

Солнечная система

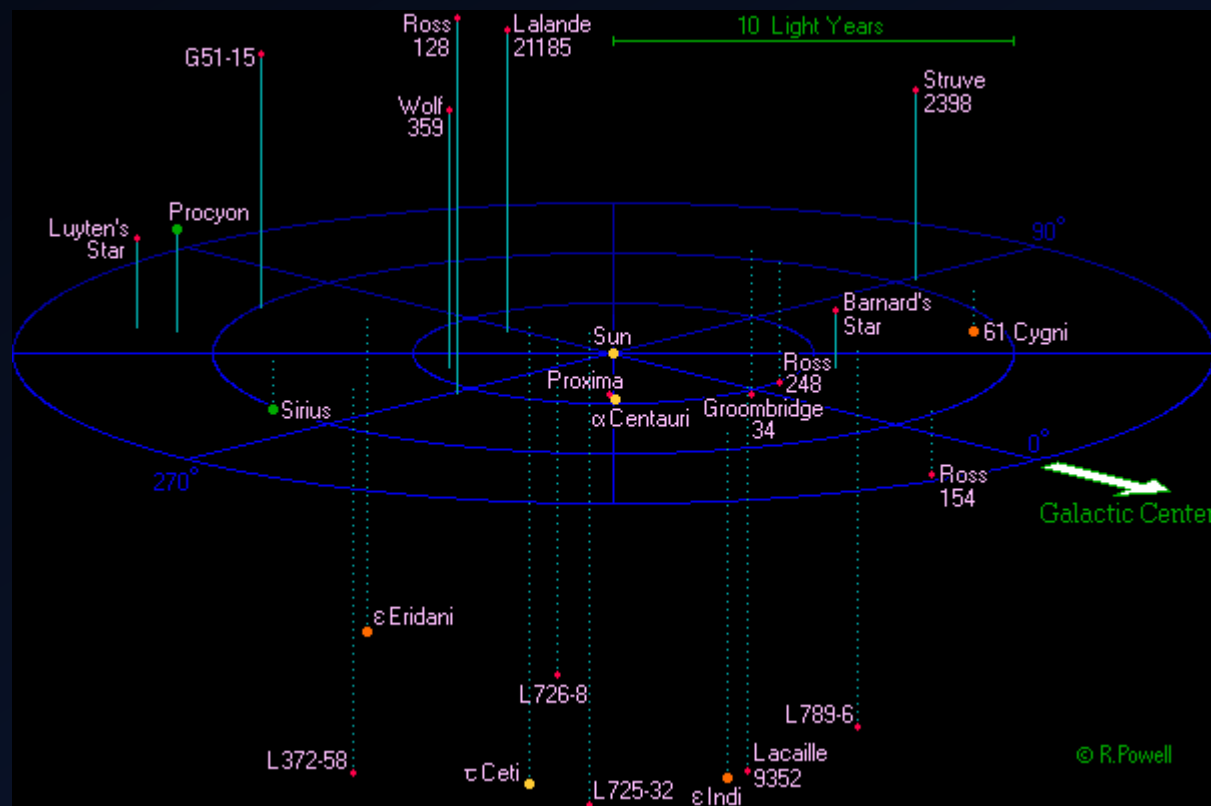
И ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

Размеры Солнечной системы



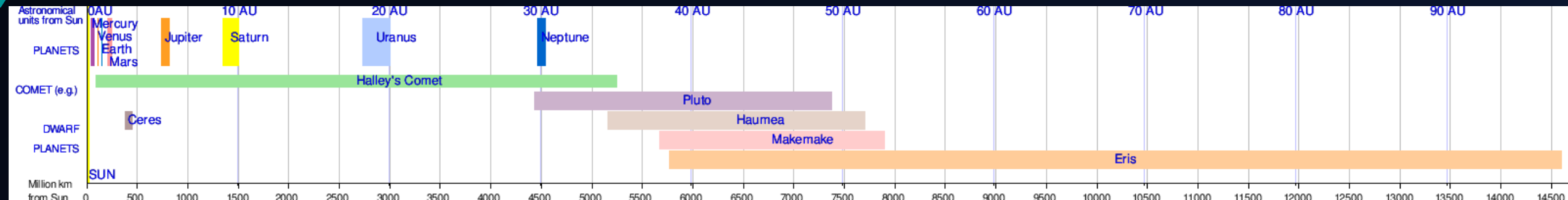
Однако гравитационное влияние Солнца простирается гораздо дальше.

Большие планеты располагаются на расстояниях < 30 а.е. от Солнца.



Структура Солнечной системы

- Планеты земной группы
- Пояс астероидов
- Планеты –гиганты
- Пояс Койпера
- Облако Оорта



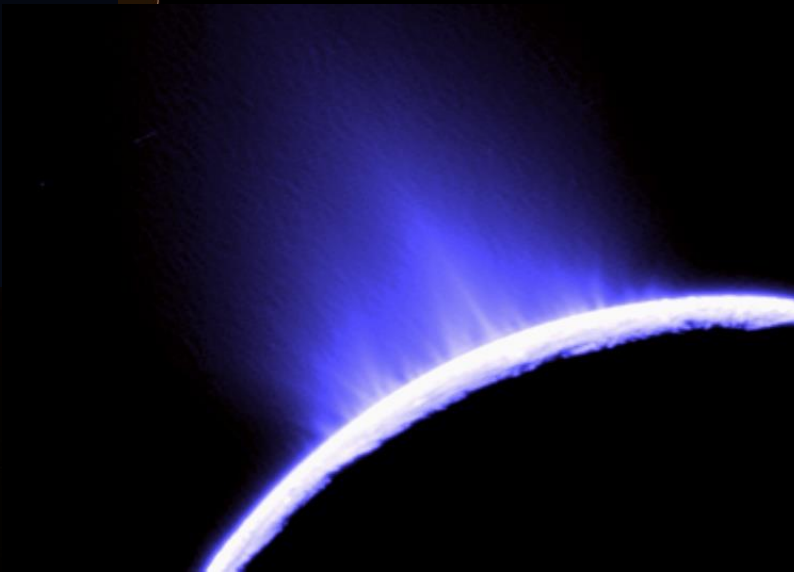
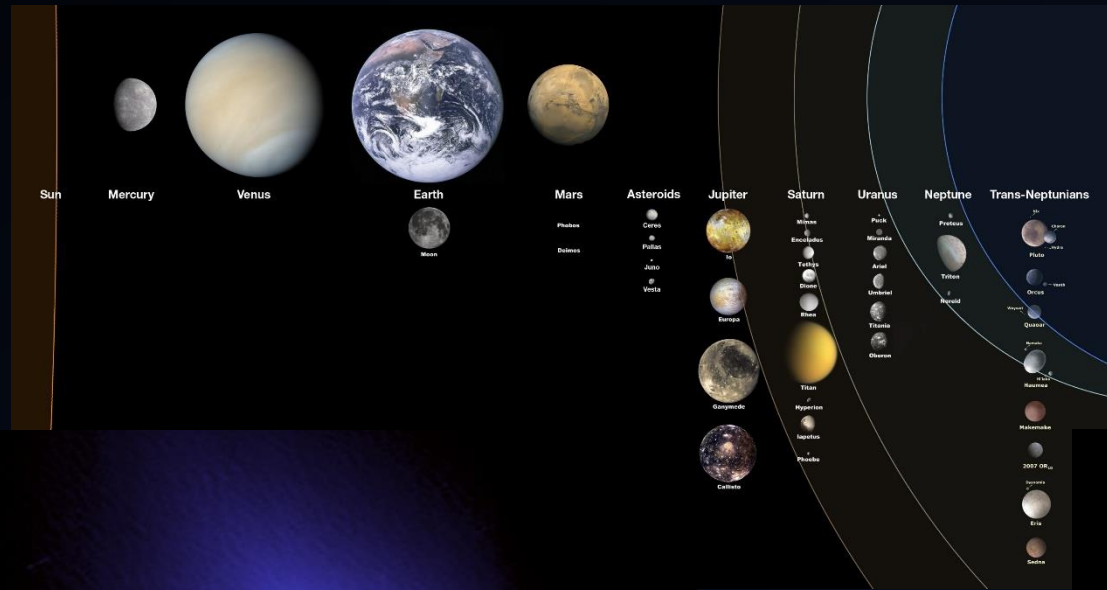
Параметры планет

Планеты земной группы, газовые гиганты, ледяные гиганты, карликовые планеты (основной пояс астероидов и транснептуновые)

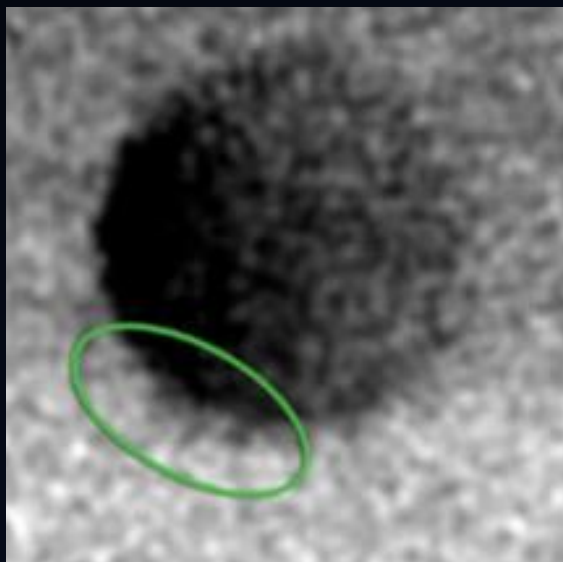
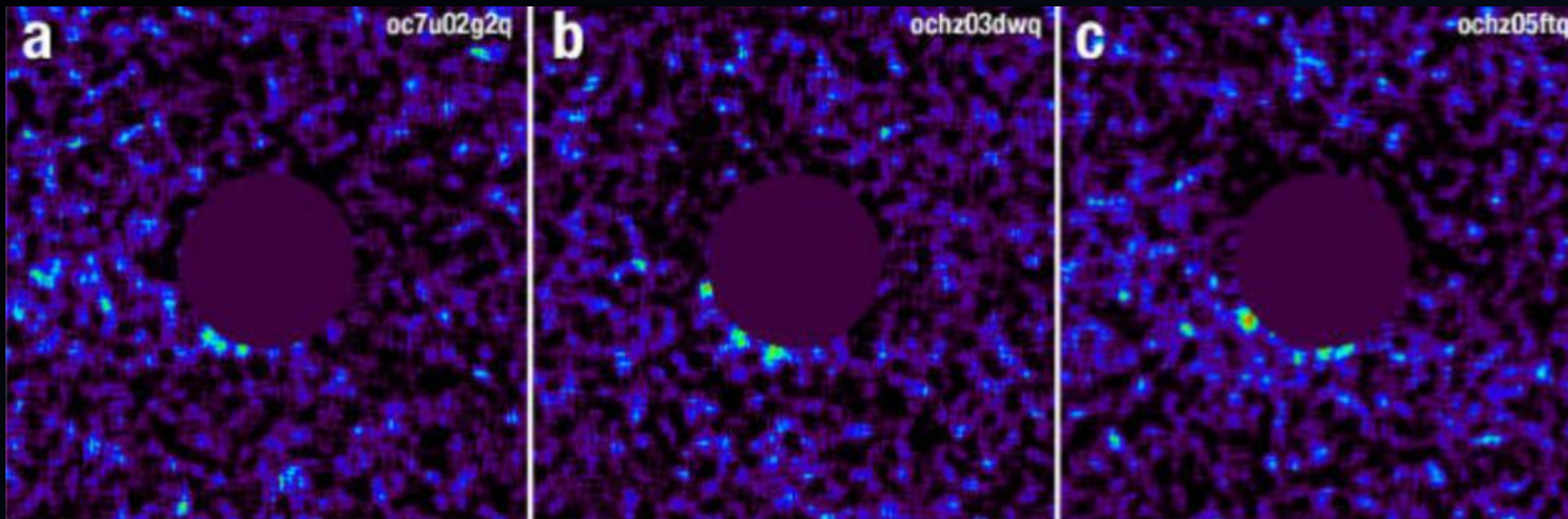
Планета (карликовая планета)	Диаметр, относительно	Масса, относительно	Орбитальный радиус, а. е.	Период обращения, земных лет	Сутки, относительно	Плотность, кг/м ³
Меркурий	0,382	0,055	0,38	0,241	58,6	5427
Венера	0,949	0,815	0,72	0,615	243 ^[130]	5243
Земля ^[131]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5515
Марс	0,53	0,107	1,52	1,88	1,03	3933
Церера	0,074	0,00015	2,76	4,6	0,378	2161
Юпитер	11,2	318	5,20	11,86	0,414	1326
Сатурн	9,41	95	9,54	29,46	0,426	687
Уран	3,98	14,6	19,22	84,01	0,718 ^[130]	1270
Нептун	3,81	17,2	30,06	164,79	0,671	1638
Плутон	0,186	0,0022	39,2 ^[132]	248,09	6,387 ^[130]	1860
Хаумеа	~0,11 ^[133]	0,00066	43 ^[132]	281,1	0,163	~2600
Макемаке	0,116	~0,0005 ^[134]	45,4 ^[132]	306,28	0,324	~1700 ^[135]
Эрида	0,182	0,0028	67,8 ^[132]	558,04	1,1	2520

