкие планеты, как правило не имеют больших газовых оболочек.

Планеты-гиганты, наоборот, в основном являются газовыми.

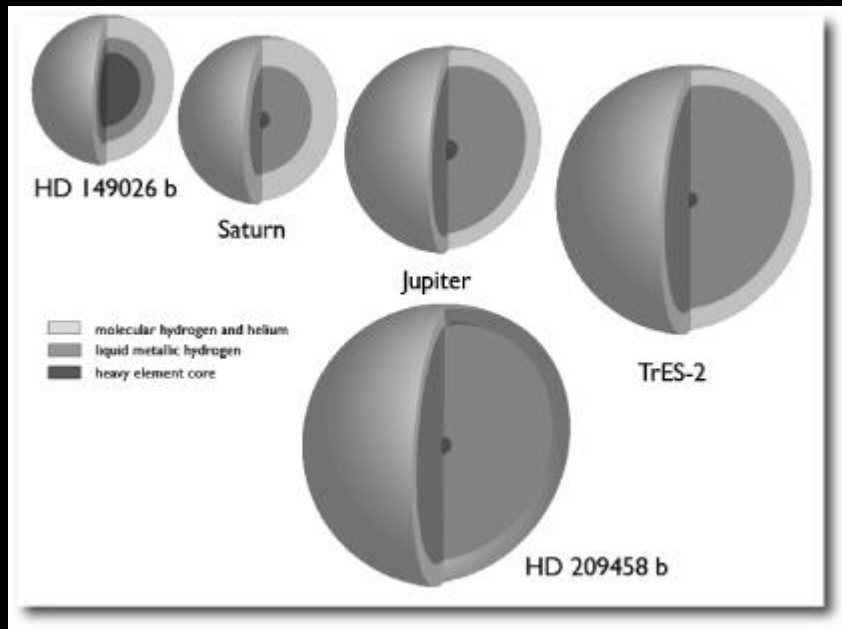
Часто данные по массе и радиусу можно объяснить несколькими разными моделями.

Масса-радиус: наблюдения и теория



Загадочный горячий сатурн

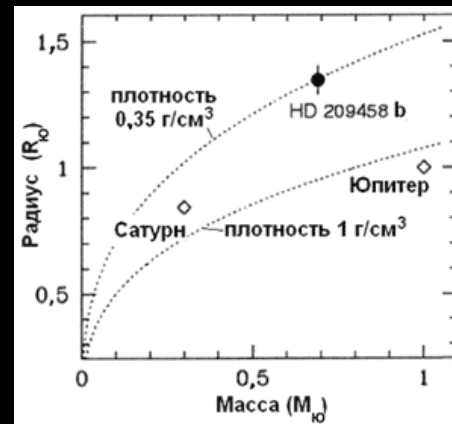
HD 149026 – горячая, но маленькая.



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).

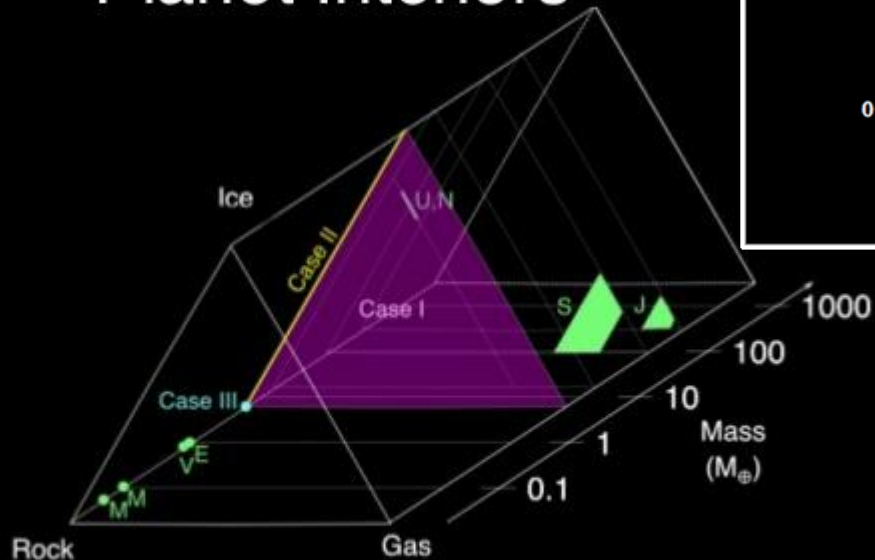
Ядра помогают объяснить
тяжелые, но компактные планеты.
Наоборот, ядра мешают объяснить
сильно раздутые планеты.



HD 209458b –
слишком раздутая.

Три источника. Три составные части

Planet Interiors



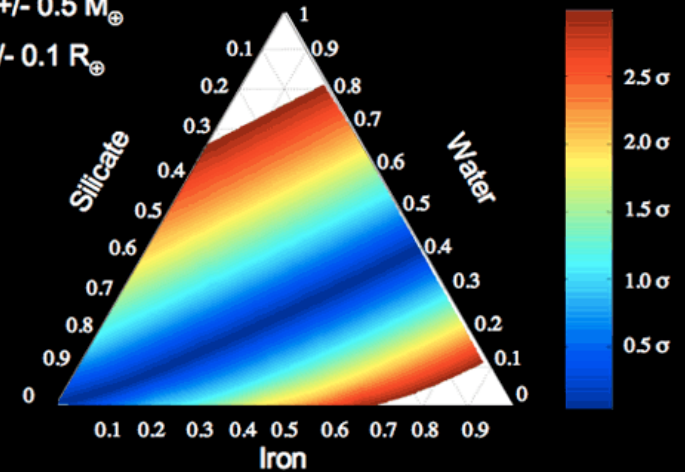
Exoplanets can be composed of three (or four) materials: rock (and iron), ice, and gas

Rogers and Seager 2010b; Chambers 2010

Ternary Diagram

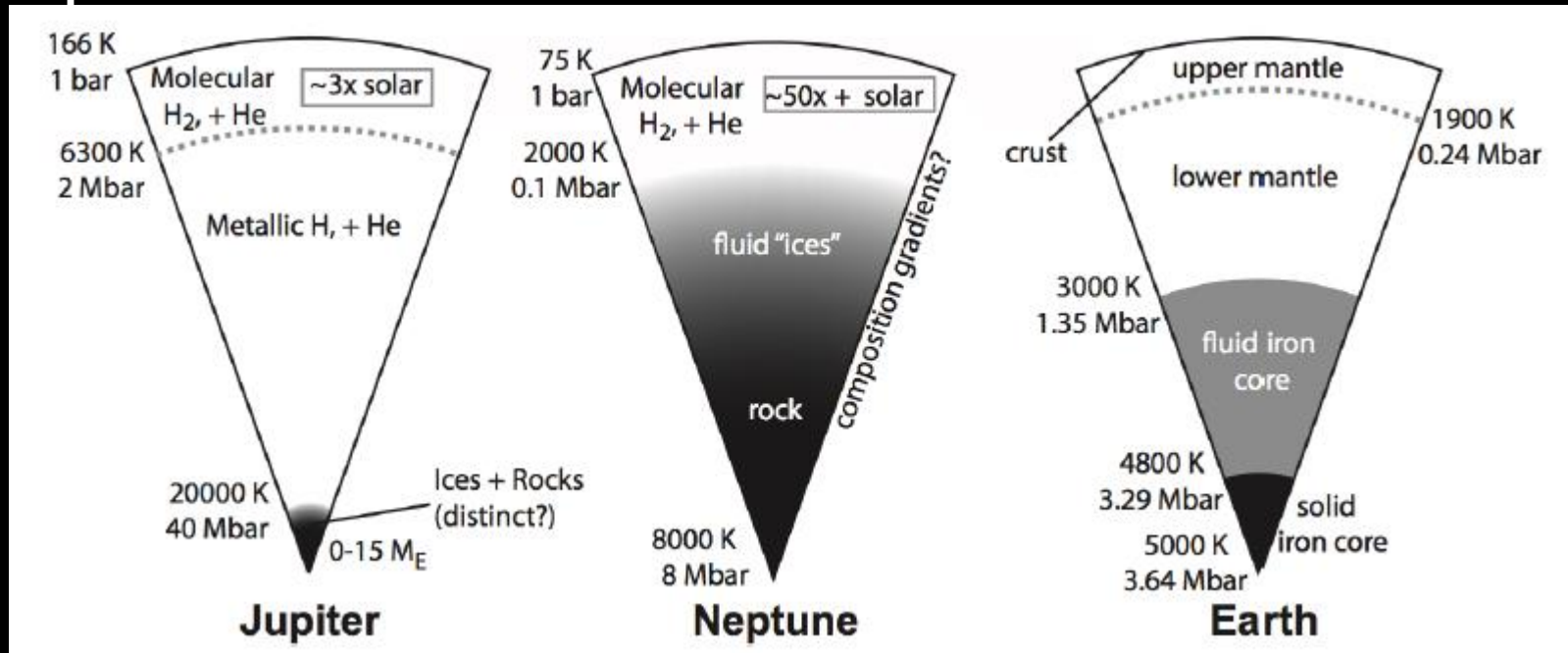
$10.0 \pm 0.5 M_{\oplus}$

$2.0 \pm 0.1 R_{\oplus}$



Zeng and Seager 2008

Три основных типа планет



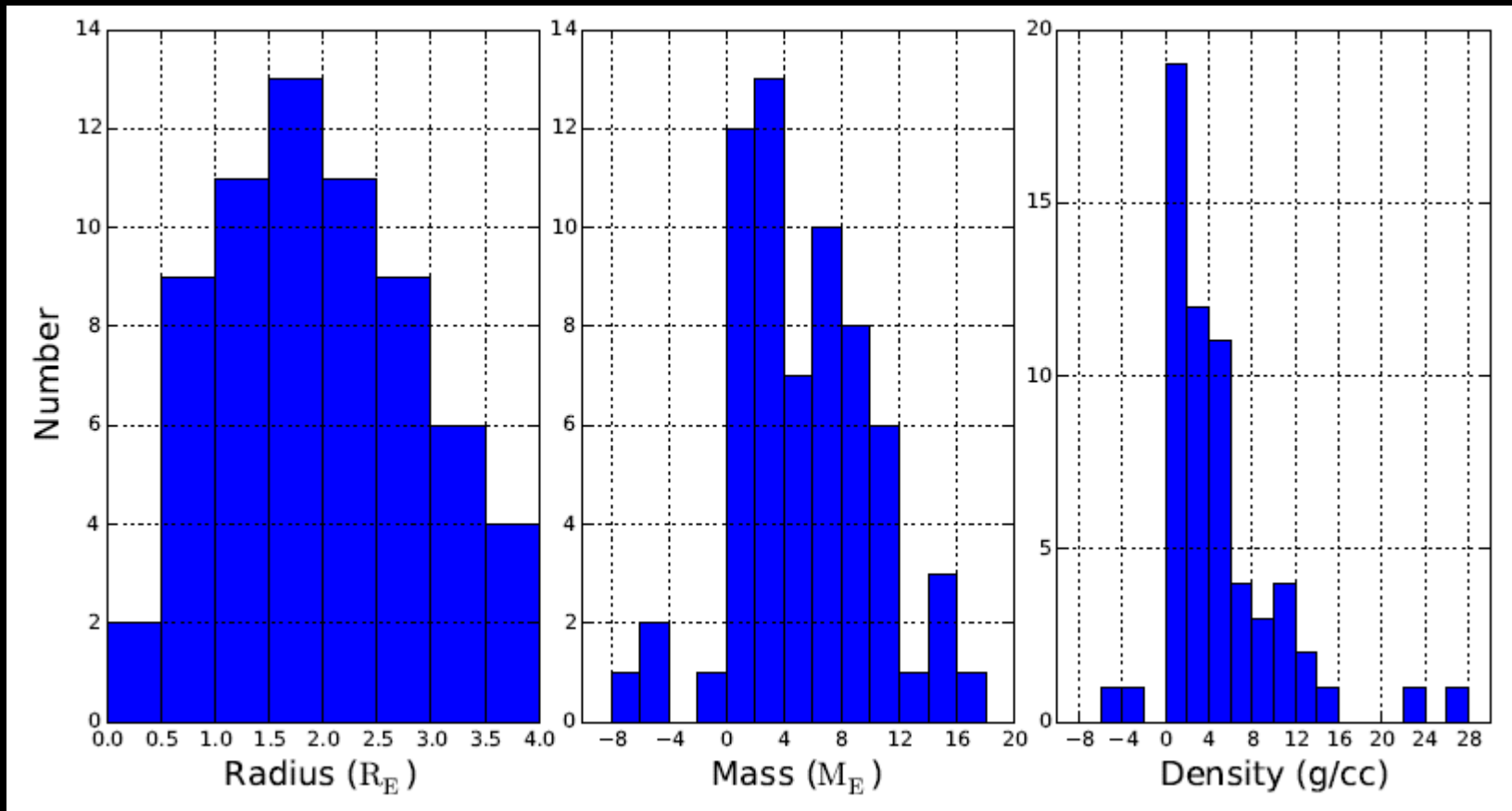
Газовые гиганты
H/He

Ледяные гиганты
H/He+лед+ядро

Твердые планеты
Si, Mg, Fe, O, C

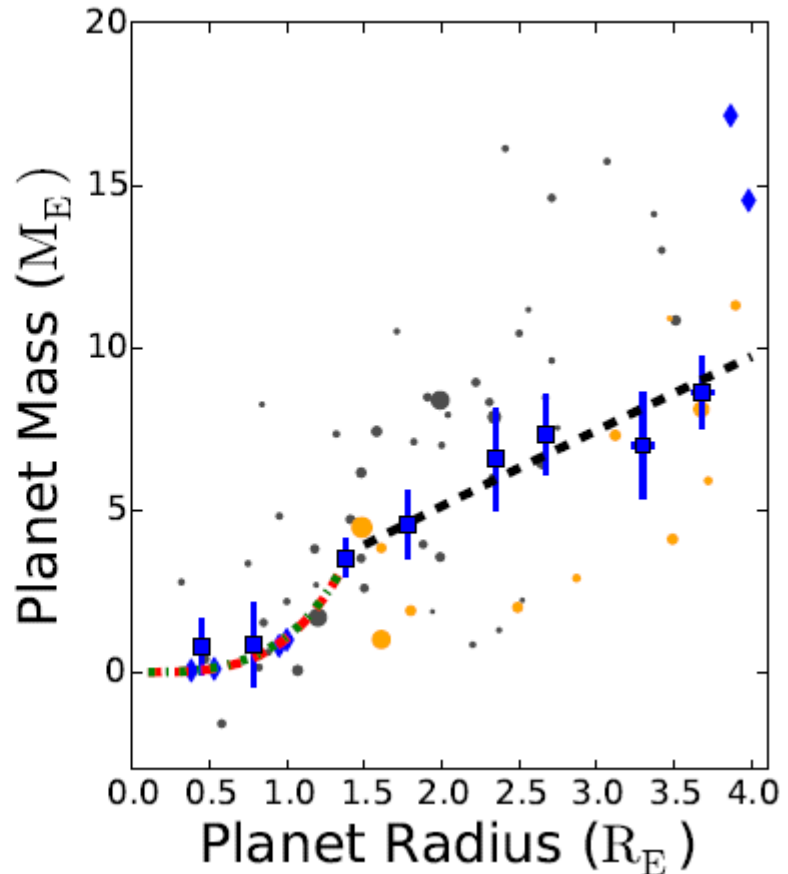
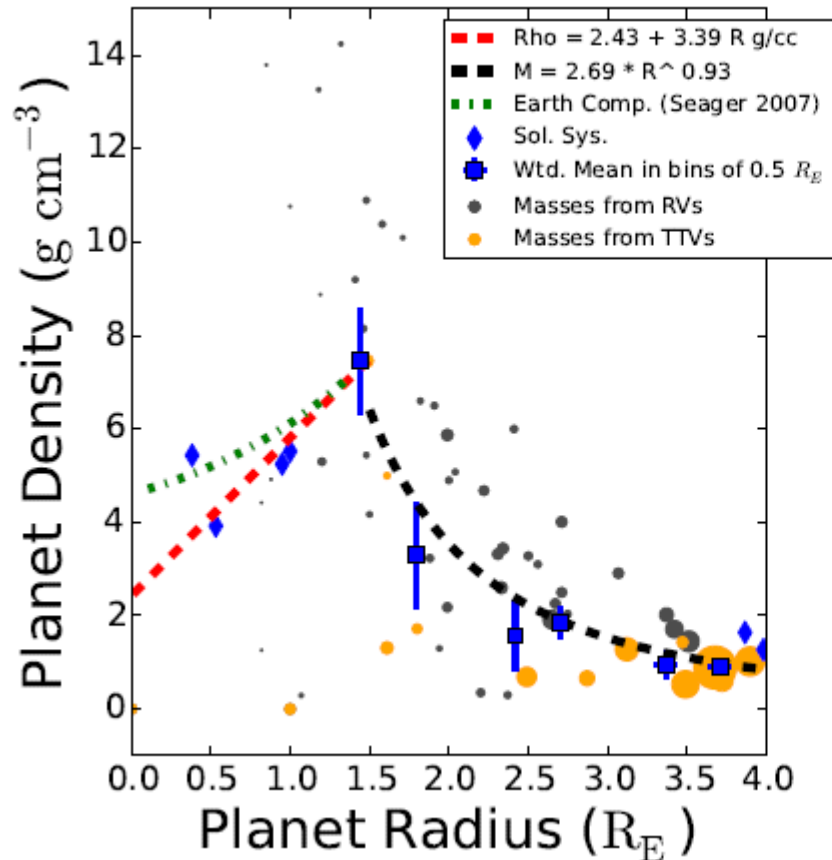
Но этим, конечно, многообразие не исчерпывается,
да и внутри этих классов есть более мелкие деления...

Плотности легких планет

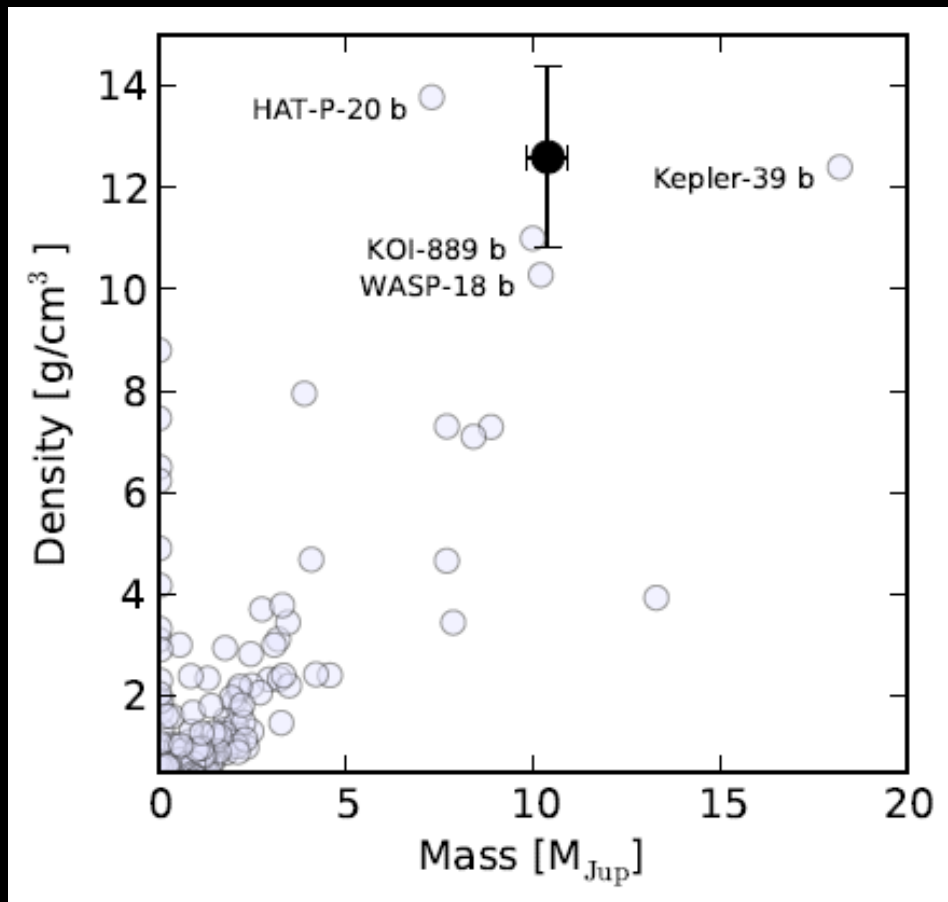


65 планет с массами менее 4 земных и
орбитальными периодами менее 100 дней

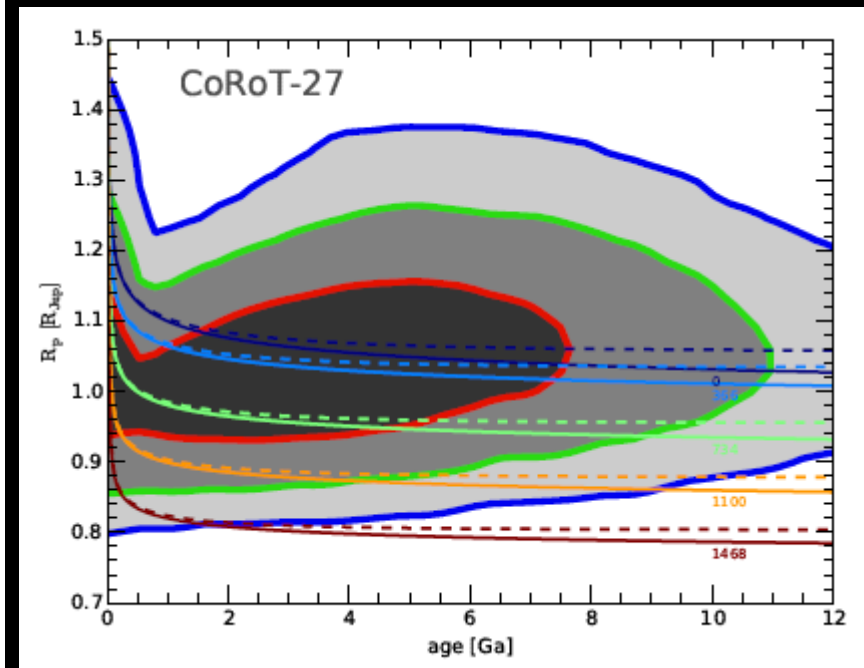
Мощные атмосферы для масс более ~ 4 масс Земли



Corot-27b – плотная планета



Орбитальный период 3.6 дня
Звезда типа Солнца.

