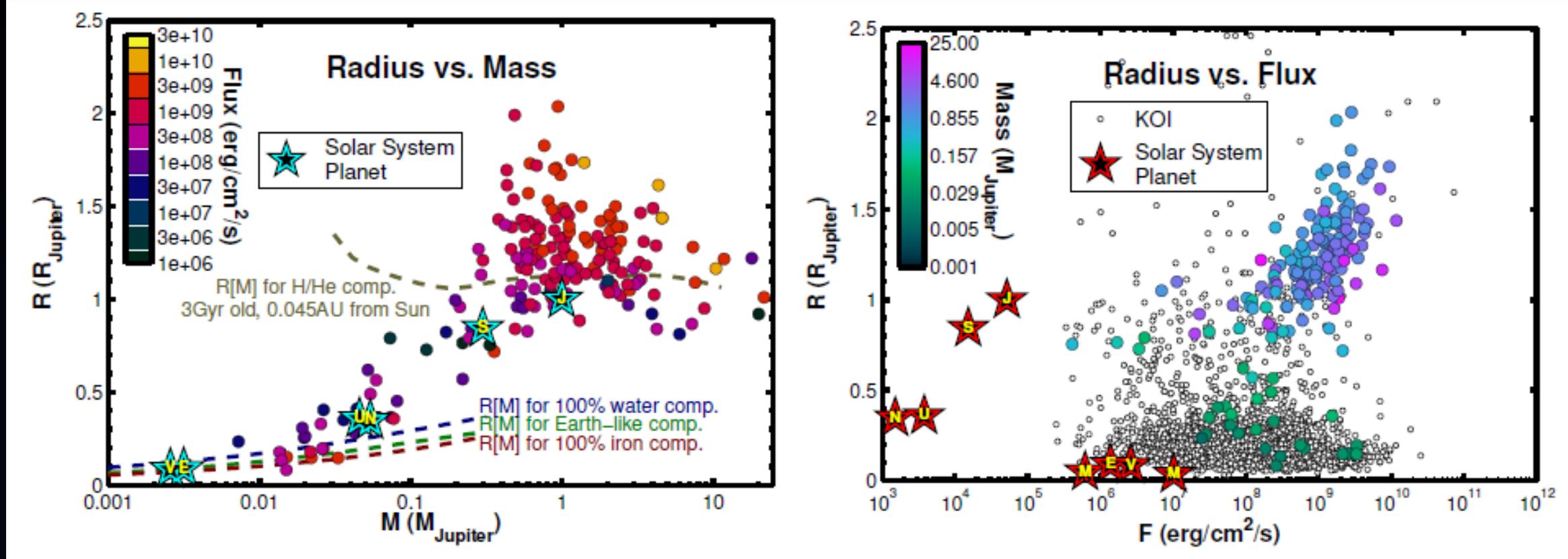


# Структура планет

И ИХ СПУТНИКИ

# Размеры планет



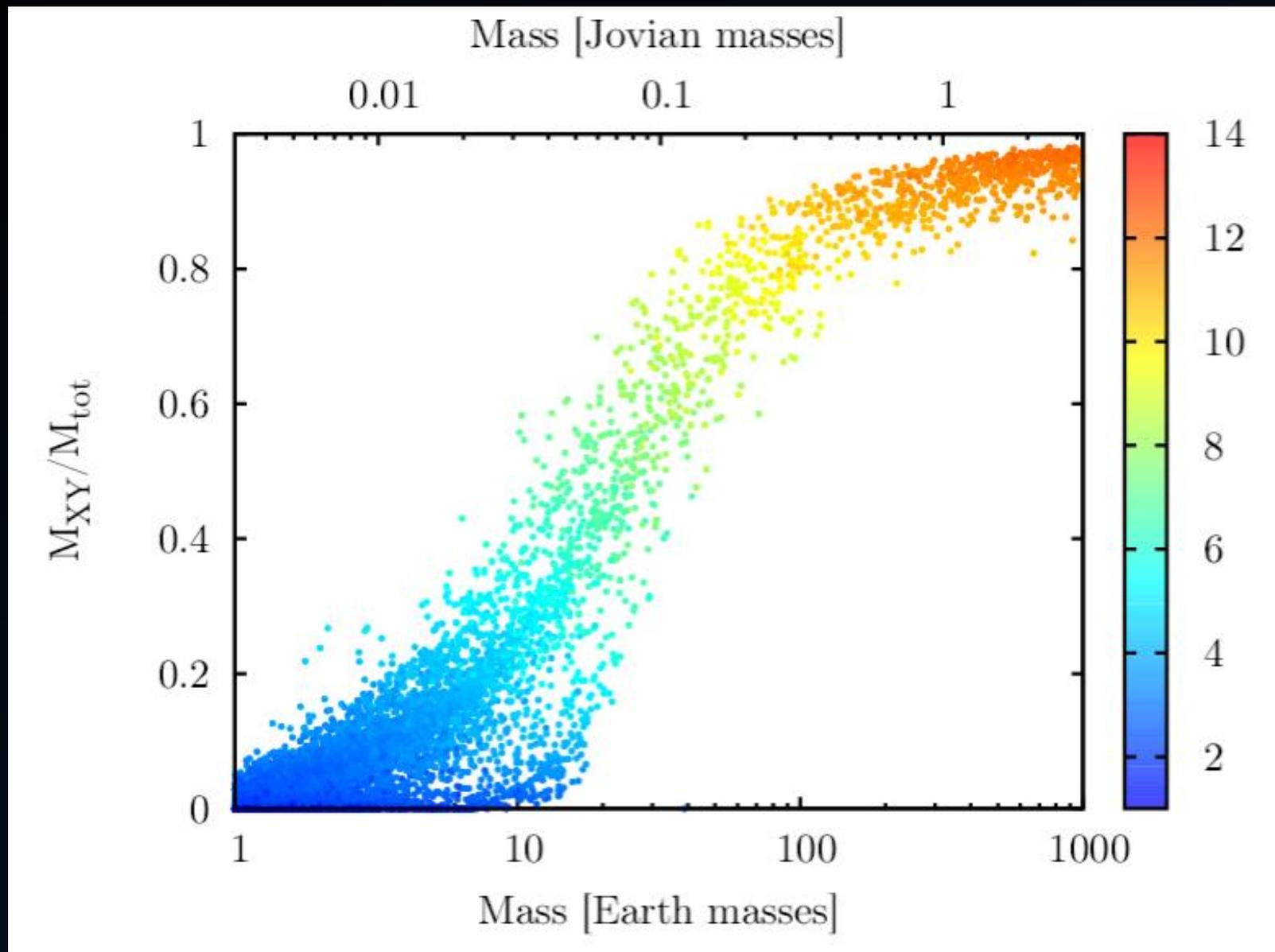
В принципе, по данным о массе и радиусе можно делать некоторые выводы о составе экзопланет. Хотя, как правило, будет несколько вариантов.

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

- возраста
- близости к звезде



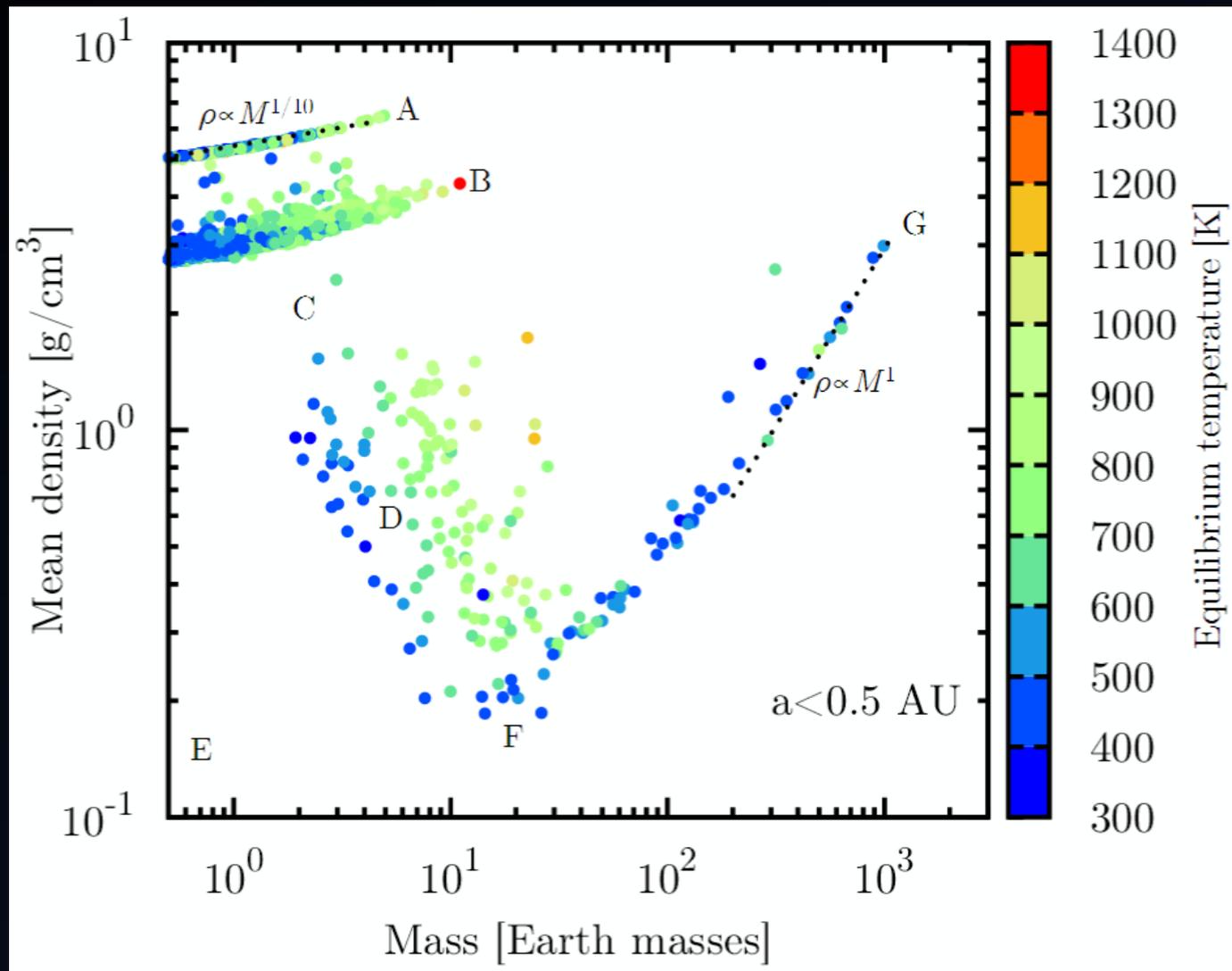
# Доля легких элементов в полной массе



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.

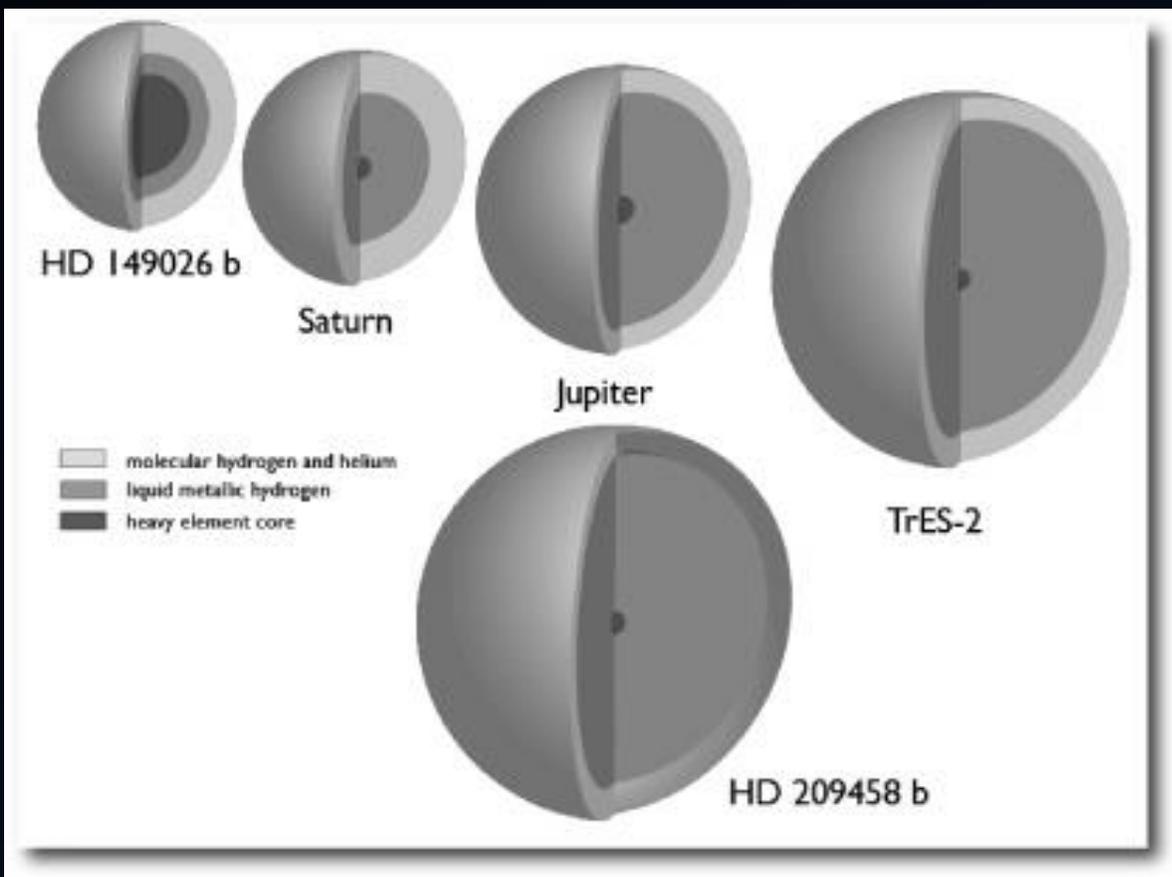
E – запрещенная зона (испар.)

F – переход к гигантам.

G – планеты-гиганты.

# Загадочный горячий сатурн

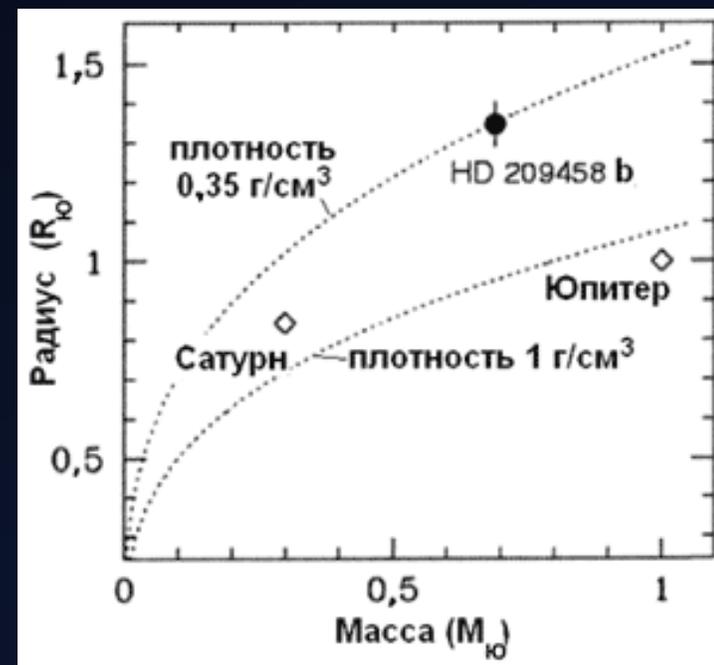
HD 149026 – горячая, но маленькая.  
На 20% тяжелее Сатурна,  
но на 22% меньше по размеру.



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.

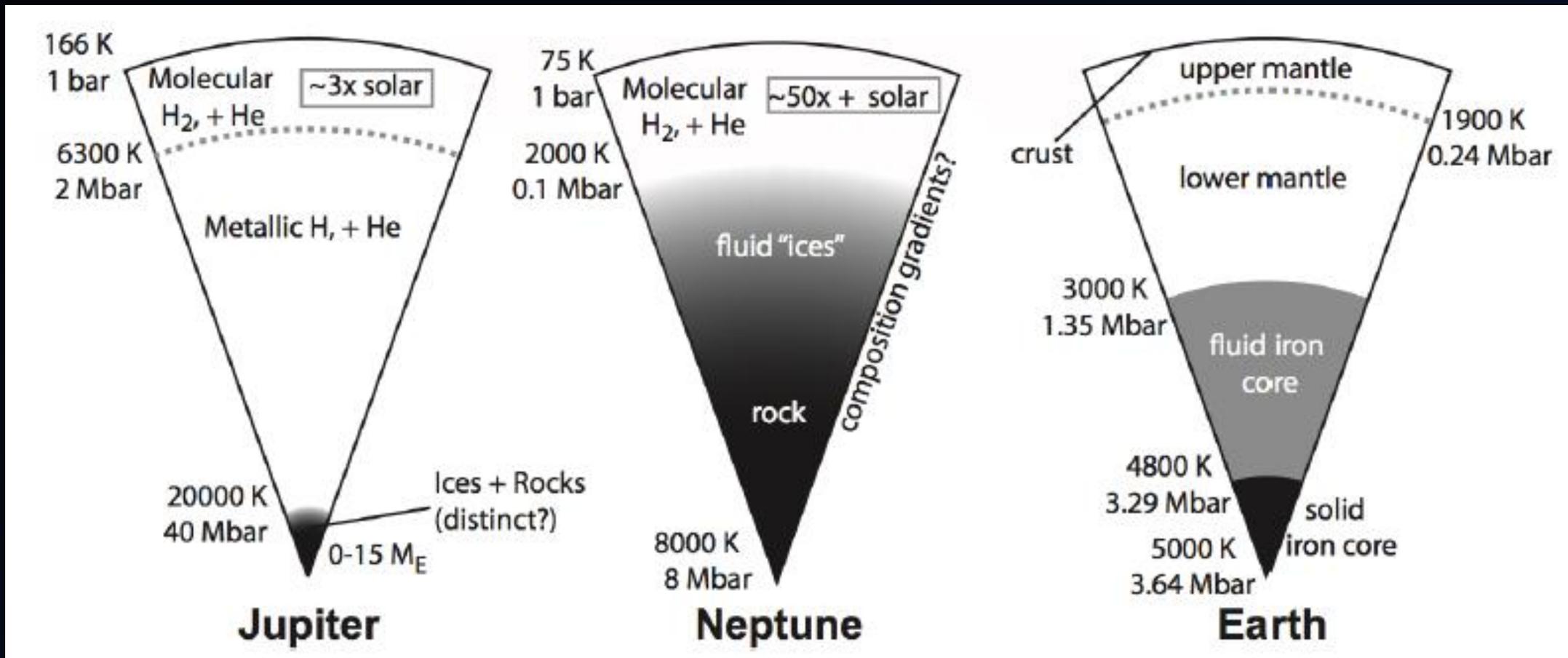


# Три основных типа планет

Газовые гиганты  
H/He

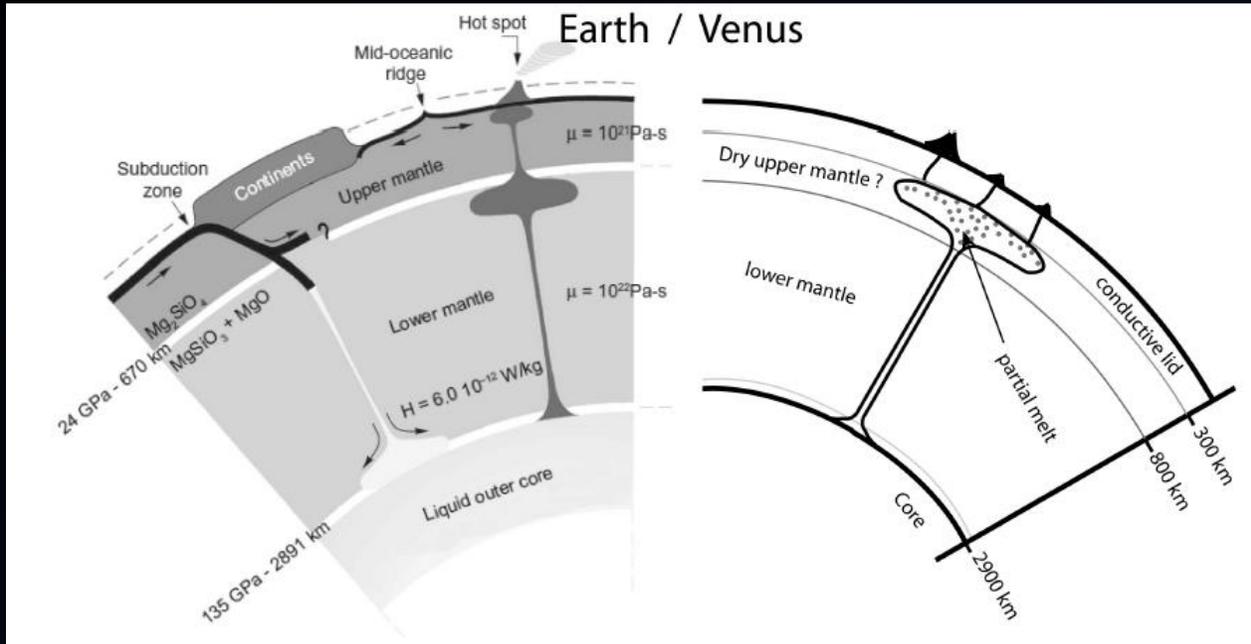
Ледяные гиганты  
H/He+лед+ядро

Твердые планеты  
Si, Mg, Fe, O, C



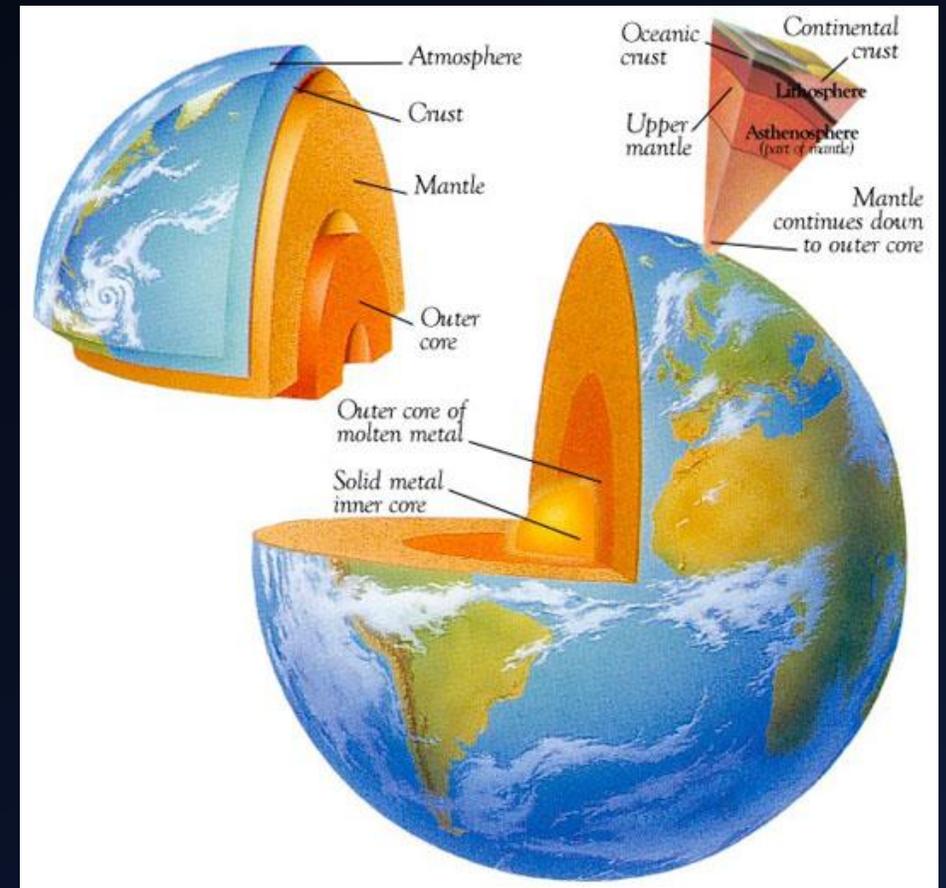
Но этим, конечно, многообразие не исчерпывается,  
да и внутри этих классов есть более мелкие деления...