Спутники планет

- Регулярные
- Иррегулярные
- «Особые» (Луна)



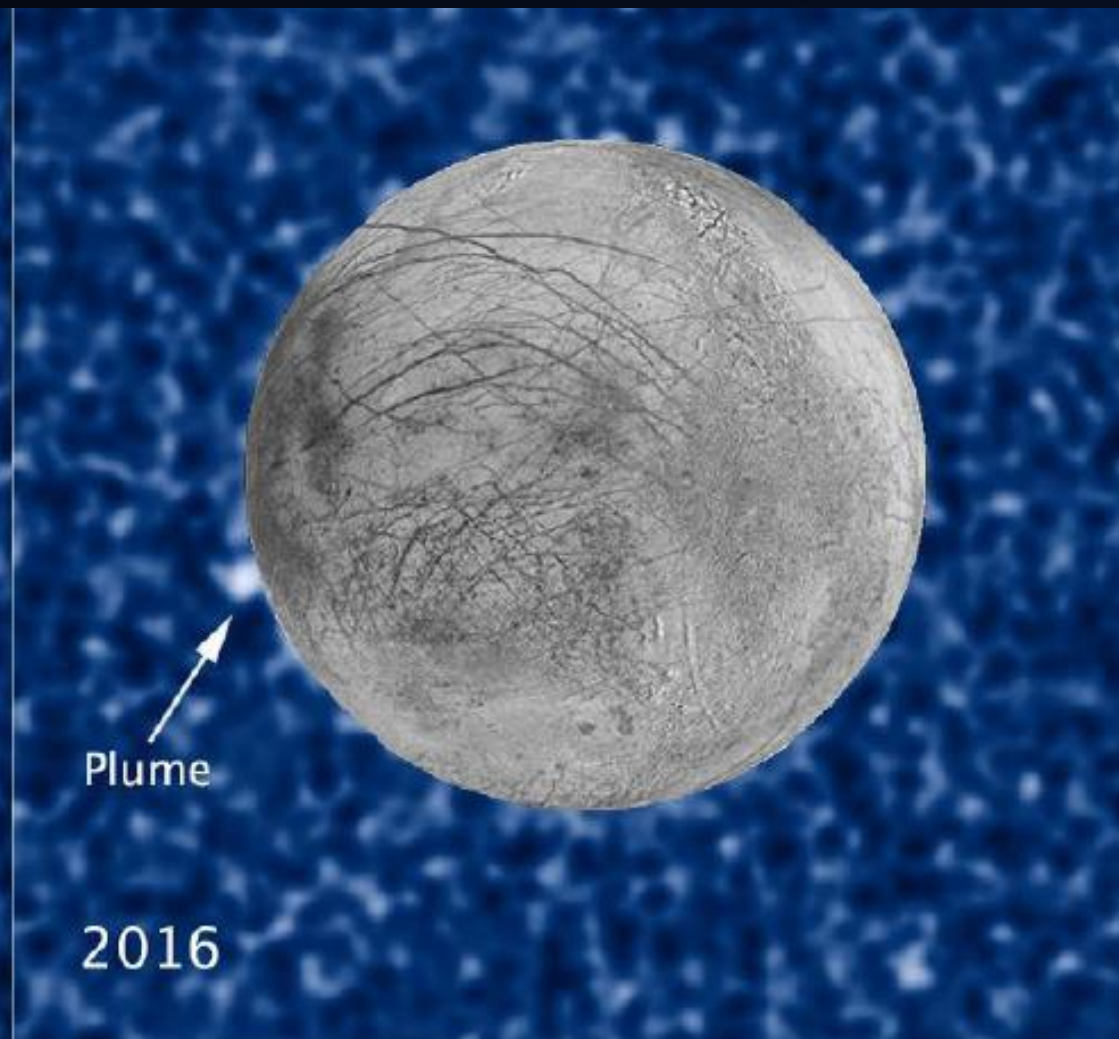
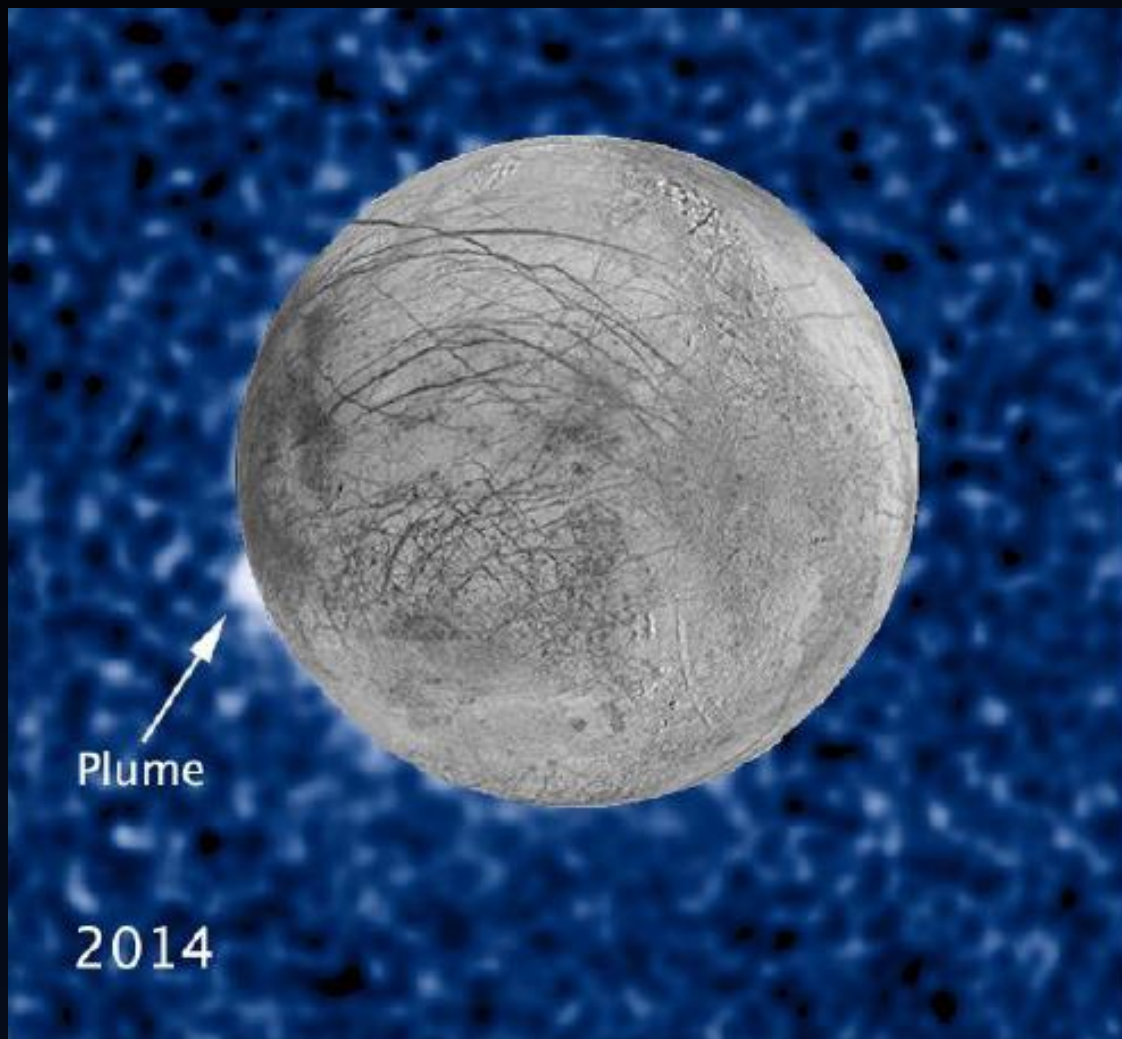
Водяные фонтаны на Европе



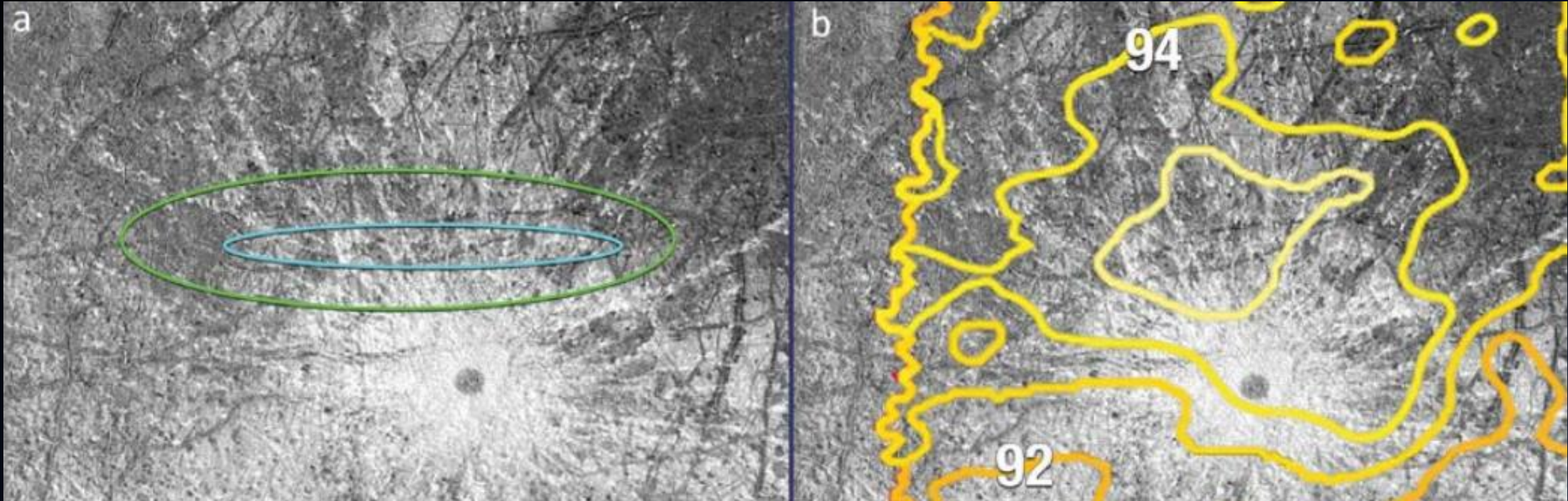
Еще в 2014 г. наблюдения на Хаббле позволили заподозрить наличие водяных выбросов на Европе. Новые данные, также полученные на КТХ, дают новые аргументы в пользу присутствия таких «фонтанов».

Данные получены во время прохождения Европы по диску Юпитера. Наблюдения велись в дальнем УФ. Результаты получены по поглощению излучения в выбросах.

Фонтаны на Европе



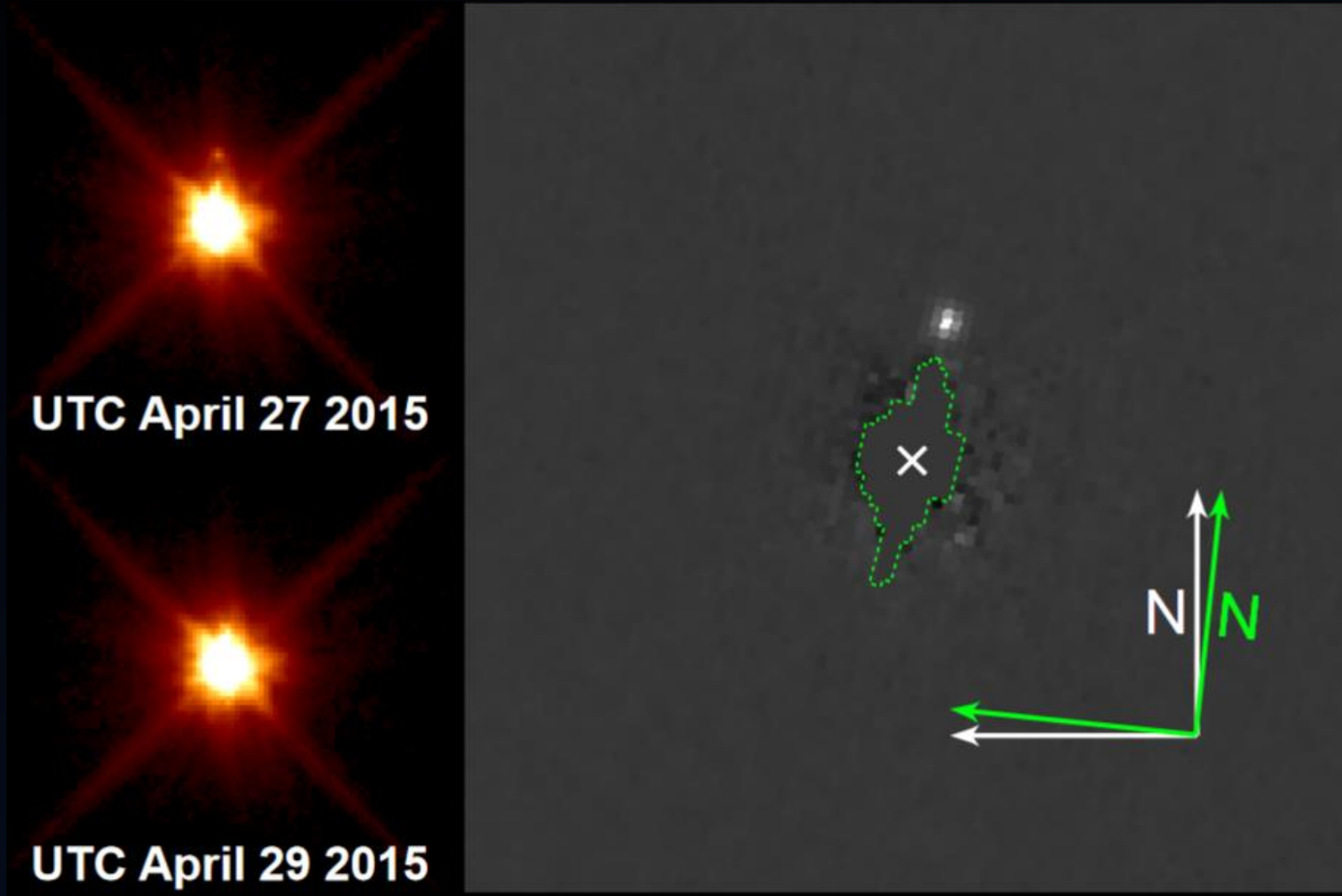
Криовулканизм на Европе



Наблюдения на Хаббле в феврале 2016 г.
Предыдущие – в марте 2014.