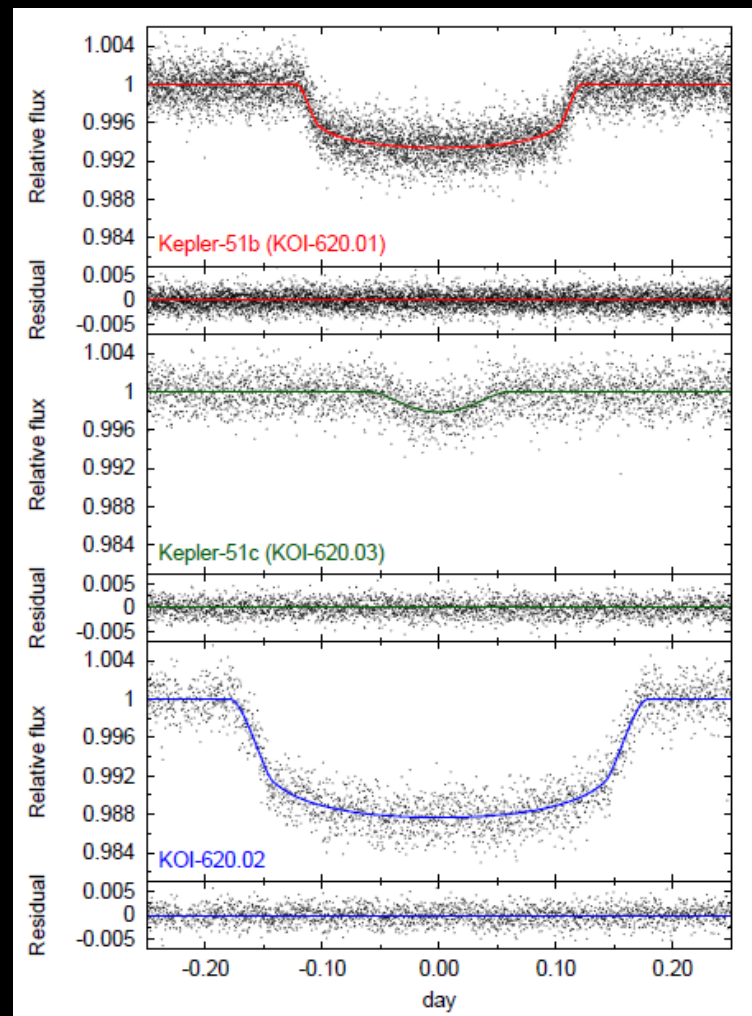


Кеплер-51 – рыхлая планета

Три планеты с массами от 2 до 8 масс Земли
и очень низкой плотностью: $< 0.05 \text{ г см}^{-3}$

Звезда типа Солнца.

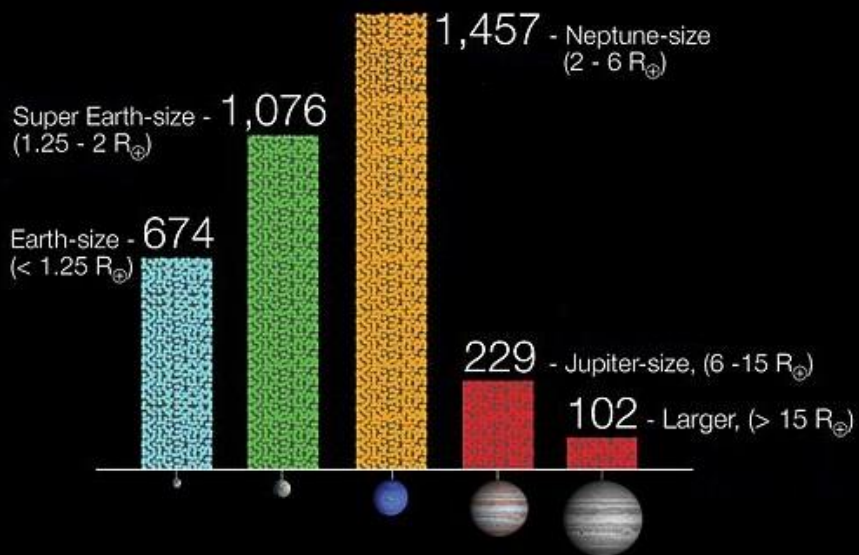
Орбитальные периоды 45-130 дней.



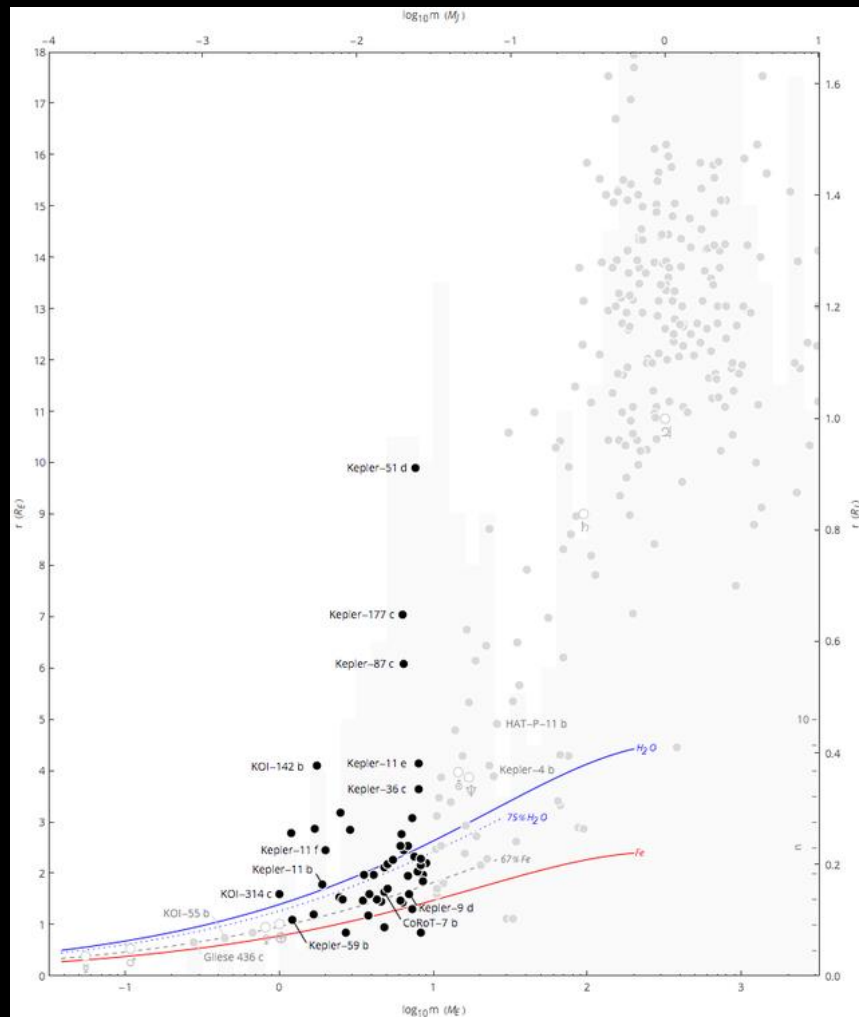
Сверхземли

Sizes of Planet Candidates

Totals as of November, 2013

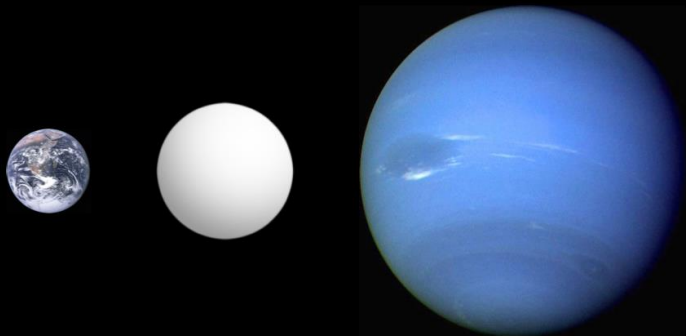


Сверхземли (super-Earth) – это общее название планет с массами в несколько раз больше земной. Они могут иметь разное строение.



Размеры сверхземель

Wikipedia

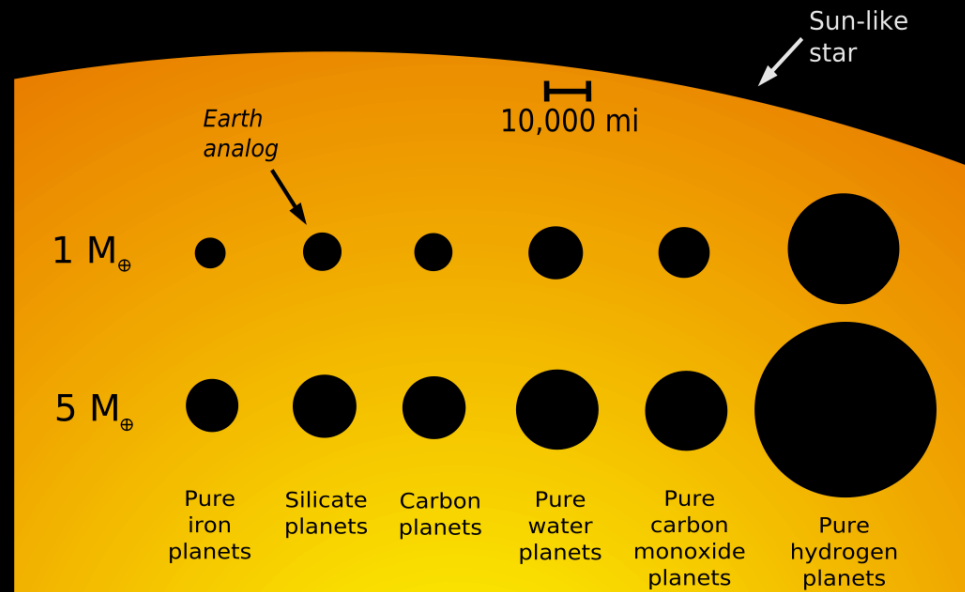


Сверхземли занимают промежуточное место между Землей и Нептуном. Соответственно, их радиусы 1 - 4 земных.

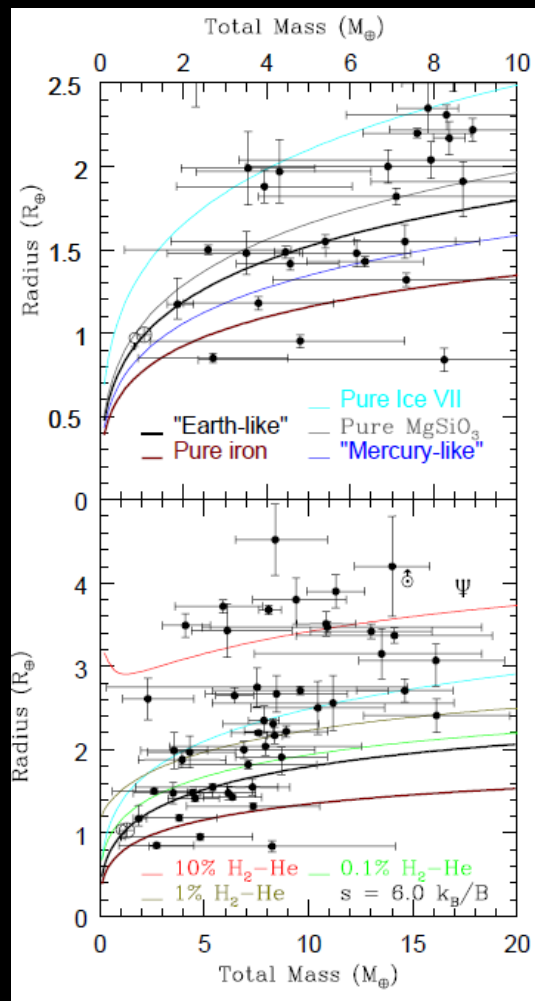
Сравнение размеров Земли, CoRoT-7b и Нептуна

Иногда планеты в этом диапазоне масс и размеров, но с низкой плотностью, называют суб-Нептуны.

Predicted sizes of different kinds of planets

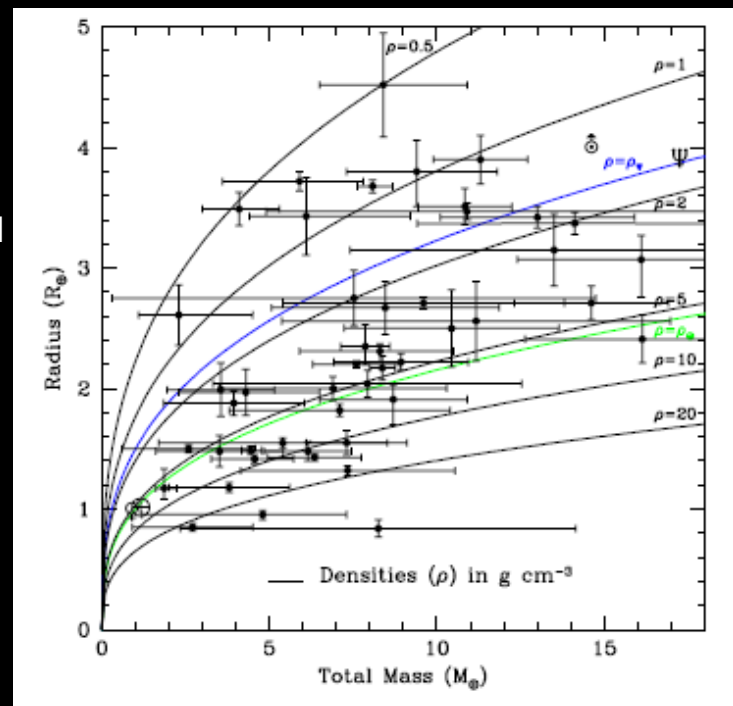


Сверхземли: масса-радиус



Сверхземли составляют большую долю от числа известных экзопланет. Показаны только те, для которых есть сразу и хорошие оценки массы, и оценки радиуса.

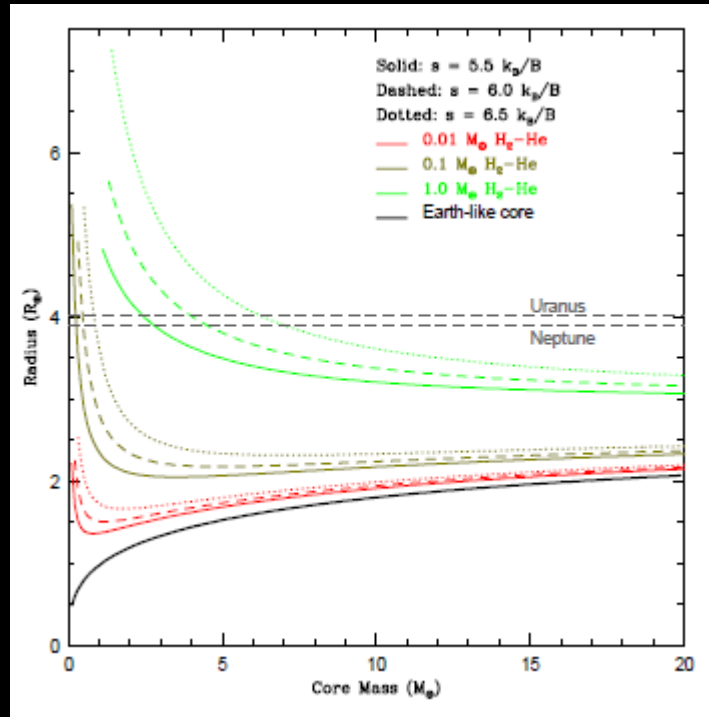
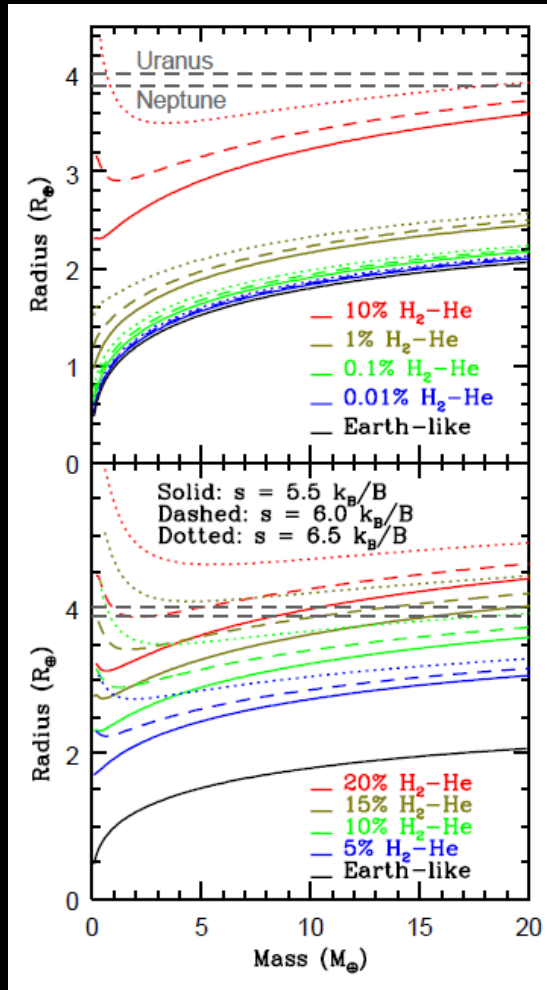
Твердые ядра могут состоять как из железа и минералов, так и из различных льдов.



Виден большой разброс параметров. Очевидно, какие-то из сверхземель — железно-каменные, а какие-то имеют мощные газовые оболочки.

Это ставит вопросы перед моделями формирования.

Модели сверхземель

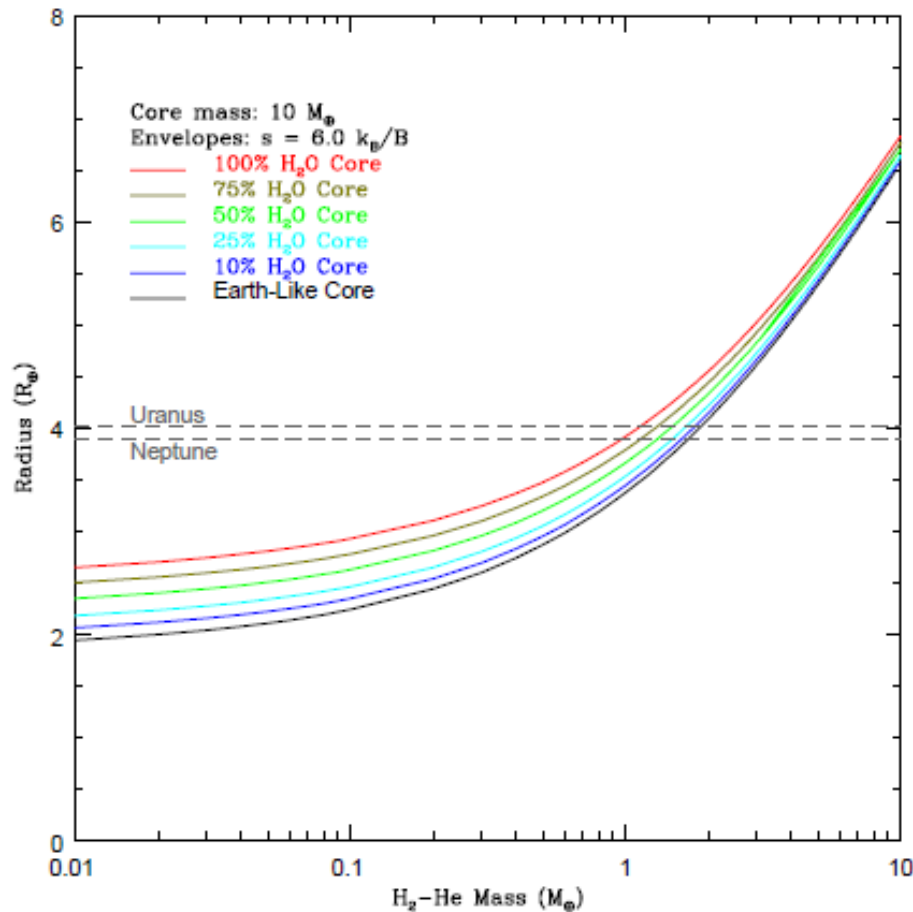


Показаны результаты расчетов для планет с твердыми ядрами земного состава.

Видно, что для планет с легкими ядрами масса оболочки (и размер) сильно зависят от массы ядра. А для массивных все определяется уже в основном оболочкой.

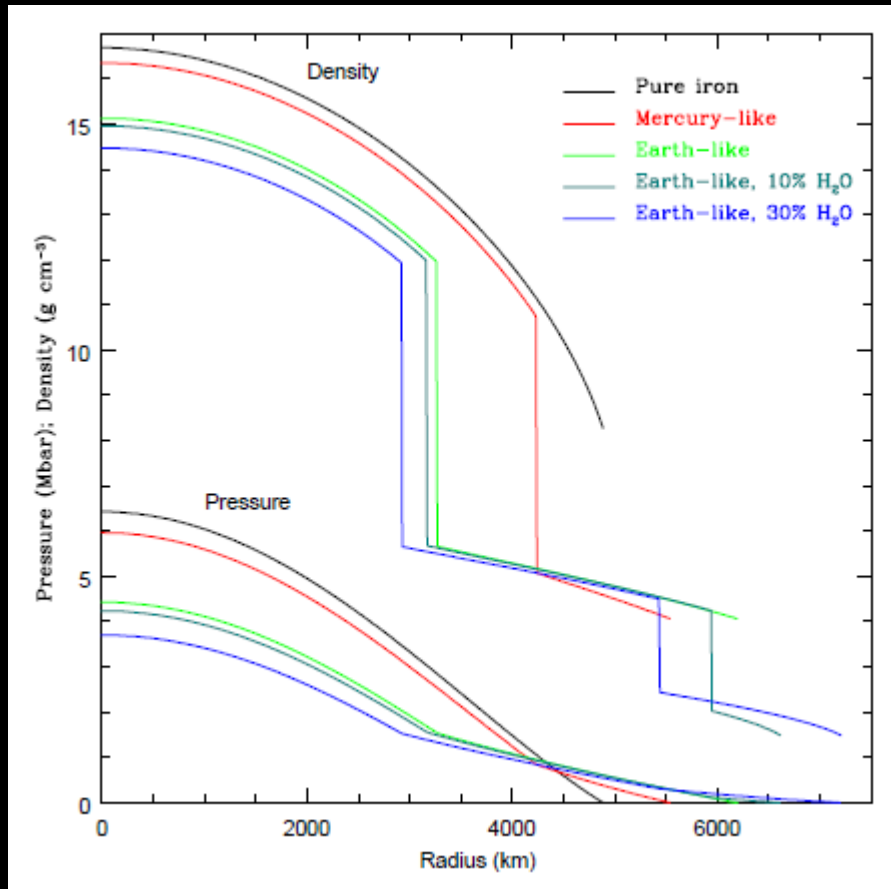
Разумеется, так же важно, как планета нагревается.

Просто добавь воды!