# Структура планет

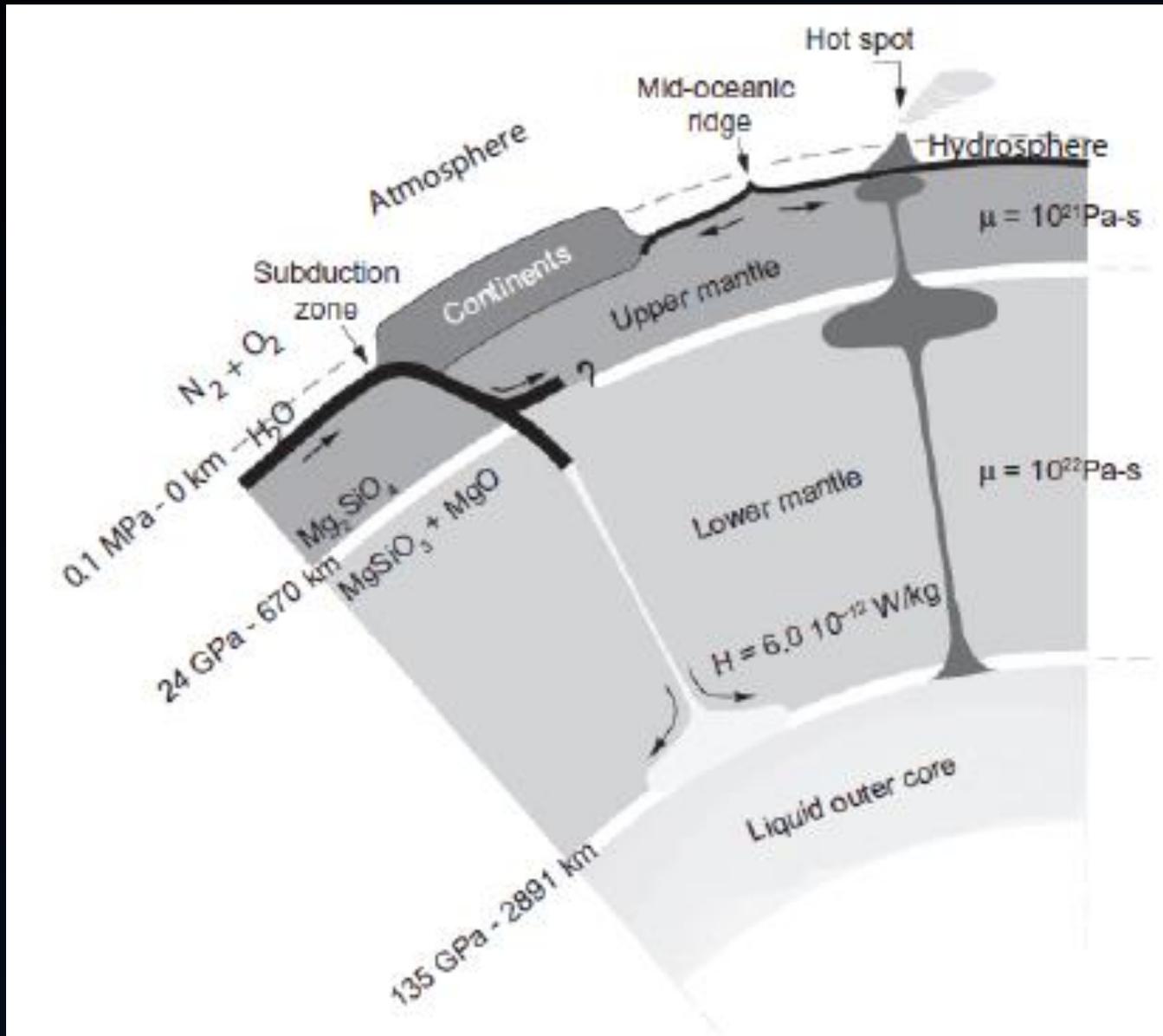


Мы недостаточно хорошо знаем даже Землю.  
Дальше идут тела Солнечной системы.  
А еще дальше – экзопланеты.

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



# Земля издалека

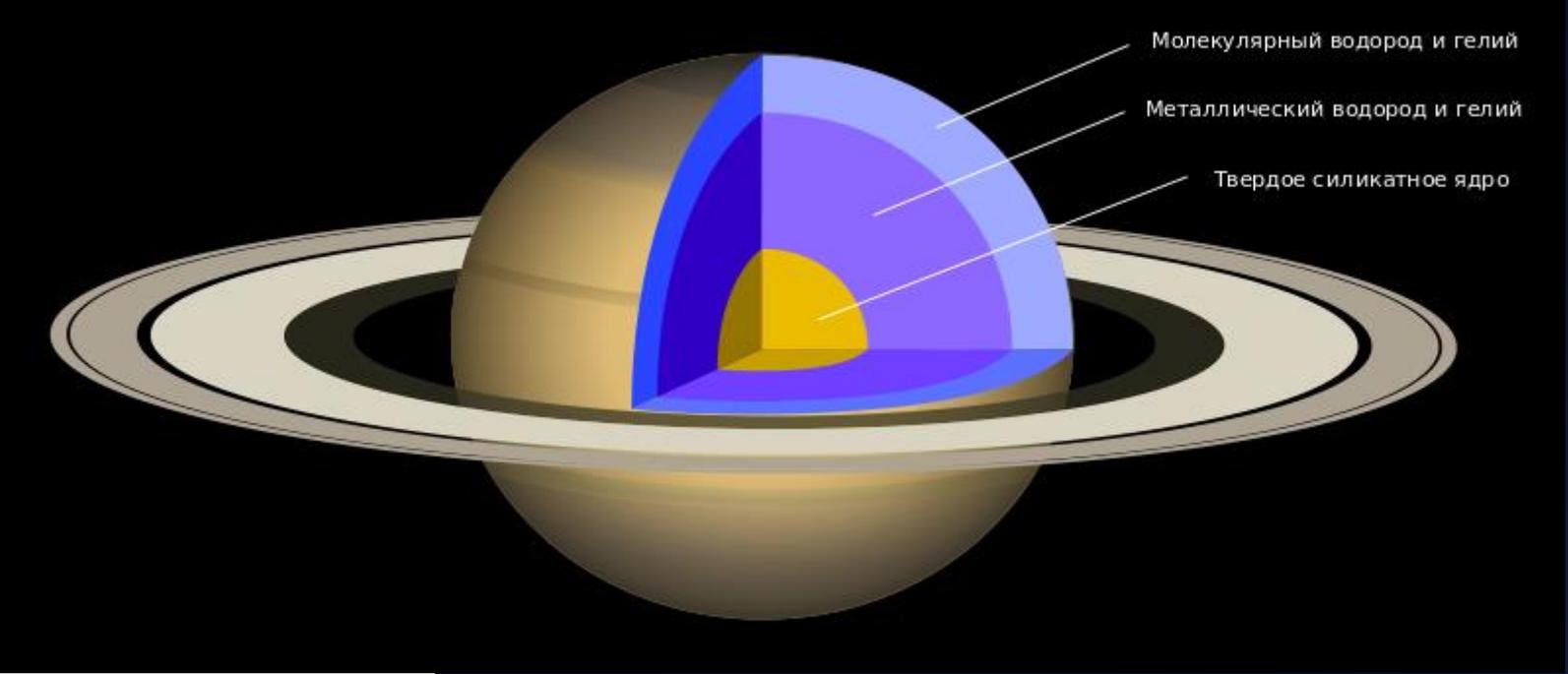
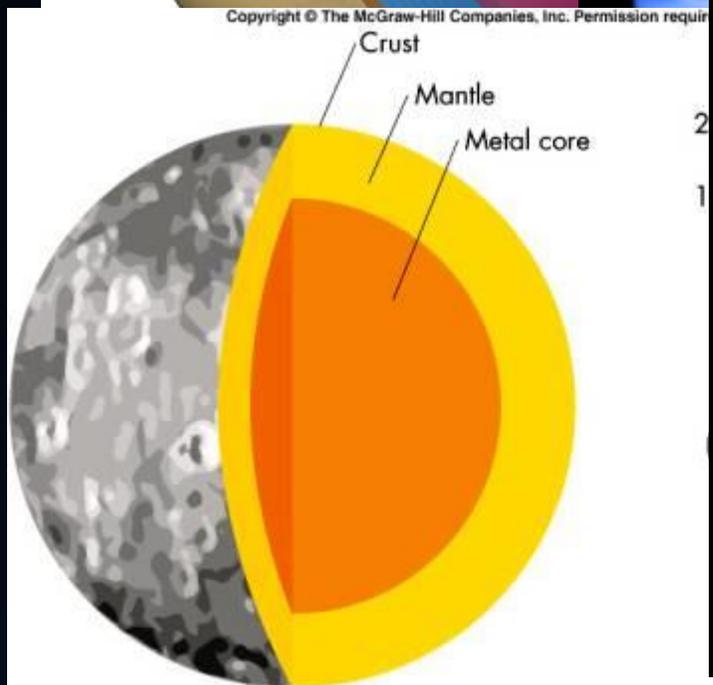
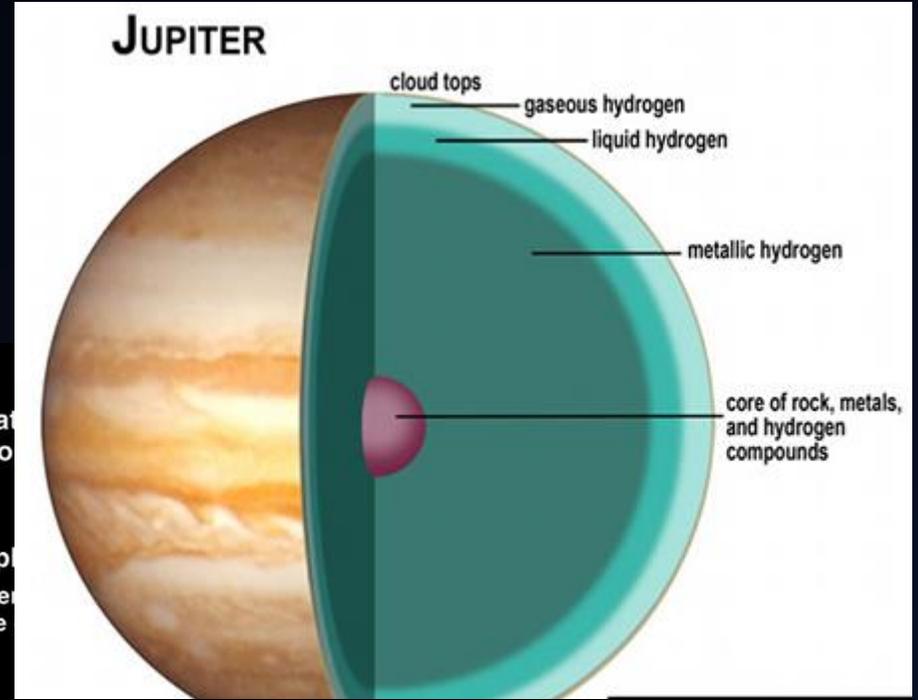
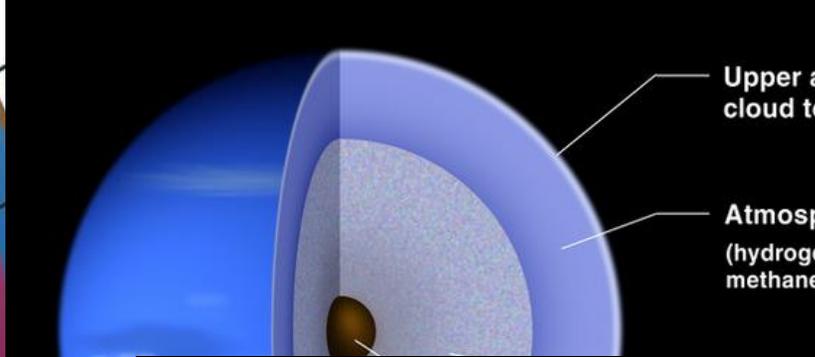
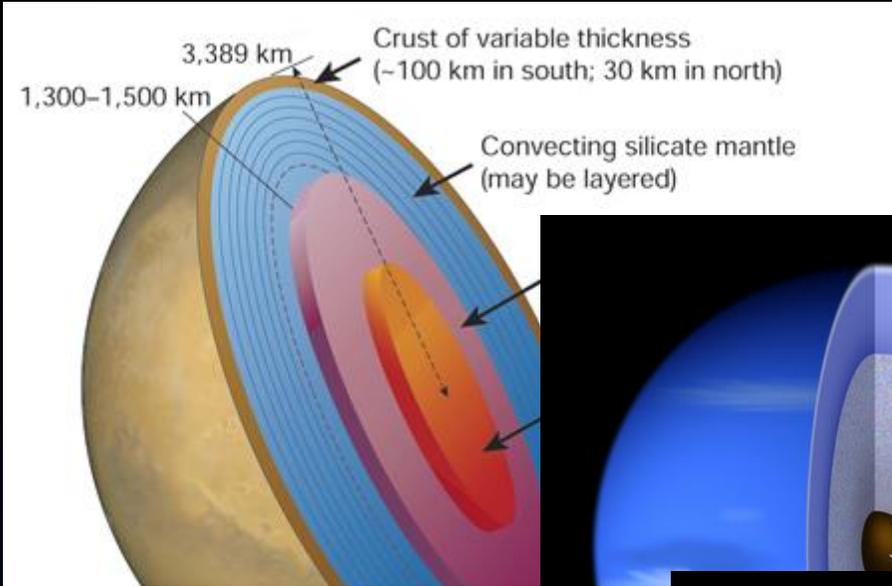


Если бы мы наблюдали Землю, как экзопланету, т.е. у нас были бы данные только по ее массе и радиусу, мы не смогли бы ничего сказать об:

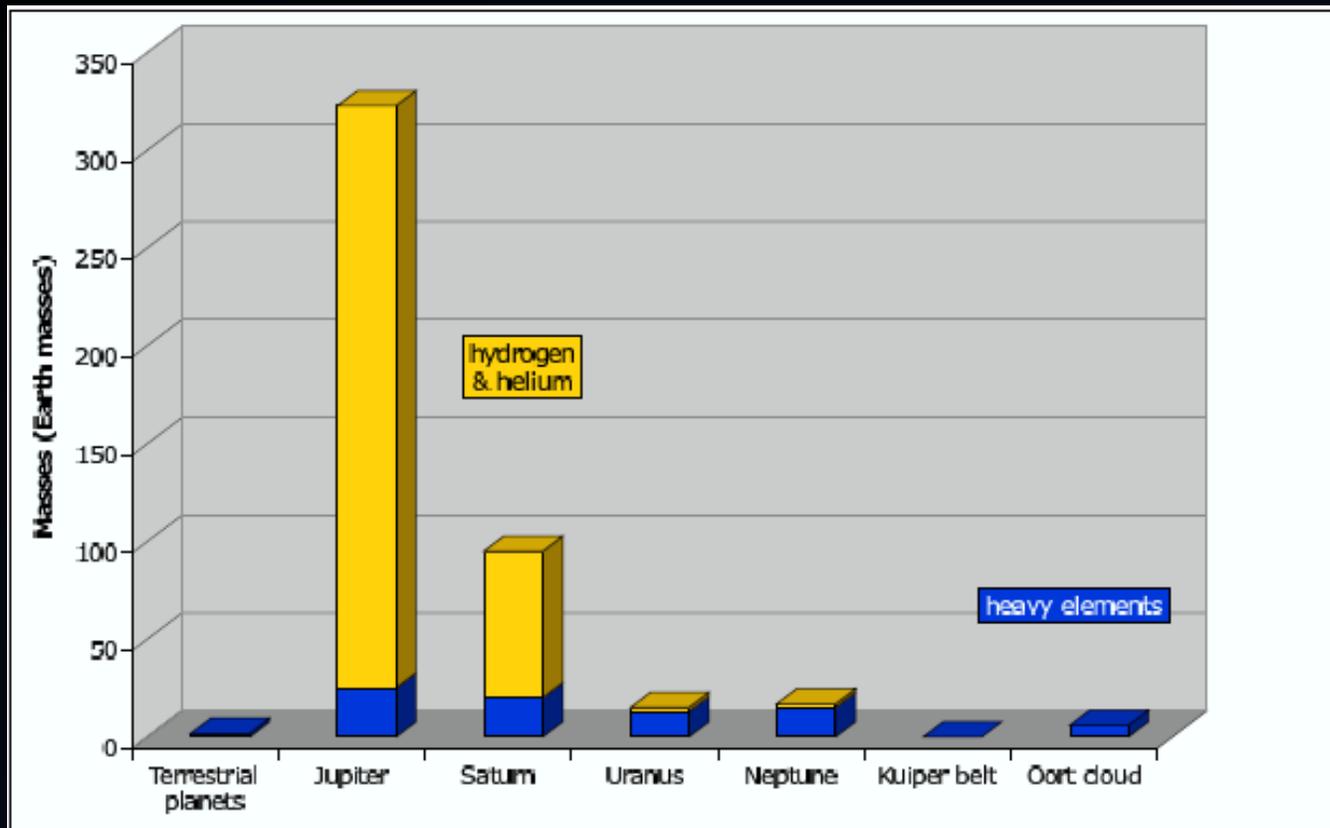
- атмосфере
- гидросфере
- коре

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

# Структура планет



# Легкие и тяжелые



Планеты делятся на несколько групп по своему составу.

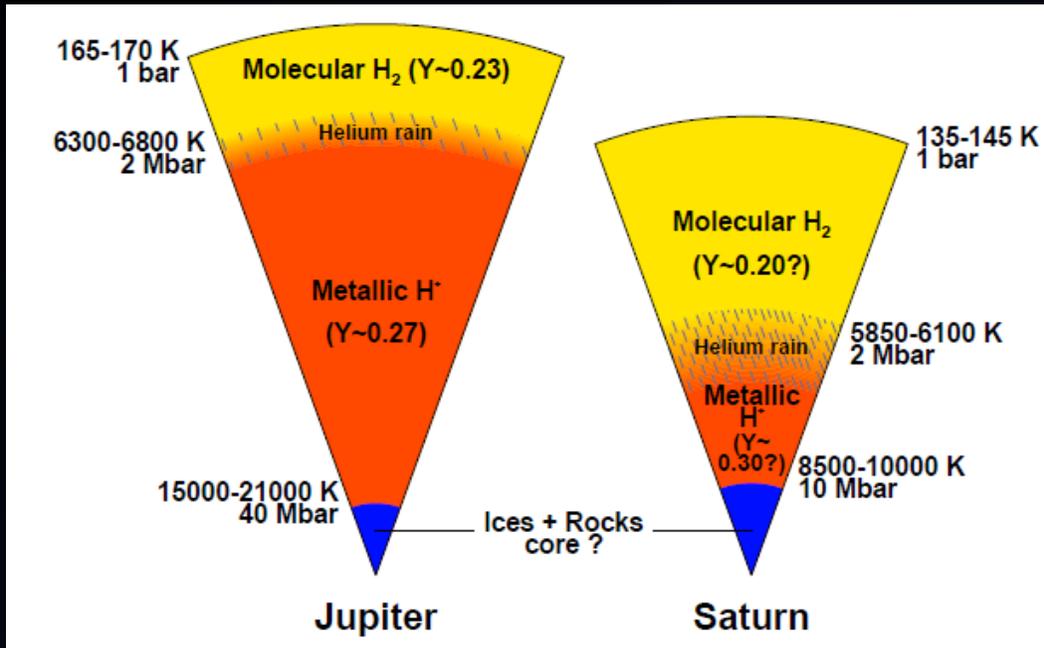
В планетах земного типа, астероидах и кометах относительно мало водорода и почти нет гелия.

В газовых гигантах они доминируют.

В составе Урана и Нептуна (ледяных гигантов) доминируют элементы тяжелее гелия.