Спутник Макемаке

1604.07461



Теперь все четыре занептуновые карликовые планеты имеют спутники.

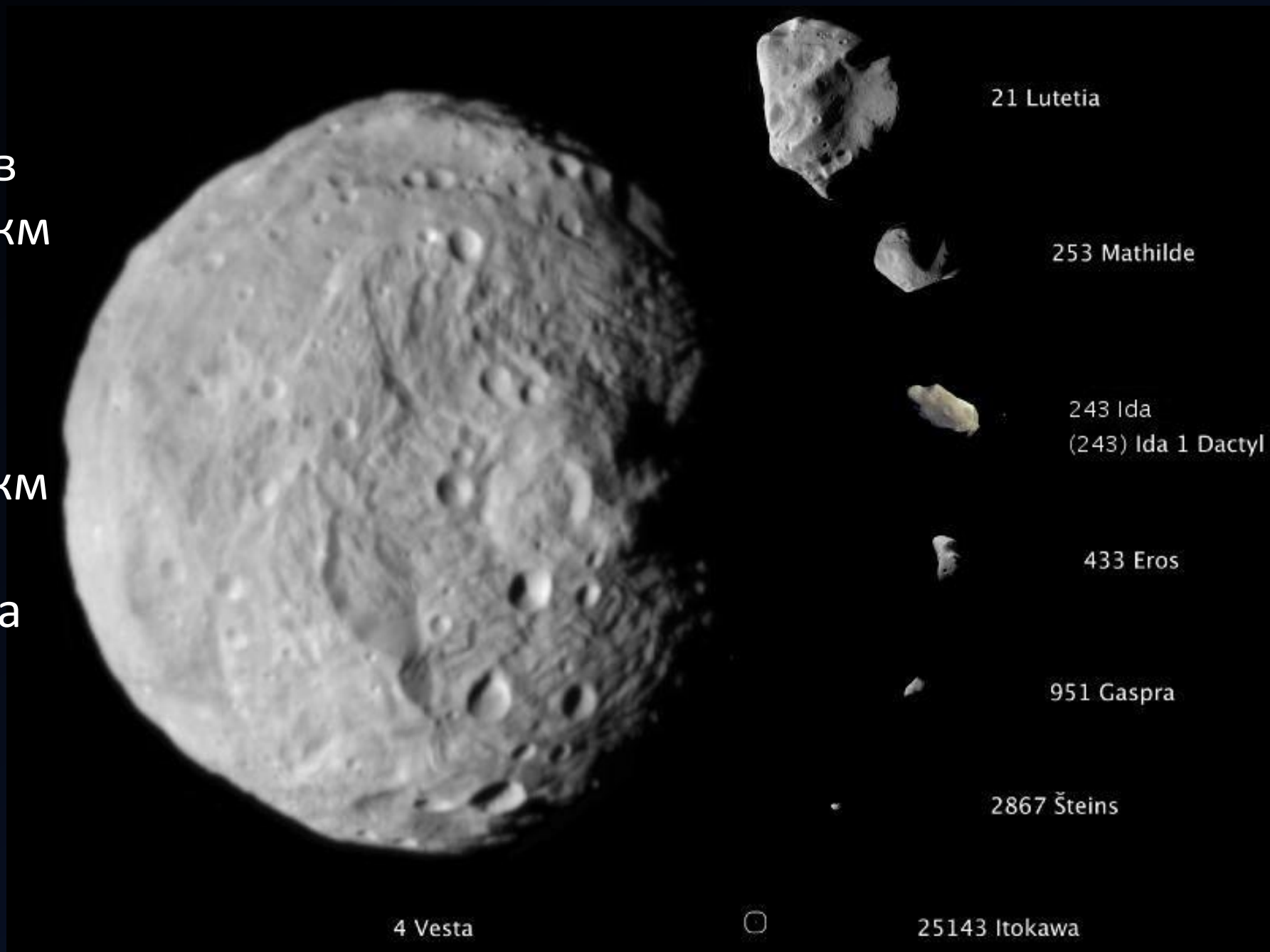
Астероиды

1-2 млн объектов
с размерами >1 км

Известно <1 млн

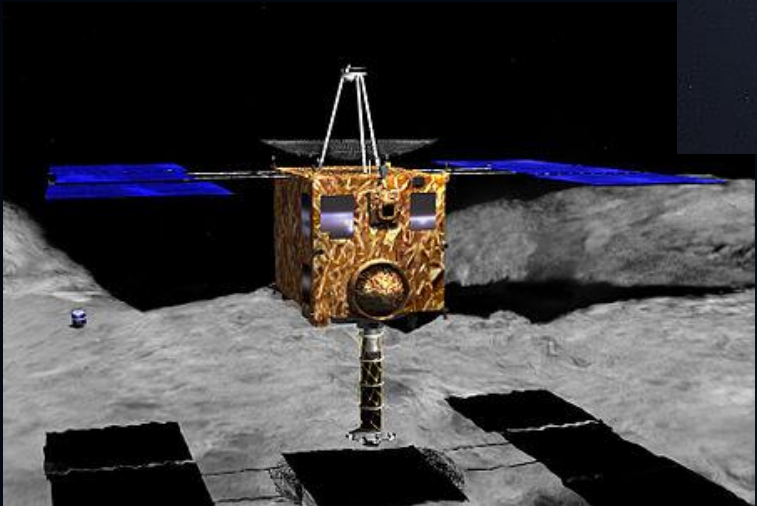
Диаметры <500 км

Суммарная масса
несколько % от
массы Луны



Доставка образцов с астероидов

Hayabusa
(2003-2010)
Itokawa



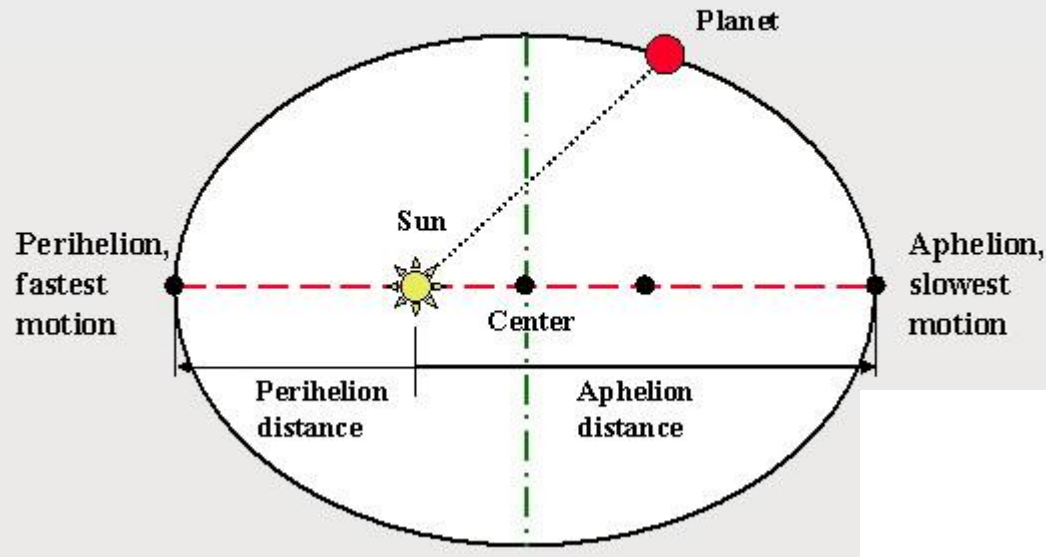
Hayabusa2
(2014-2020)
Ryugu

Osiris-Rex
(2016-2023)
Bennu



Законы Кеплера

Kepler's 1st Law



- Эллиптические орбиты
- Закон площадей
- Квадраты периодов vs. Кубы полуосей

Derivation of Kepler's 3rd Law

When something is in orbit, Centripetal Force is caused by Gravitational Force.

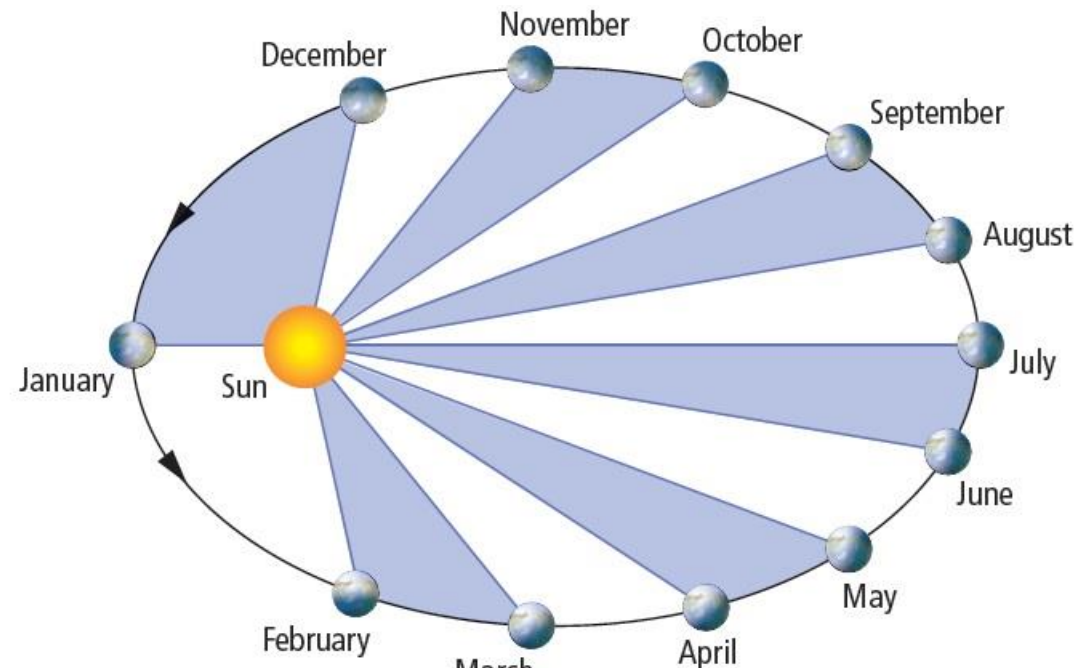
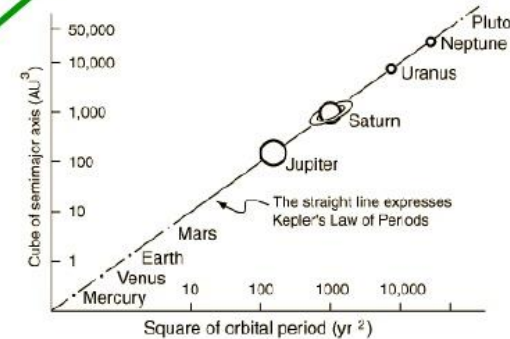
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} + v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$T^2 \propto r^3$$

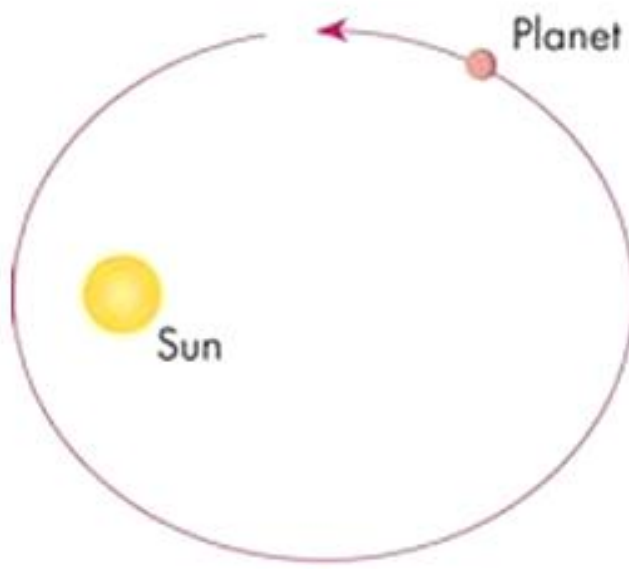
$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