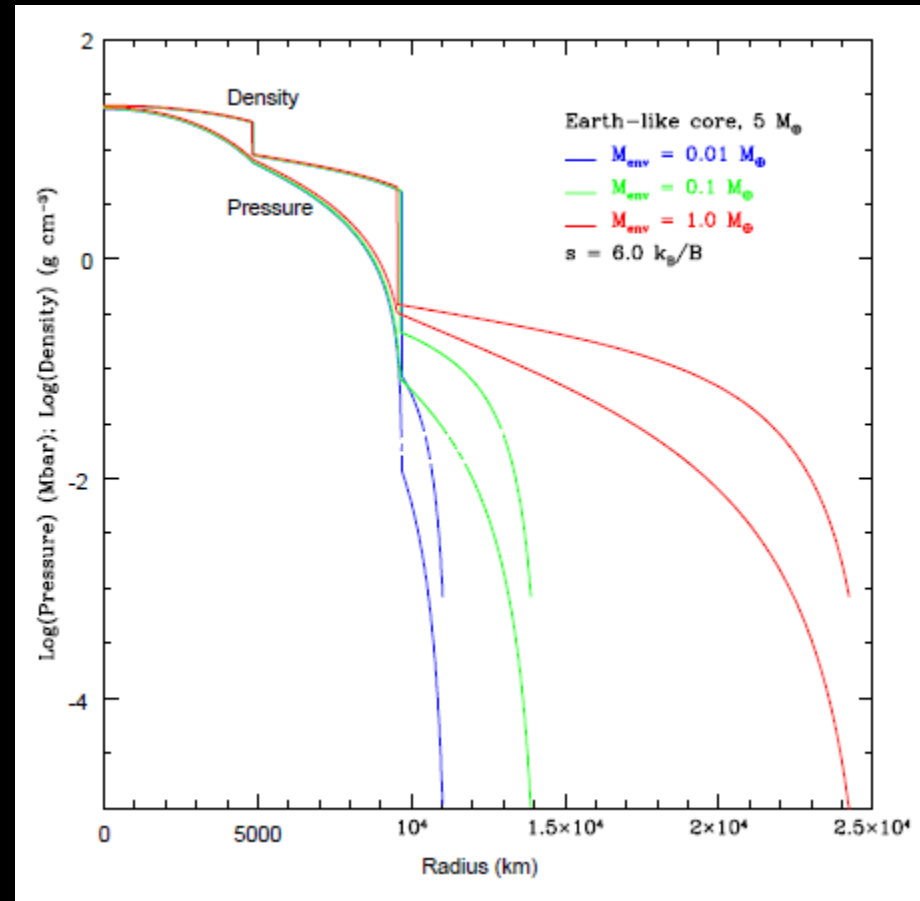


Теперь зафиксируем массу планеты, и начнем добавлять воду. Это будет слой льда на твердом ядре. Видно, что только при небольшой массе оболочки можно будет различить ядро без воды и ядро из чистого льда.

Внутренняя структура

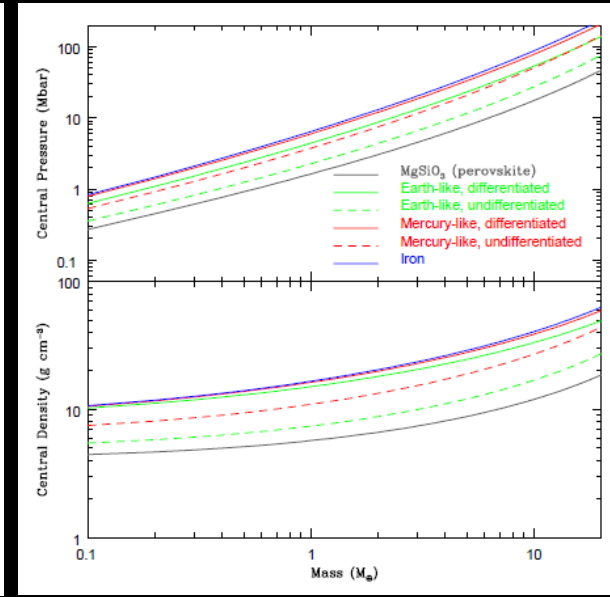
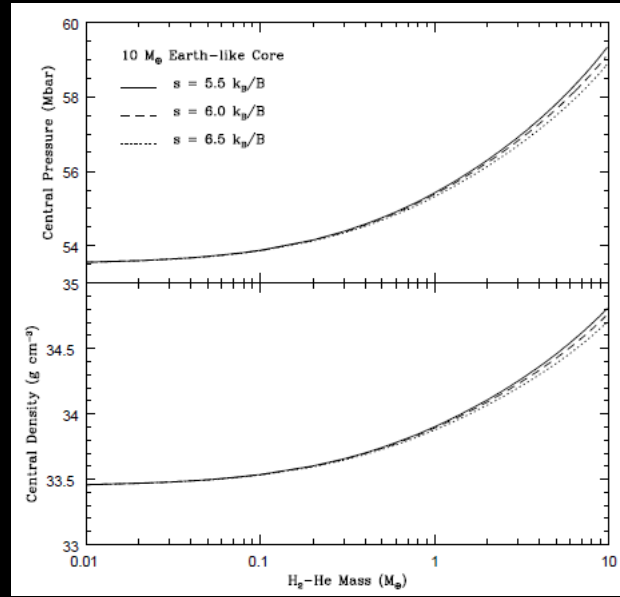
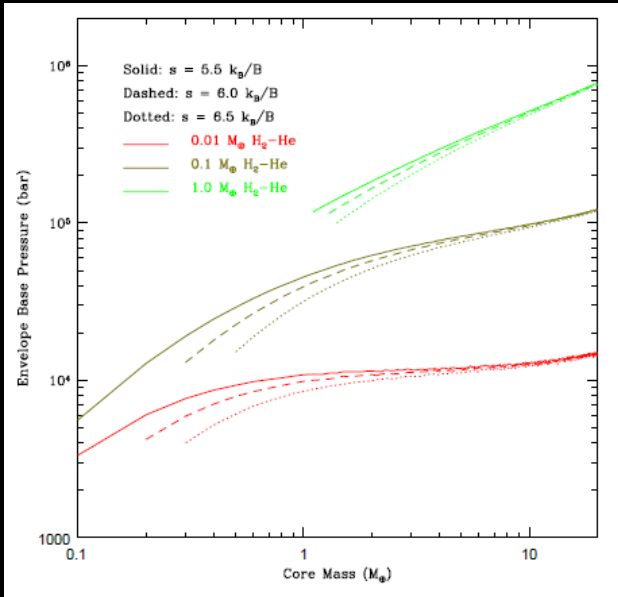


Без оболочки



С оболочкой

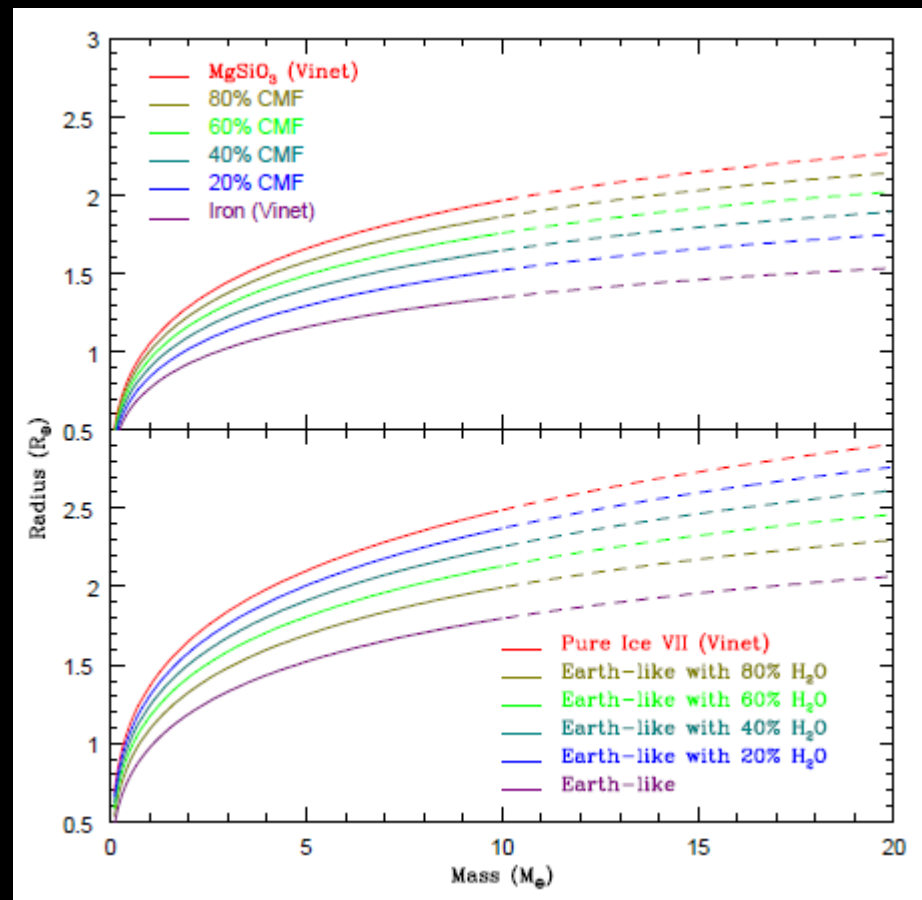
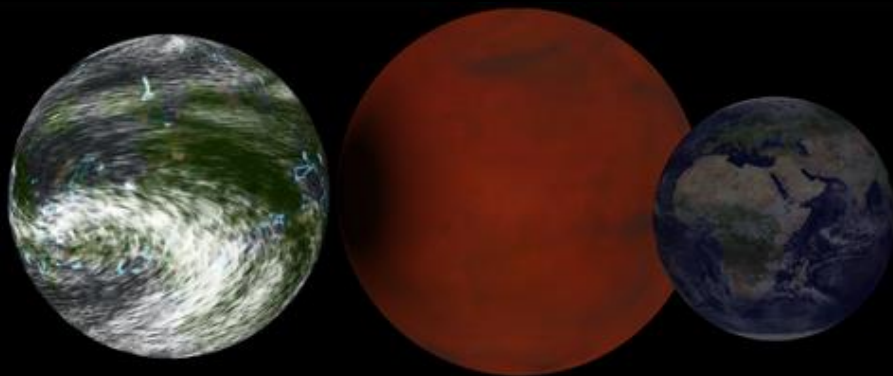
Сильно ли давит?



В недрах планет давление достигает очень высоких значений, из-за чего вещество там находится при очень высокой плотности.

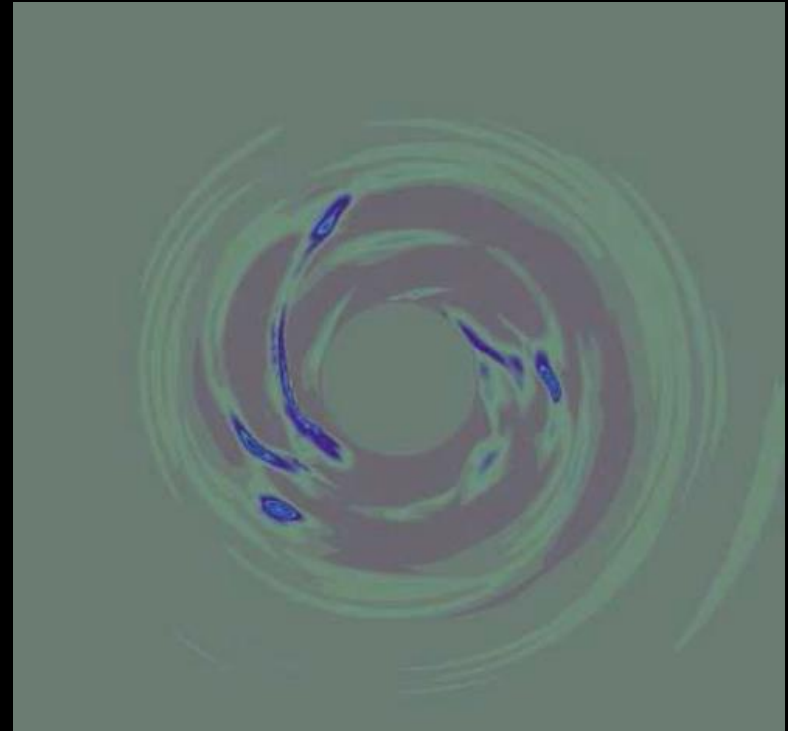
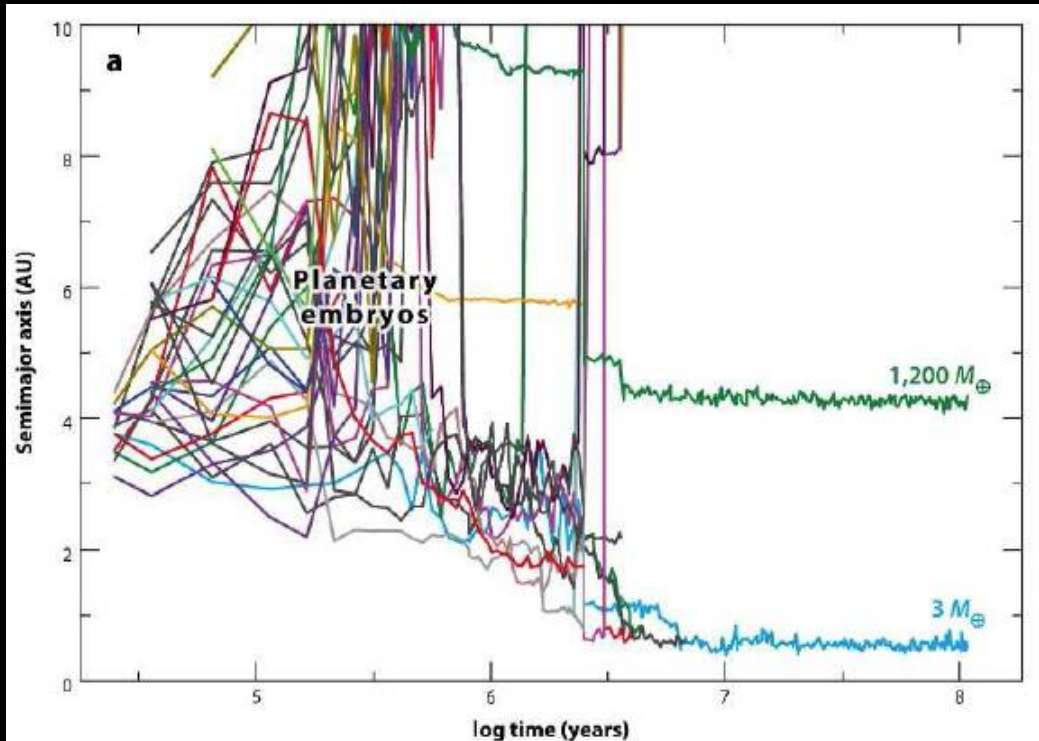
Земли и воды

Wikipedia



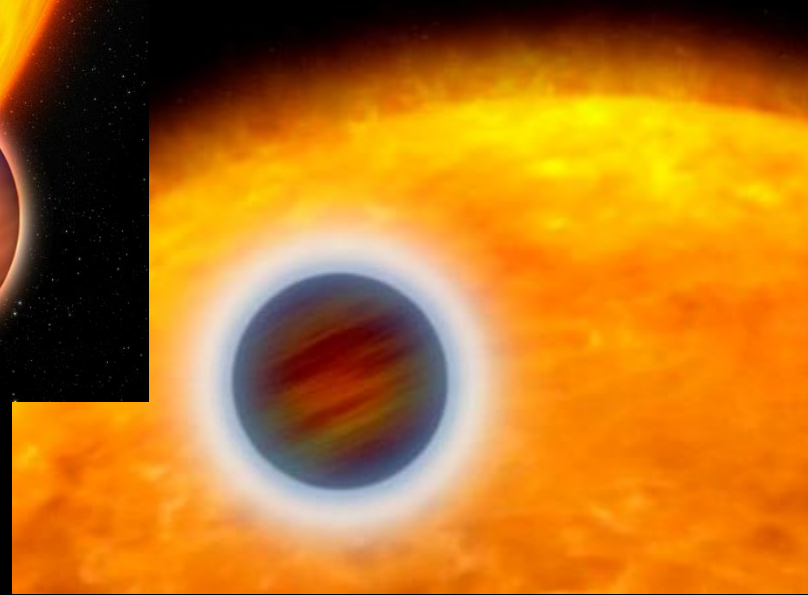
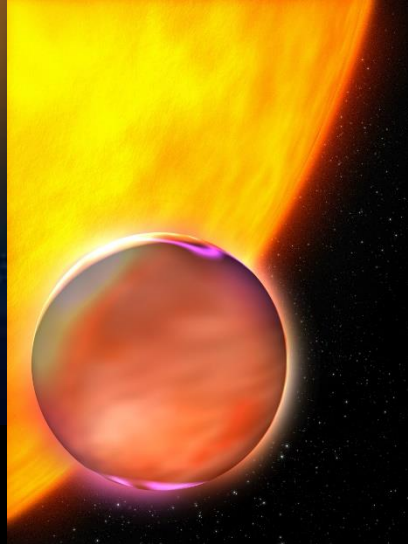
Размеры планет (в зависимости от масс)
для разного содержания воды (льда).

Образование сверхземель



В процессе образования остается еще много неясного . . .

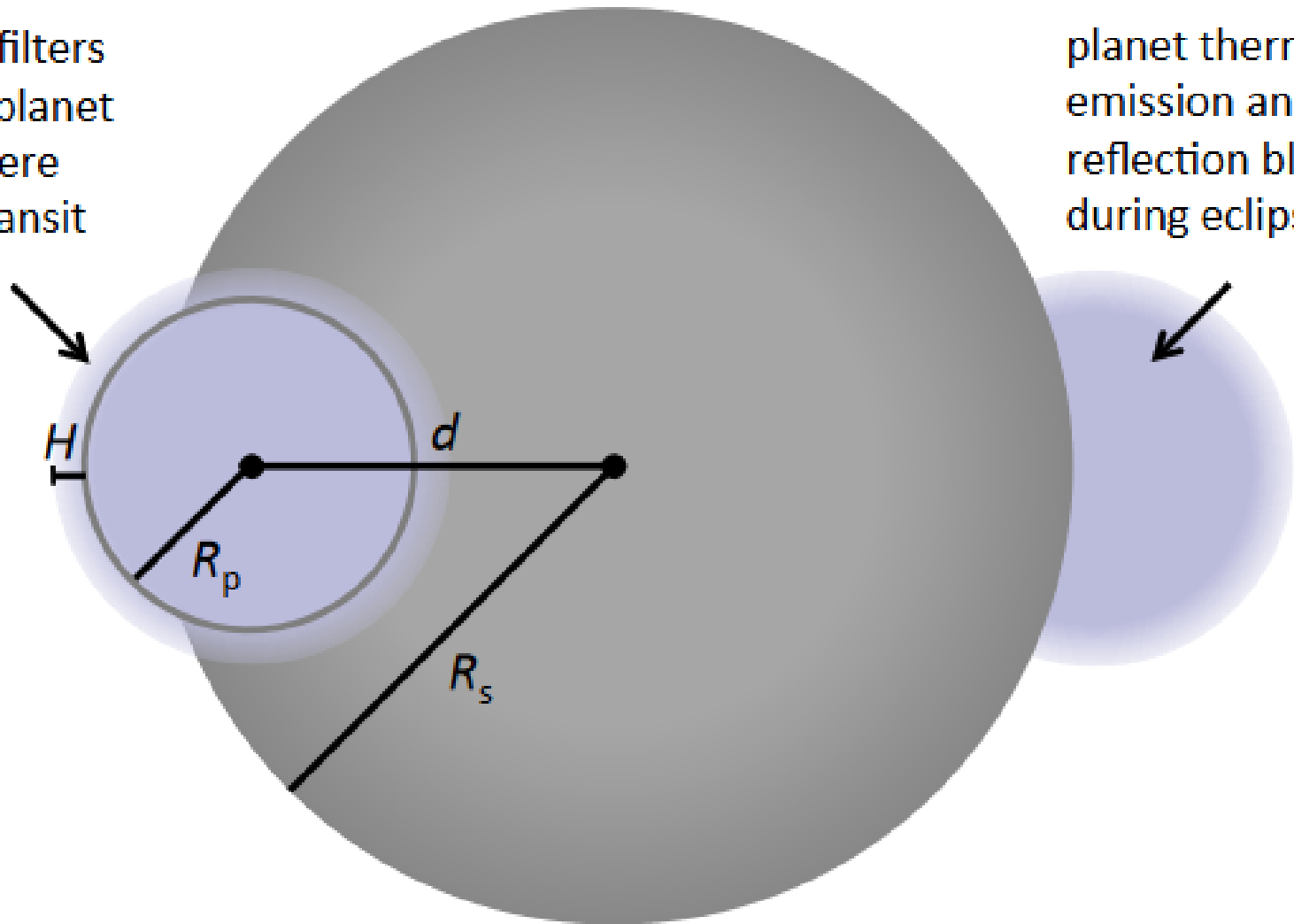
Атмосферы экзопланет



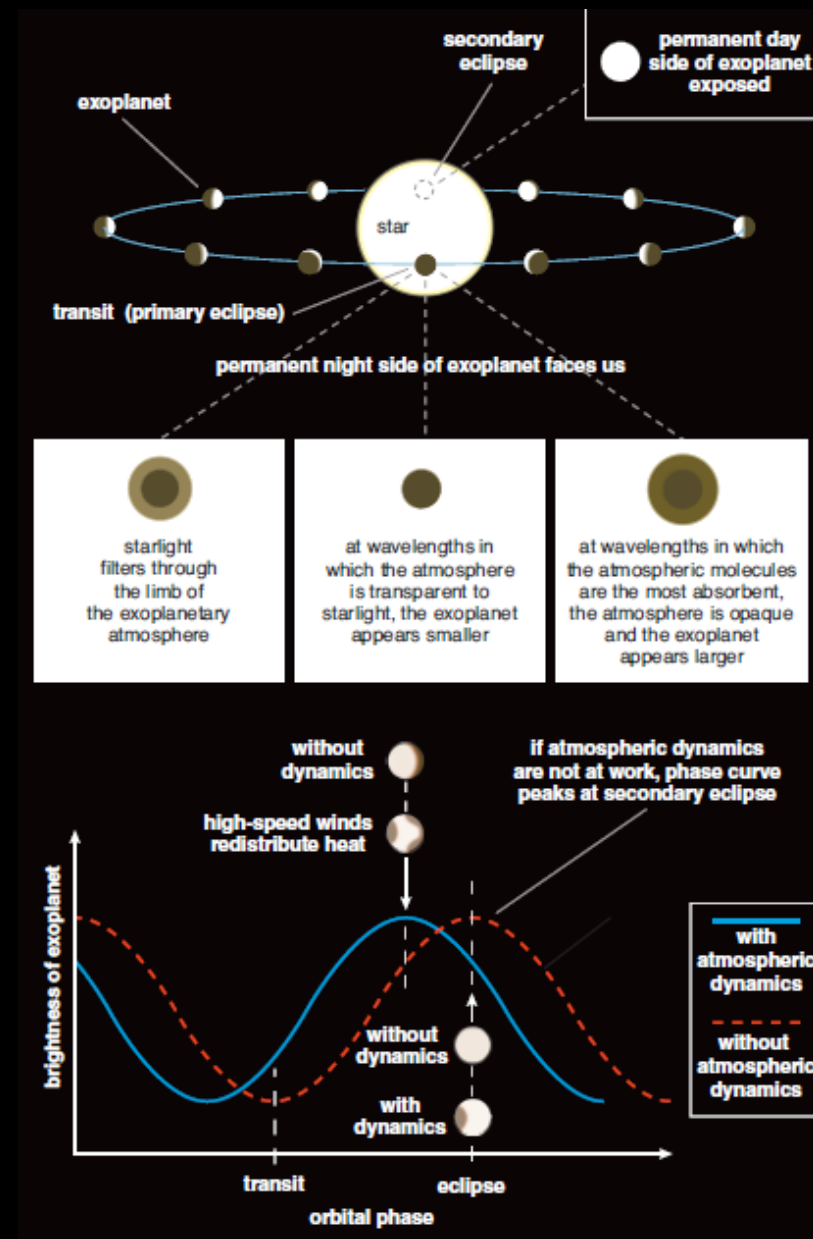
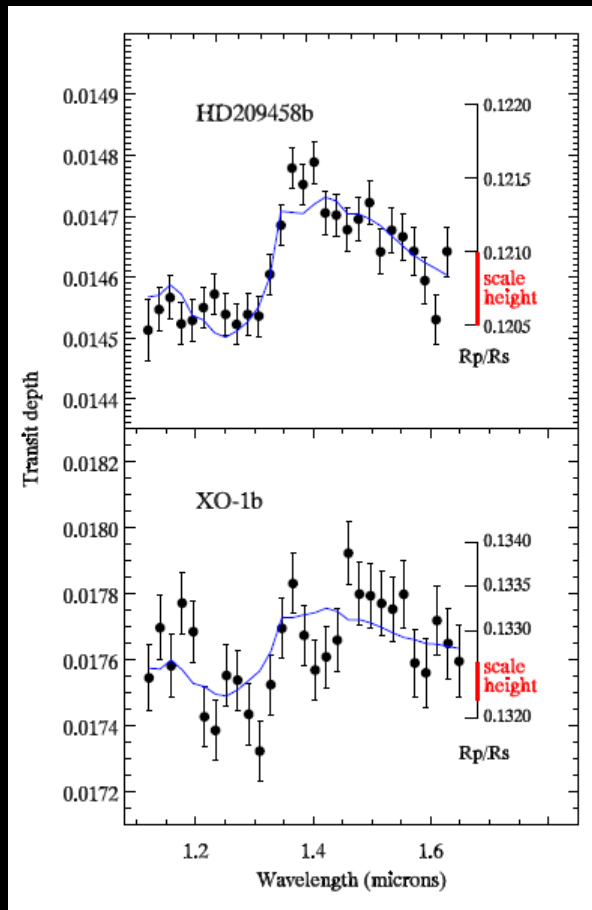
Транзиты и изучение атмосфер