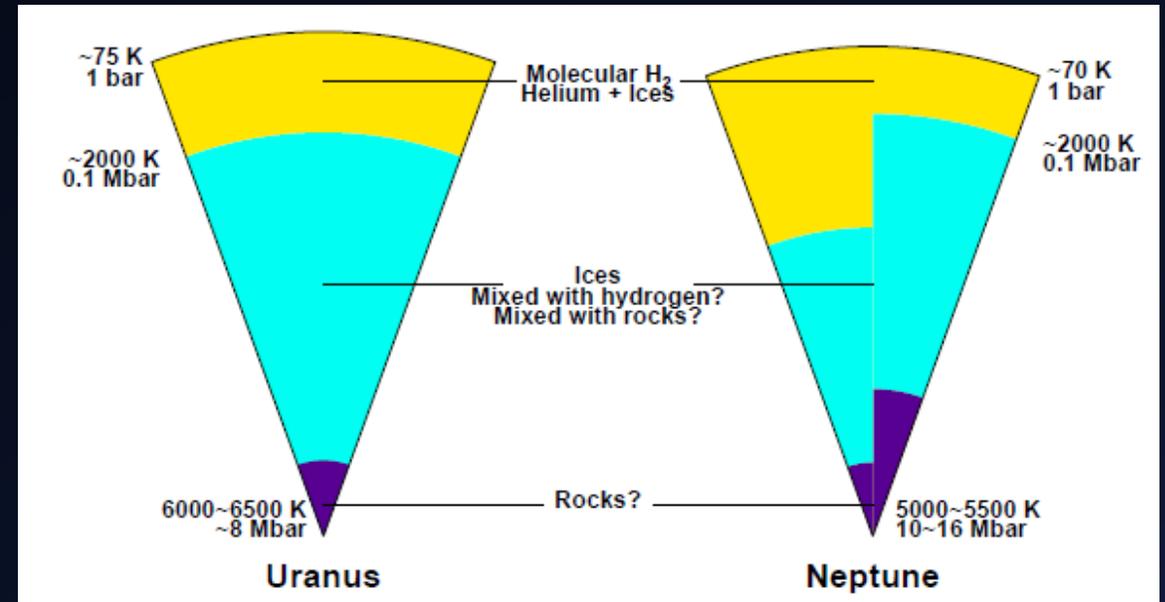


# Структура гигантов



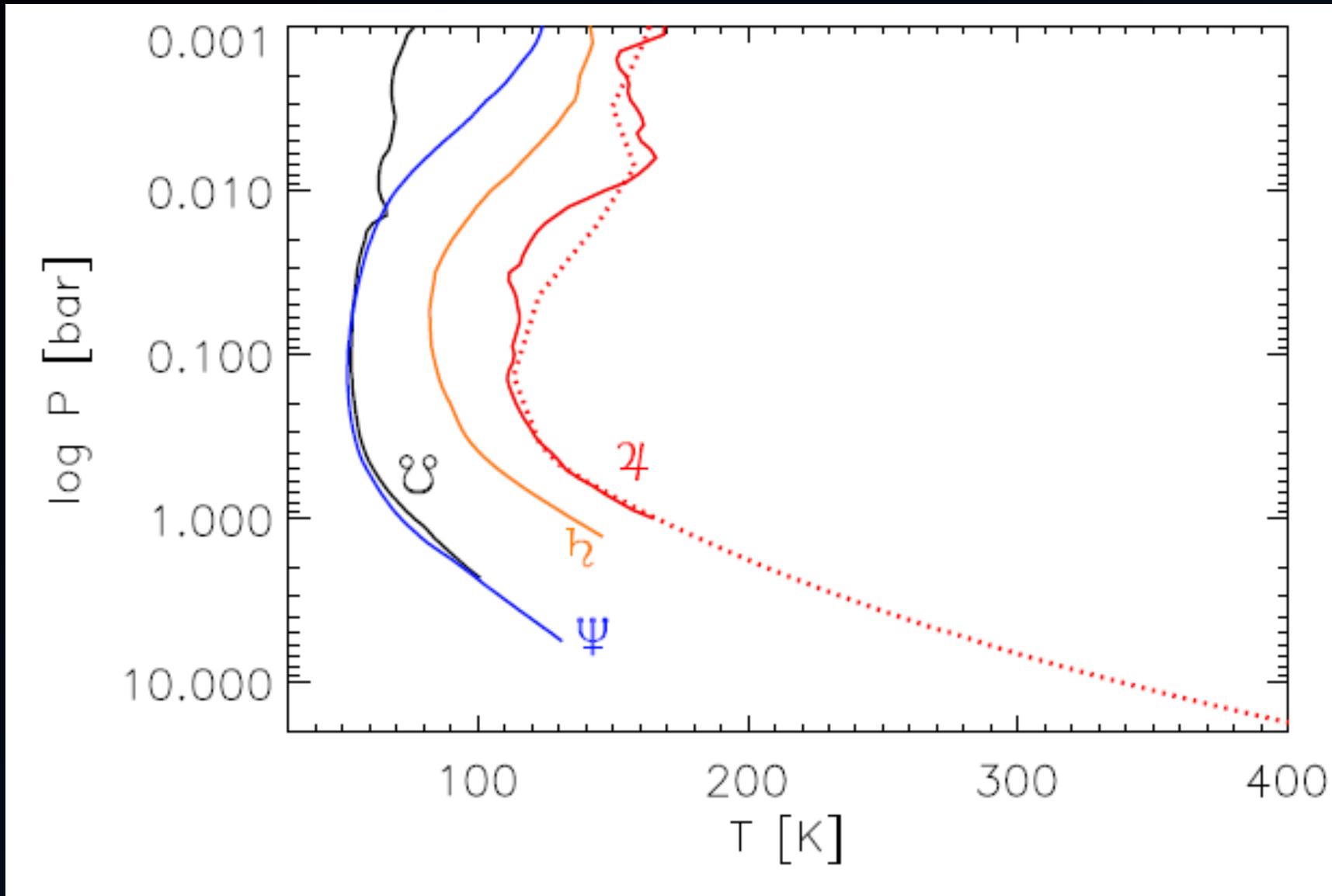
По всей видимости все гиганты не имеют твердого ядра (исключением может быть Уран).

Элементы сегрегированы под действием гравитации.

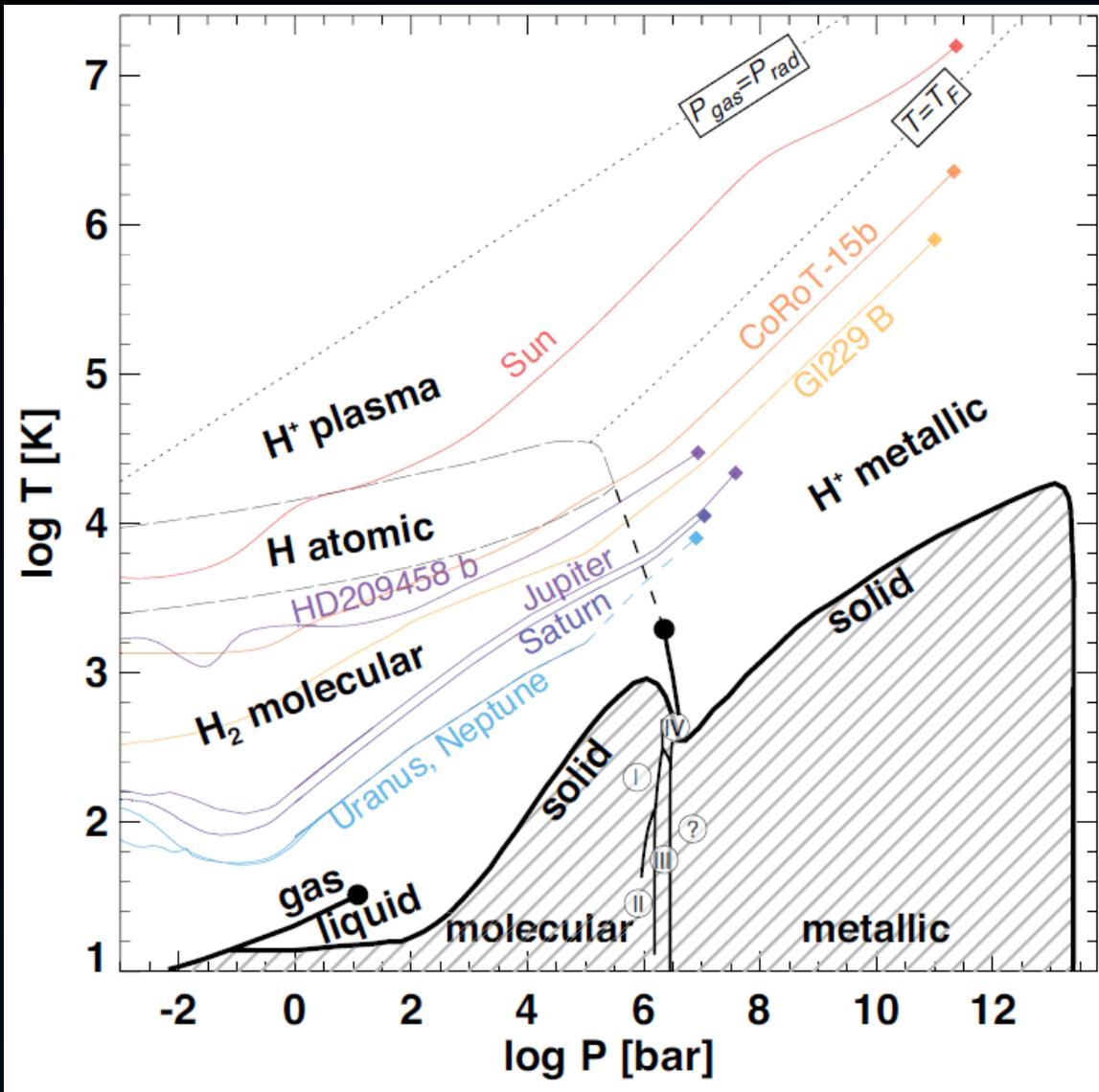


В центрах массивных планет плотность и температура достигают больших значений. Это усложняет построение точных моделей, т.к. неизвестно поведение вещества при таких условиях.

# Температура и давление в атмосферах гигантов

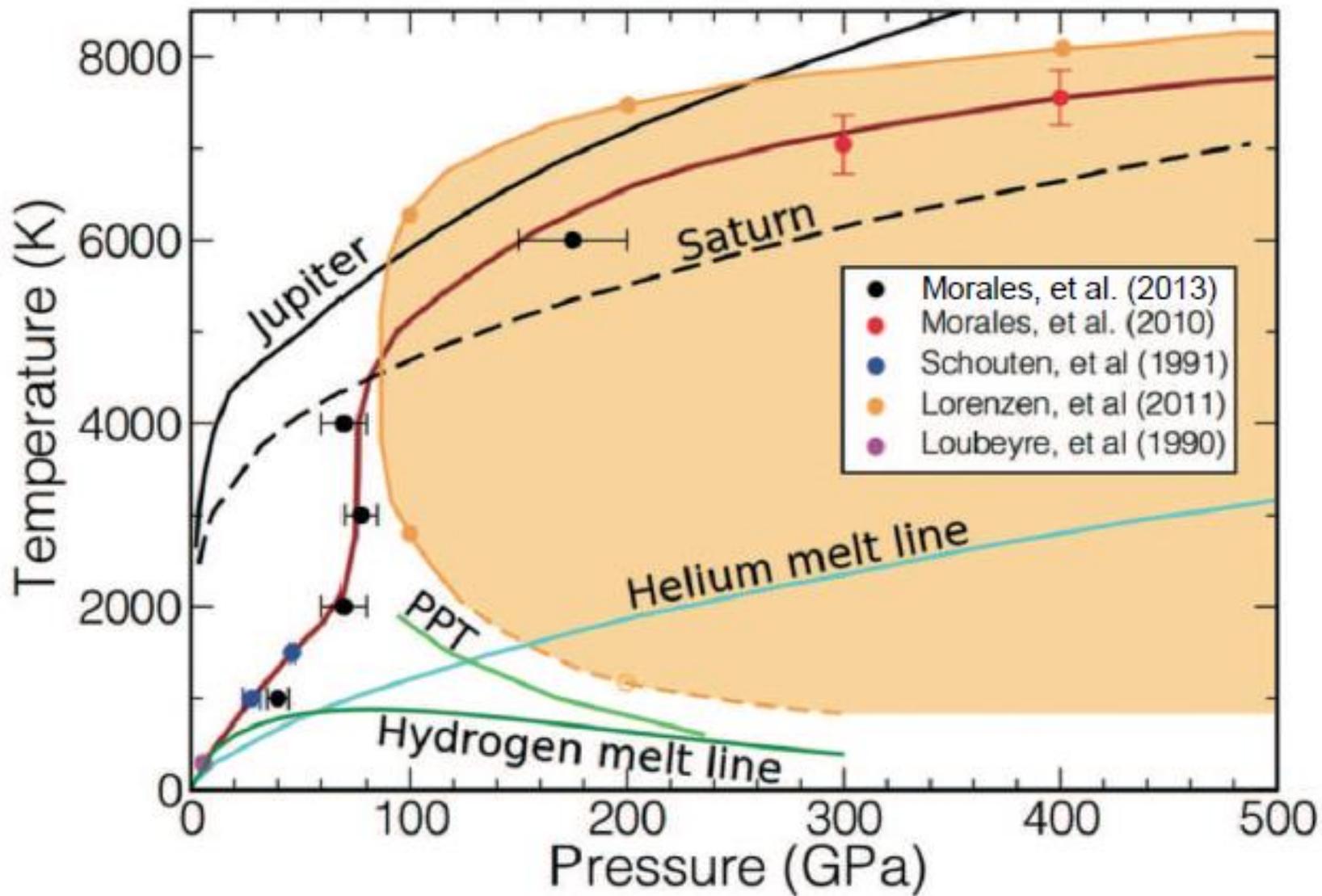


# Уравнение состояния водорода

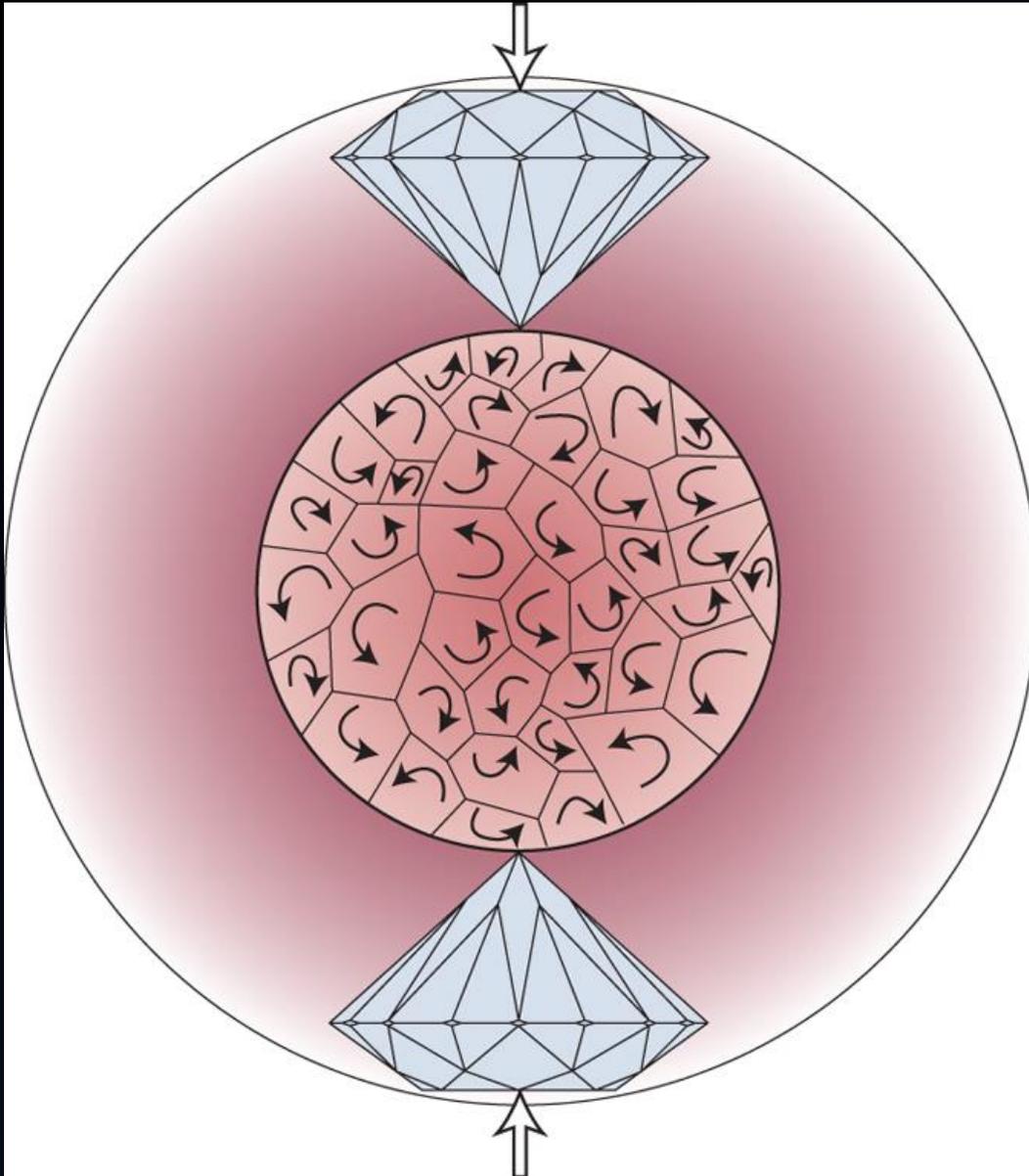


Даже водород – самый простой элемент таблицы Менделеева – имеет очень сложное поведение в разных условиях. Некоторые режимы изучены нами довольно плохо.