The 3rd Law: The **square of the orbital period** of a planet is **directly proportional to the cube of the semi-major axis** of its orbit



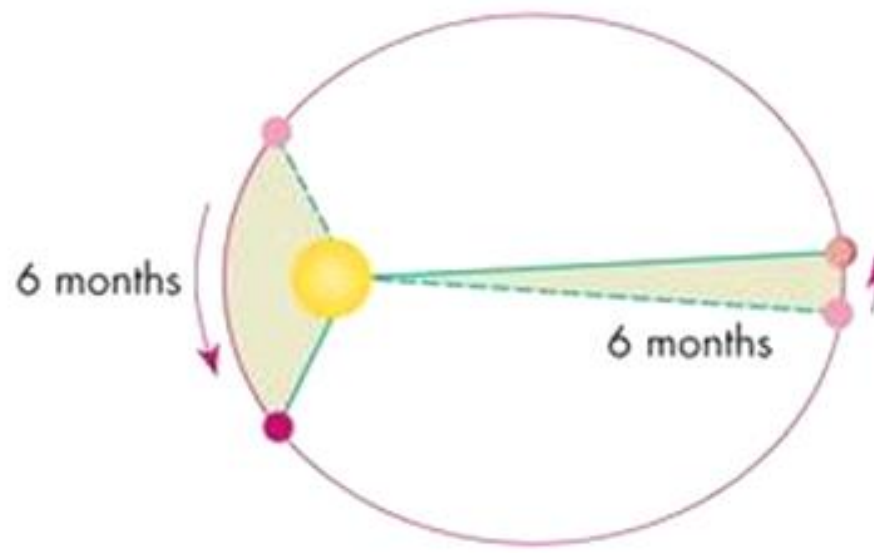
- Движение по эллипсам, в одном из фокусов – Солнце.
- Закон площадей: движение быстрее в перигелии.
- Квадраты периодов относятся как кубы больших полуосей.

Kepler's 3 Laws of Planetary Motion



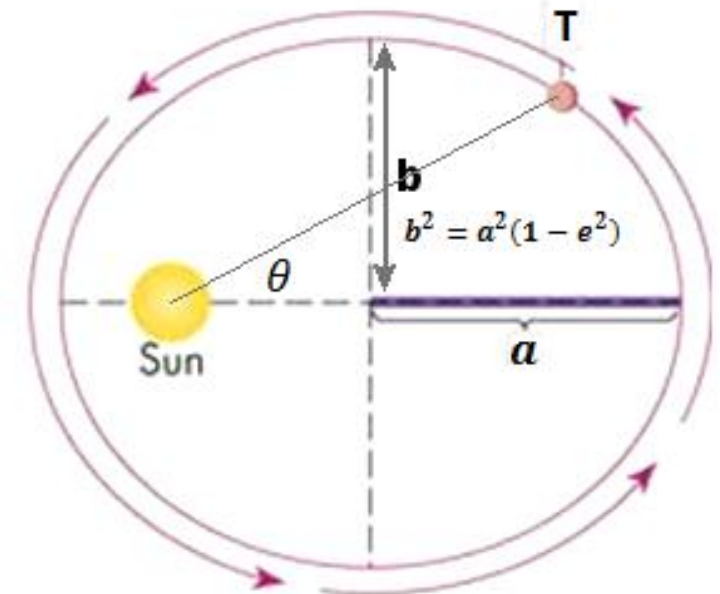
(1)

The orbits are ellipses



(2)

Equal areas in equal time



(3)

$T^2 \propto a^3$ T = time to complete orbit
 a = semi-major axis

Уточнение третьего закона Кеплера

$$P^2 = \left[\frac{4\pi^2}{G(M + m)} \right] a^3$$

Если не пренебрегаем массой более легкого тела, то закон слегка меняется.

Пример: слияние черных дыр

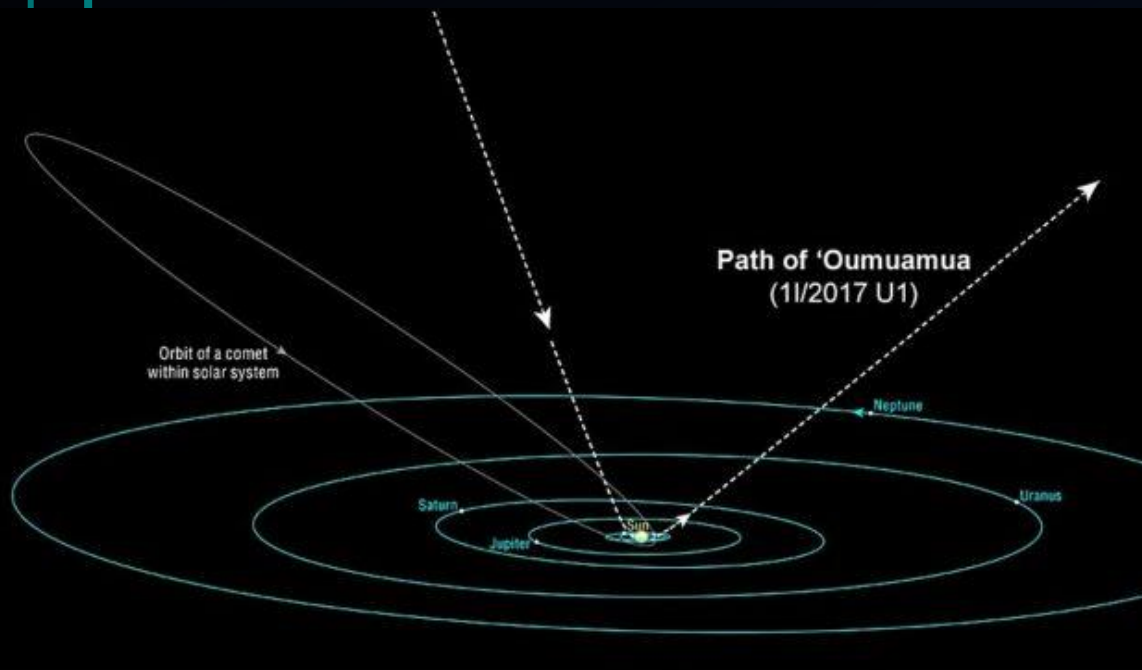
$R = 2.95 \text{ км} (M/M_{\text{solar}})$

$\Omega^2 = (2\pi/T)^2 = GM/a^3$, $a = a_1 + a_2$, $M = M_1 + M_2$

Частота излучения = $2/T$

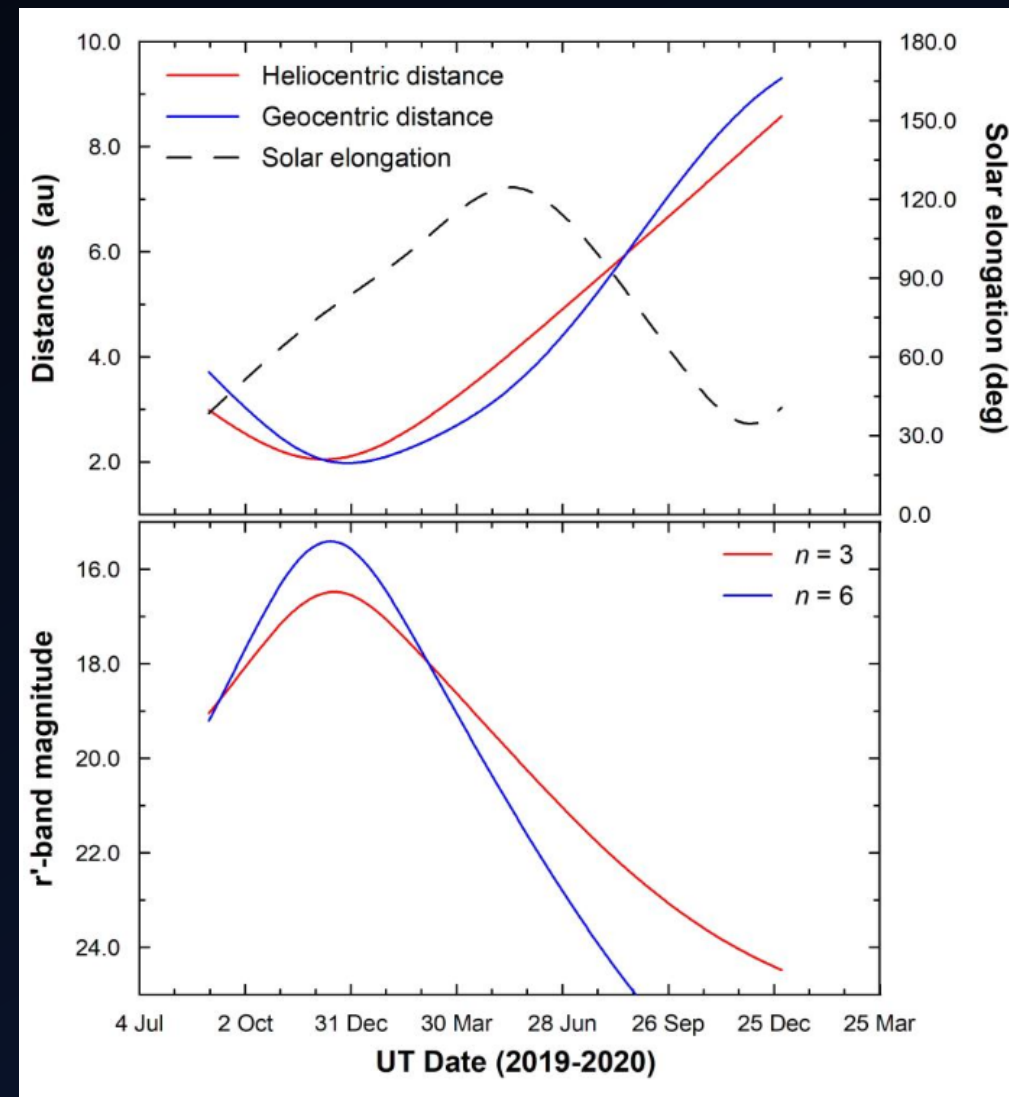
Длина волны = $cT/2$

Оумуамуа – первый межзвездный



Межзвездная комета C/2019 Q4 (Borisov)

T	2019 Dec. 9.745968 $\pm$ 0.94 TT
e	3.1551235 $\pm$ 0.13
q	1.95954186 $\pm$ 0.035 au
ω	210.22059 $\pm$ 0.90 deg (2000.0)
Ω	307.71365 $\pm$ 0.33 deg (2000.0)
i	44.49503 $\pm$ 0.34 deg (2000.0)