starlight filters
through planet
atmosphere
during transit

planet thermal
emission and
reflection blocked
during eclipse



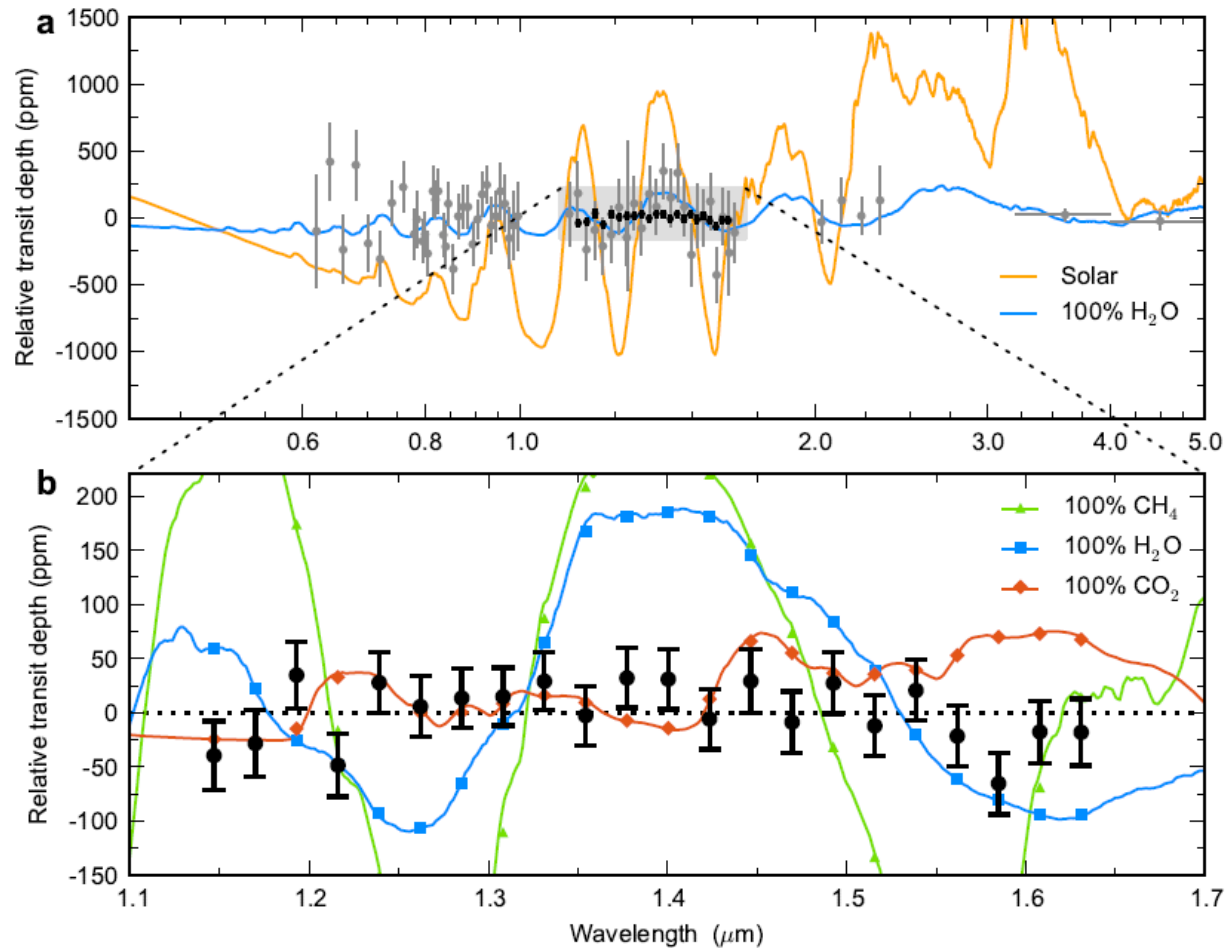
Наблюдения транзита на разных длинах волн позволяет определить свойства атмосферы, т.к. какие-то волны атмосфера пропускает хорошо – там размер планеты меньше, какие-то плохо – там размер больше.



1407.4150

1302.1141

Сверхземля GJ 1214b



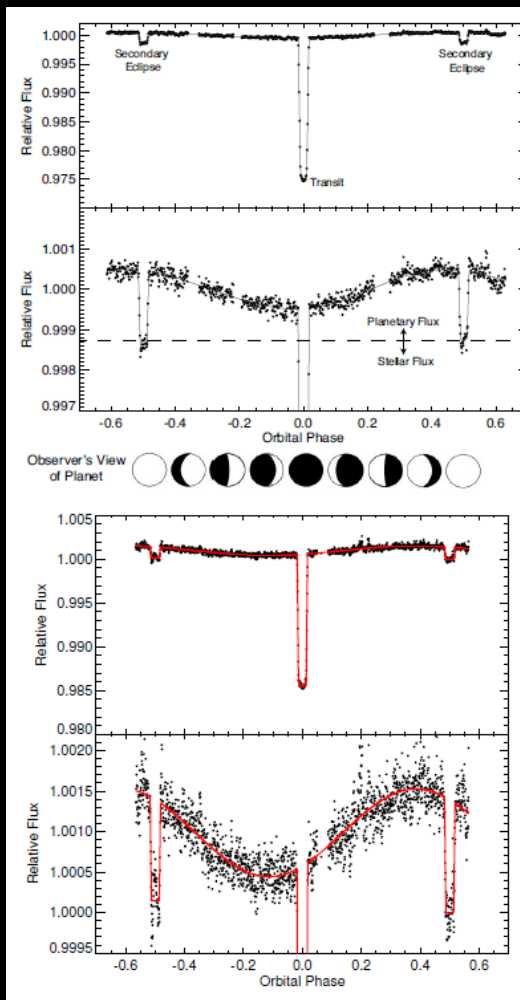
С помощью Космического телескопа им. Хаббла получен хороший спектр.

В нем не видно деталей.

Это можно объяснить высокими облаками.

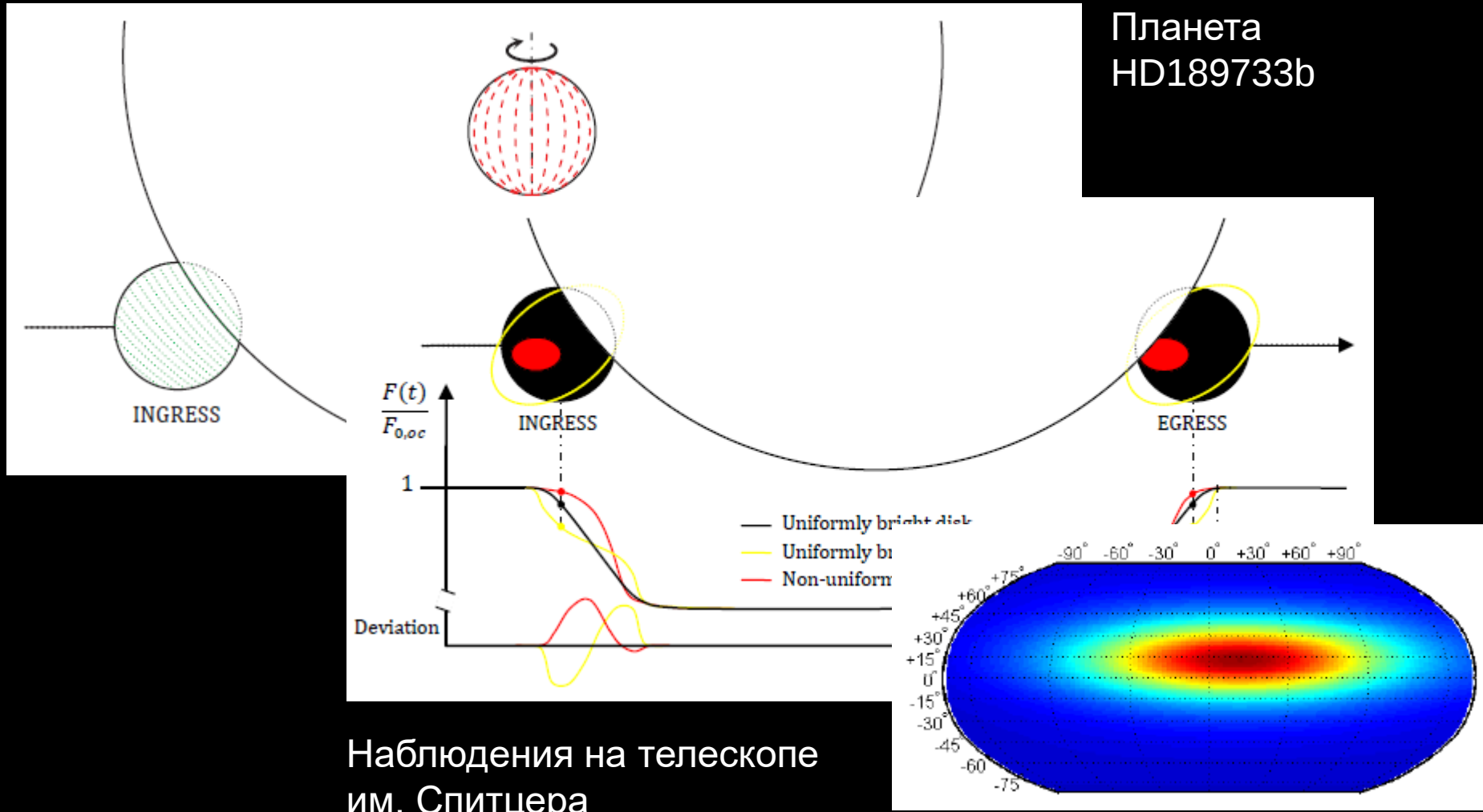
Фазовая кривая

В зависимости от фазы, мы видим части диска планеты.
Показаны данные по горячим юпитерам:
HD 189733b – вверху,
HD 209458b – внизу.



Сканирование диска планеты

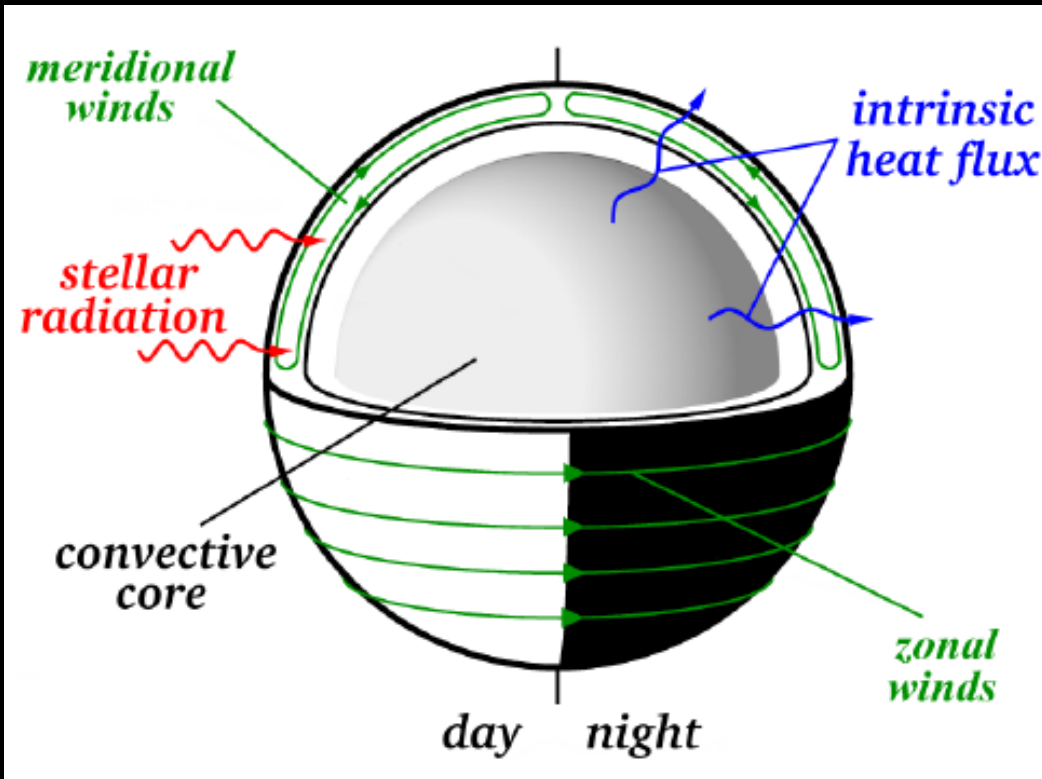
Планета
HD189733b



Наблюдения на телескопе
им. Спитцера

1202.3829

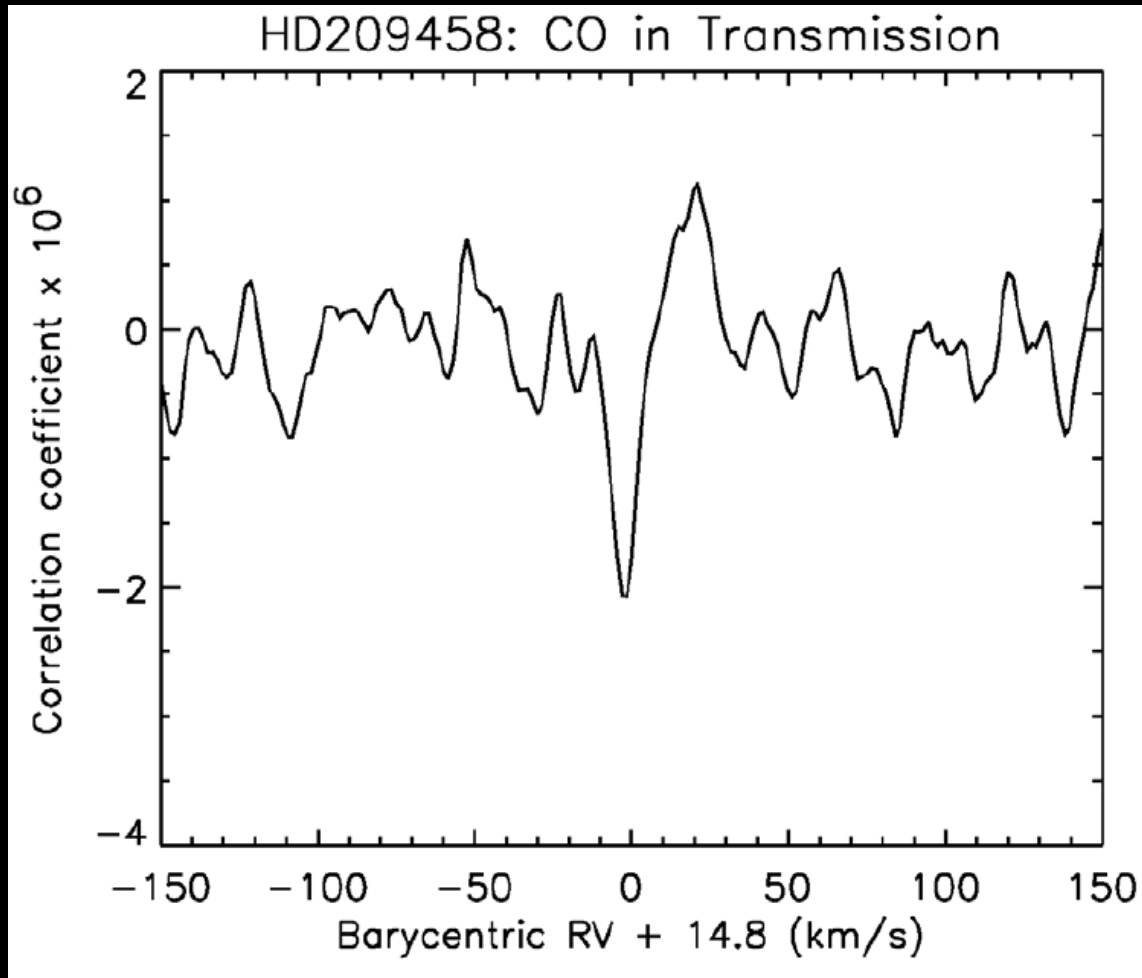
Динамика внешних слоев на горячих юпитерах



Планета прогревается и изнутри, и снаружи.

Это приводит к бурным движениям в верхней части оболочки планеты.

Ветер на HD 209458b

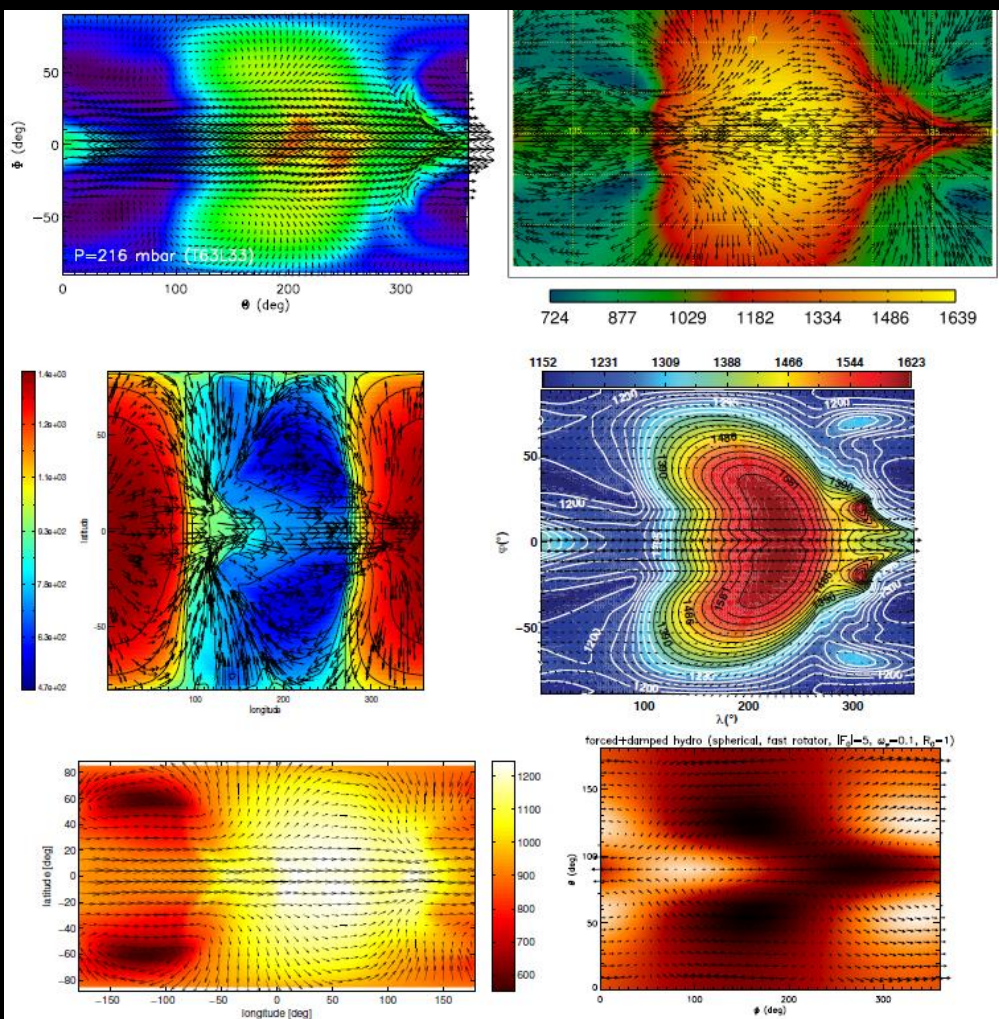


Очень горячий юпитер.
Скорость ветра 2 км в сек.