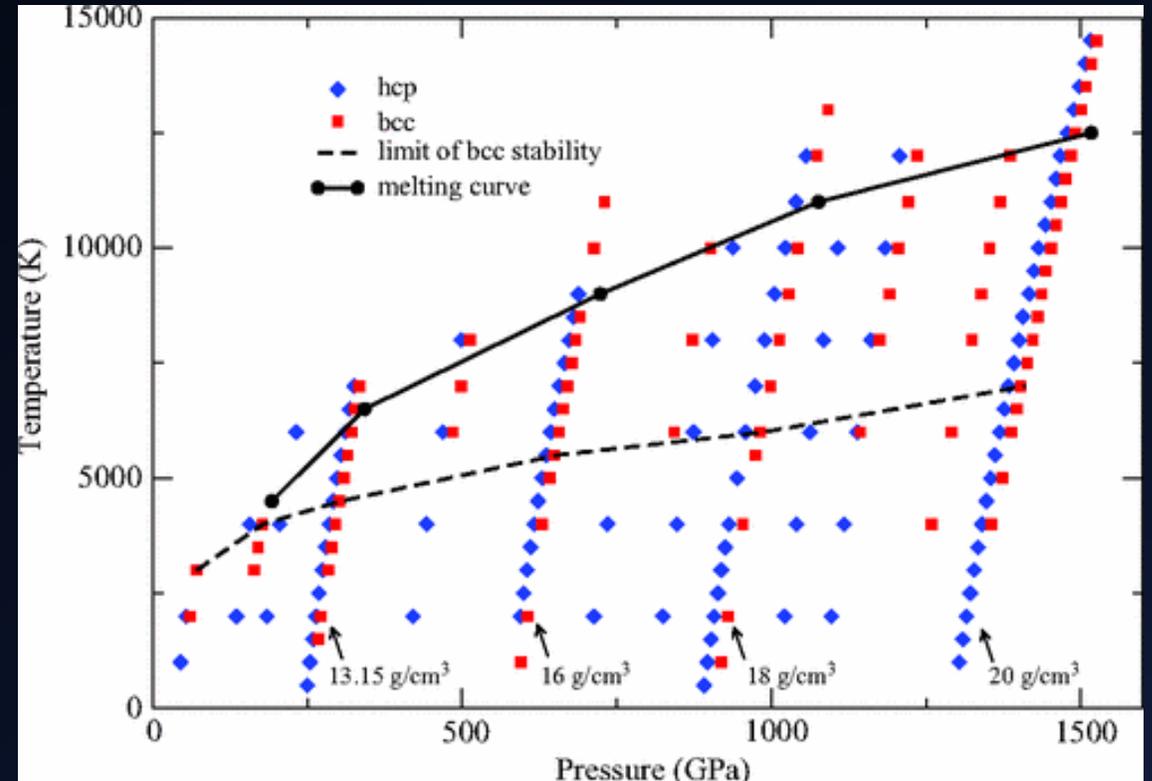
# Смесь водорода и гелия



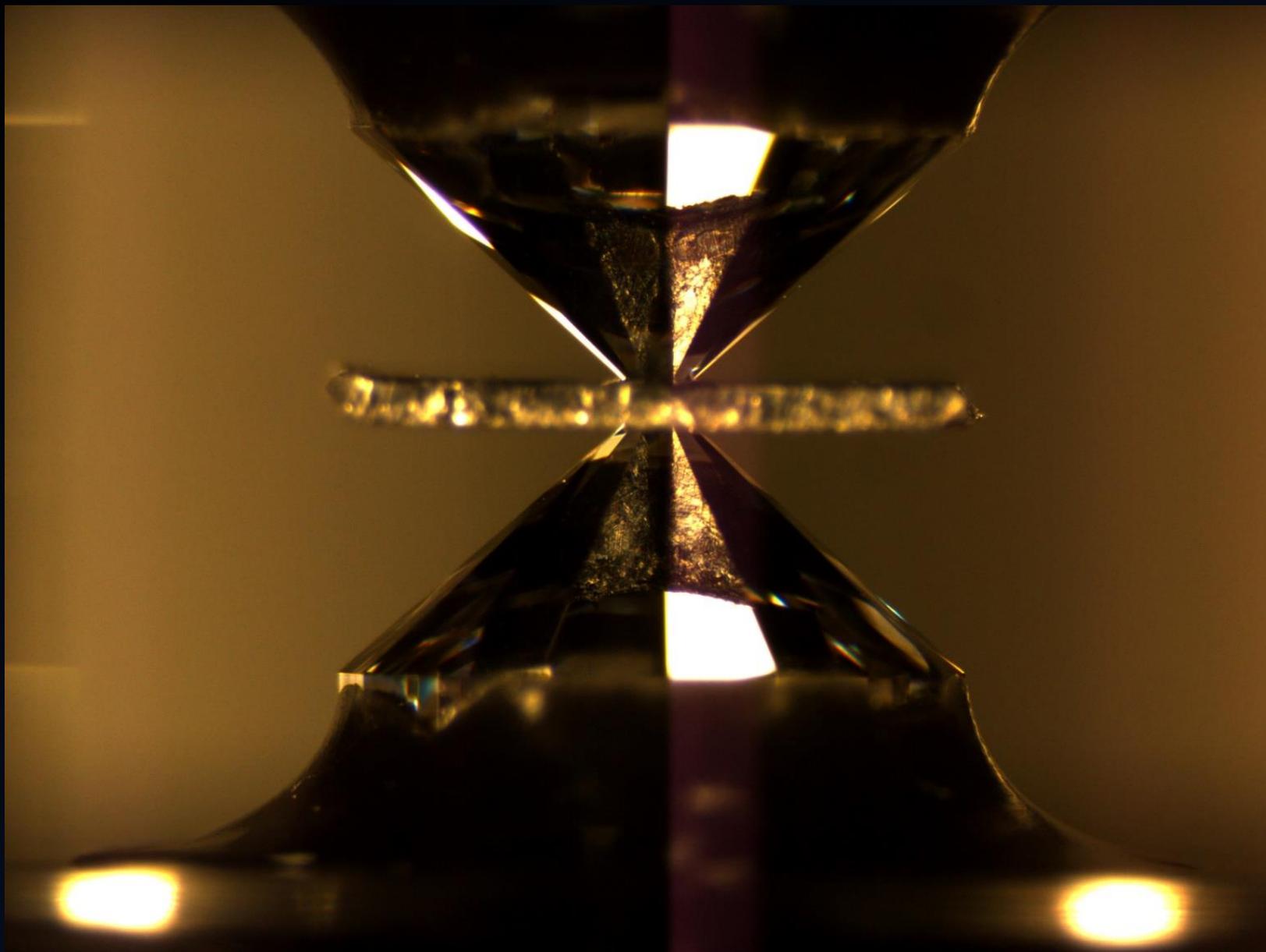
# Уравнение состояния



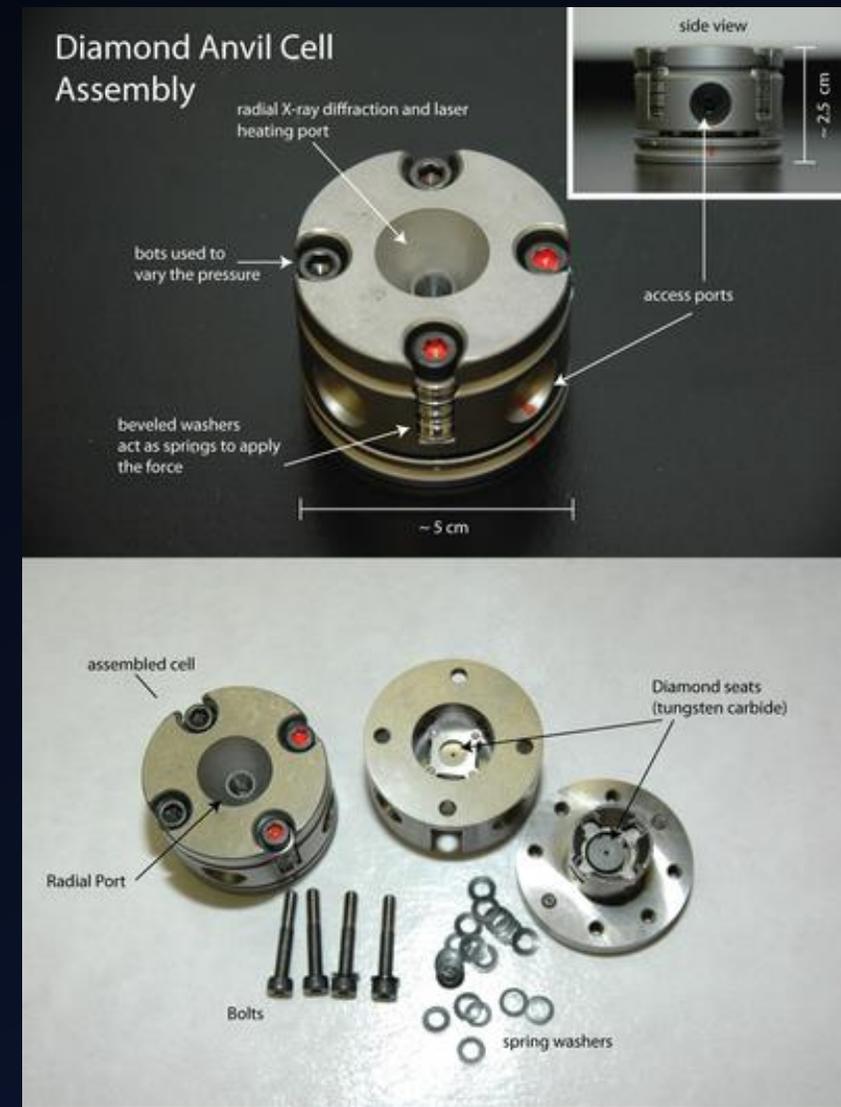
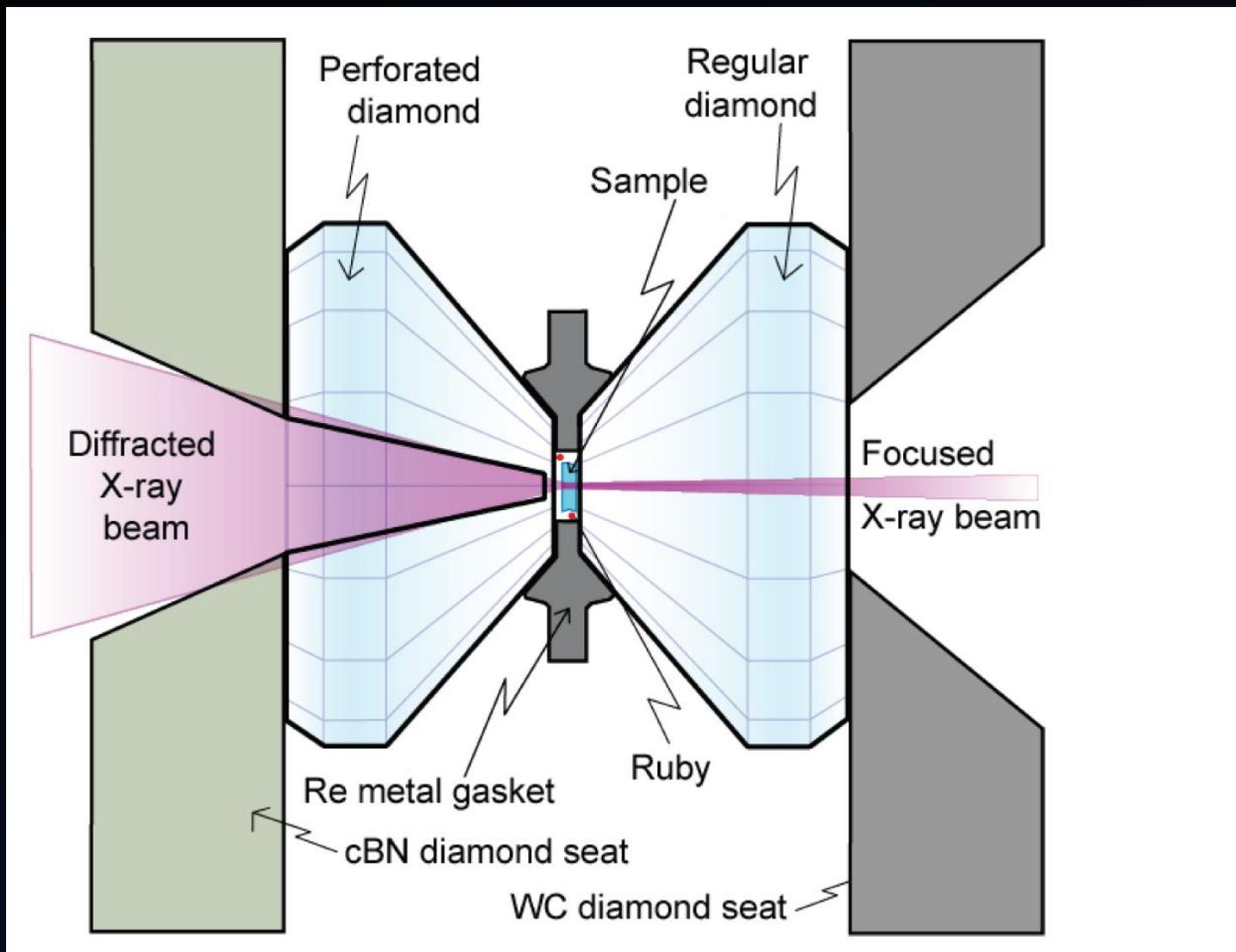
В лабораторных экспериментах уравнение состояния изучают, сжимая вещество в алмазных ячейках. Но пока достичь высоких плотностей и температур не получается. На помощь приходит моделирование.



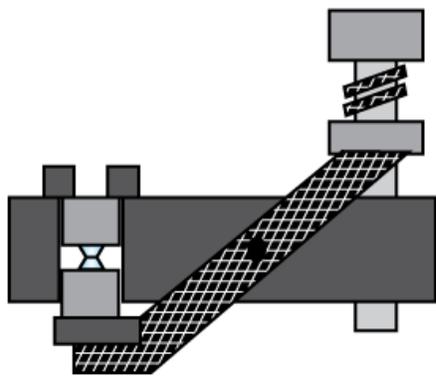
# Алмазные наковальни



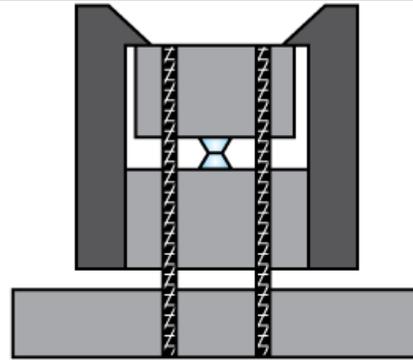
# Схема эксперимента



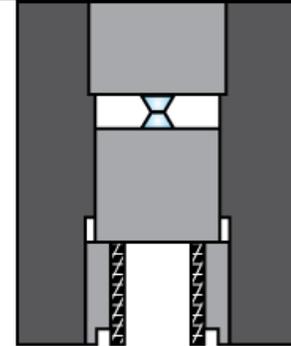
# Как давить?



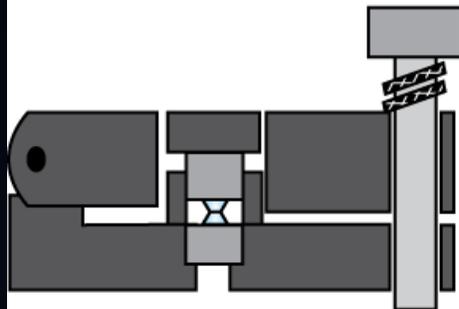
1st class lever drive



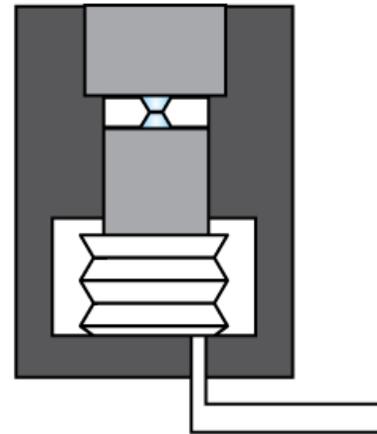
Pin - guide screw drive



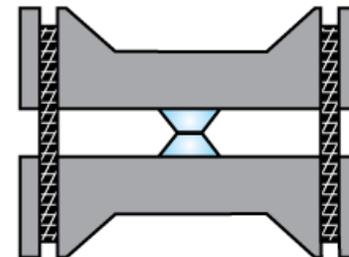
Screw piston drive



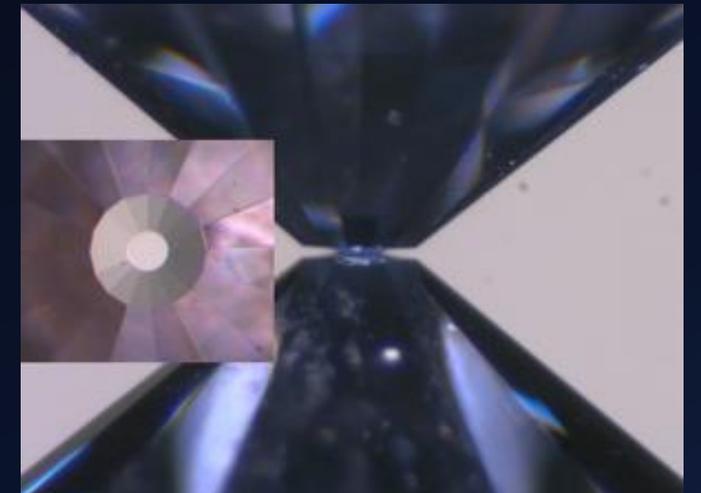
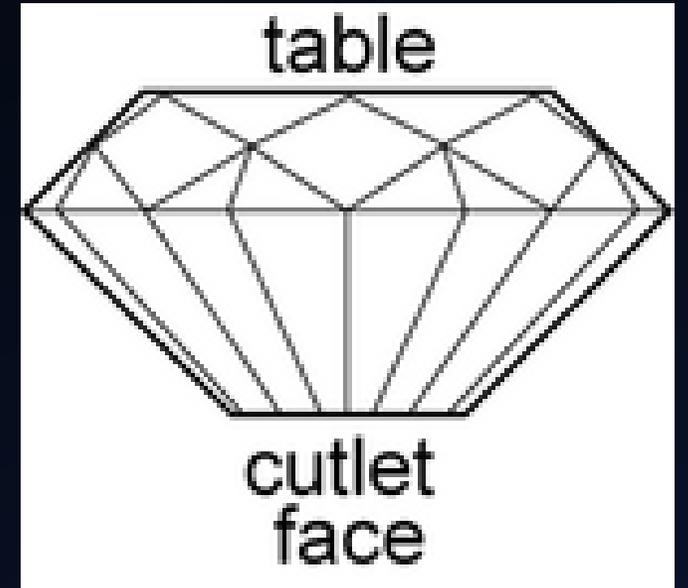
2nd class lever drive



Fluid - bellows drive

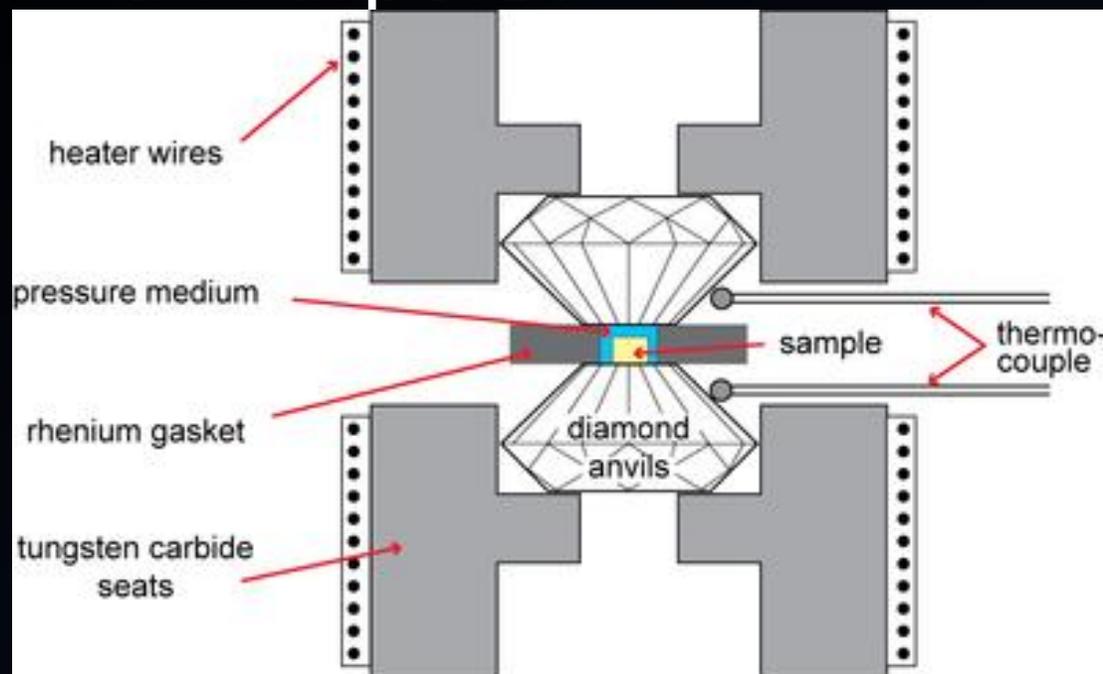


pull - platen drive



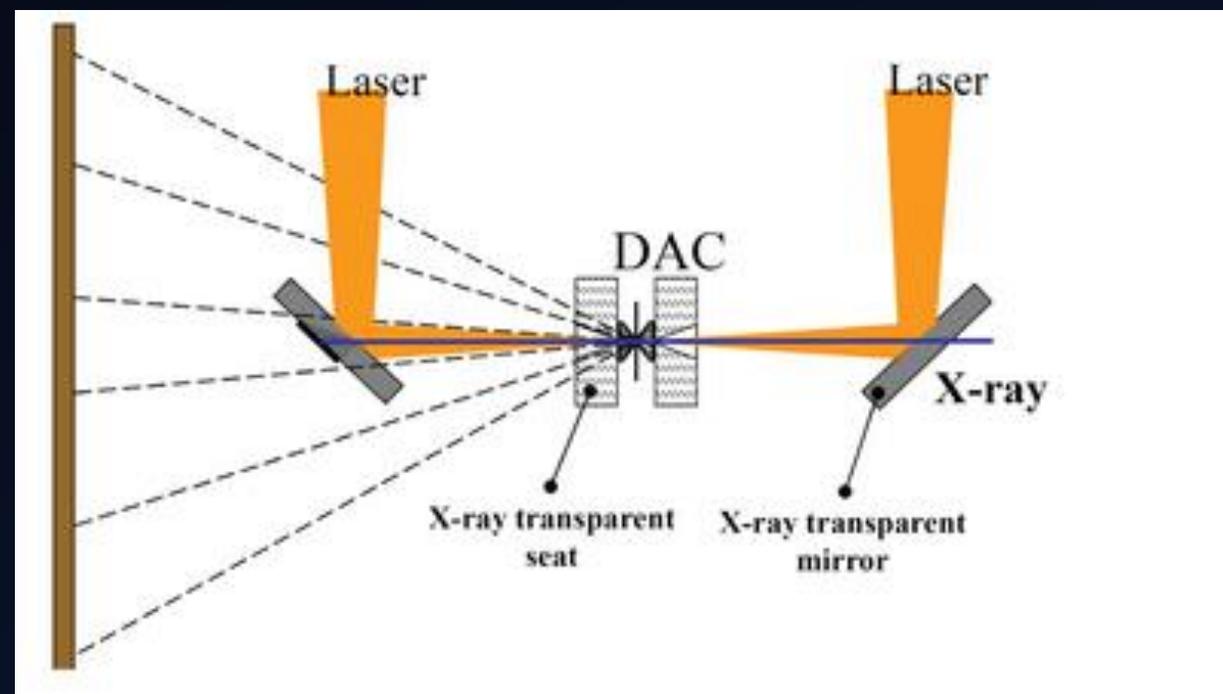
six basis ways of providing force in the DAC (Bassett, 1979)

# Как нагреть?

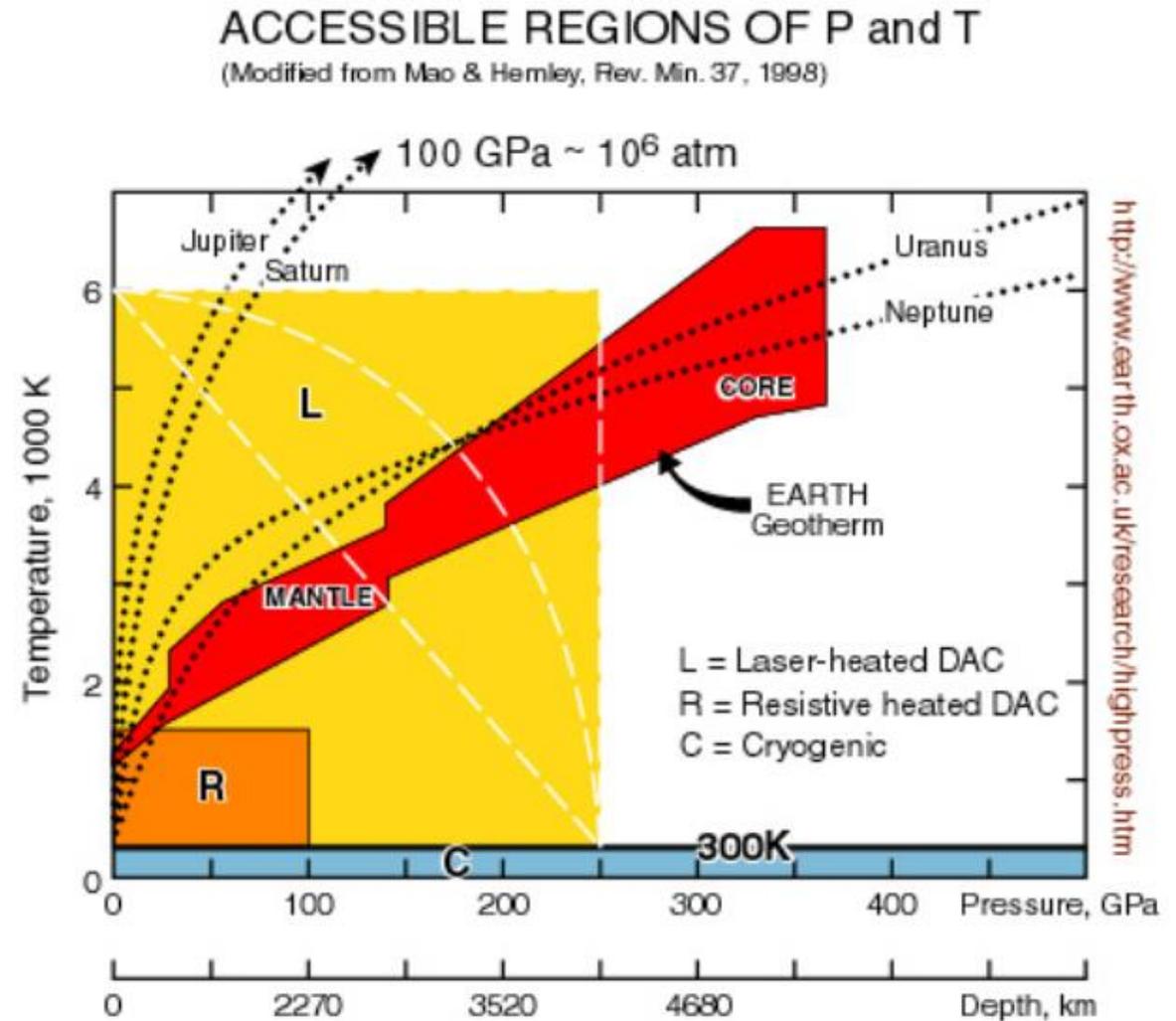
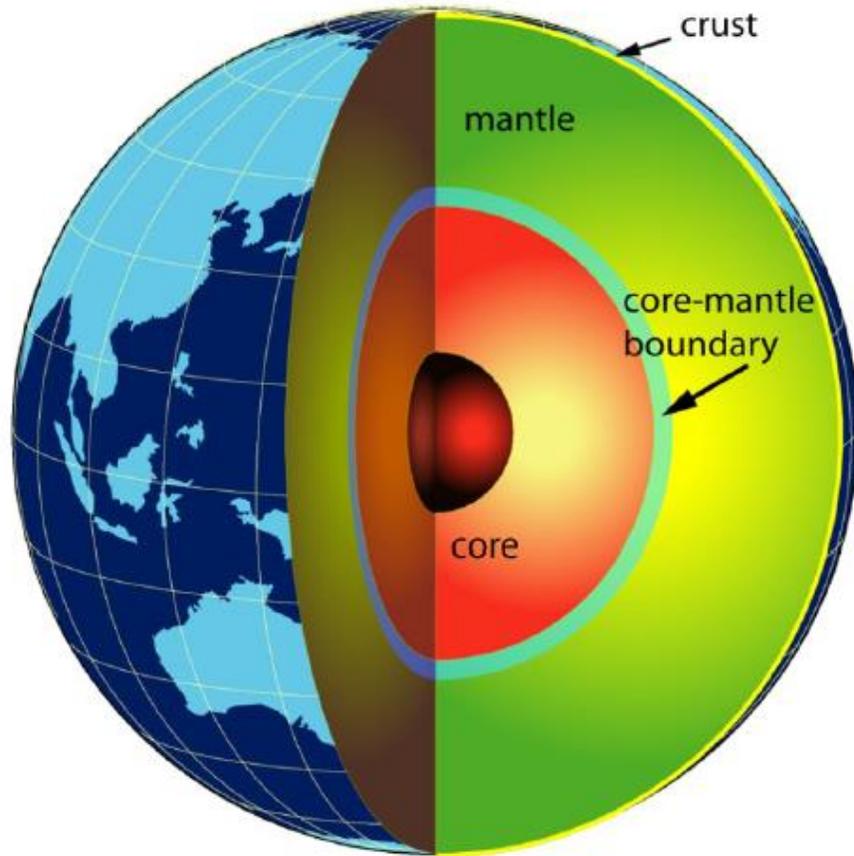