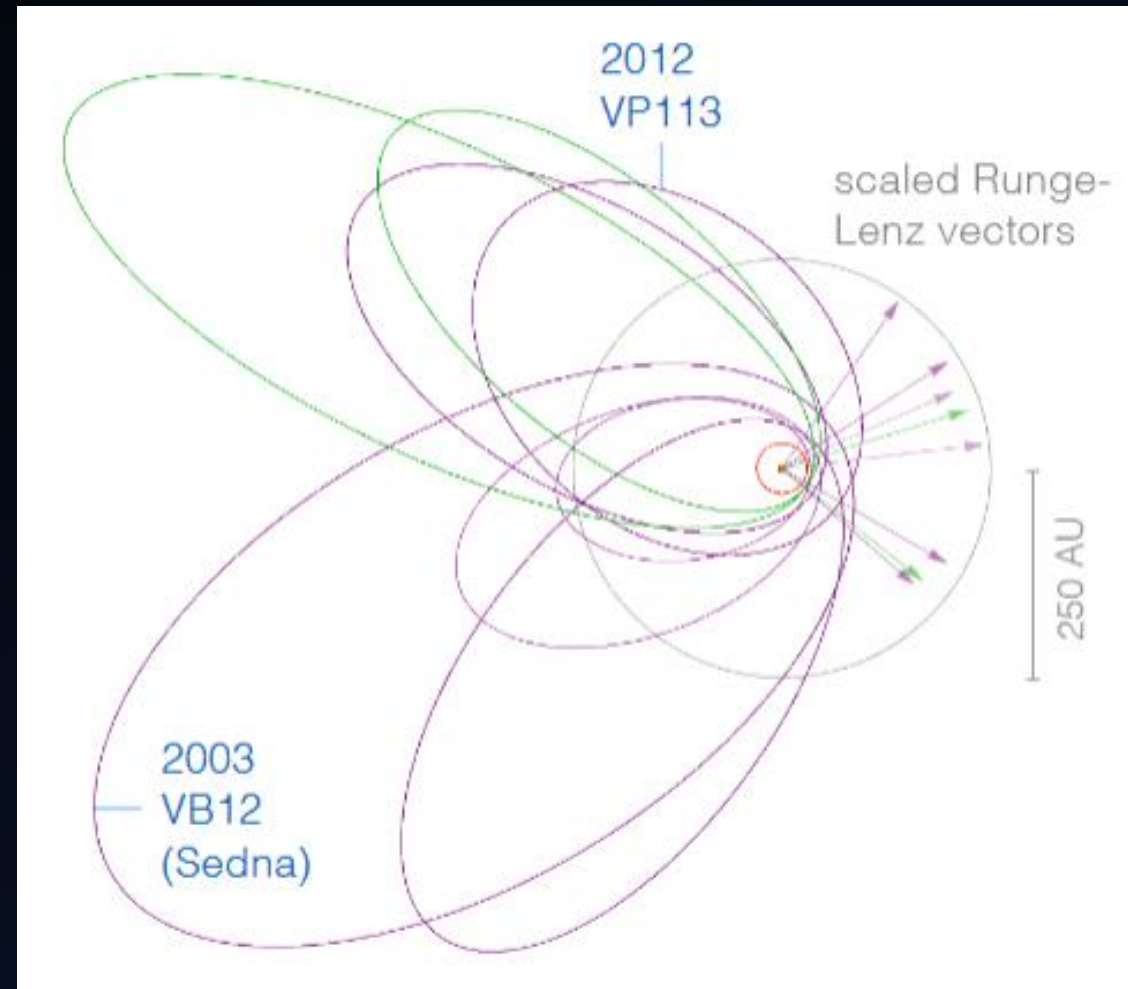
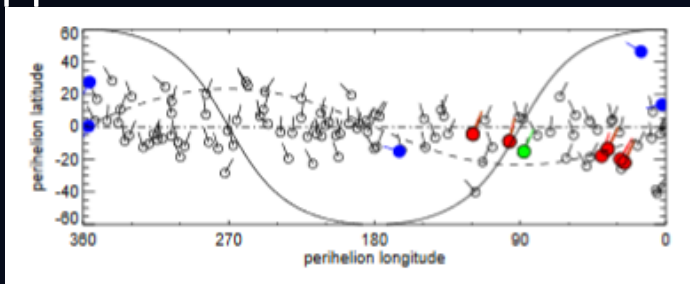


Девятая планета

В течение нескольких лет накапливаются данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в Солнечной системе может быть еще одна массивная планета.

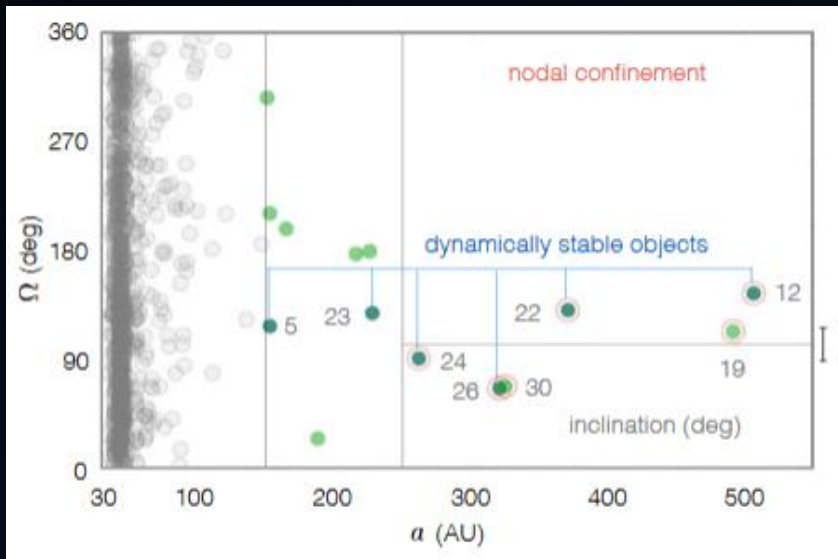
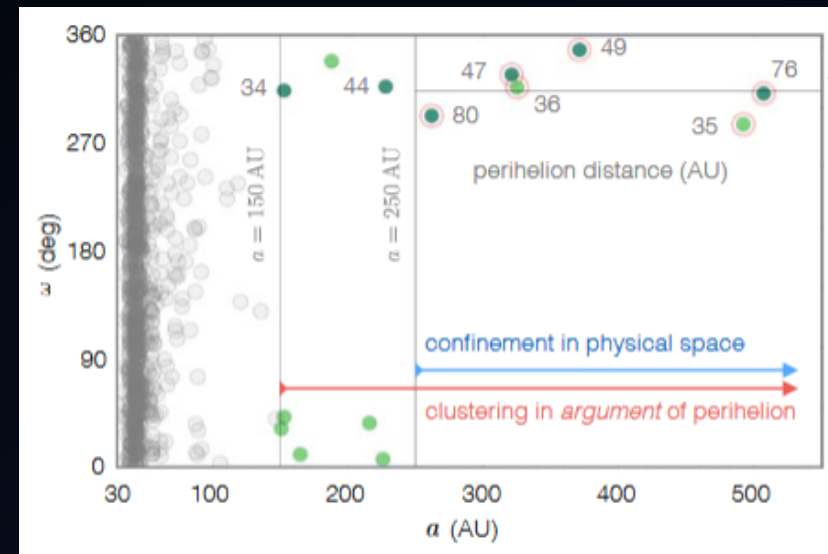
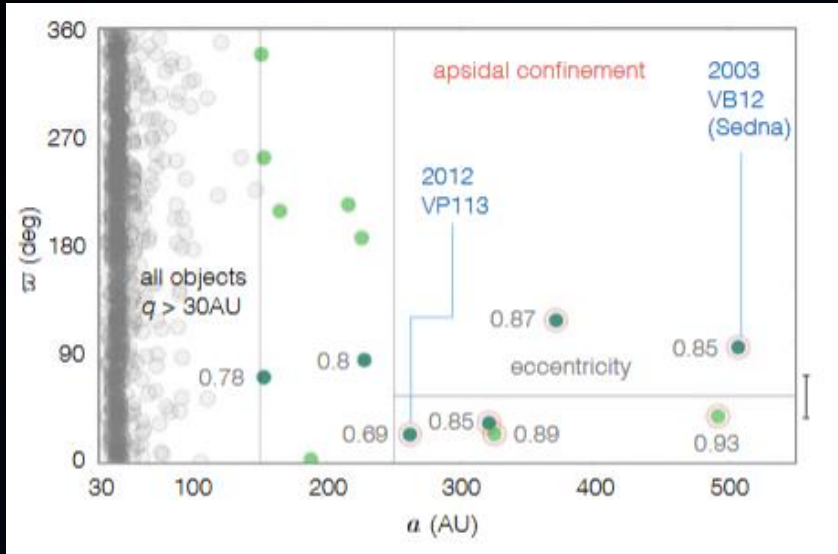
В январе 2016 г. появилась работа Батыгина и Брауна, которая вывела обсуждение на новый уровень.

Начались активные поиски девятой планеты.



Орбиты далеких малых тел оказываются особым способом «выстроены». Чтобы объяснить это можно привлечь гипотезу о существовании планеты с массой в несколько земных и >10 раз дальше Плутона.

Кластеризация орбит под действием внешней пл

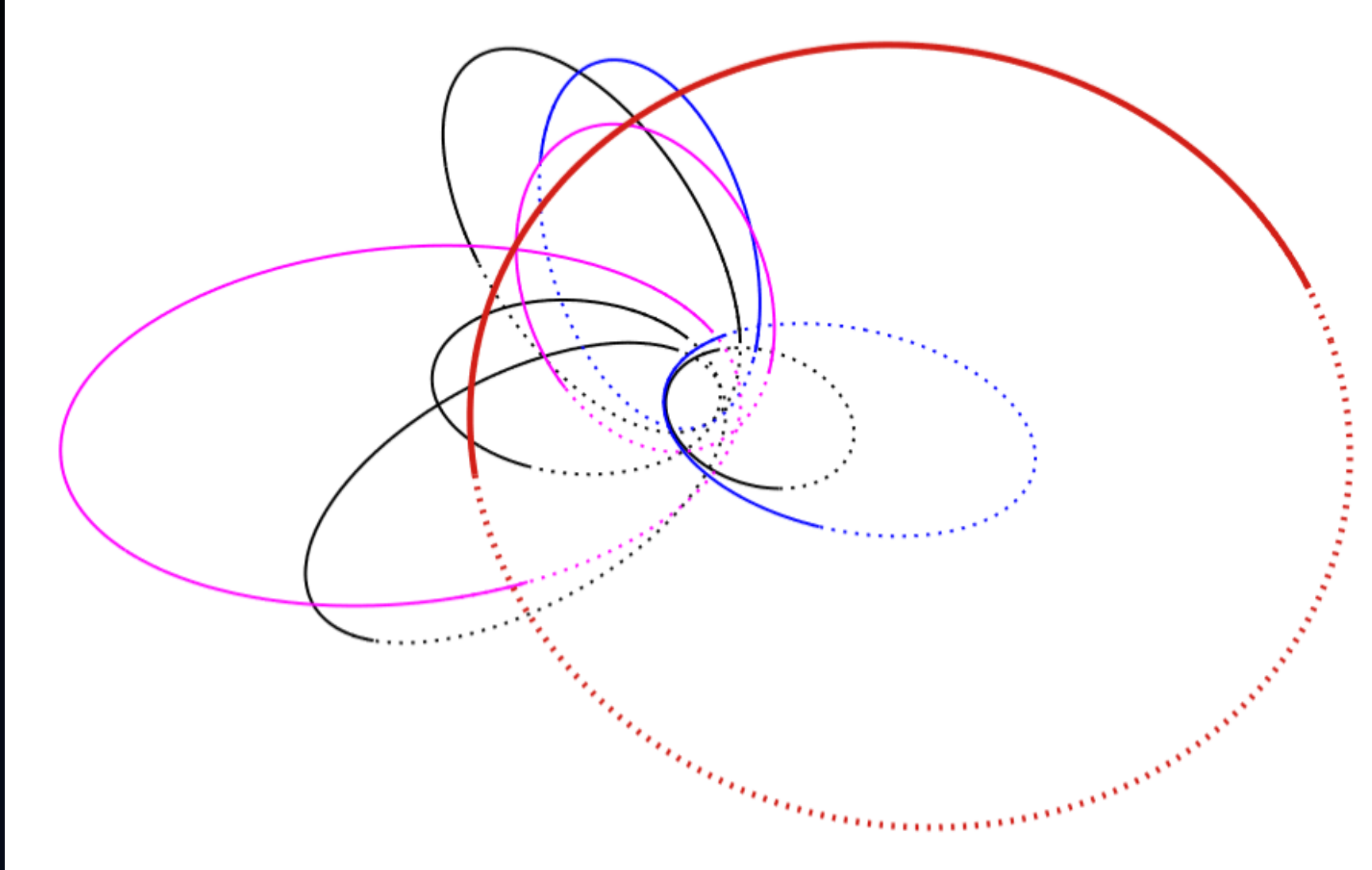


Орбиты нескольких тел, начиная с С, имеют сходные характеристики.

Вероятность случайного совпадения параметров орбит крайне мала.