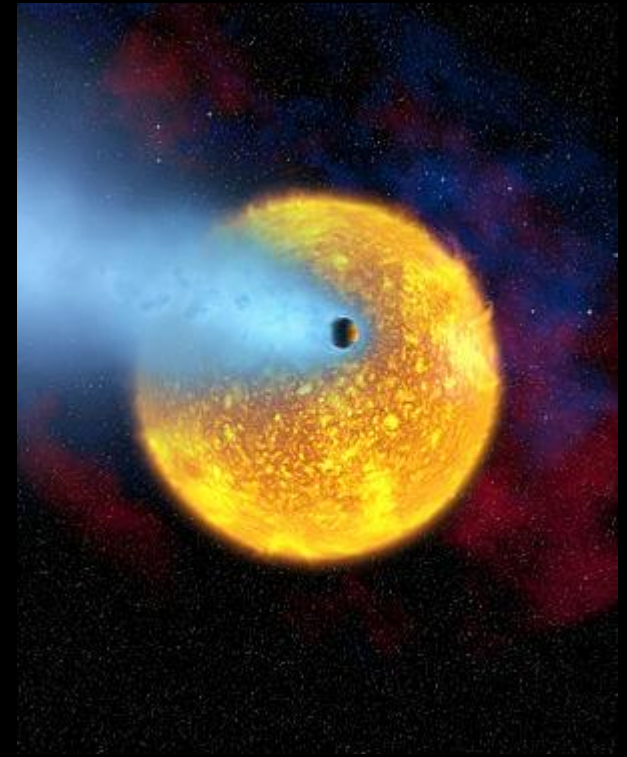
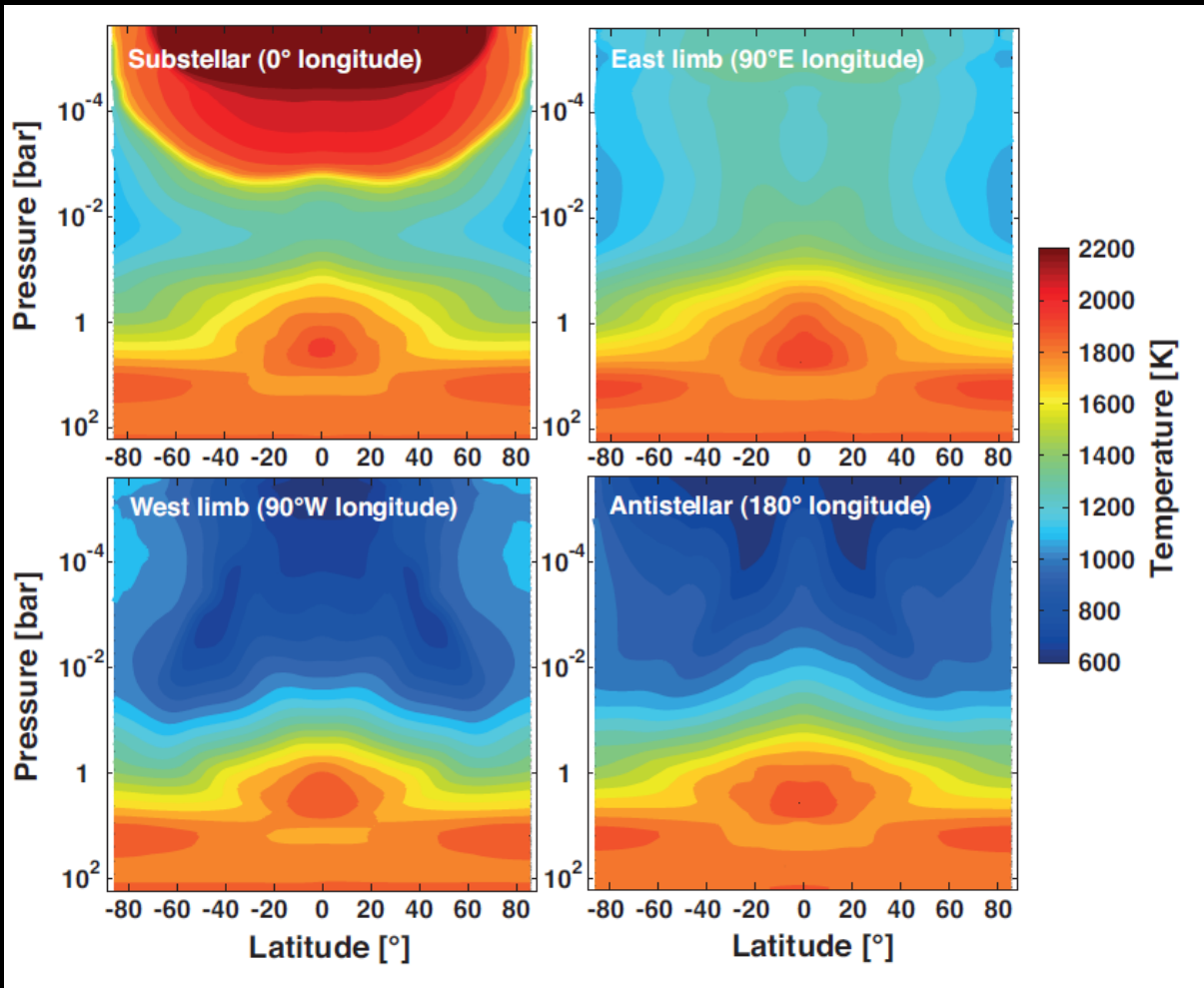
Ветры на горячих юпитерах

Показаны результаты моделирования.

Общее свойство — сильный поток вдоль экватора с запада на восток.

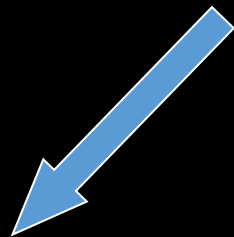


Моделирование HD209458 b



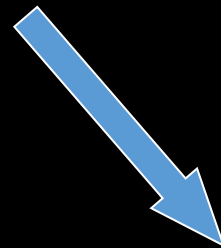
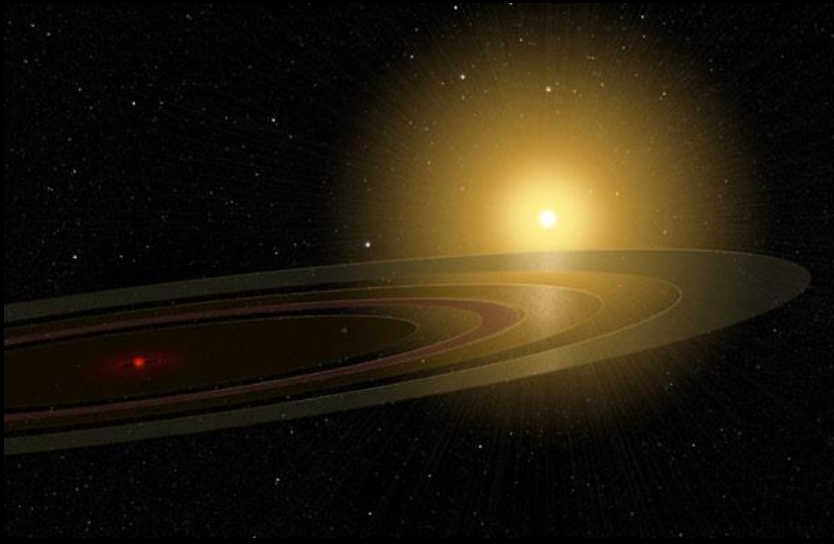
Осирис

Экзолуны. Как образовать?



Регулярные спутники

Образуются вместе с планетами
из вещества околопланетного диска

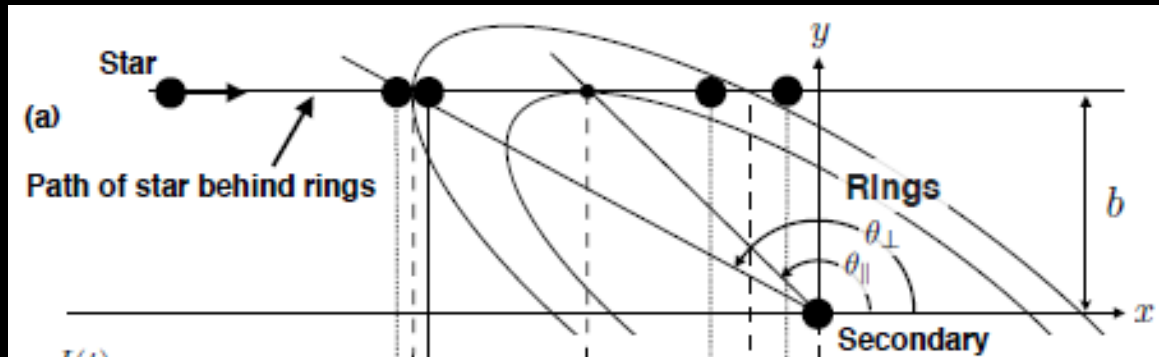


Иррегулярные спутники

Захват или удар

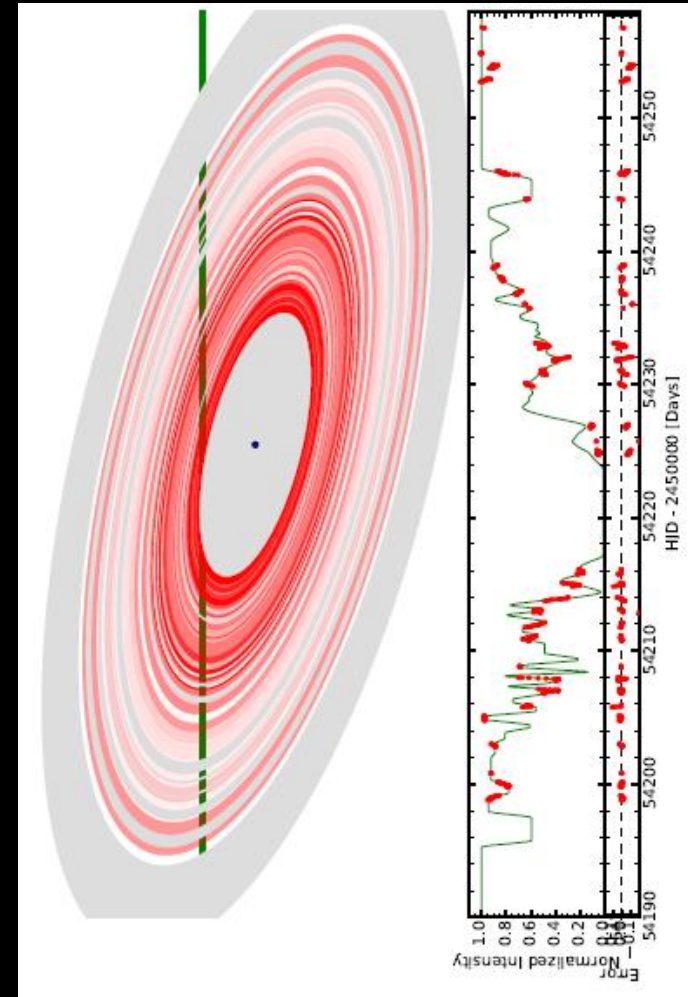


Гигантская система колец



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.



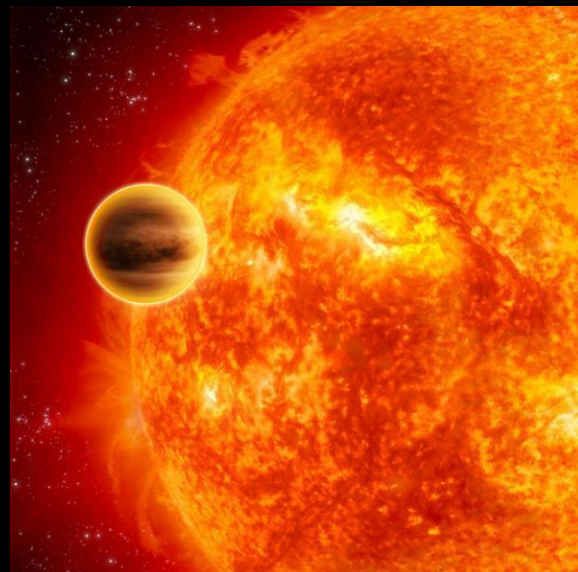
У каких планет могут быть «хорошие» экзолуны?

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



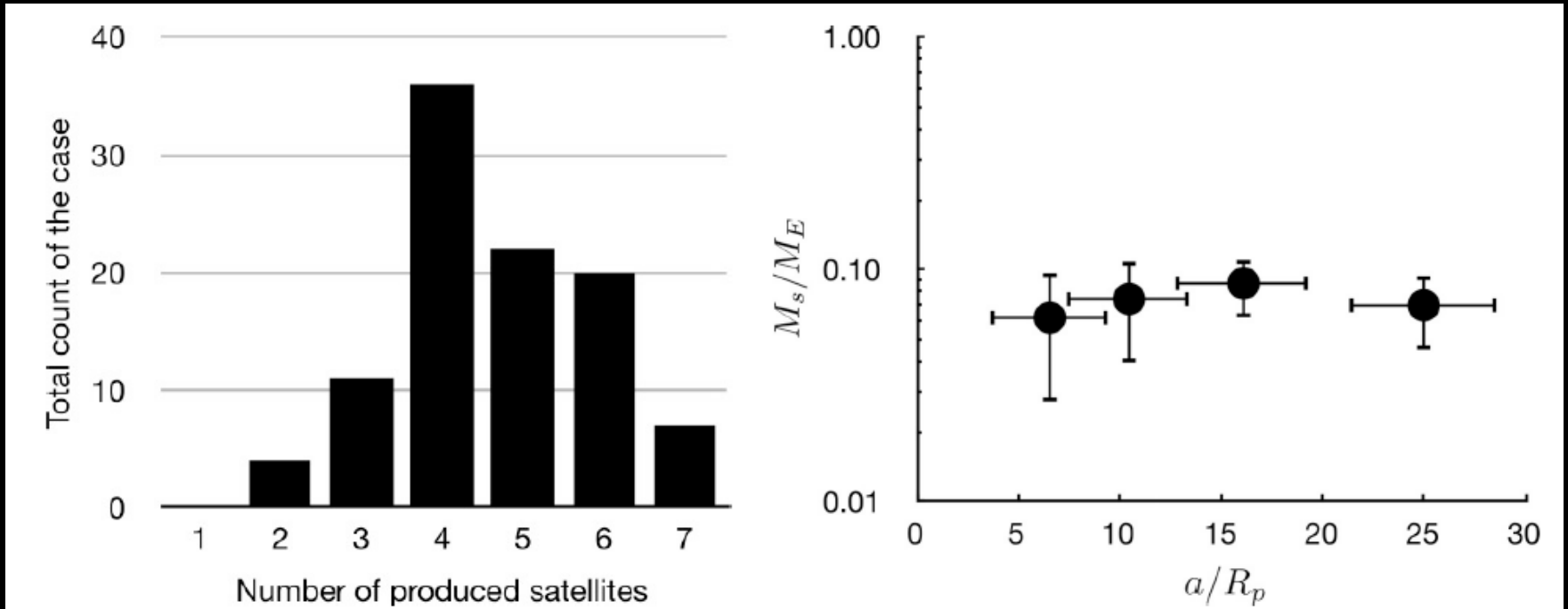
Следует выбирать системы, где много планет.

Большие луны должны быть у больших планет.



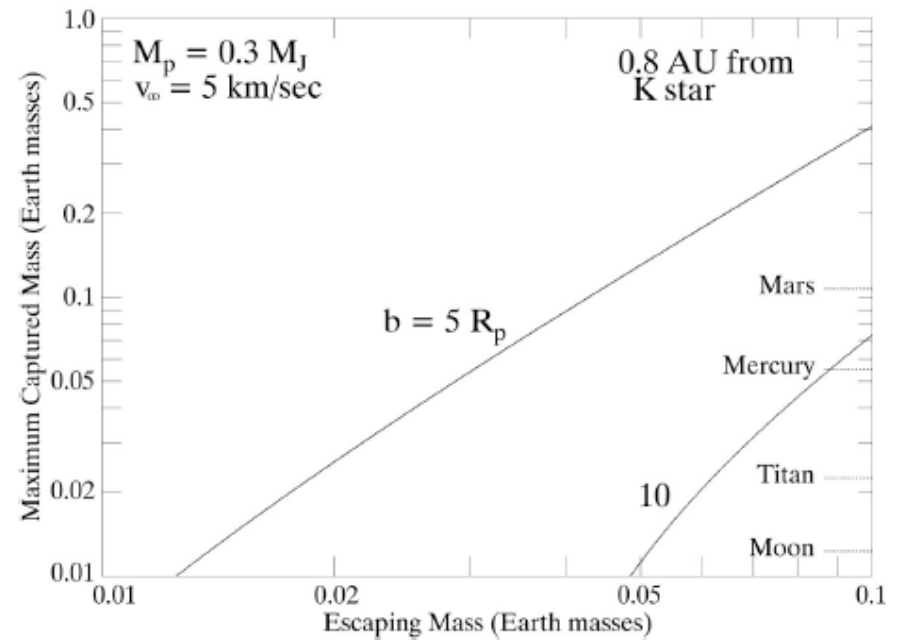
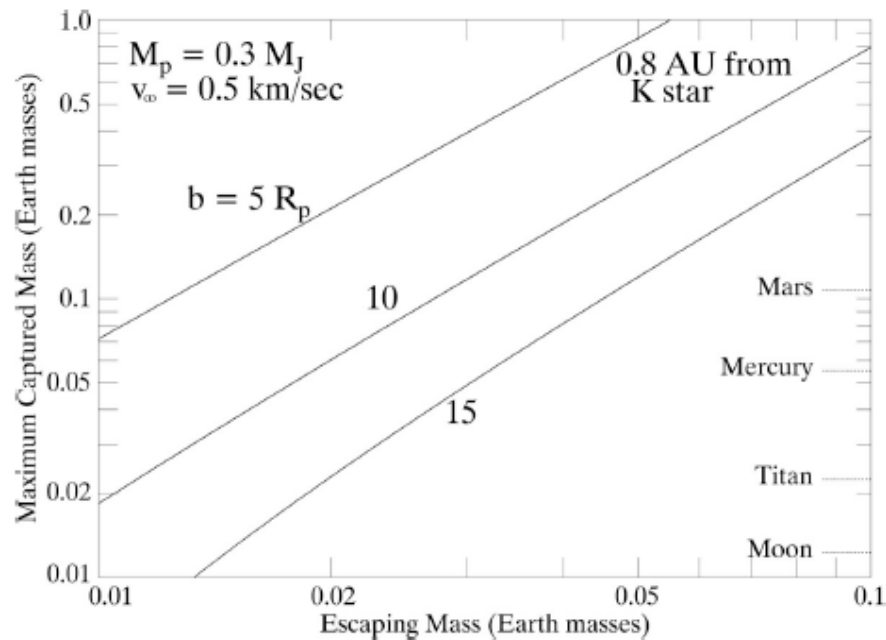
Горячие юпитеры должны растерять свои спутники пока мигрируют к звезде

Моделирование образования больших спутников



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

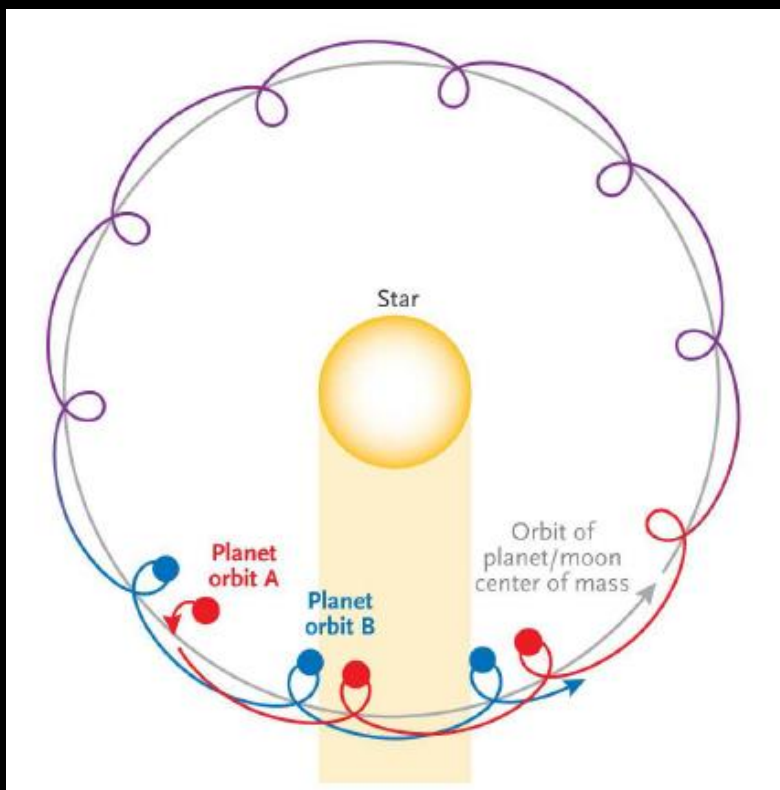
Захват спутника



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

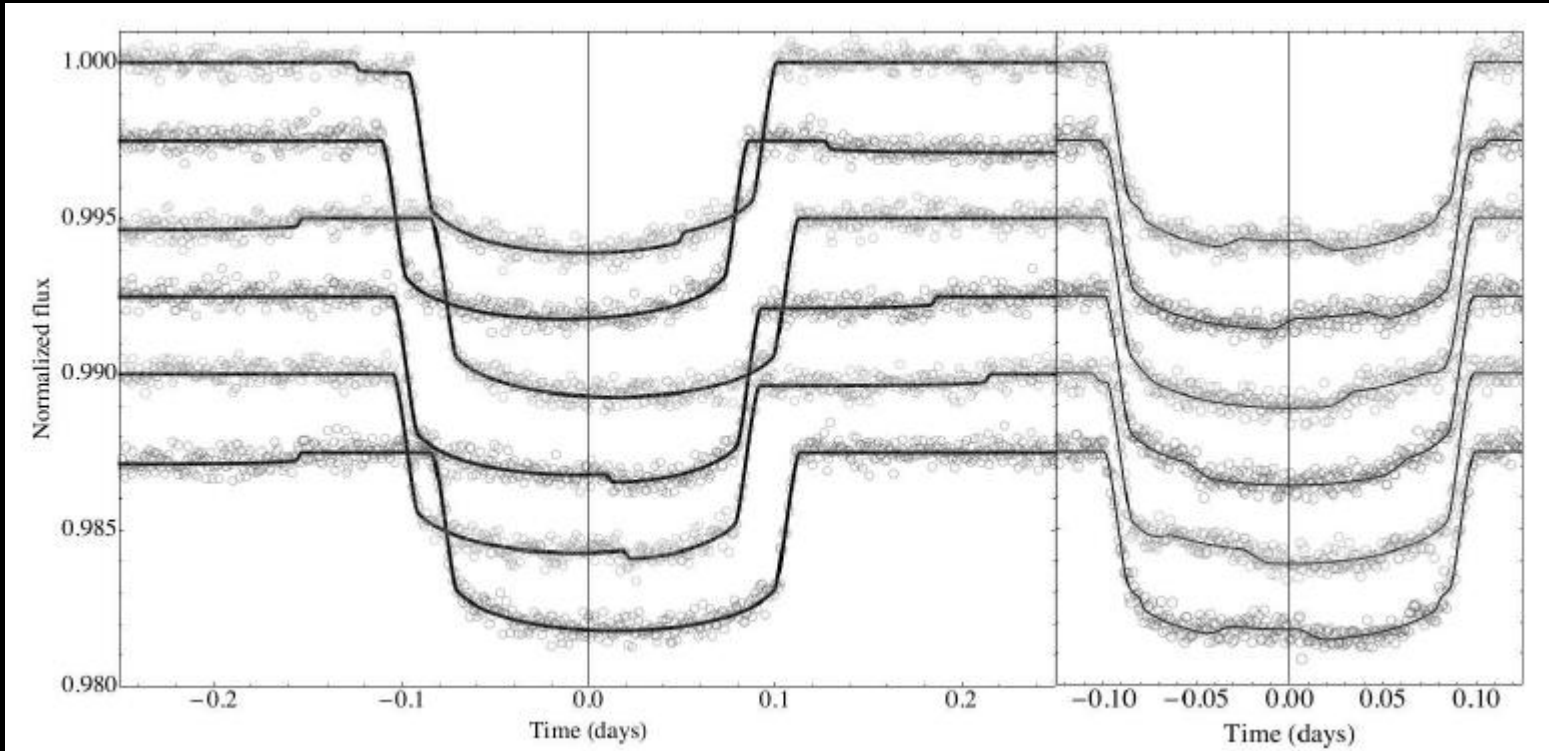
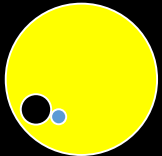
Наличие спутника приводит к вариации скорости движения планеты.