До 1300К

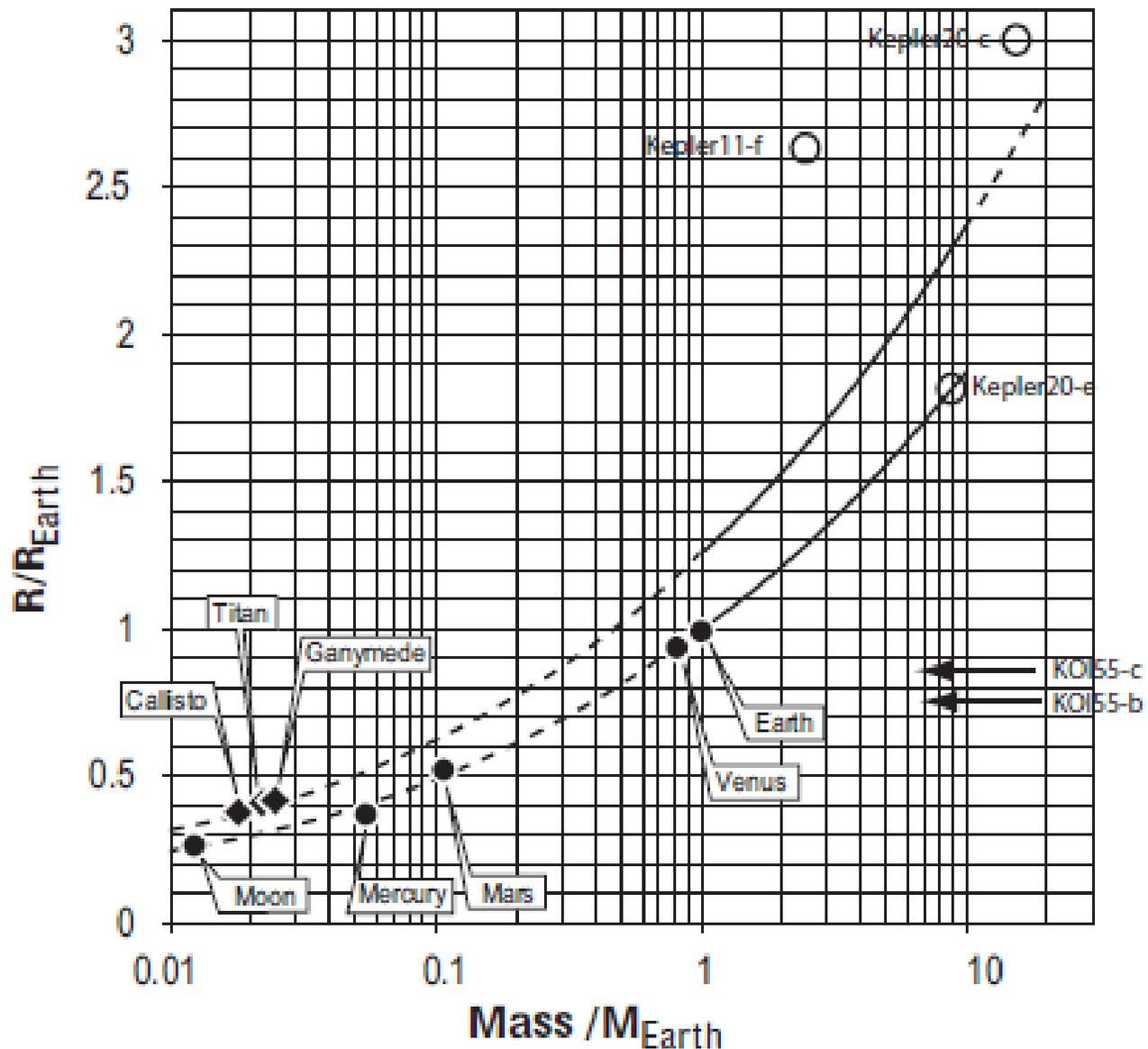
Выше 1300К



# Приложение к недрам Земли



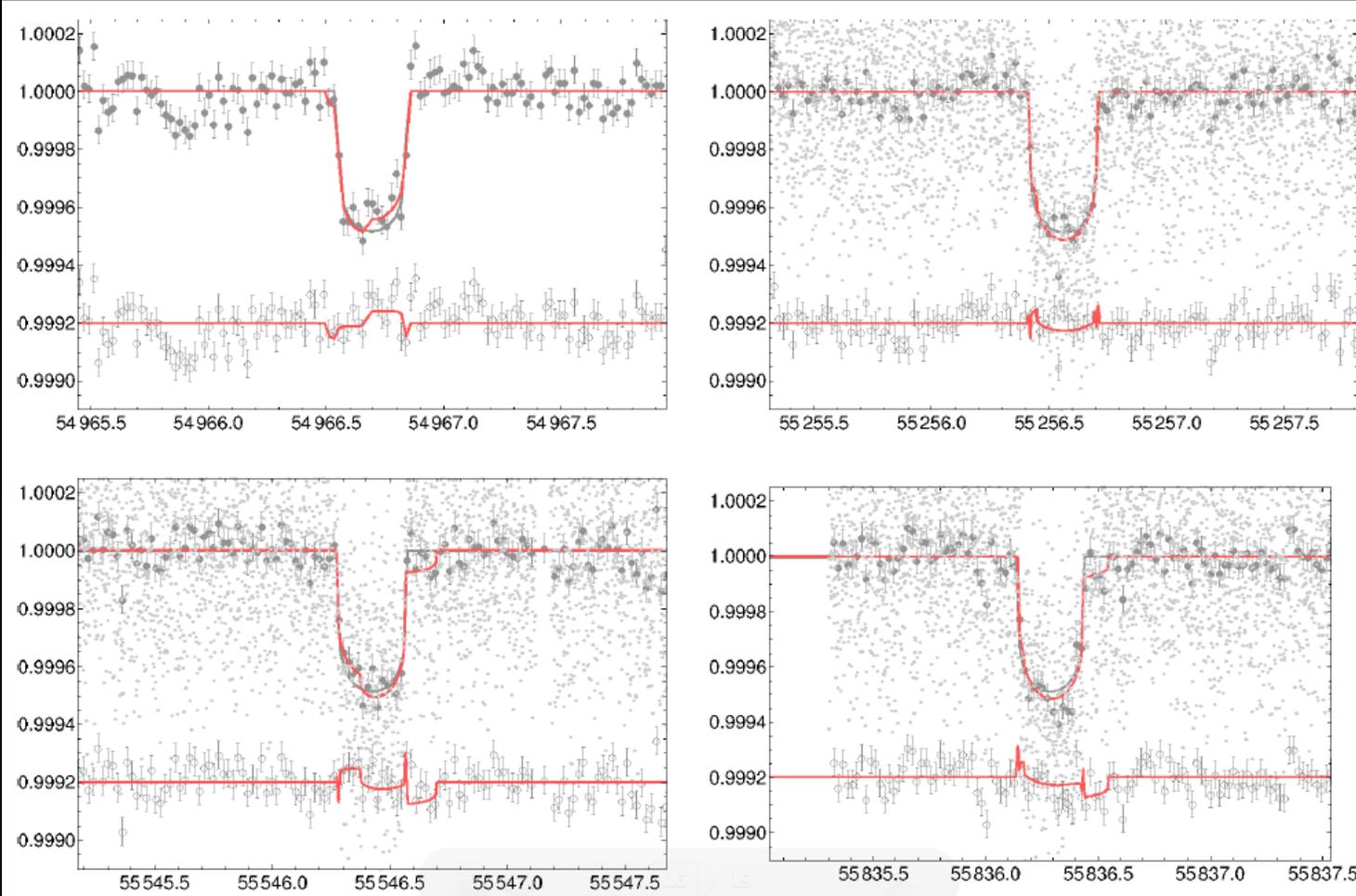
# Масса-радиус для планет земного типа



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

# Экзолуны могут быть обитаемы

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



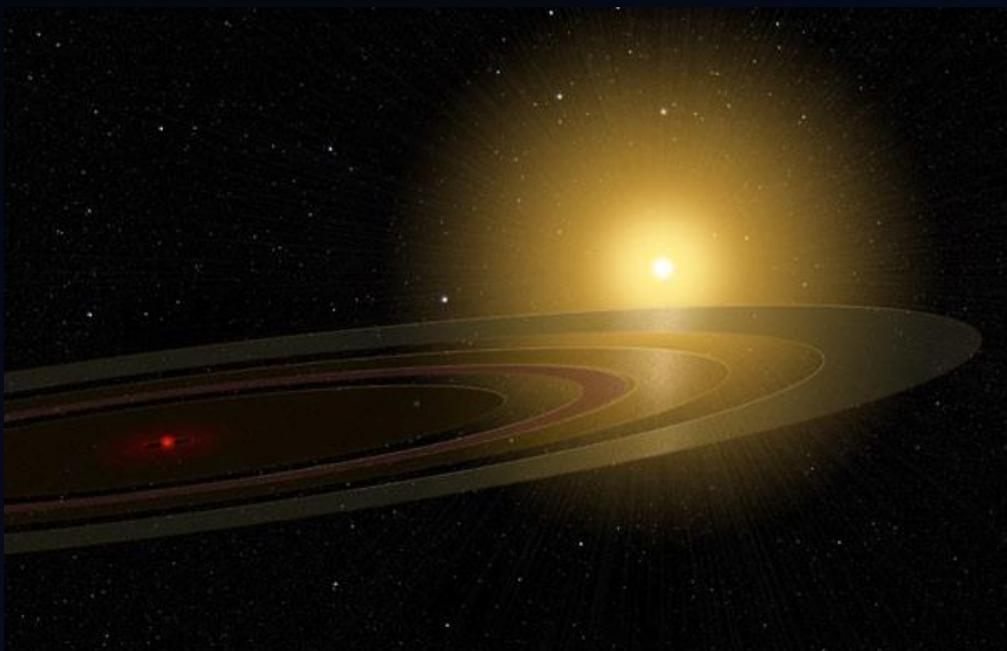
Такой спутник искали  
у планеты Керлер-22b.  
Сама планета слишком велика.  
Зато, тогда у нее может быть  
тяжелый спутник.  
Спутник не нашли.  
Спутник по крайней мере  
вдвое легче Земли.

# Экзолуны. Как образовать?



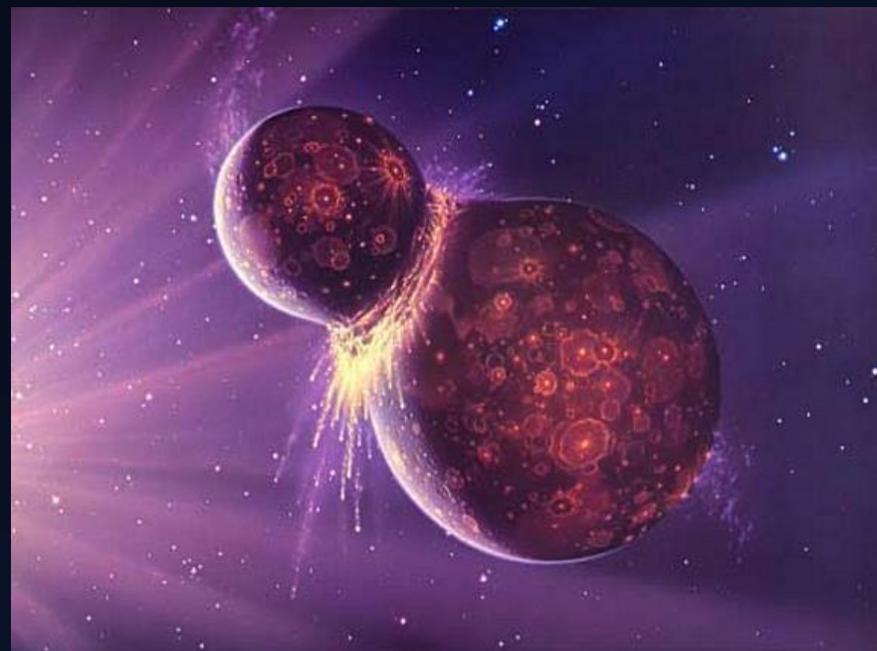
## Регулярные спутники

Образуются вместе с планетами  
из вещества околопланетного диска



## Иррегулярные спутники

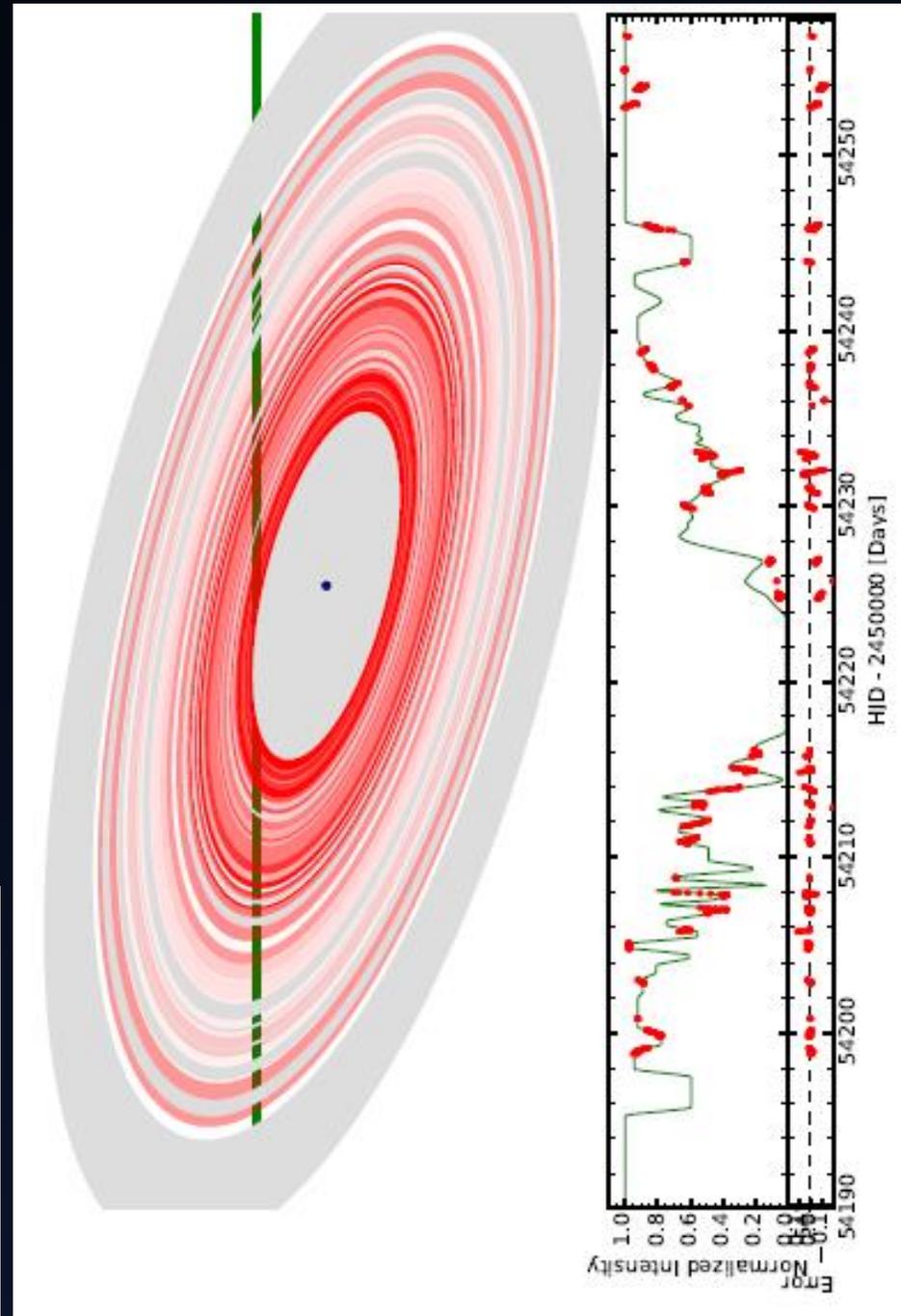
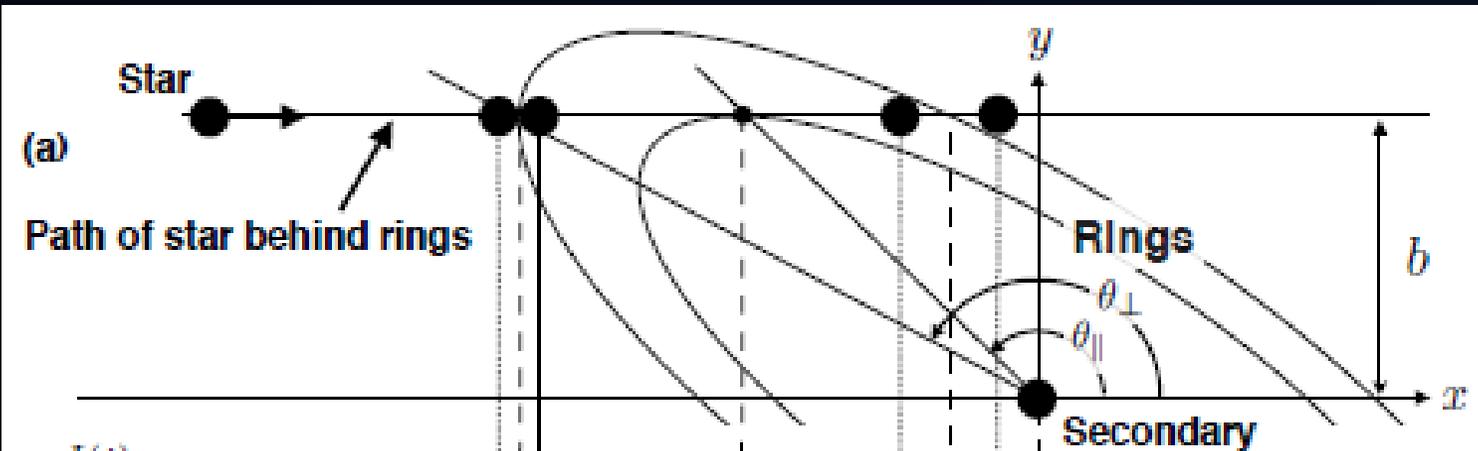
Захват или удар



# 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.



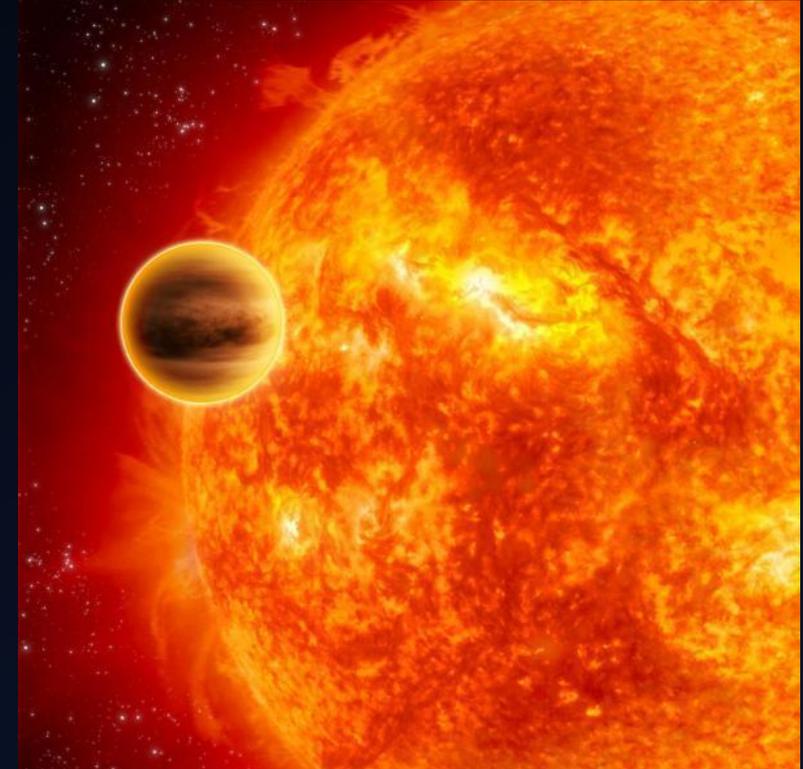
# У каких планет могут быть «хорошие» экзолуны?