Такие параметры нельзя получить под действием известных планет и прохождений звезд вблизи Солнца

Новые открытия транснептуновых малых тел

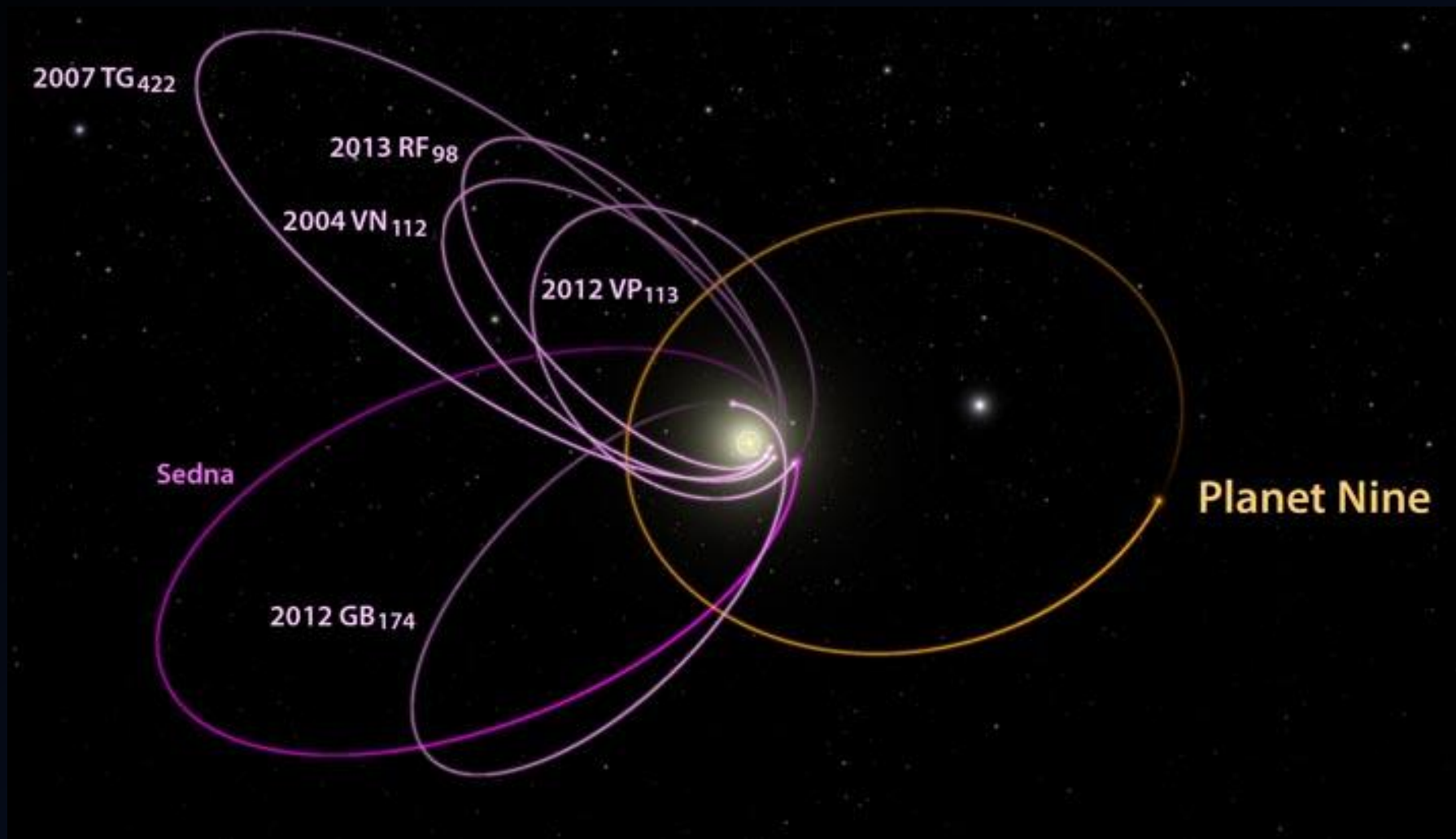


1608.08772

Были сделаны новые открытия, подтверждающие модель с девятой планетой.

«Будем искать....»

skyandtelescope.com

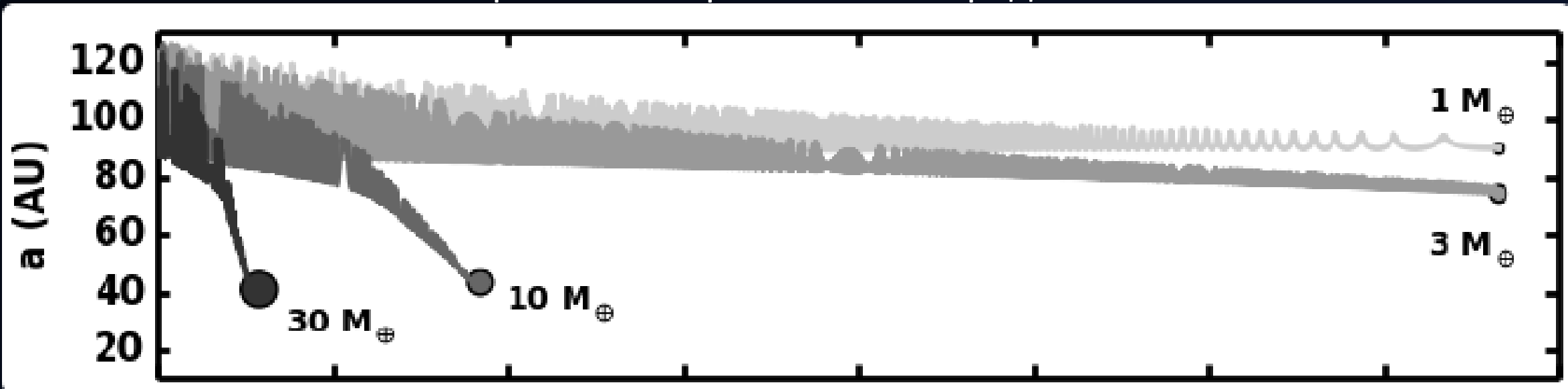


Моделирование показывает, что сейчас «девятая планета» может находиться вблизи афелия своей орбиты. Поэтому обнаружить ее нелегко.

Судьба рассеянных планет

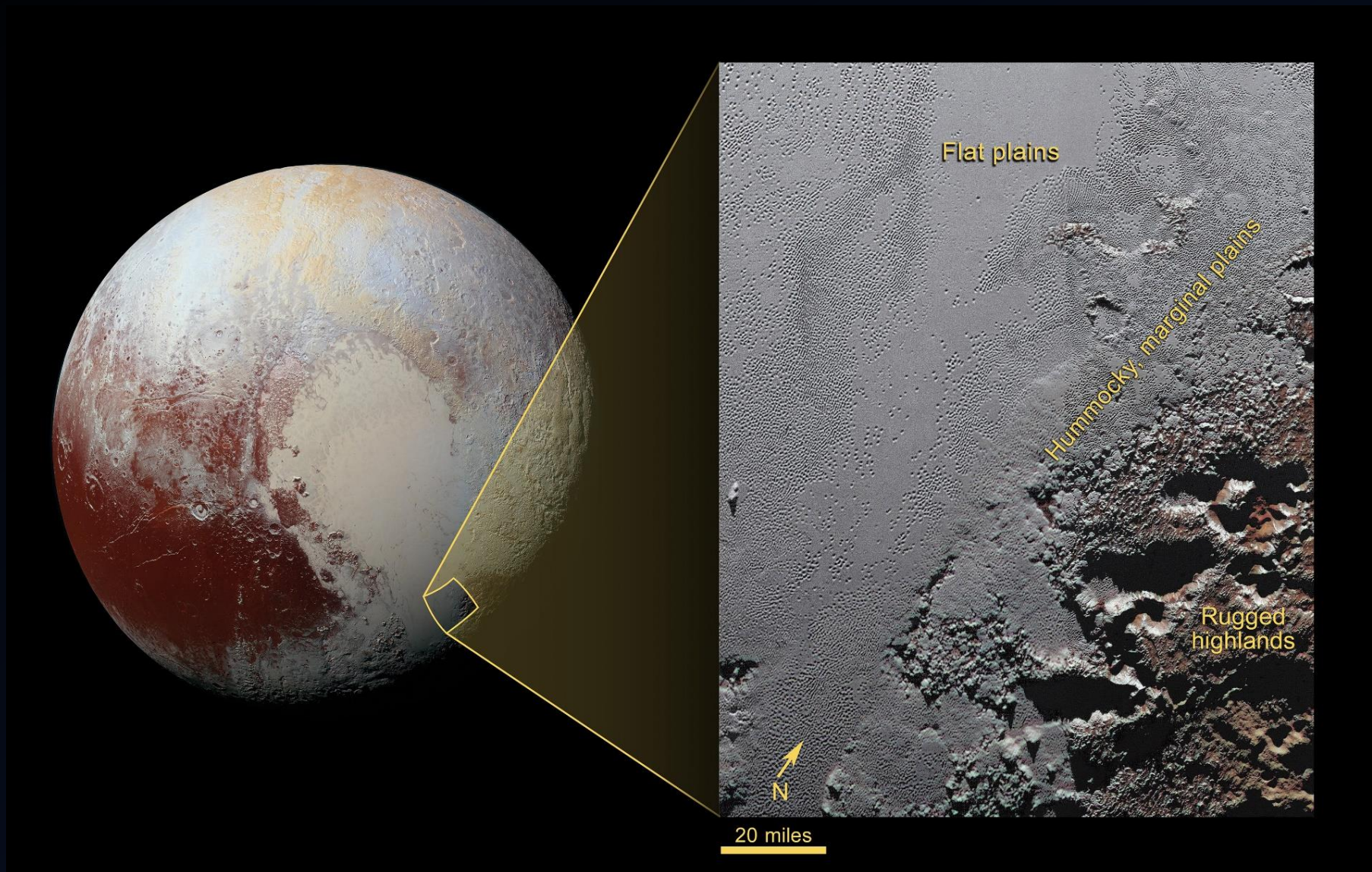
Взаимодействие тел в протопланетном диске может приводить к выбрасыванию на далекие внешние орбиты достаточно крупных тел. Орбиты самых массивных рассеянных тел быстро становятся круглыми. А вот легкие могут оставаться на вытянутых орбитах.

Авторы полагают, что даже в Солнечной системе может быть сверхземля на расстоянии порядка 300 а.е.



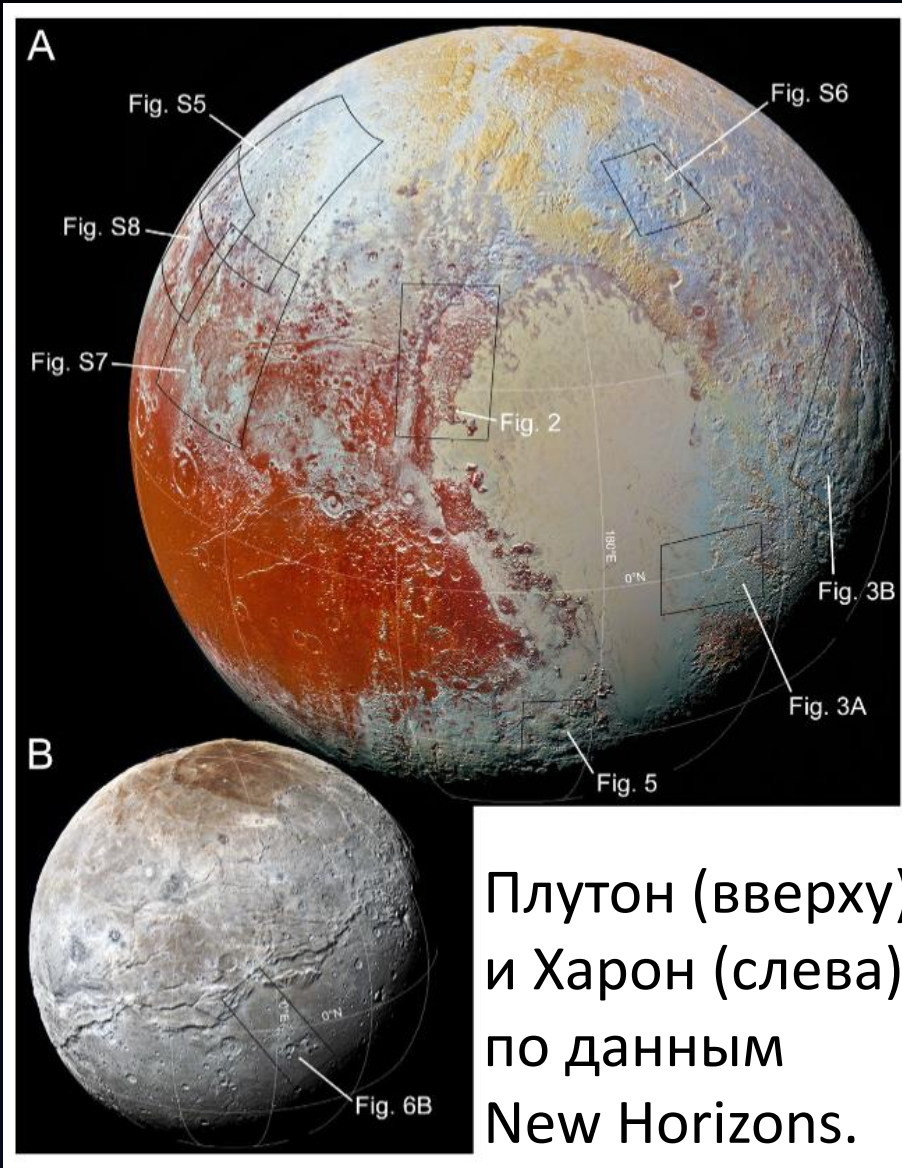
New Horizons

www.nasa.gov



Первые подробные снимки поверхности Плутона и его спутников.

Подробные карты Плутона и Харона



Плутон (вверху)
и Харон (слева)
по данным
New Horizons.

Удалось изучить разные типы участков поверхности.