Из-за этого меняется длительность транзита.

3. Сдвиг плоскости орбиты

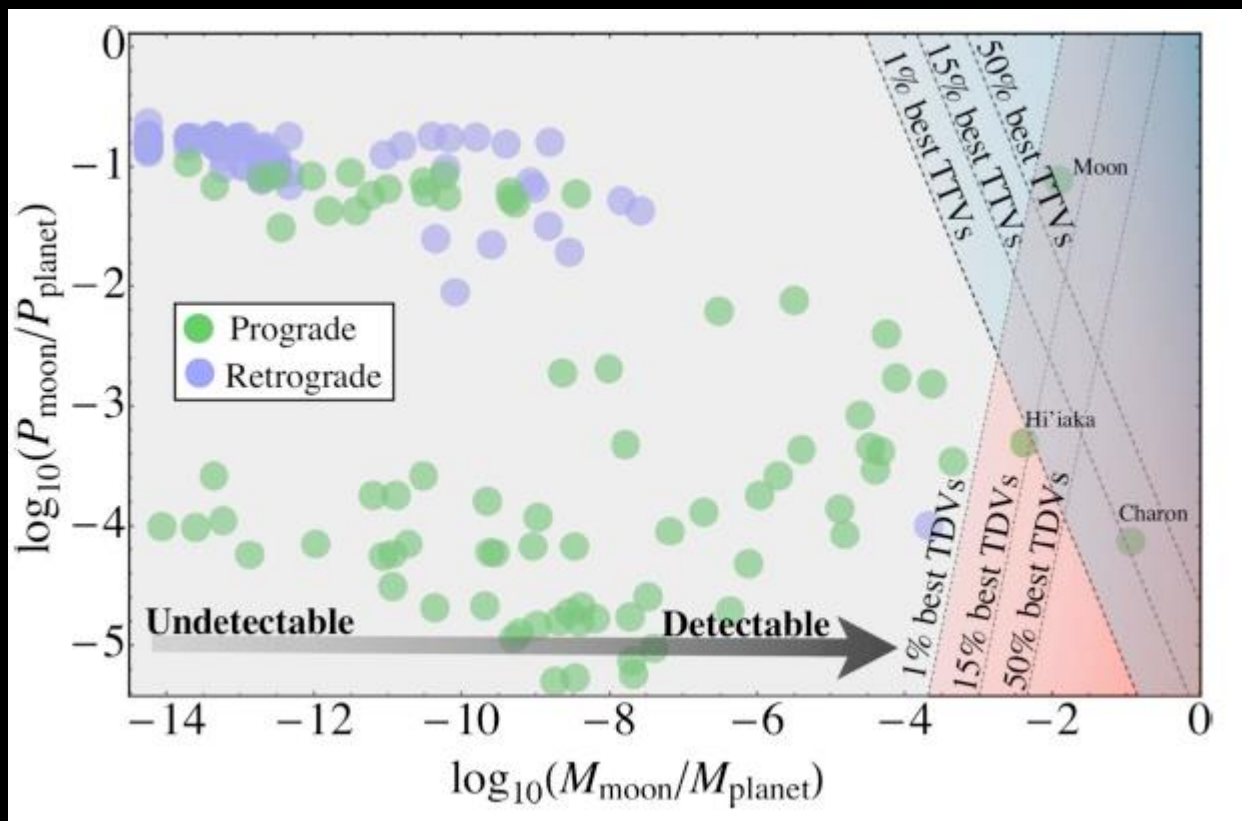
Из-за влияния спутника планета смещается перпендикулярно основной плоскости орбиты.

Совместные затмения



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

Современные пределы

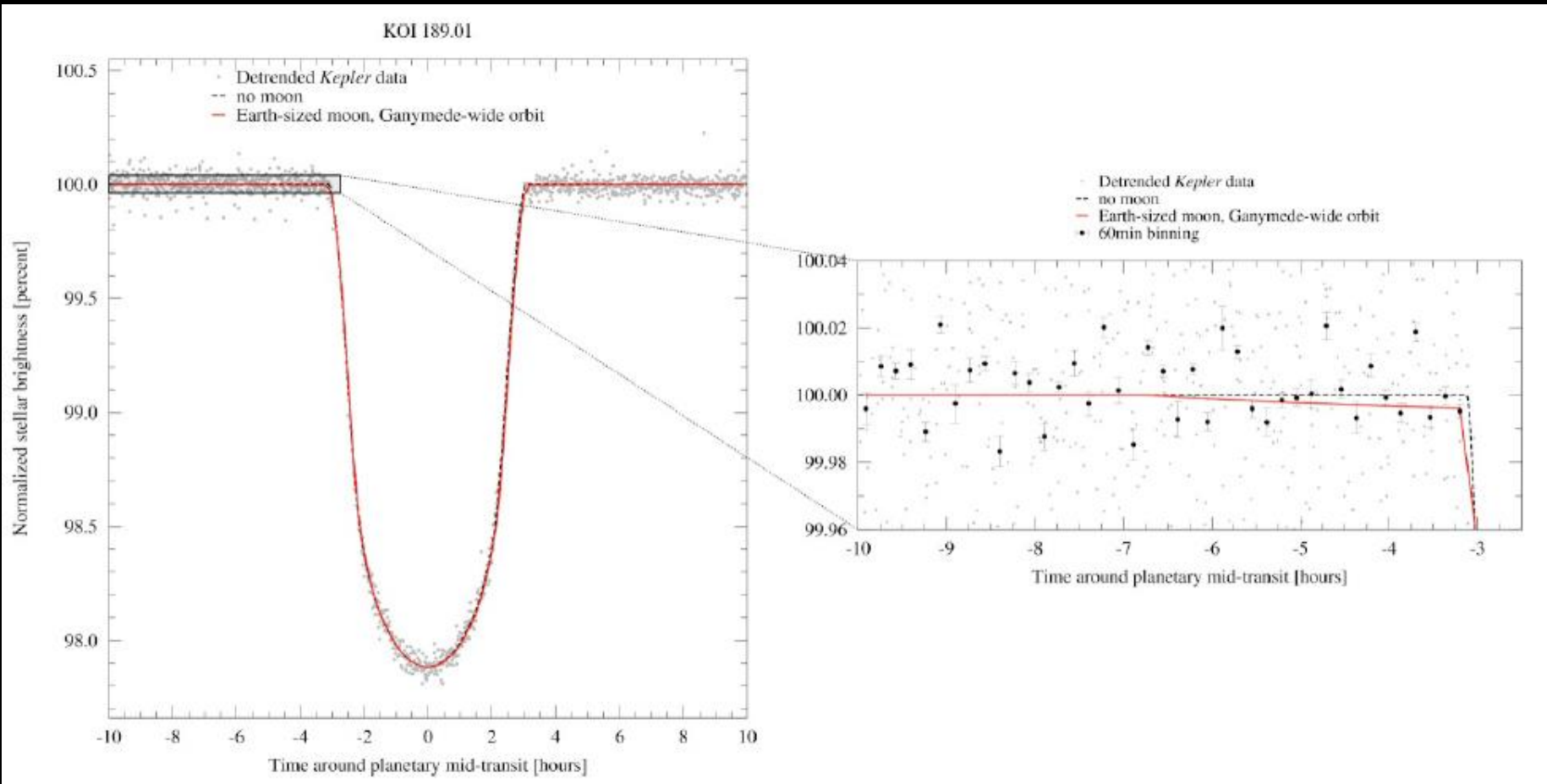


Показано, что бы мы получили, если бы луны Солнечной системы вращались вокруг планеты на 100-дневной орбите.

Предполагается, что у нас есть данные Кеплер за 4.35 лет, а поиск ведется по

- времени транзита
- длительности транзита

Насколько мал эффект



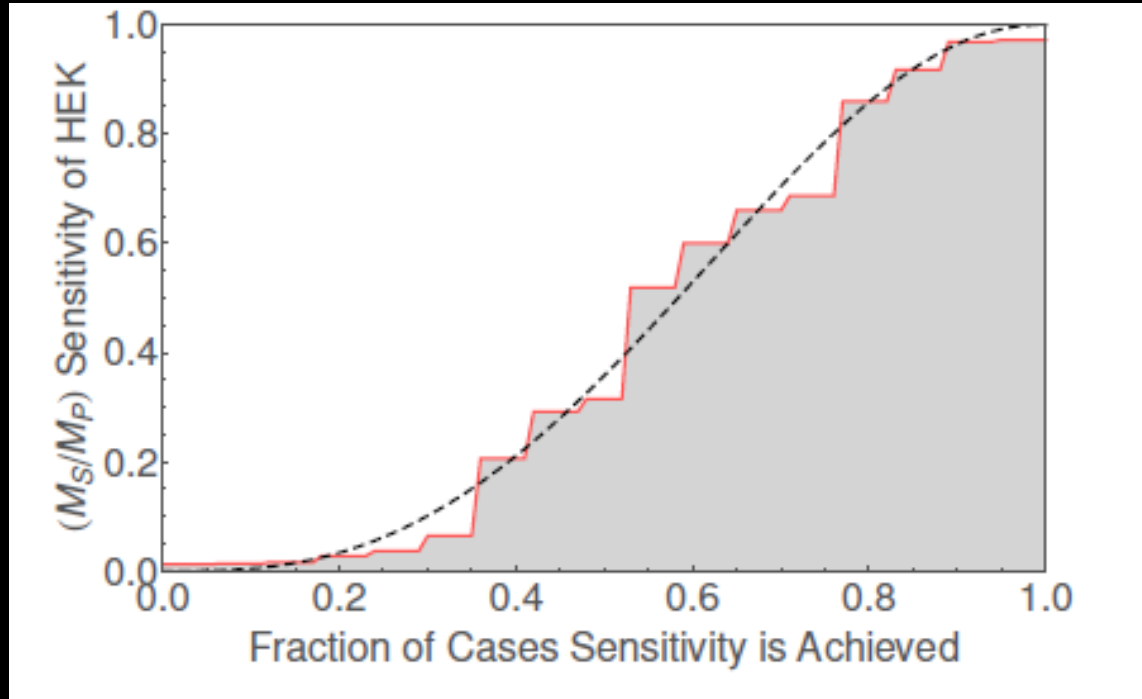
Планета типа Юпитера, луна – типа Земли.

Hunt for Exomoons with Kepler

Искали вокруг 17 планет,
но ничего не нашли.



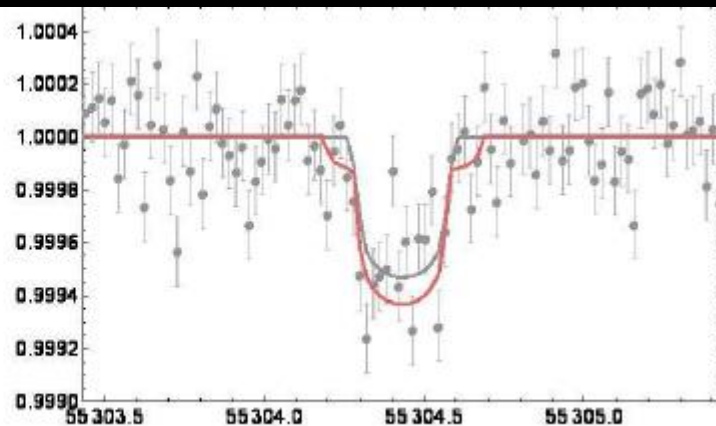
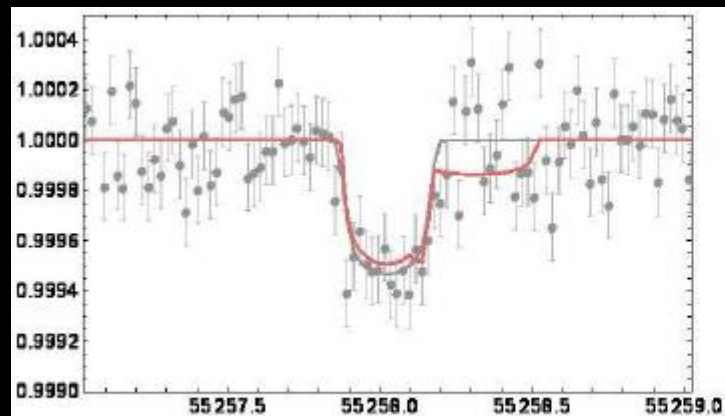
Зато в ходе поисков
удалось открыть
планету, которая
сама не транзитная.



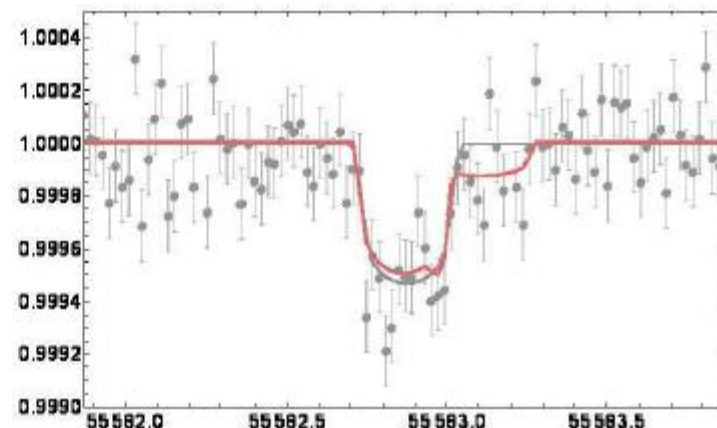
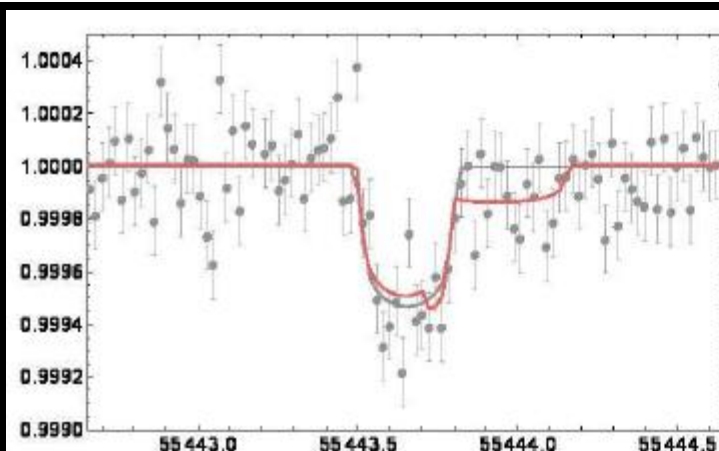
Соотношение масс, как у Земли-Луны,
давало бы регистрацию в 14% случаев.
А как у Плутона-Харона – в 32%.

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

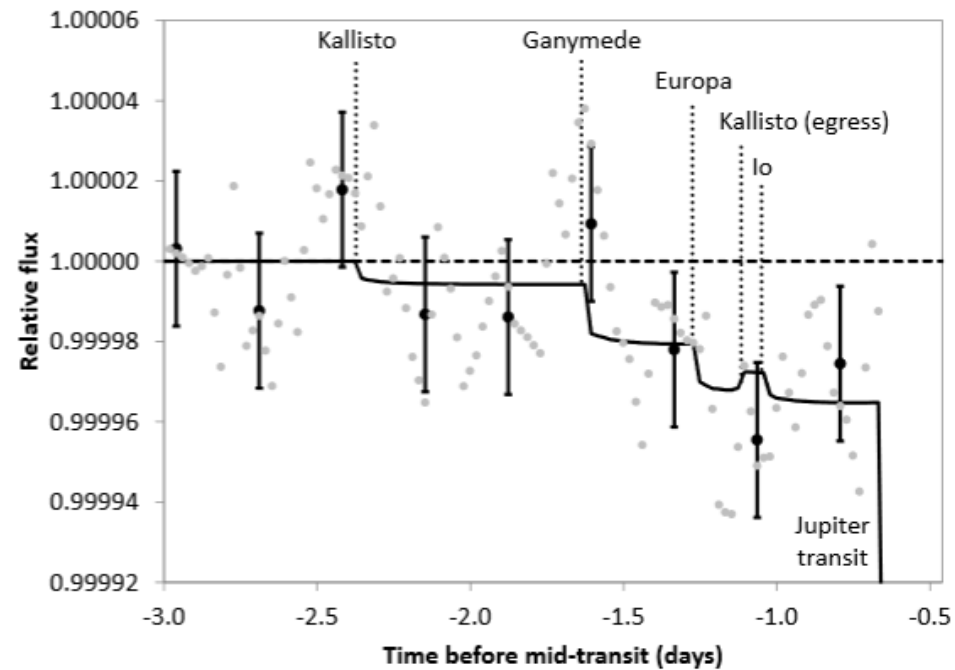
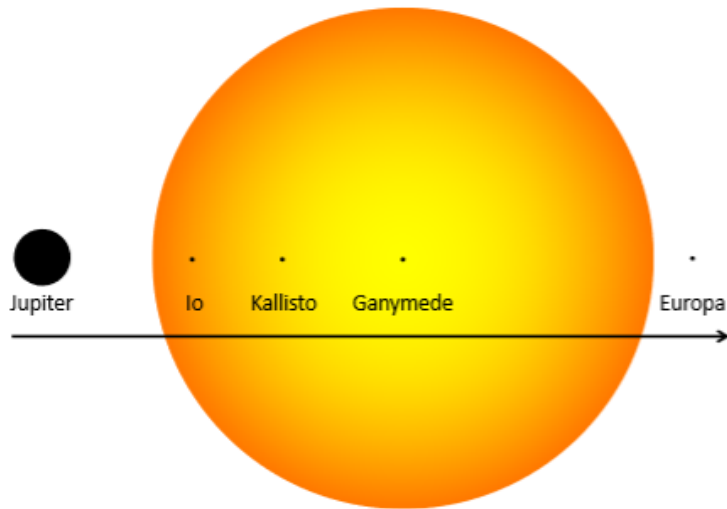
Примеры поиска



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



Как бы мы видели транзит Юпитера



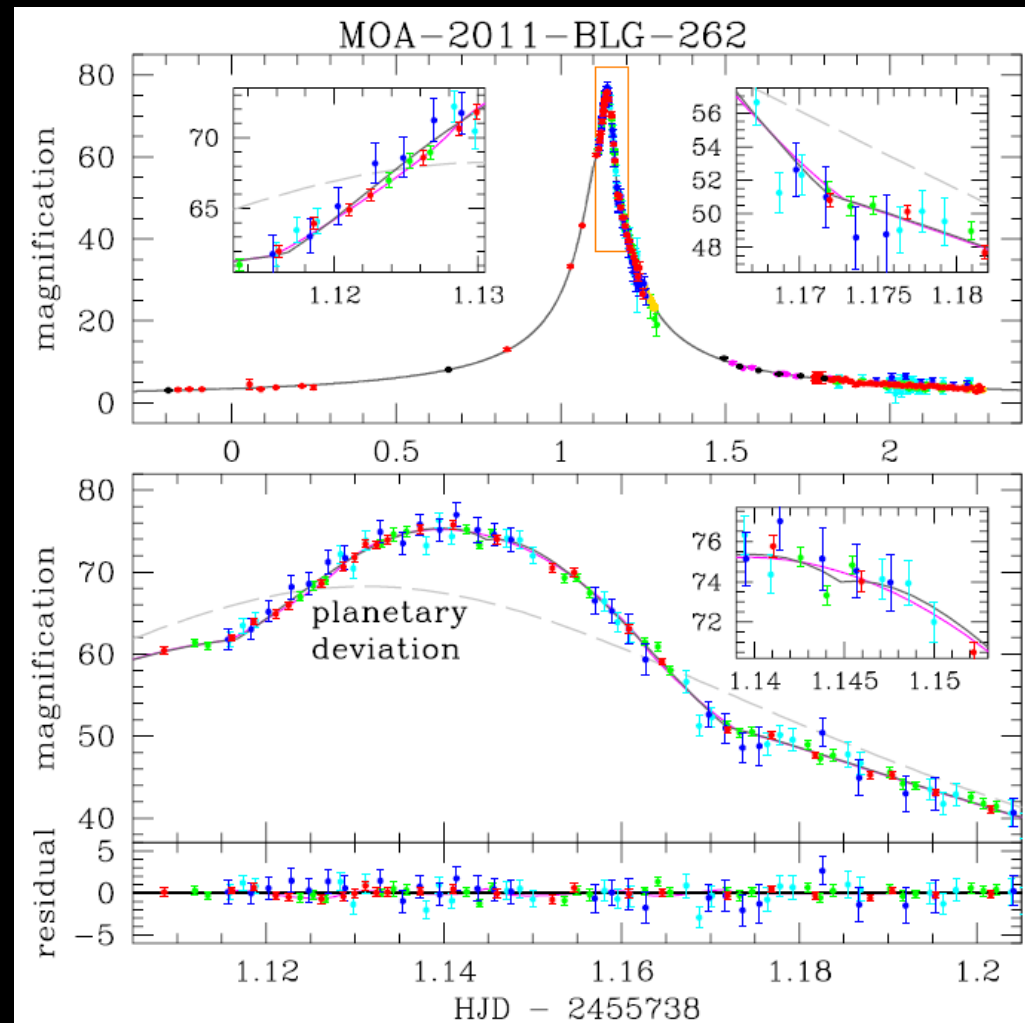
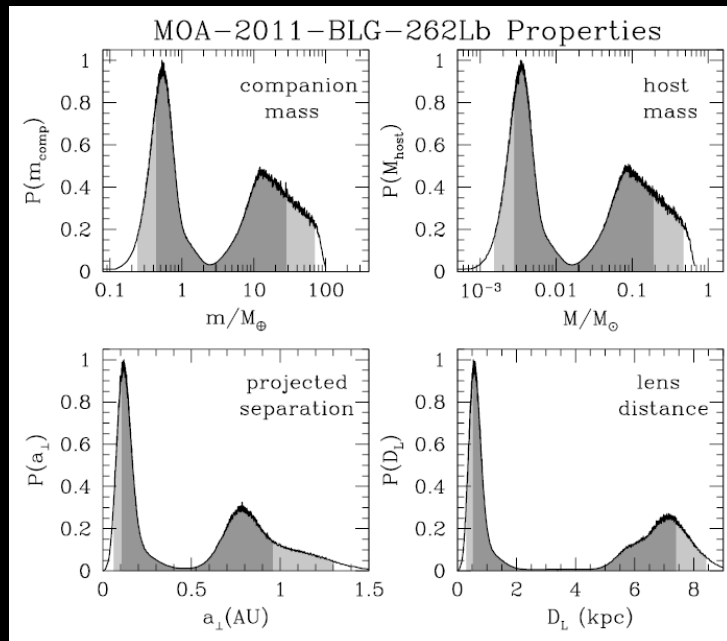
1503.03251

Экзопланета с луной, но без звезды?