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



Следует выбирать системы, где много планет.

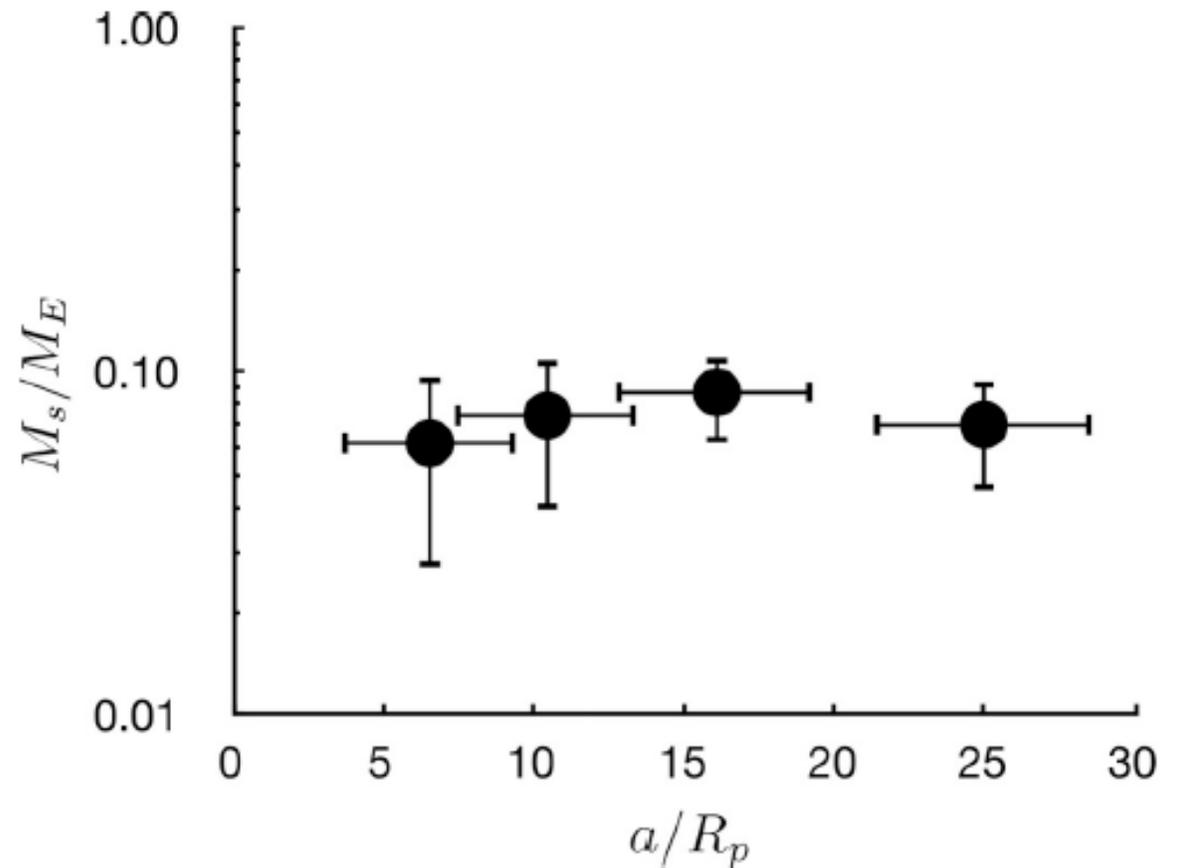
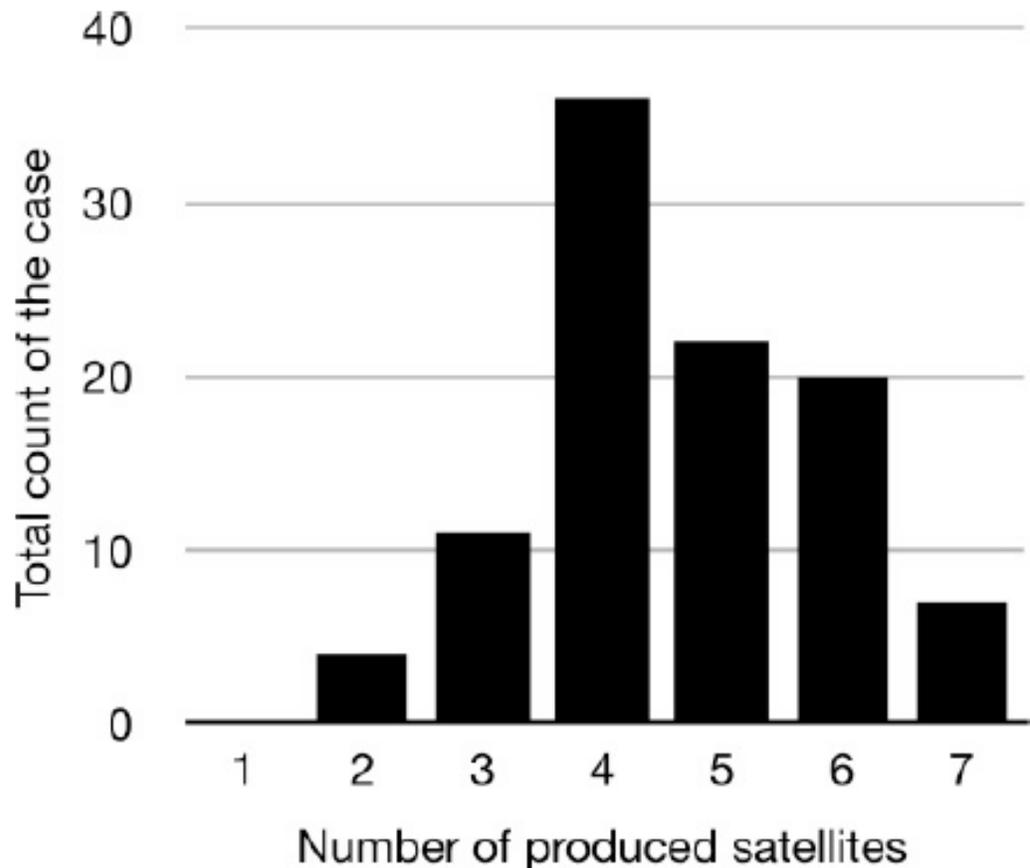
Большие луны должны быть у больших планет.



Горячие юпитеры должны растерять свои спутники пока мигрируют к звезде

# Моделирование образования больших спутников

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

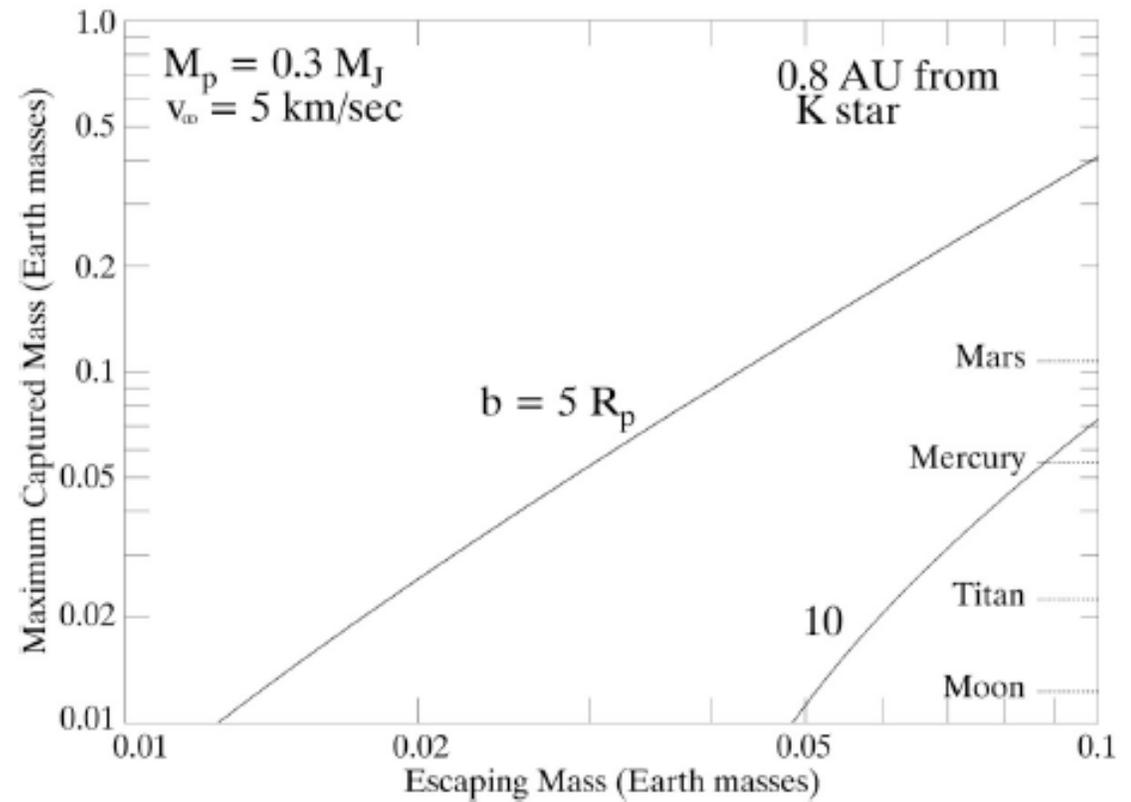
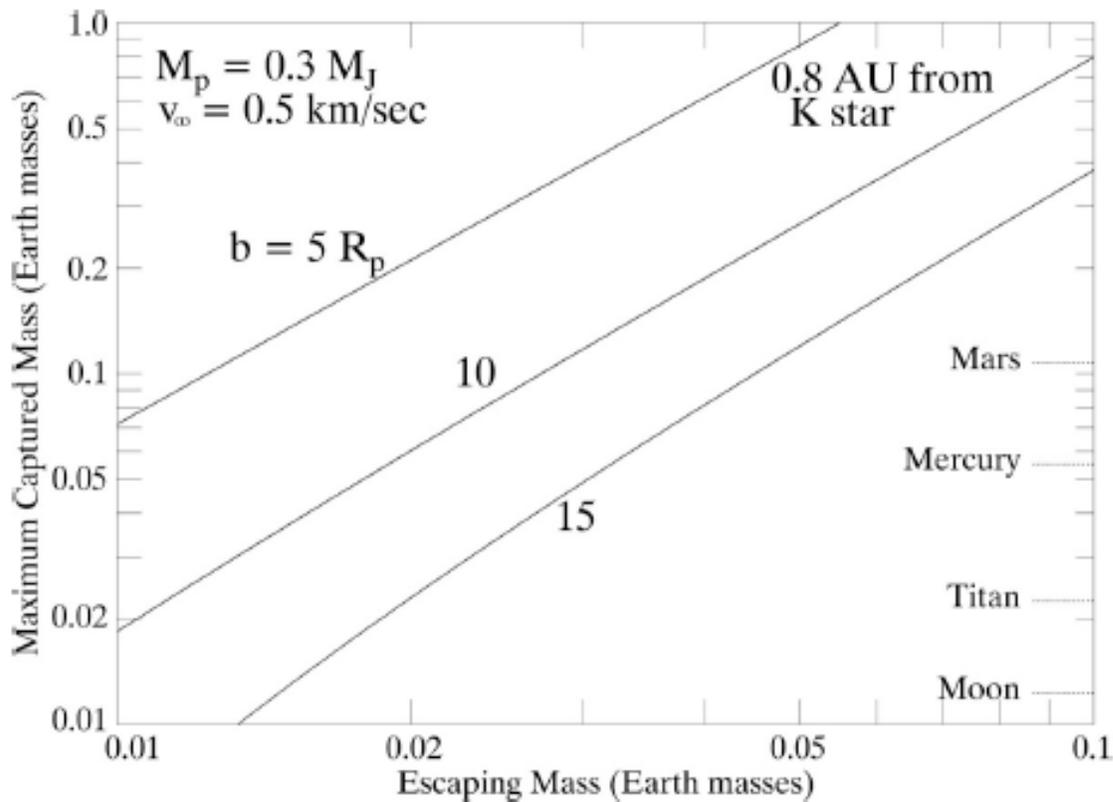


# Захват спутника

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

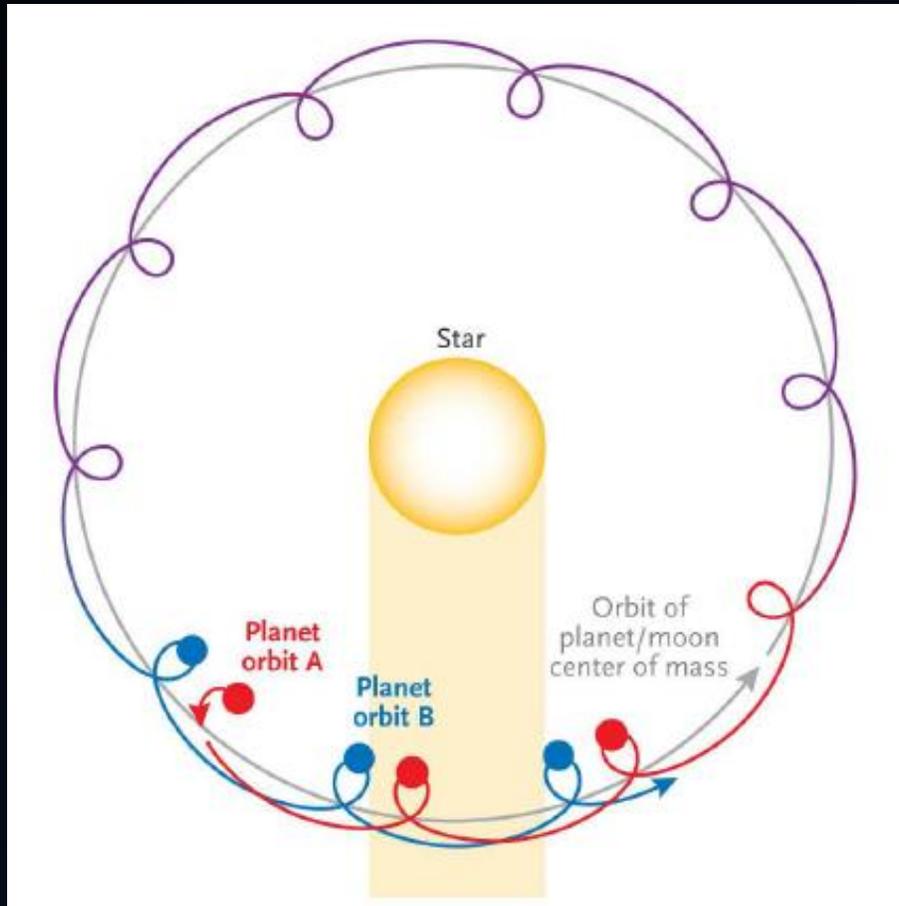
Такой сценарий проще реализовать вблизи массивной планеты.

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

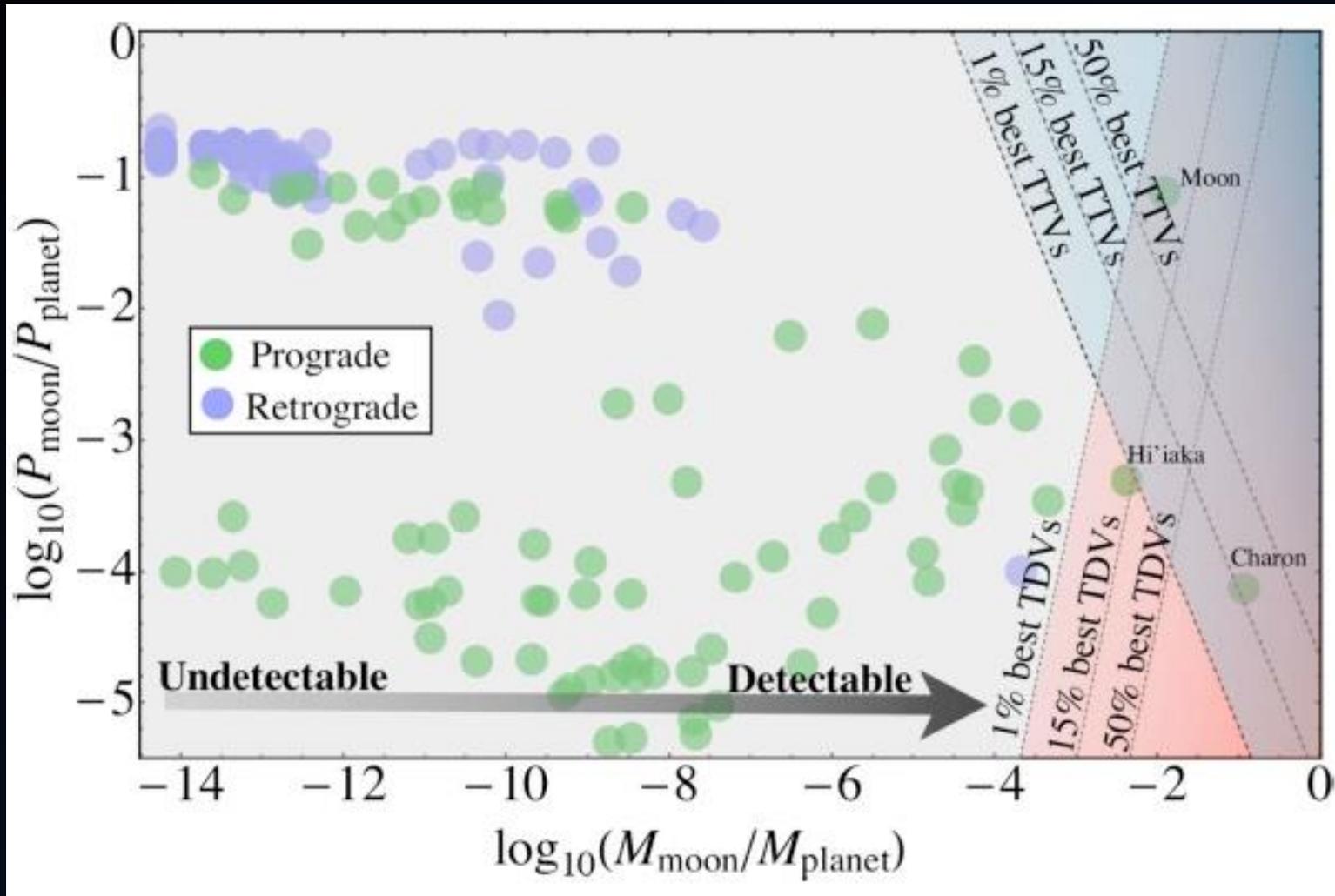
Наличие спутника приводит к вариации скорости движения планеты.

Из-за этого меняется длительность транзита.

## 3. Сдвиг плоскости орбиты

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

# Современные пределы по таймингу транзитов

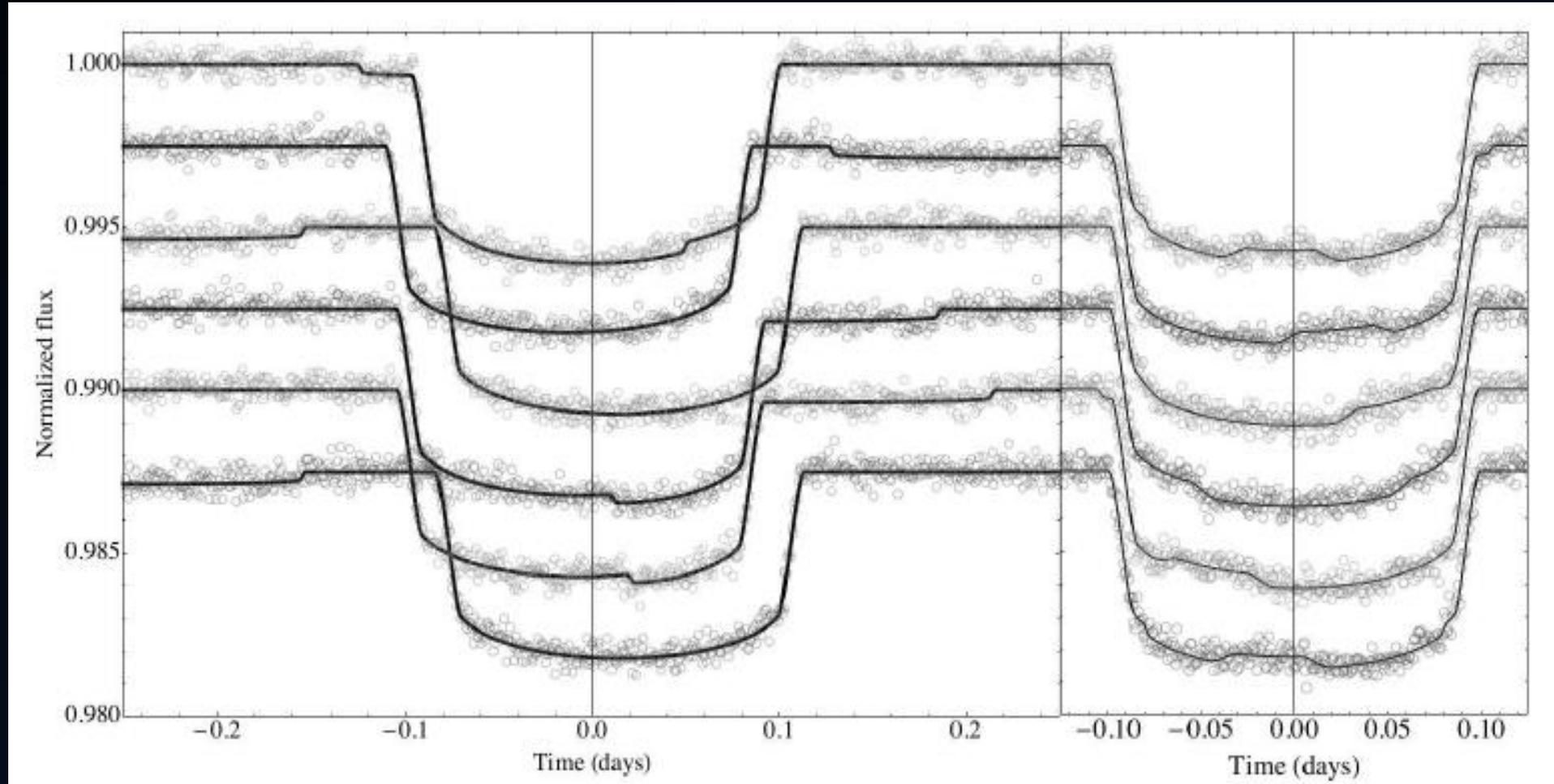


Показано, что бы мы получили, если бы луны Солнечной системы вращались вокруг планеты на 100-дневной орбите.