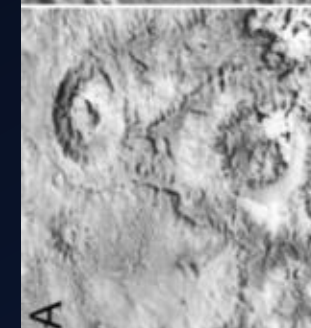
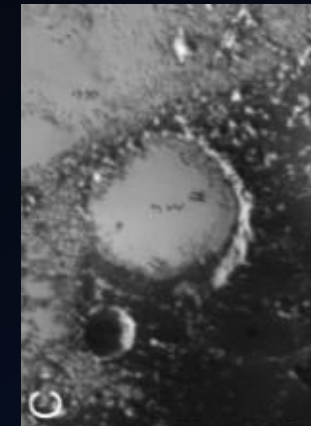
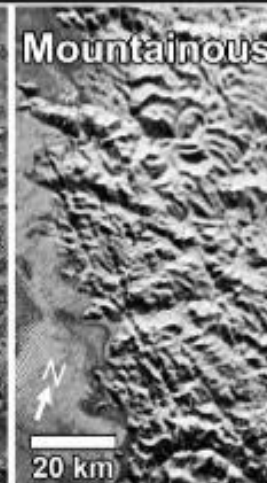
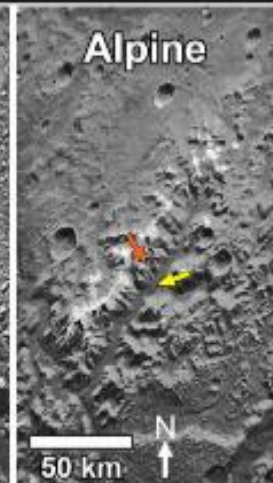
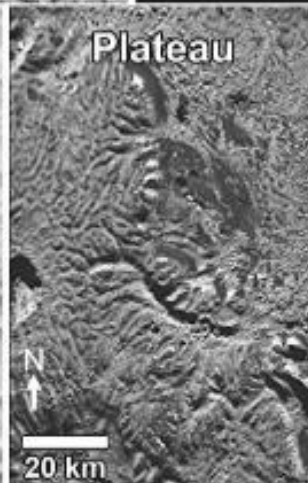
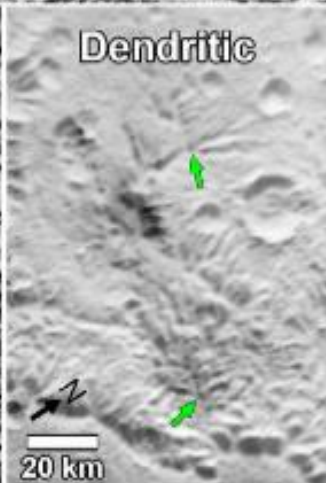
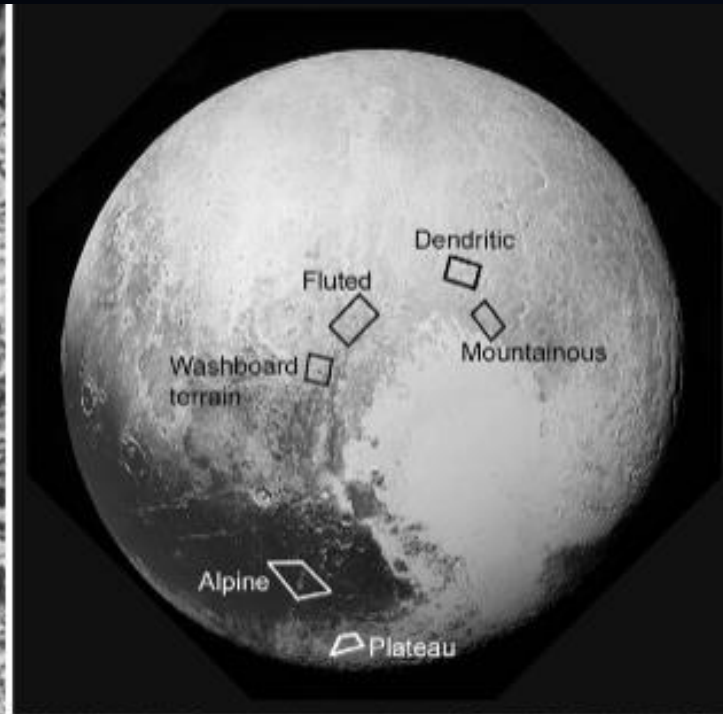
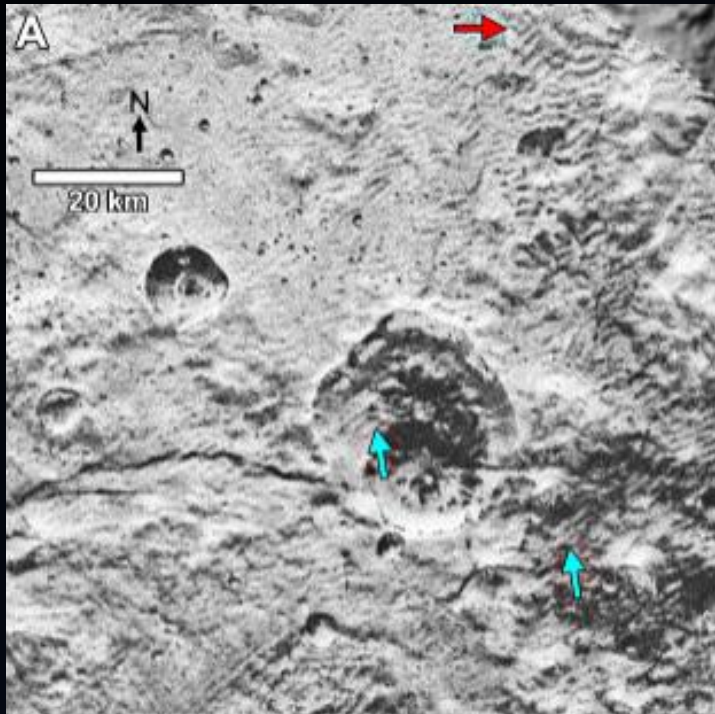
В некоторых случаях разрешение было лучше чем 100 метров на пиксел.

Столь детальные снимки позволяют делать выводы об истории формирования различных структур на поверхности и об их составе.

Обнаружены сложные структуры, в том числе относительно молодые. Т.е., Плутон – не такой «мертвый» мир, как полагали ранее.

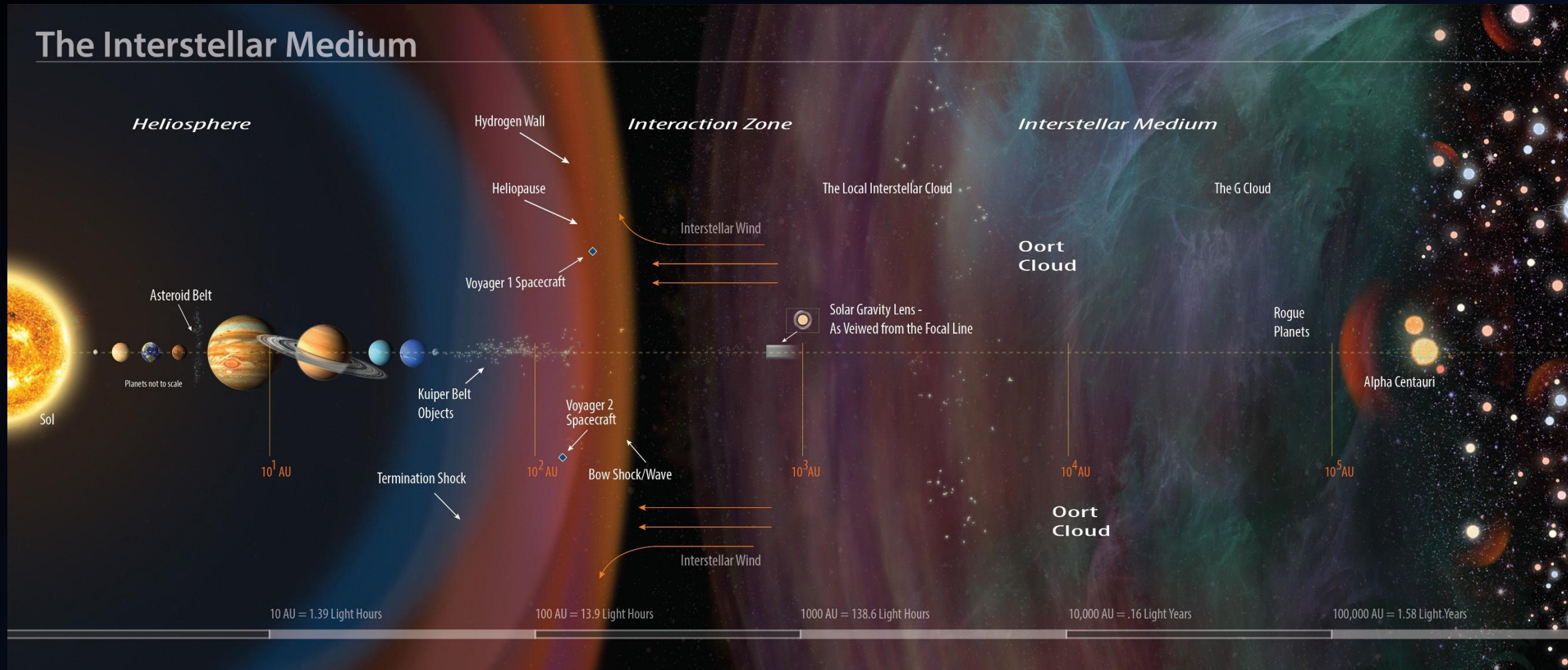
На Sputnik Planum нет кратеров, что говорит об очень молодом возрасте этой области (<10 млн лет).

Богатая география и геология



1604.05702

Межпланетная среда и гелиосфера



Важным компонентом Солнечной системы является межпланетная среда. Во многом ее свойства определяются потоком вещества от Солнца. Но также важны пыль и галактические космические лучи.

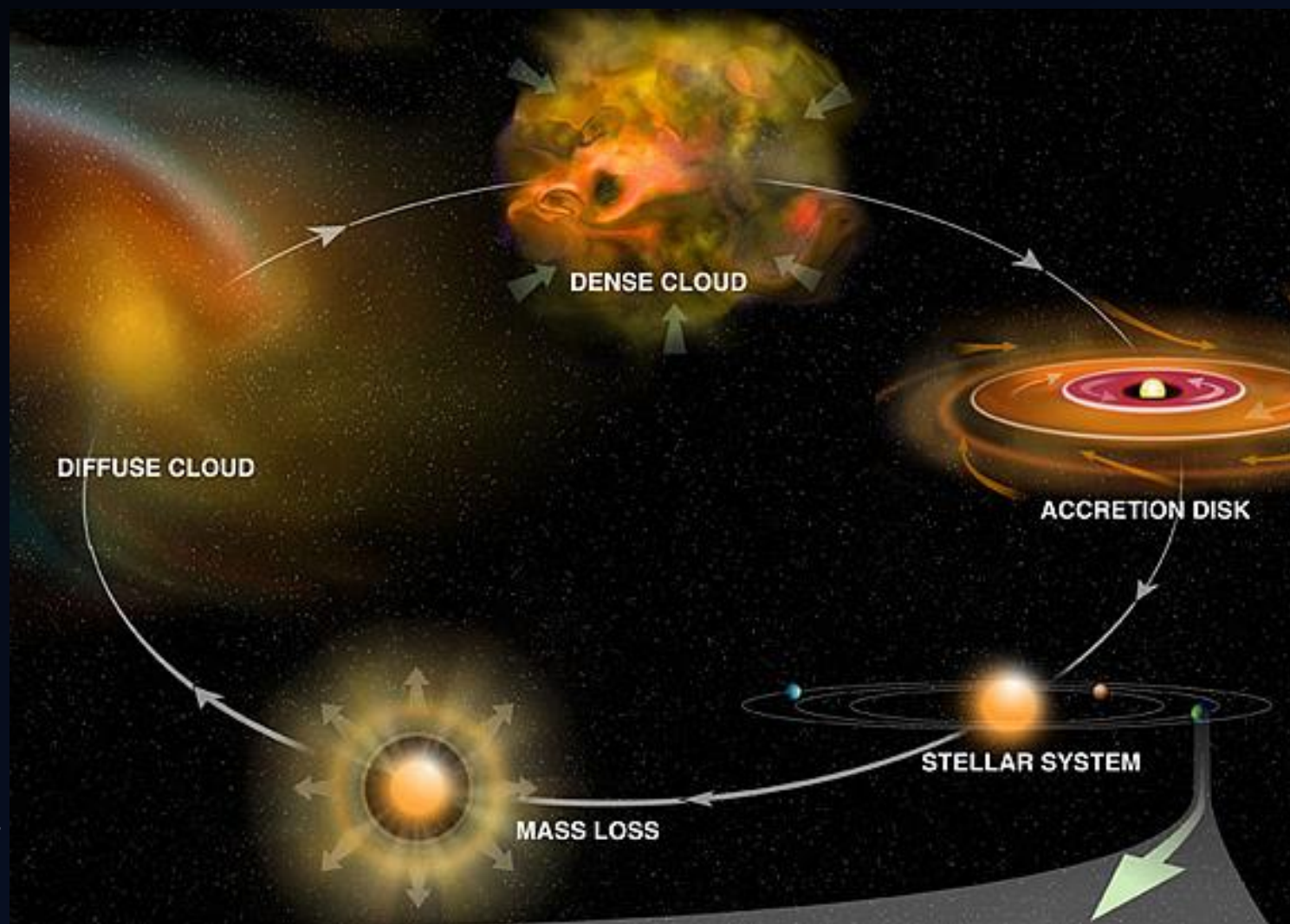
Галактический спиралеворот

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

Первые звезды не могли иметь каменные планеты.