Существует два решения:

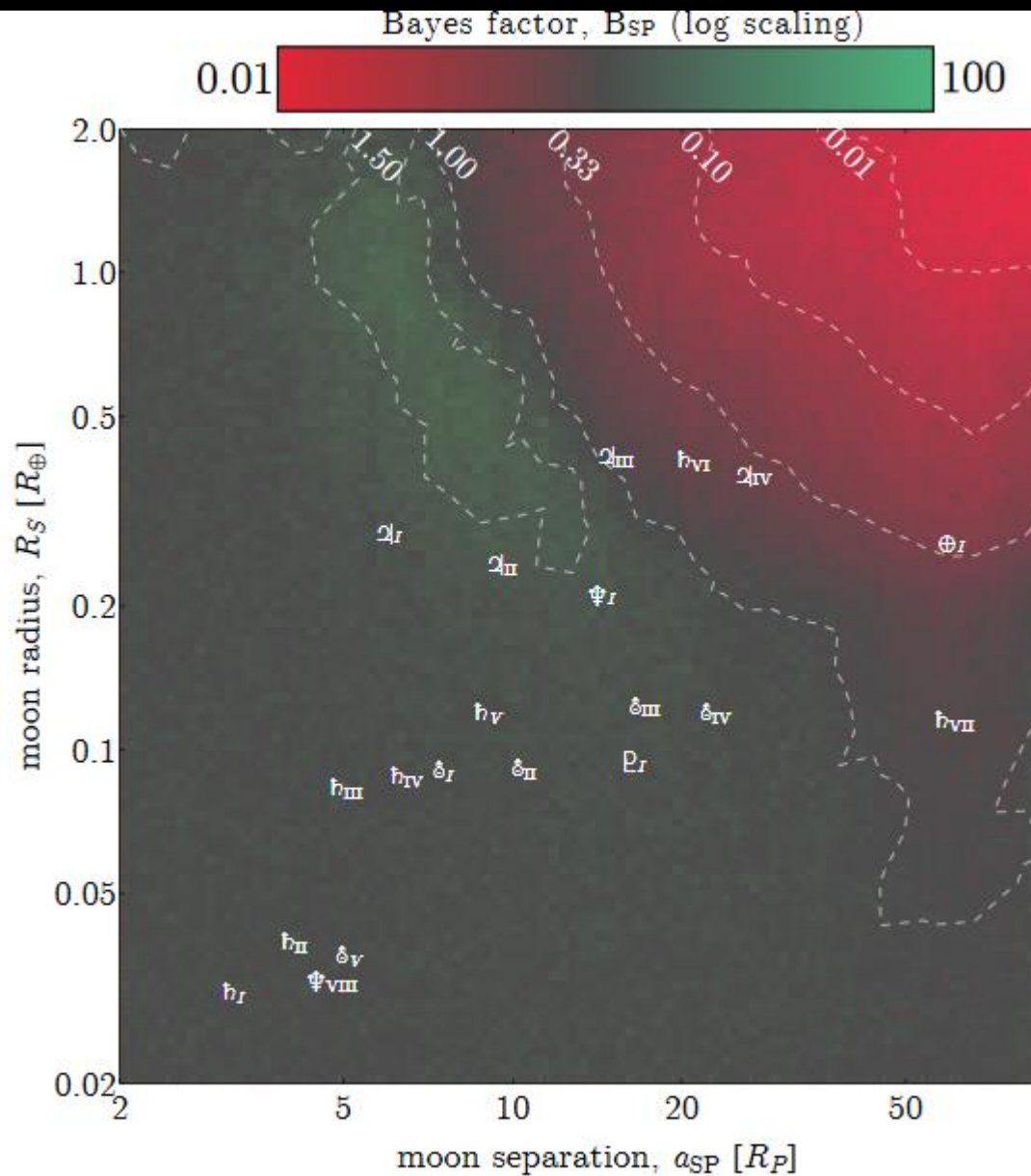
1. $0.12M_{\text{sun}} + 18M_{\text{Earth}}$
2. $4M_{\text{Jup}} + 0.5M_{\text{Earth}}$

Проблема в определении
расстояния до системы

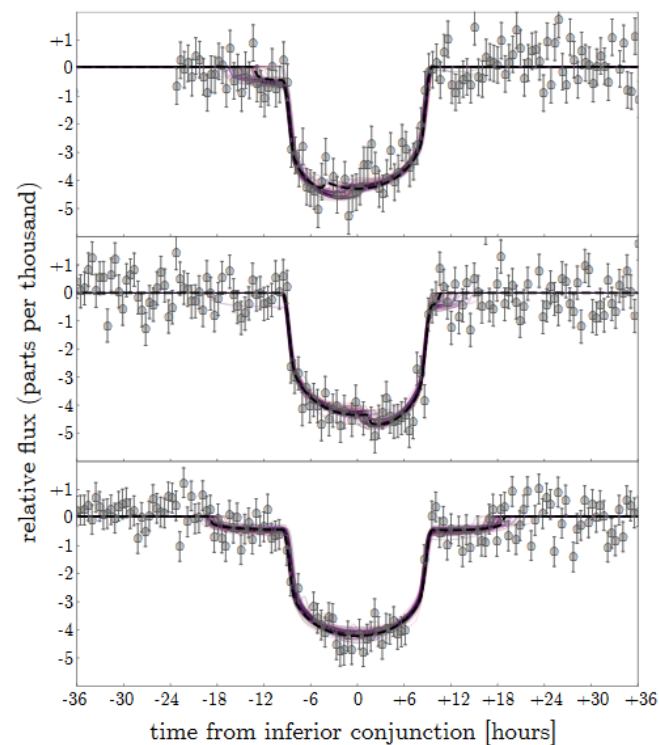


1312.3951

Кандидат в экзолуны?



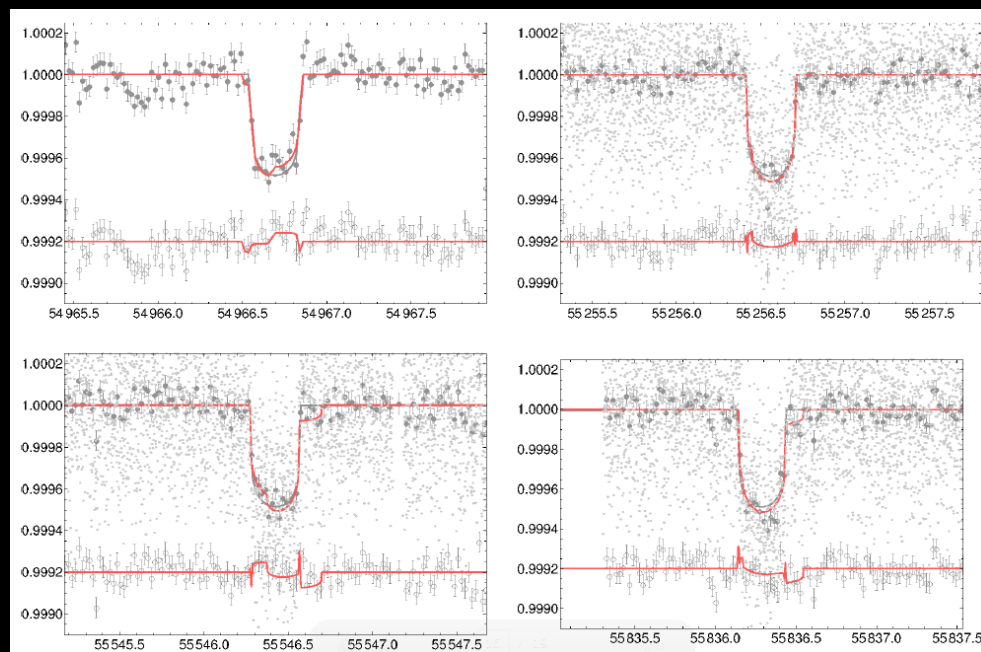
Kepler-1625BI



Полуось ~20 радиусов планеты.
Планета типа Юпитера.
Орбита планеты ~0.8 а.е.

Экзолуны могут быть обитаемы

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



Такой спутник искали у планеты Керлер-22b.

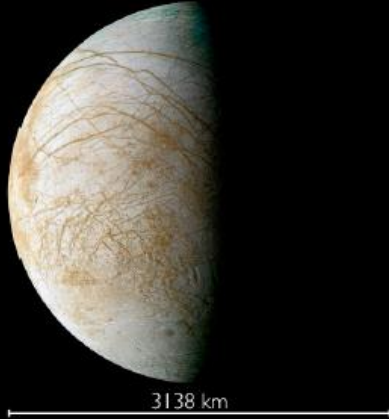
Сама планета слишком велика. Зато, тогда у нее может быть тяжелый спутник.

Спутник не нашли.

Спутник по крайней мере вдвое легче Земли.

... и в Солнечной системе ...

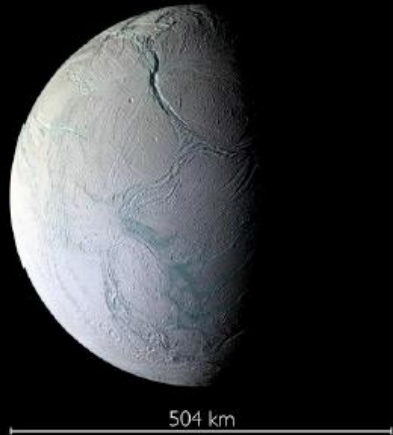
Europa



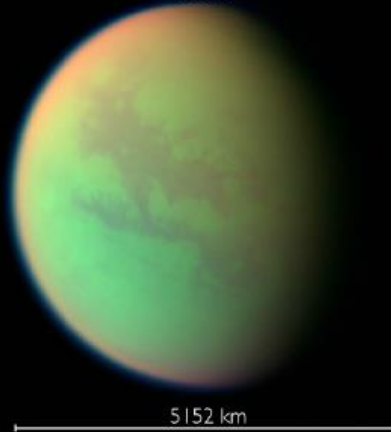
Ganymede



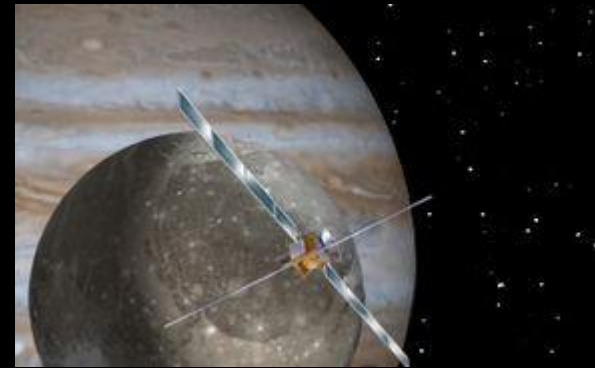
Enceladus



Titan

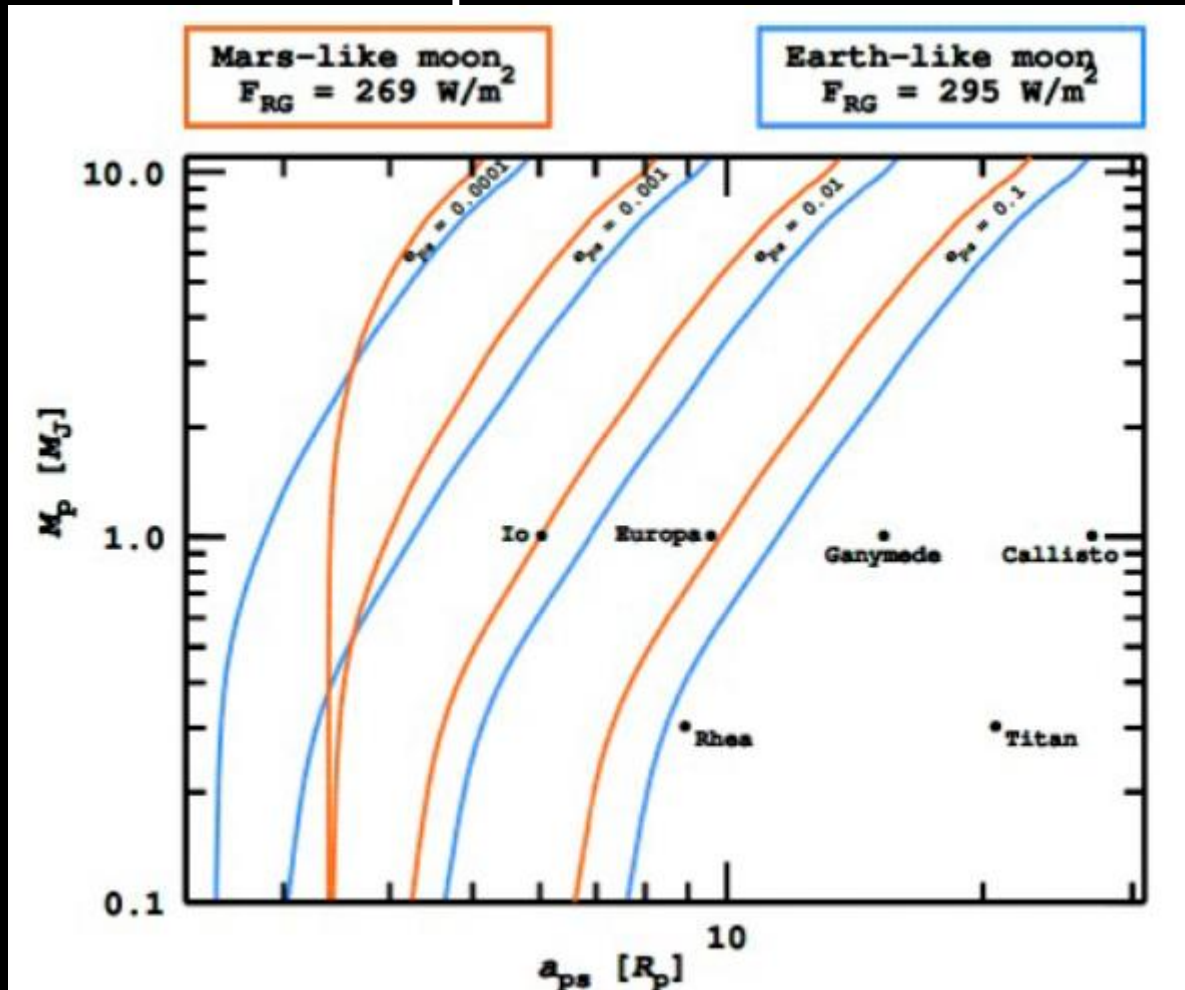


Потенциально обитаемыми считаются четыре объекта: спутники Юпитера и Сатурна.



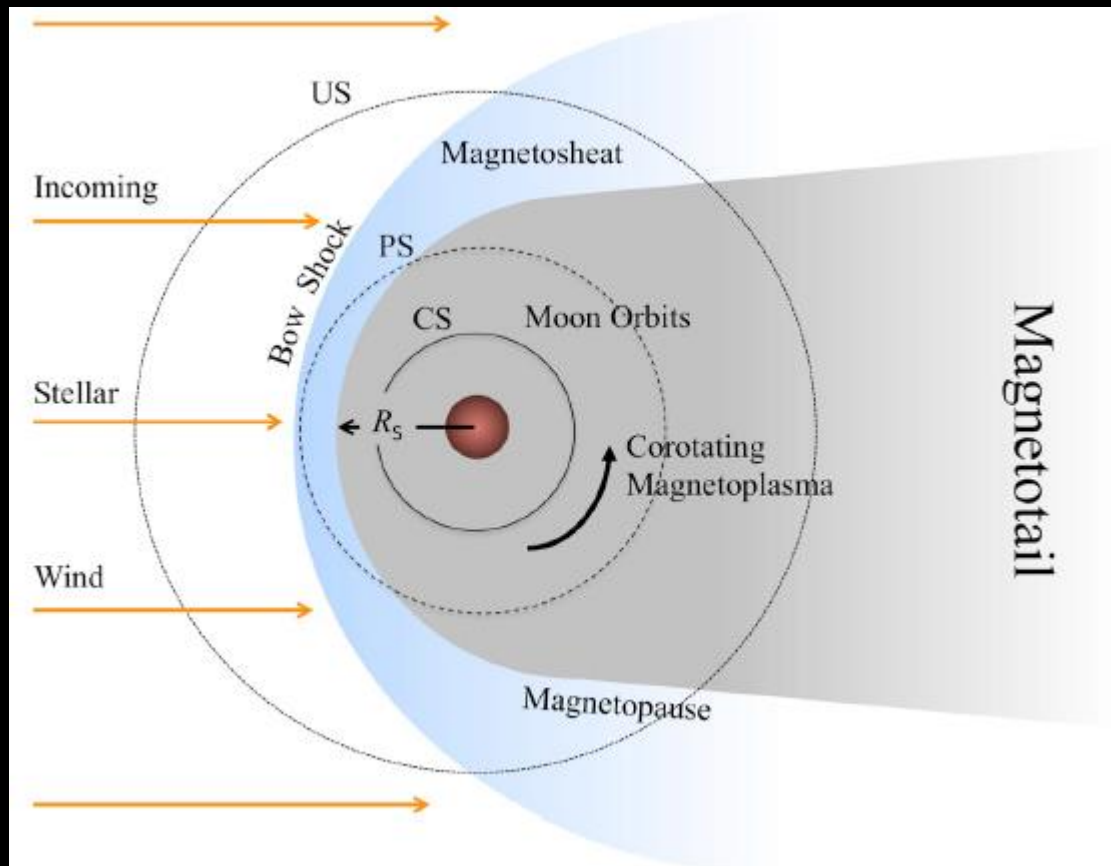
Ждем JUICE (2022-...)

Роль приливов



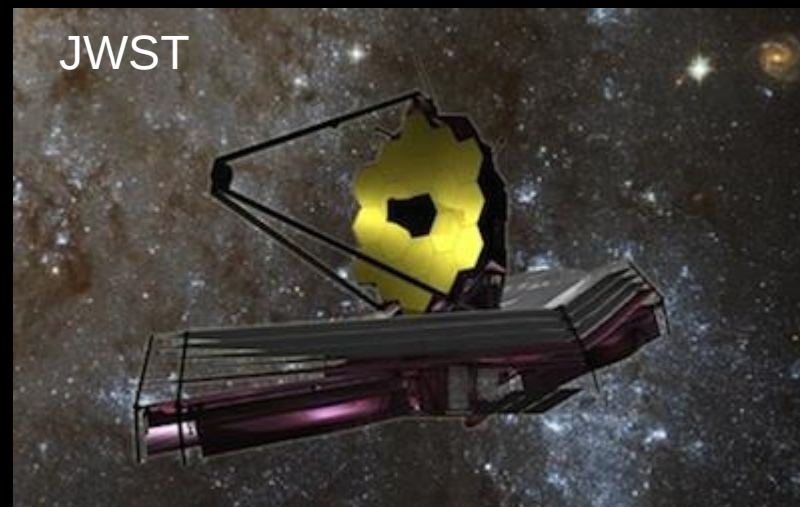
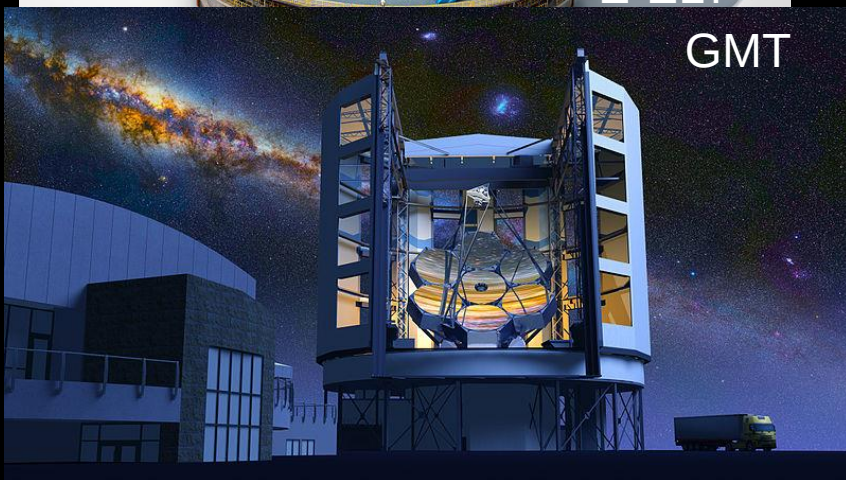
Приливы дополнительно греют спутник. В итоге, если спутник находится слишком близко, то там начинается парниковый эффект из-за приливного нагрева. Чем больше эксцентриситет, тем дальше спутник должен быть от планеты.