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

# Совместные затмения

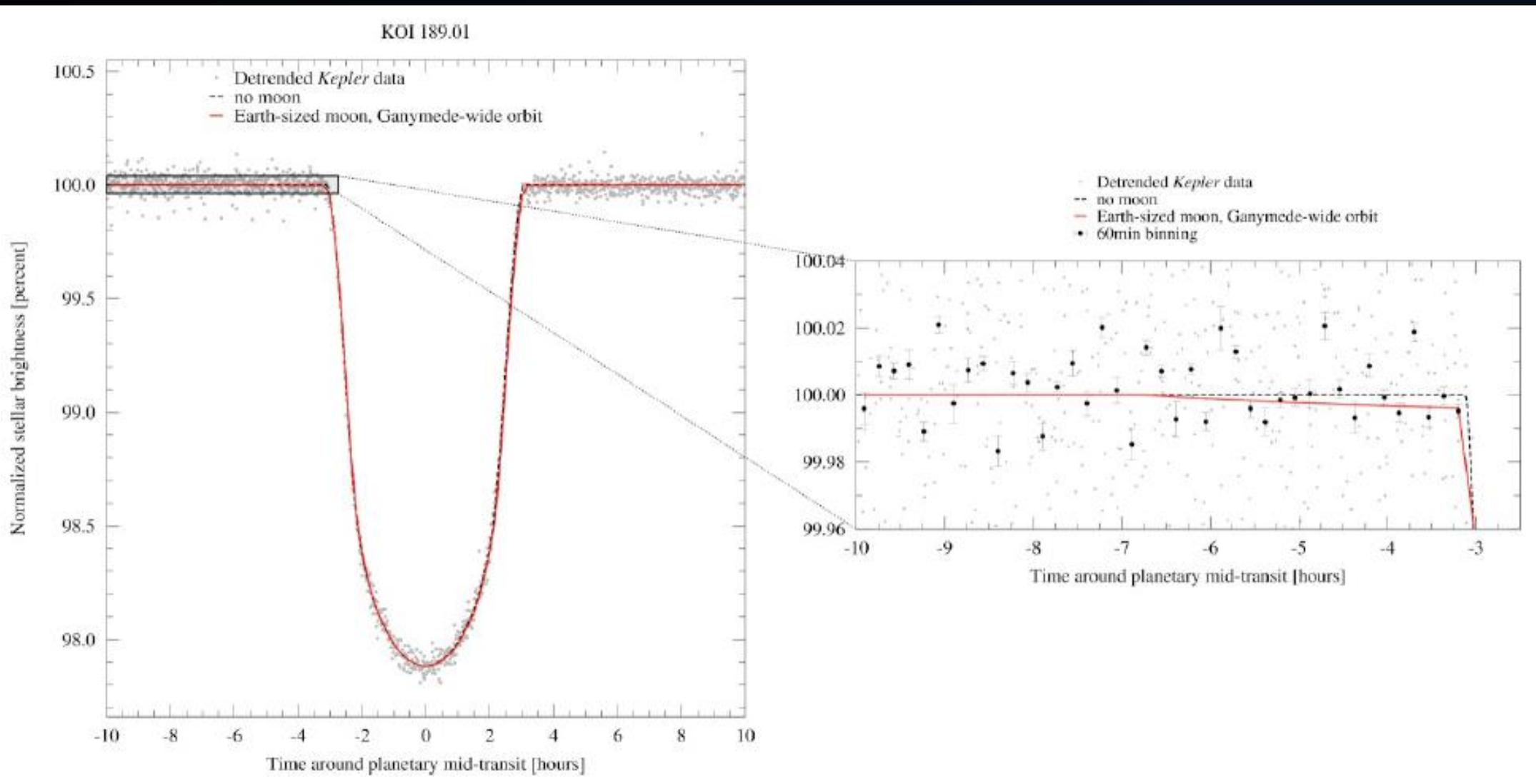
Похоже, как будто планета наехала на темное пятно на диске звезды.



Нептун в зоне обитаемости около красного карлика со спутником размером с Землю. Численное моделирование.

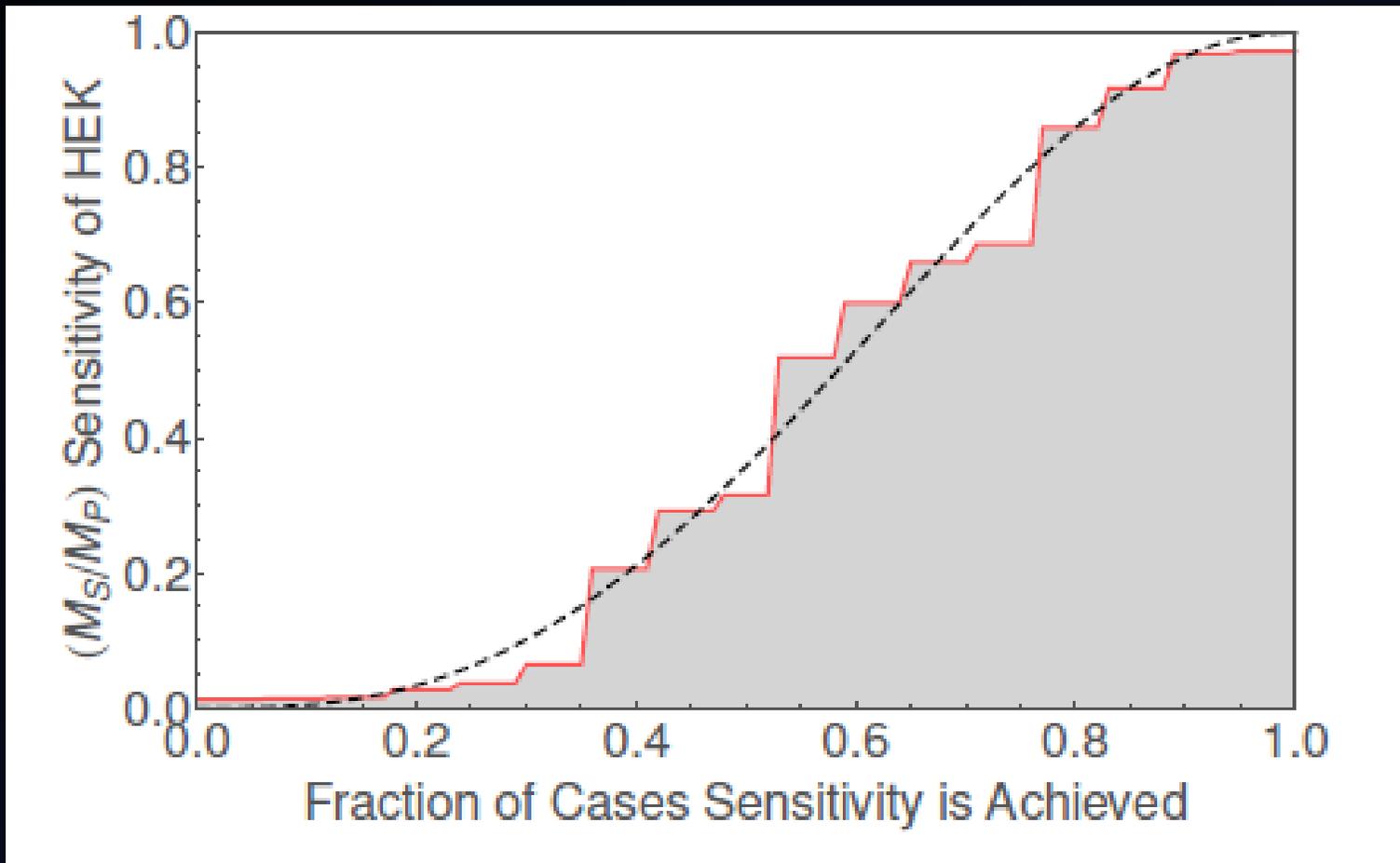
# Насколько мал эффект

Планета типа Юпитера, луна – типа Земли.



# Hunt for Exomoons with Kepler

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



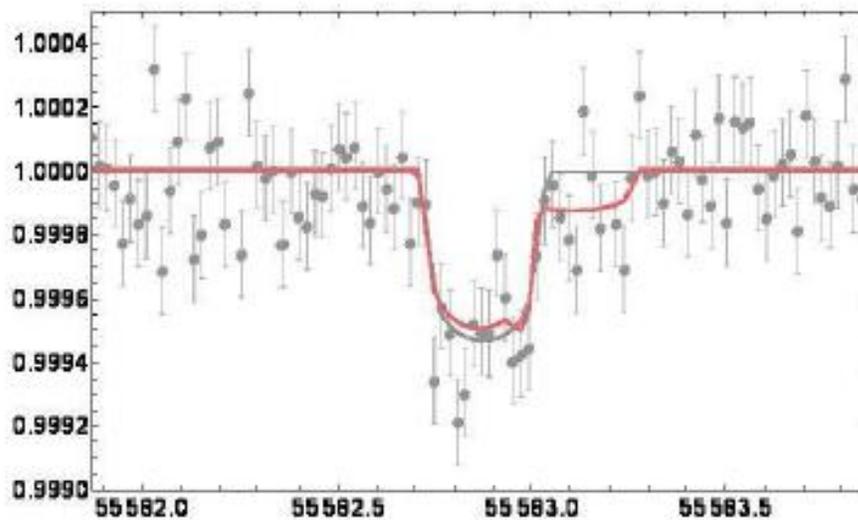
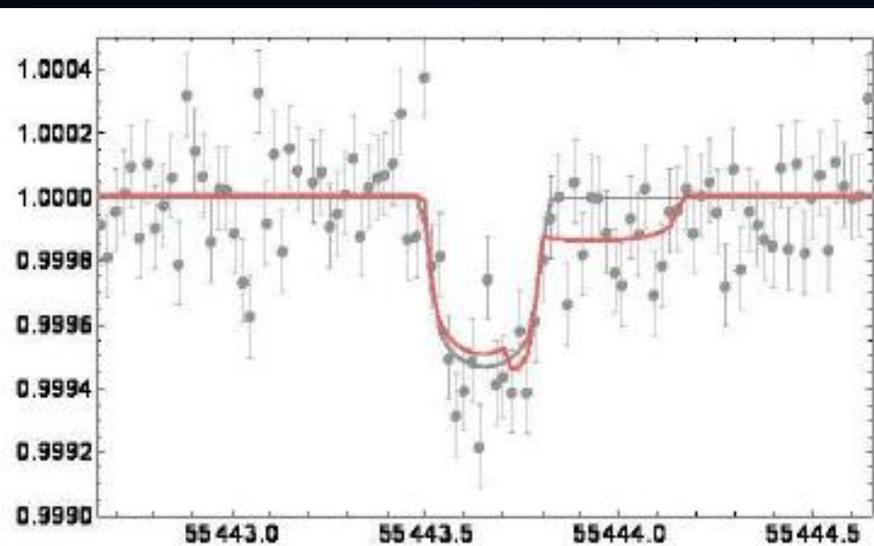
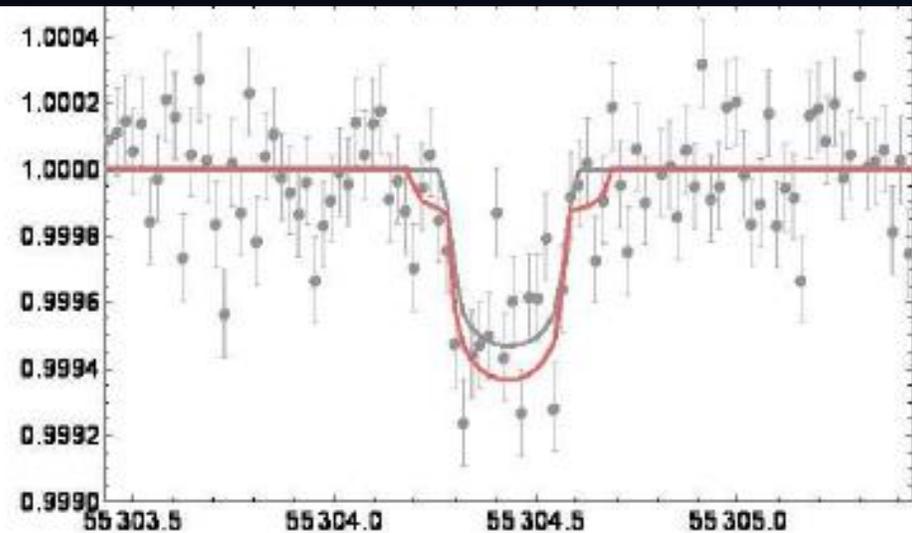
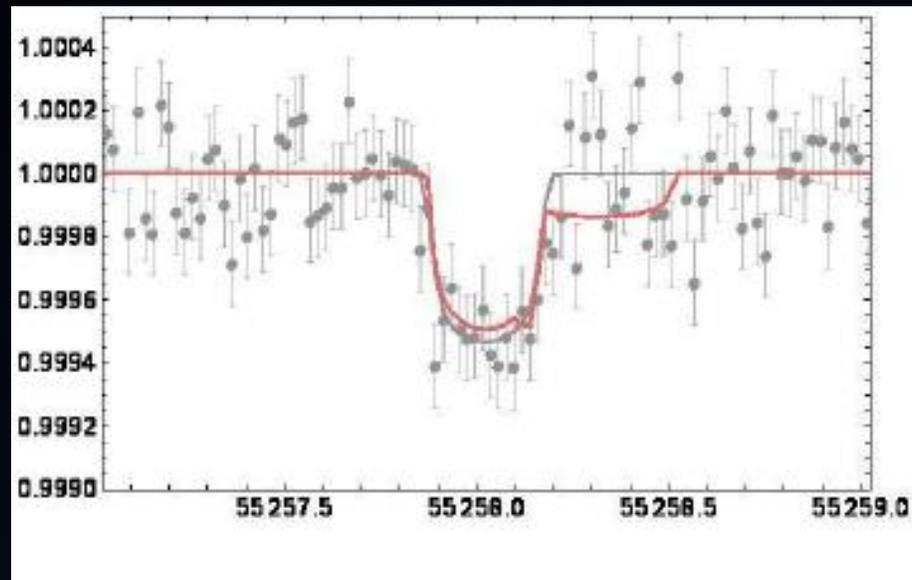
1405.1455



Искали вокруг 17 планет,  
но ничего не нашли.

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

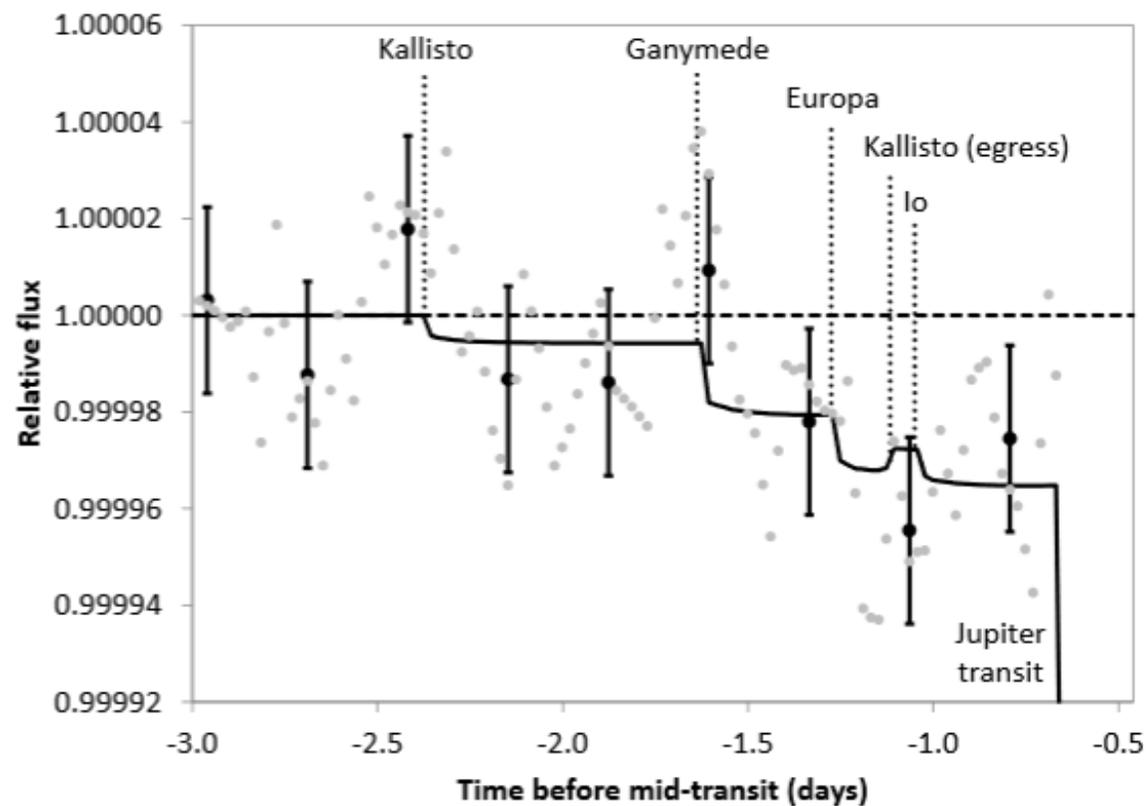
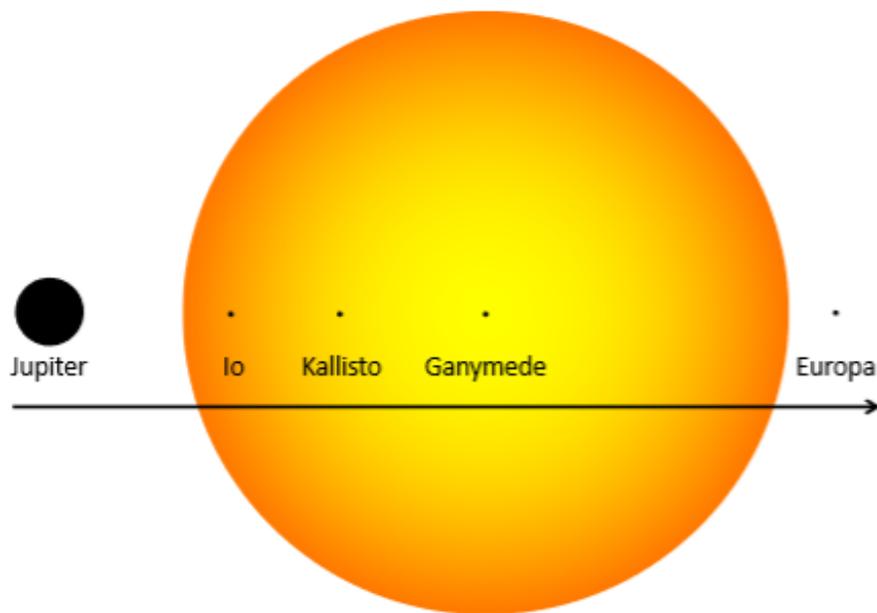
# Примеры поиска



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

# Возможность обнаружить аналог Солнечной системы

Расчеты для спутника PLATO (2024 г.)