Магнитосферы

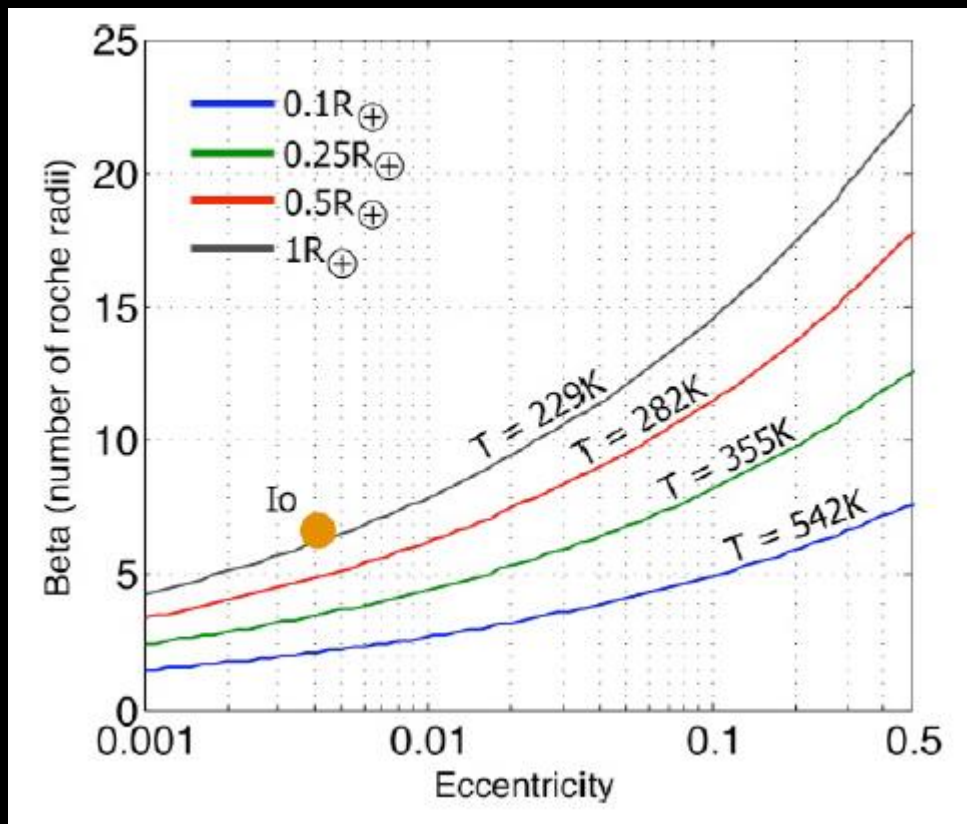


Полагают, что для жизни может быть важным наличие магнитосферы. Сами спутники вряд ли могут иметь достаточно мощную магнитосферу. Но они могут быть защищены планетой. Тут, однако, есть сложности, т.к. вблизи велик приливной нагрев, а вдали – не работает магнитосферная защита.

Будущие исследования



Смогут ли JWST их увидеть?



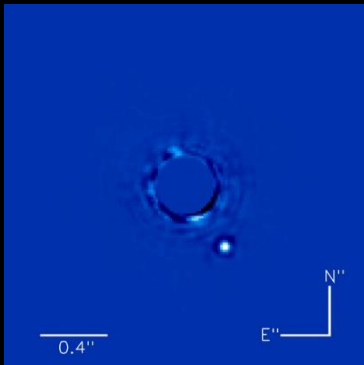
Луна должна быть большой (как Земля) и довольно теплой (снова, например, как Земля).

Плюсом является то, что теплый (и потенциально обитаемый) спутник может находиться далеко от звезды (где его проще увидеть), т.к. часть нагрева связана с приливами.

Звезда на 3 пк

Gemini Planet imager

Наблюдения начались в 2014 г.



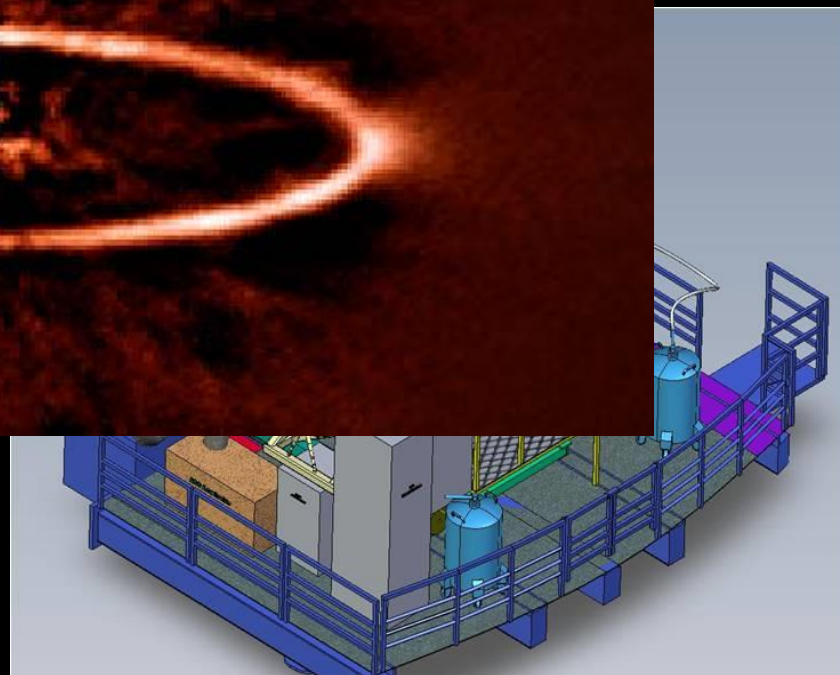
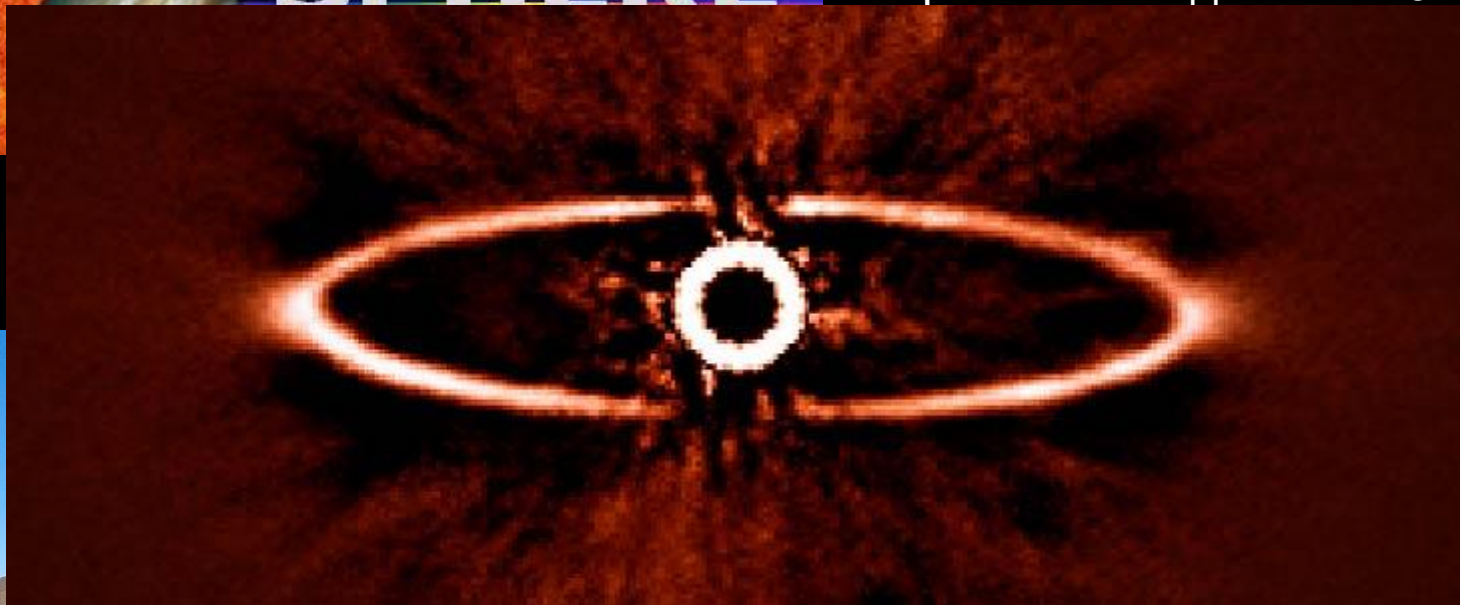
Первый свет



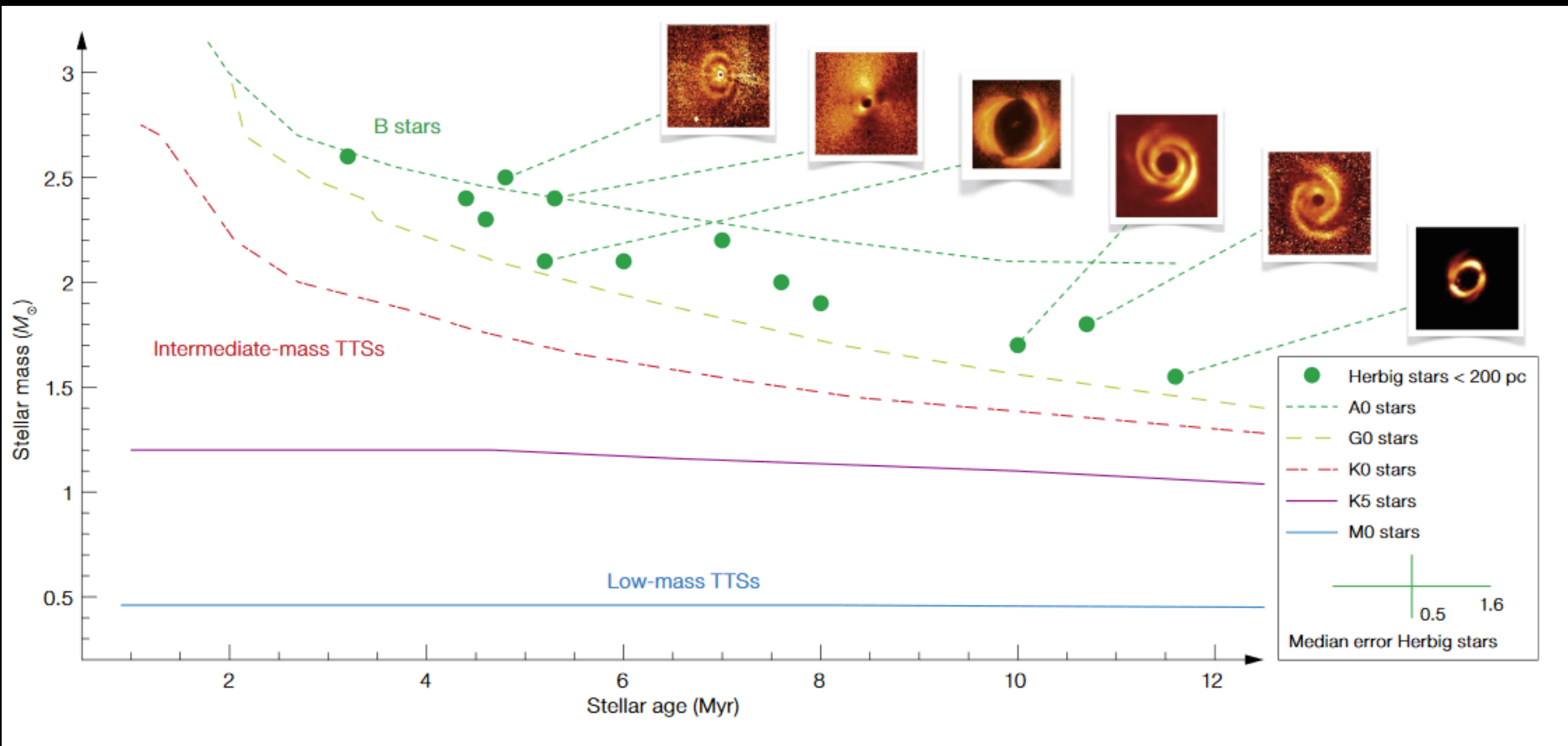
SPHERE на VLT



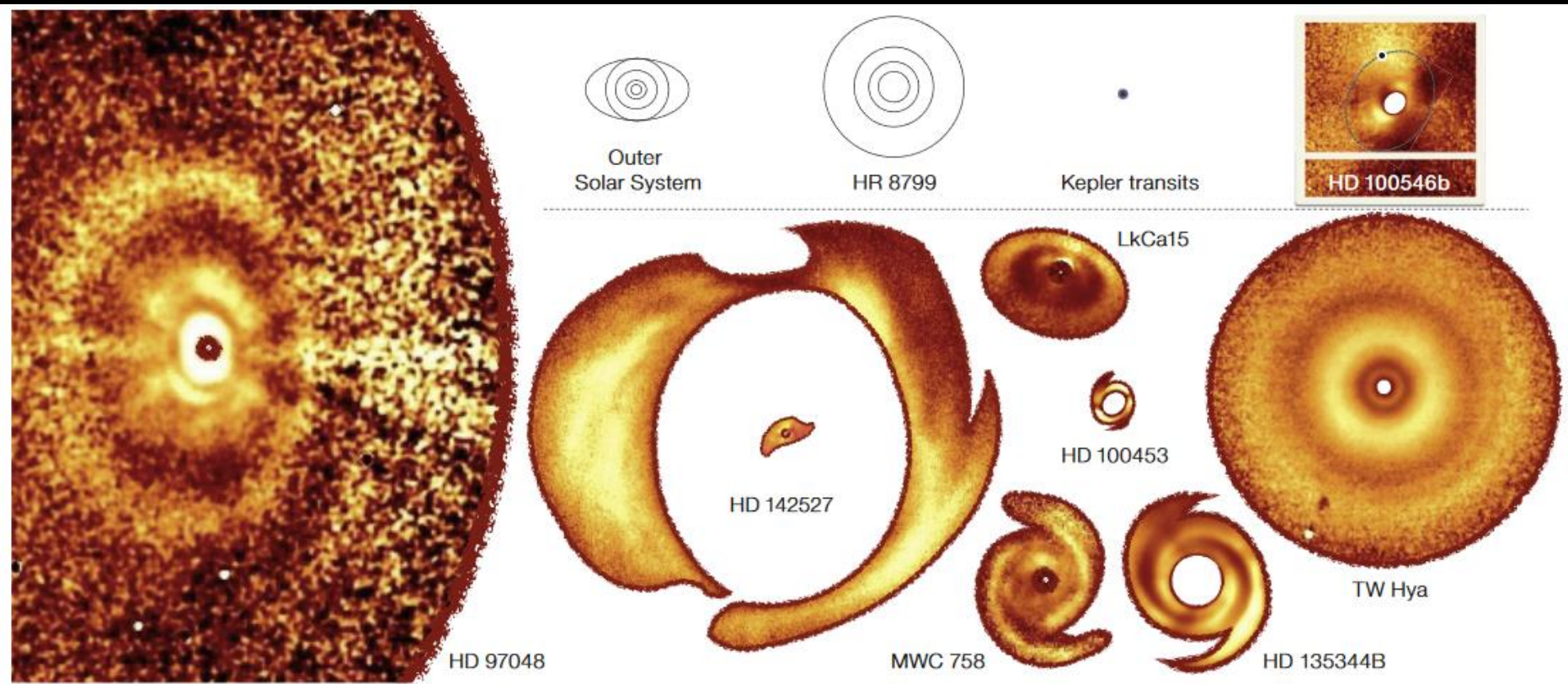
Поиск планет-гигантов.
Первые наблюдения – 2014 г.



Три года SPHERE

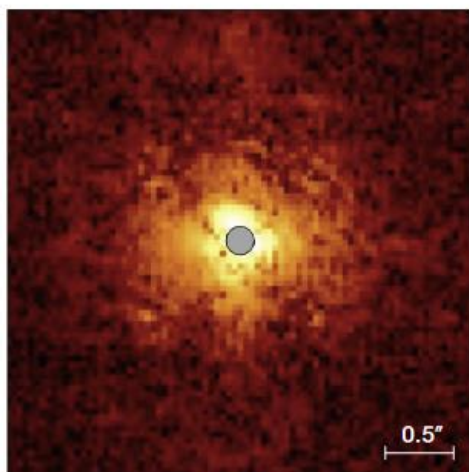


Три года SPHERE

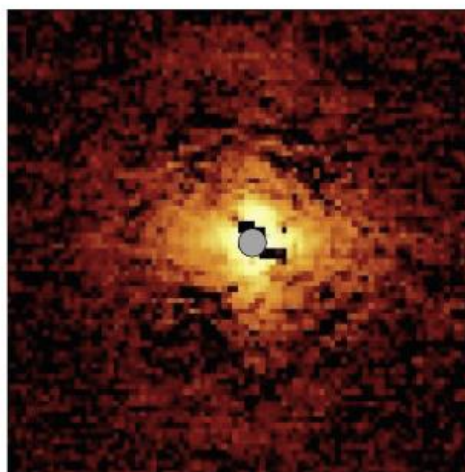


NACO vs. SPHERE

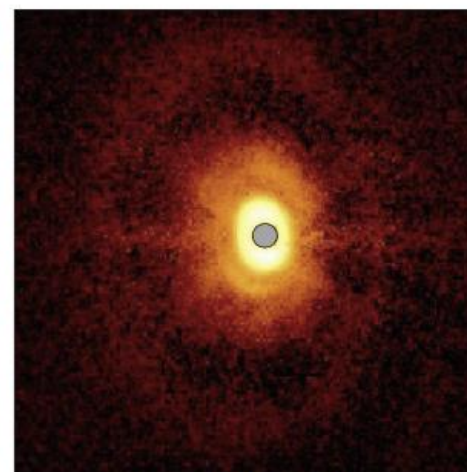
HD 97048



2006 VLT/NACO data
Old data reduction

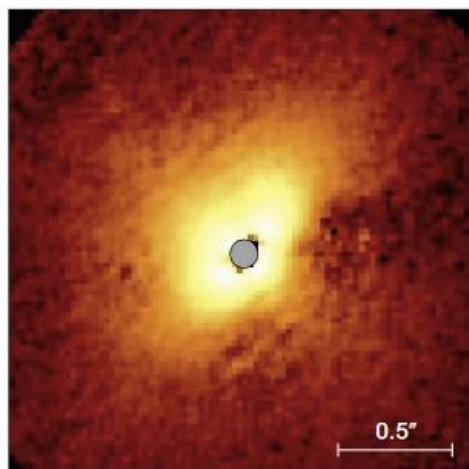


2006 VLT/NACO data
New data reduction

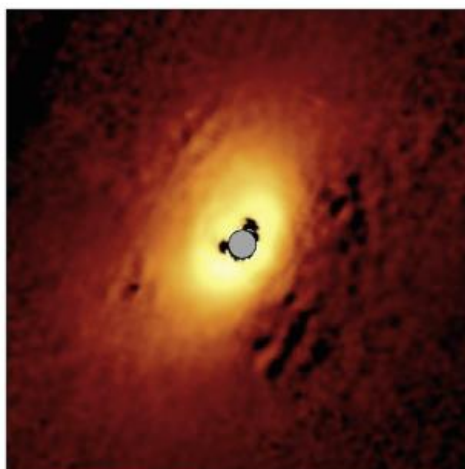


2016 VLT/SPHERE data

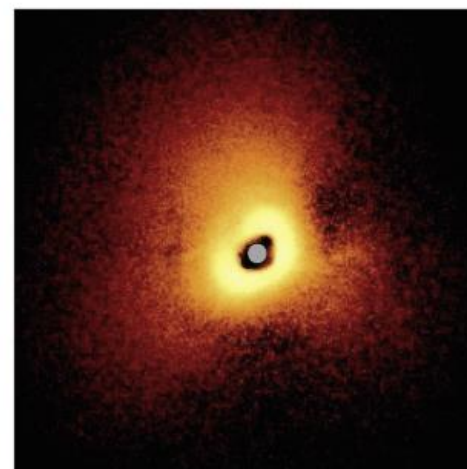
HD 100546



2006 VLT/NACO data
Old data reduction

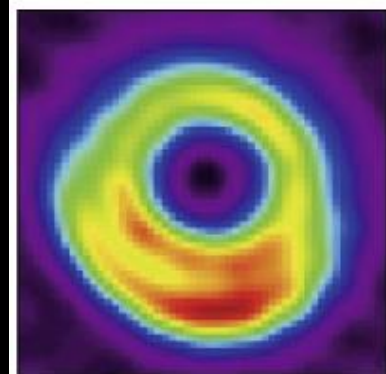


2006 VLT/NACO data
New data reduction



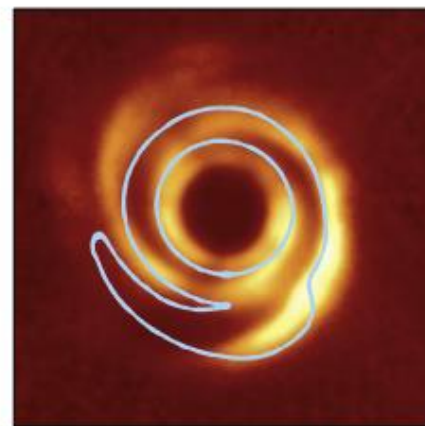
2015 VLT/SPHERE data

Спирали SPHERE



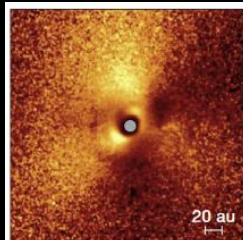
ALMA

HD 135344B

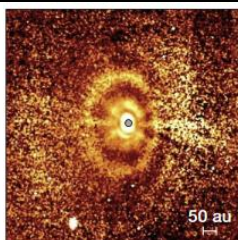


SPHERE

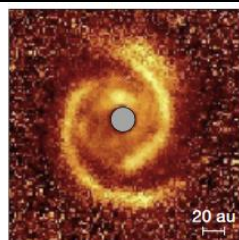
1710.02795



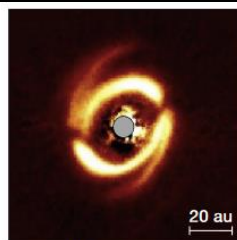
HD 100546



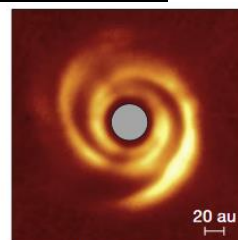
HD 97048



MWC 758



HD 100453

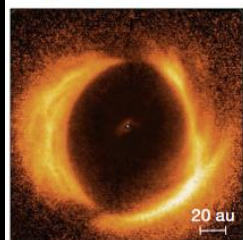


HD 135344B

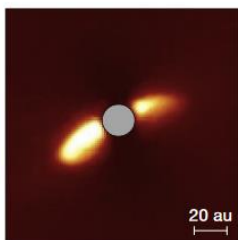
Early stellar type

Herbig Ae/Be stars

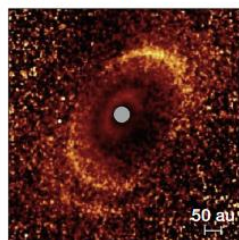
F stars



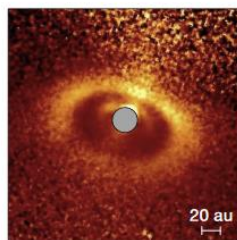
HD 142527



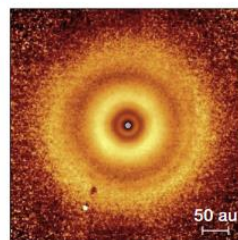
T Cha



RX J1615-3255



LkCa15



TW Hya

T Tau stars

Late stellar type