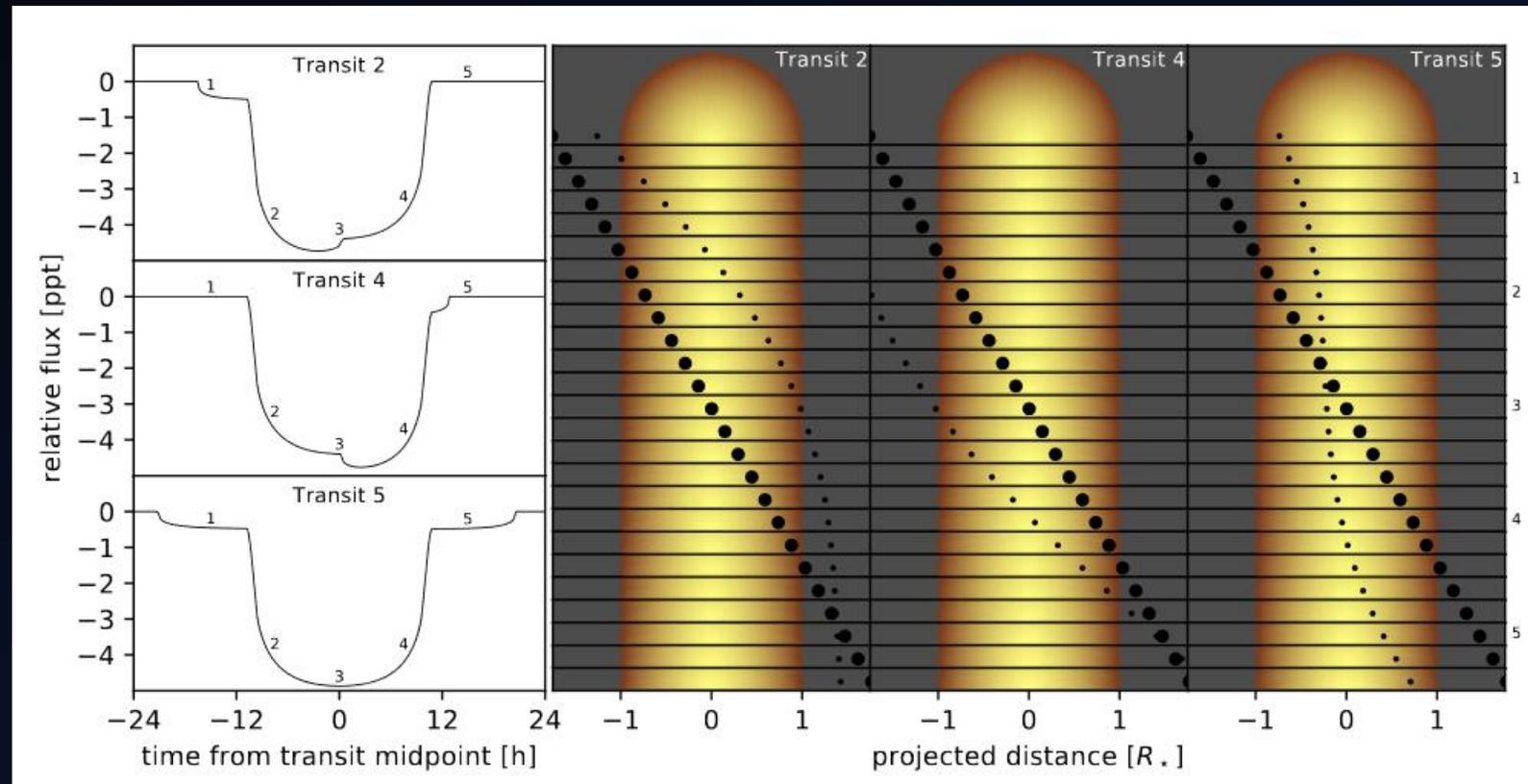
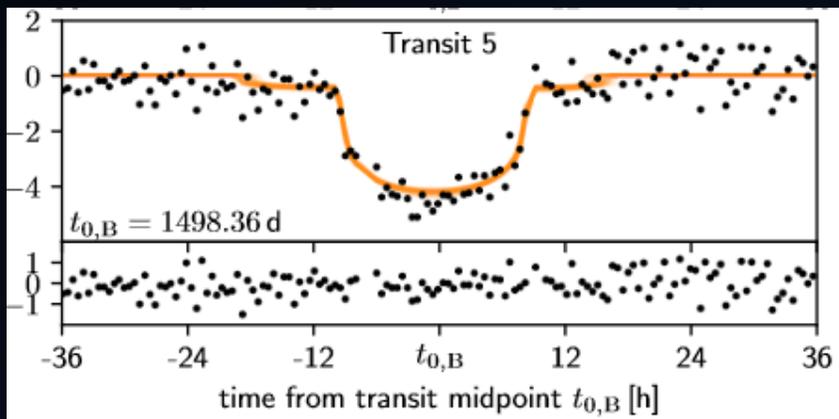


# Единственный кандидат: Kepler-1625B

Вокруг звезды типа Солнца (слегка проэволюционировавшего) на расстоянии 0.9 а.е. с периодом 287 дней обращается планета с массой порядка 10 юпитерианских.

1806.04672

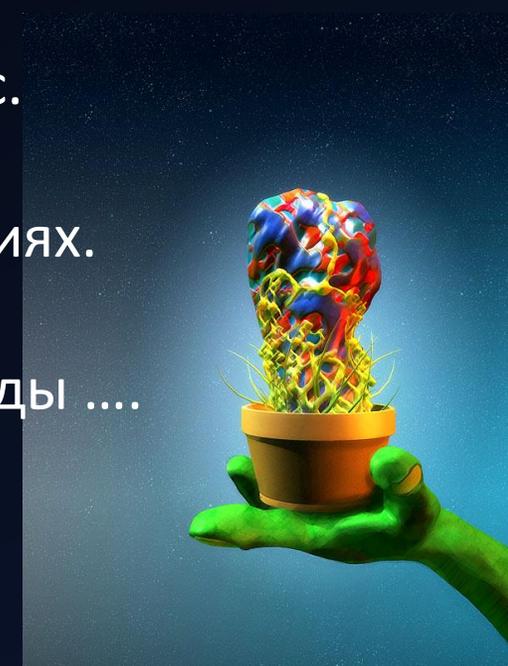
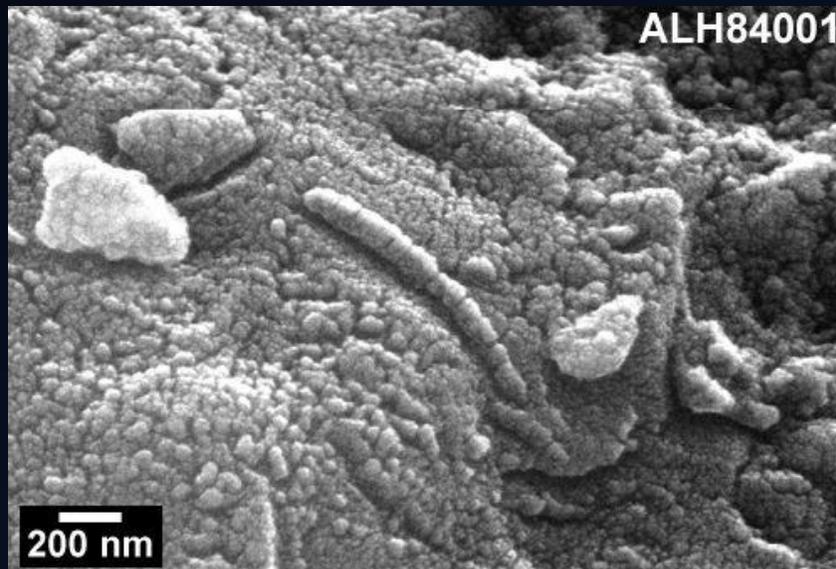
На расстоянии около 20 планетных радиусов заподозрена планета с размером порядка размера Нептуна.



# 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 ....



# Жизнь на спутниках?

Europa



3138 km

Ganymede



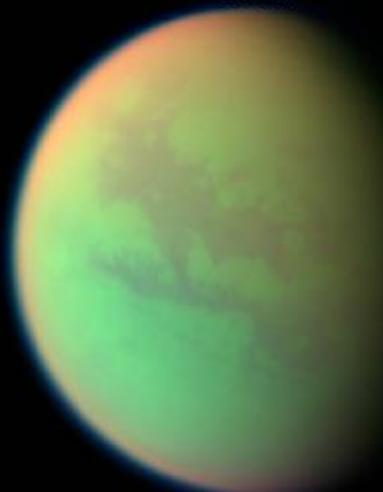
5268 km

Enceladus



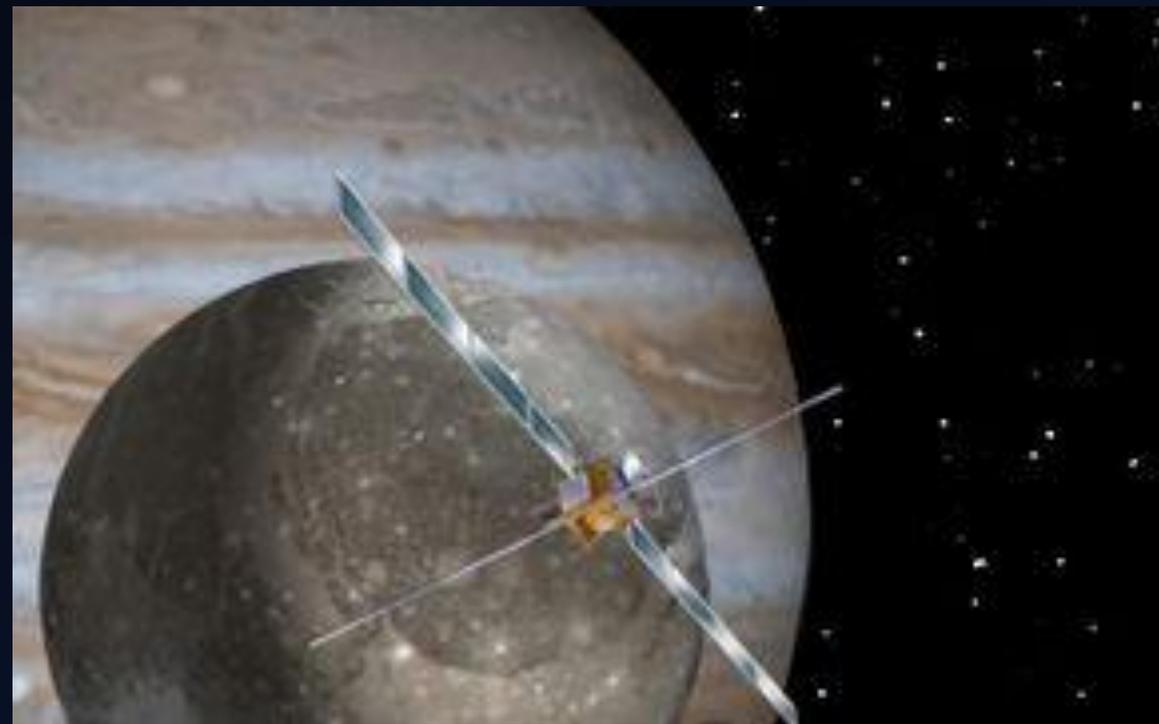
504 km

Titan



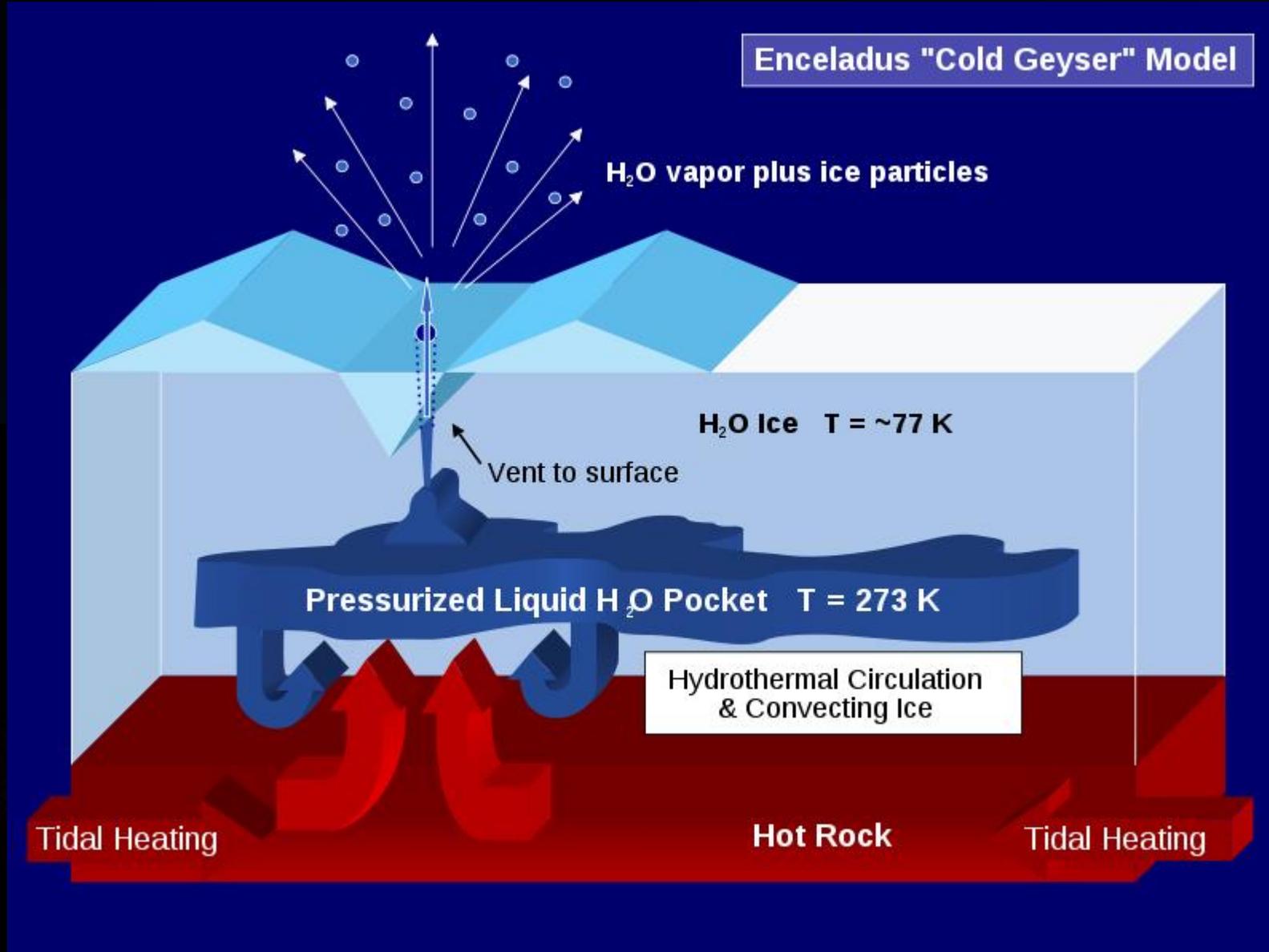
5152 km

Потенциально обитаемыми  
Считаются четыре объекта:  
спутники Юпитера и Сатурна.



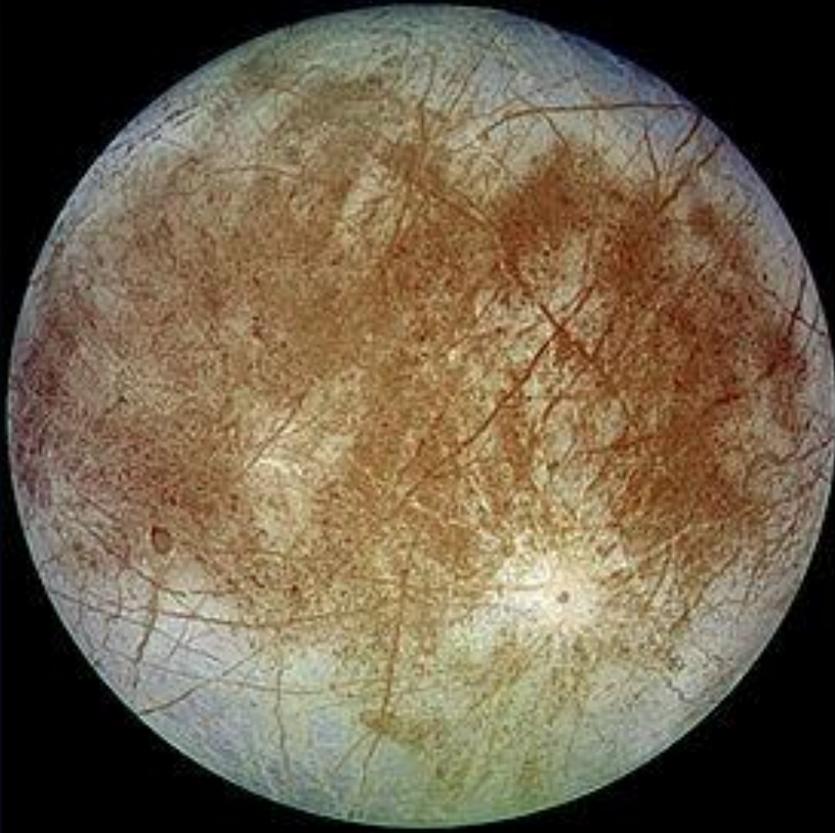
Ждем JUICE (2022-...)

# Энцелад – спутник Сатурна



Спутник Кассини открыл выбросы, в которых оказалось много воды.

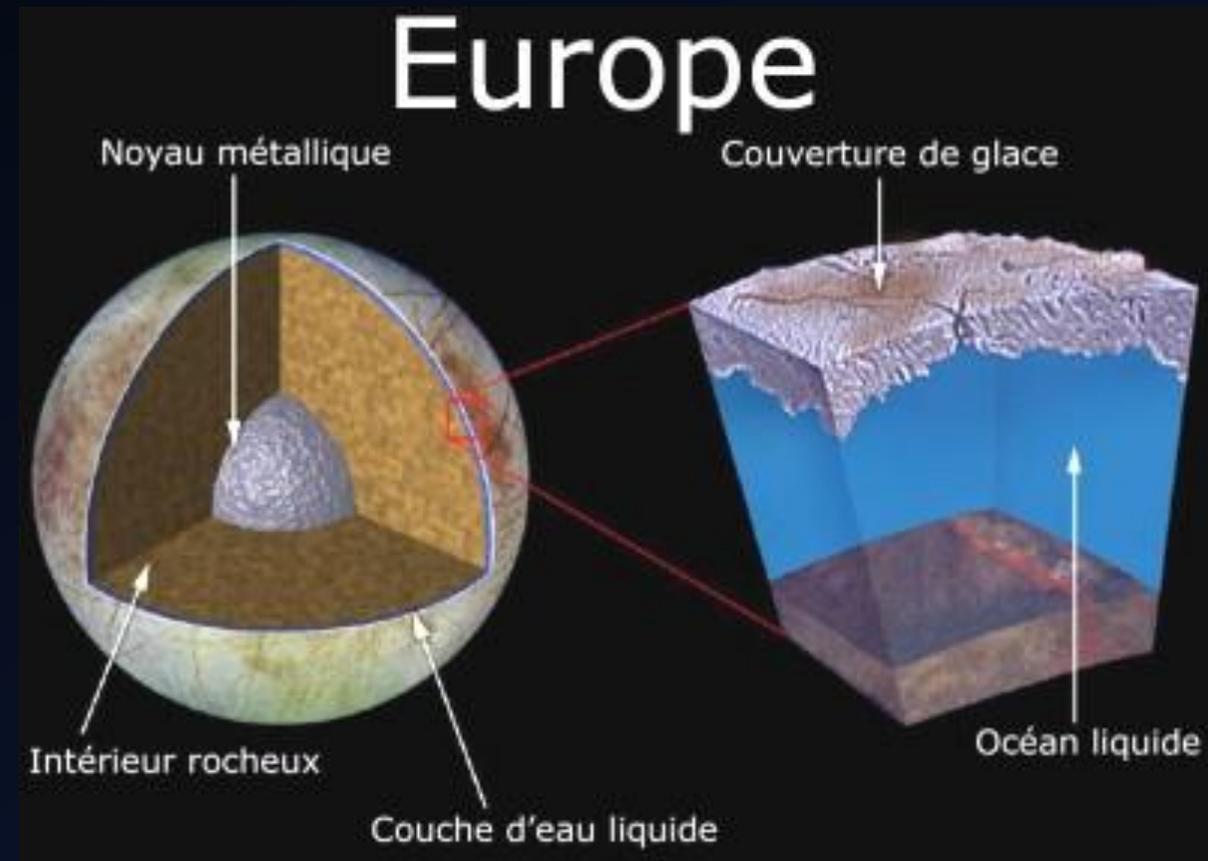
# Европа – спутник Юпитера



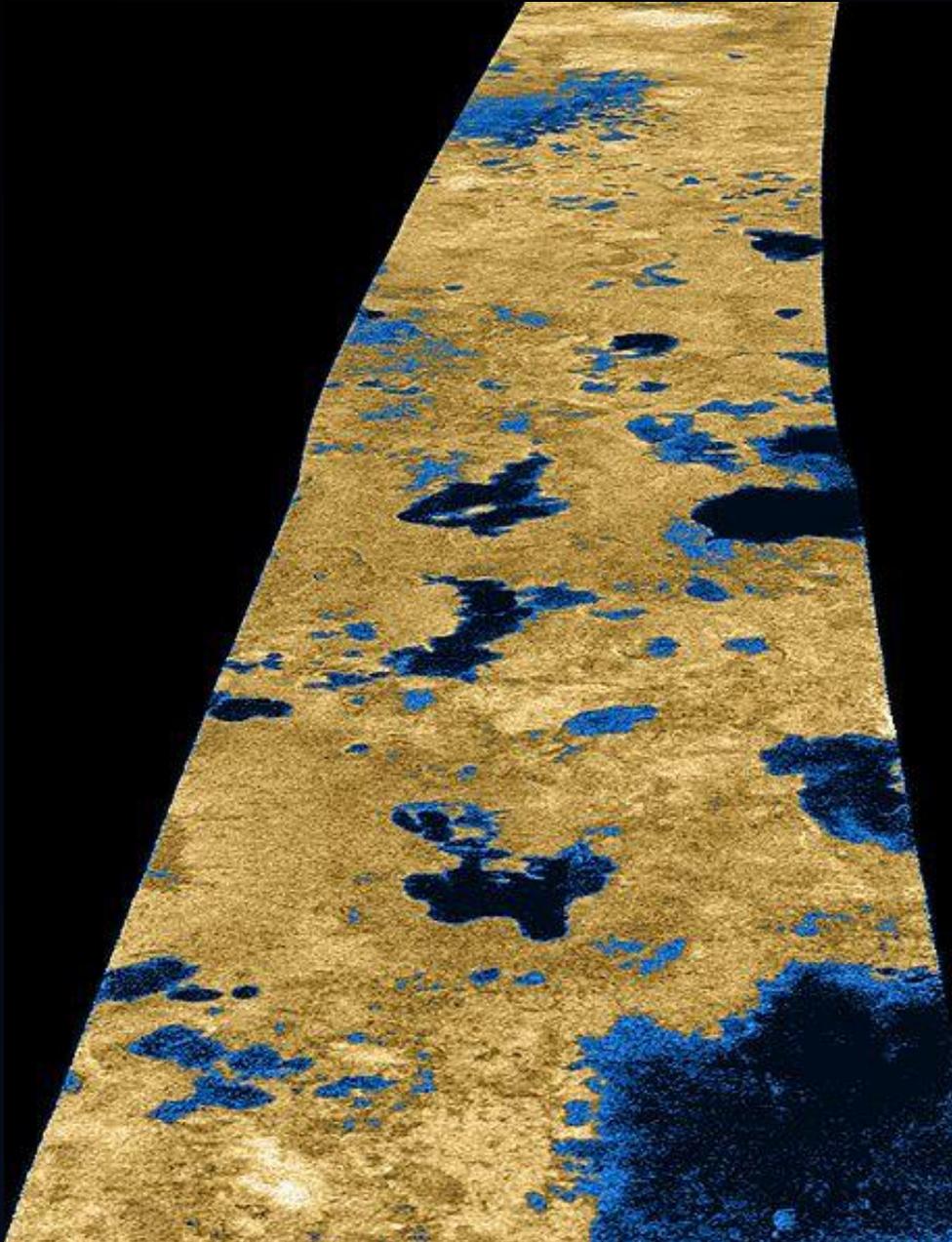
Первый хороший кандидат в обитаемые объекты

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

С 2014 г. на Европе также наблюдают выбросы выдо из подледного океана.



# 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».