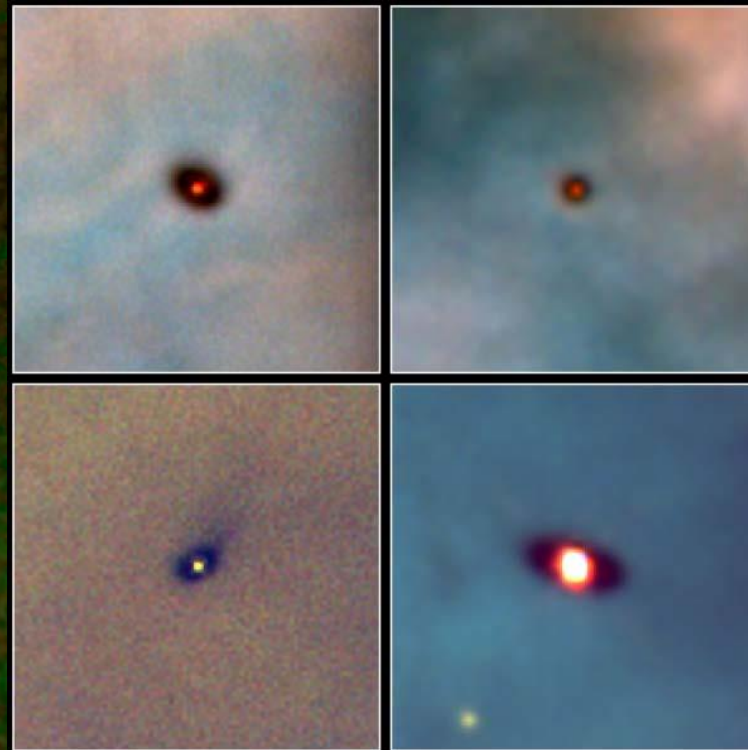
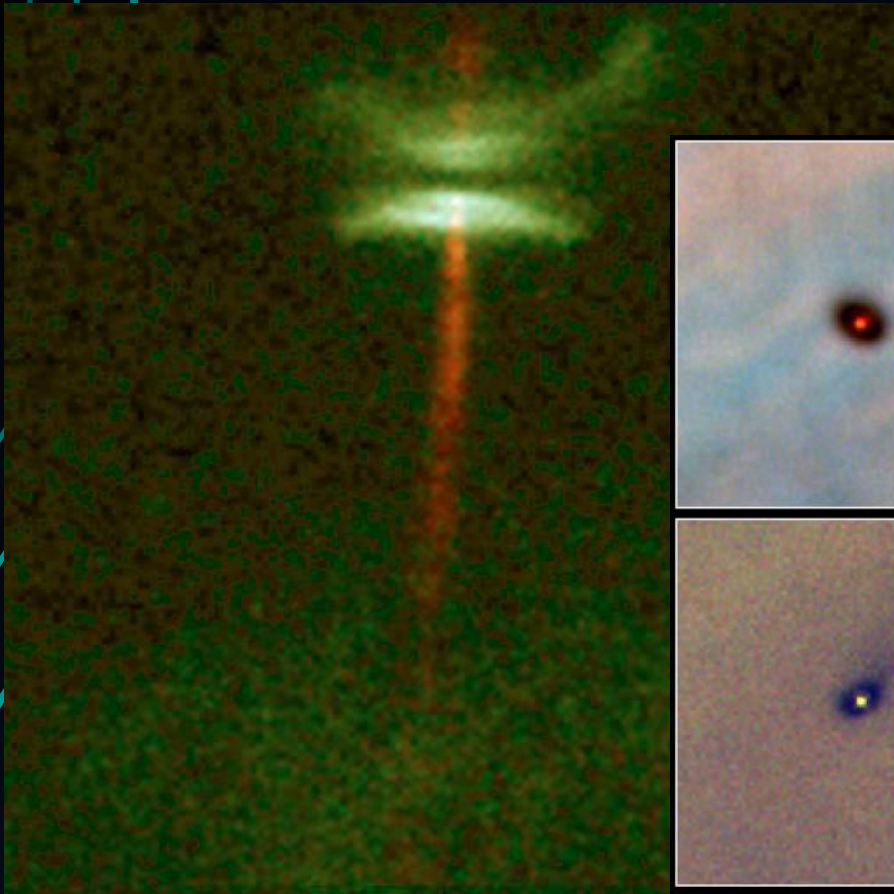
Со временем появились тяжелые элементы, и стало возможным создавать твердые планеты.

Наконец, появилась жизнь.



Протопланетные диски

Мы видим, как образуются планеты и звезды.
В некоторых случаях удастся даже рассмотреть
структуру протопланетных дисков.

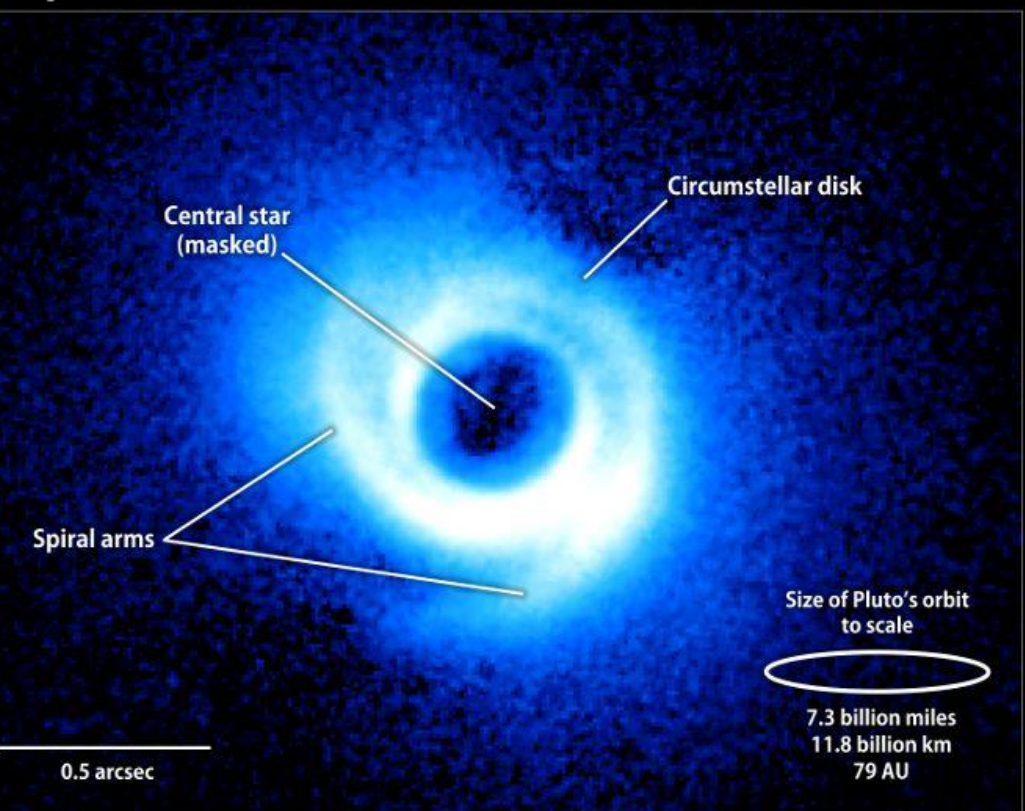


**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

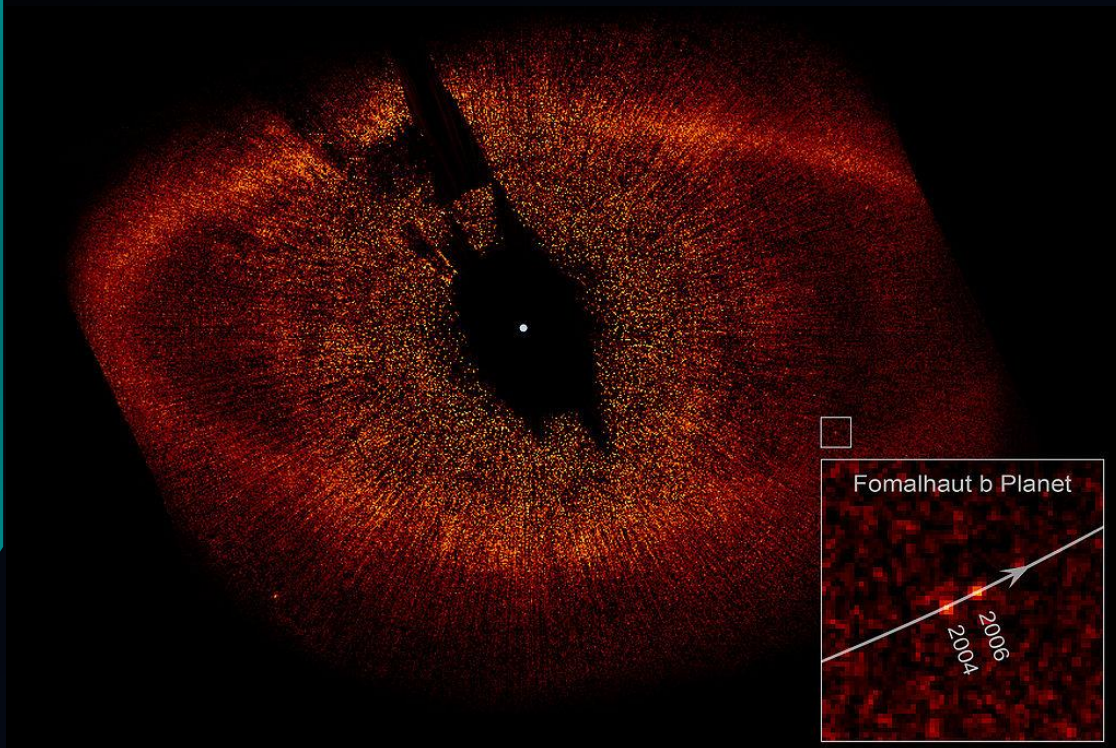
PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

HST · WFPC2

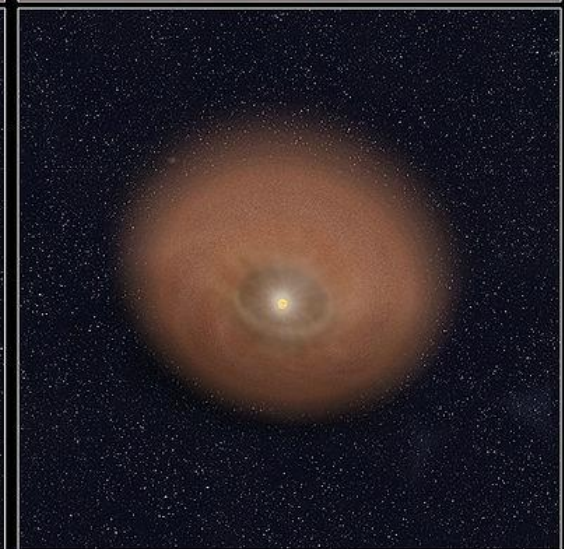
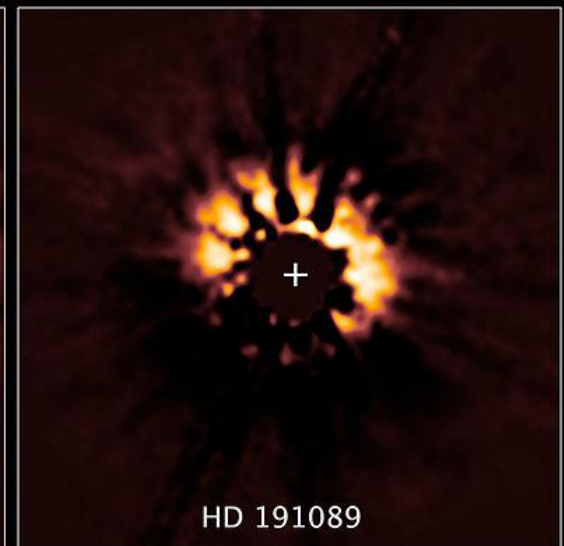
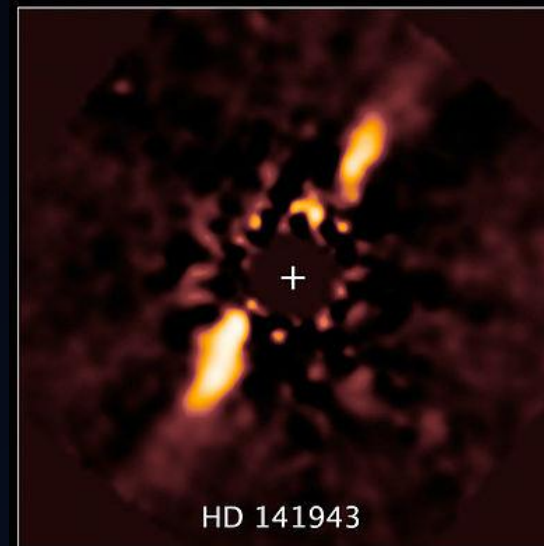
Spiral features revealed in SAO 206462's dust disk



Остаточные диски

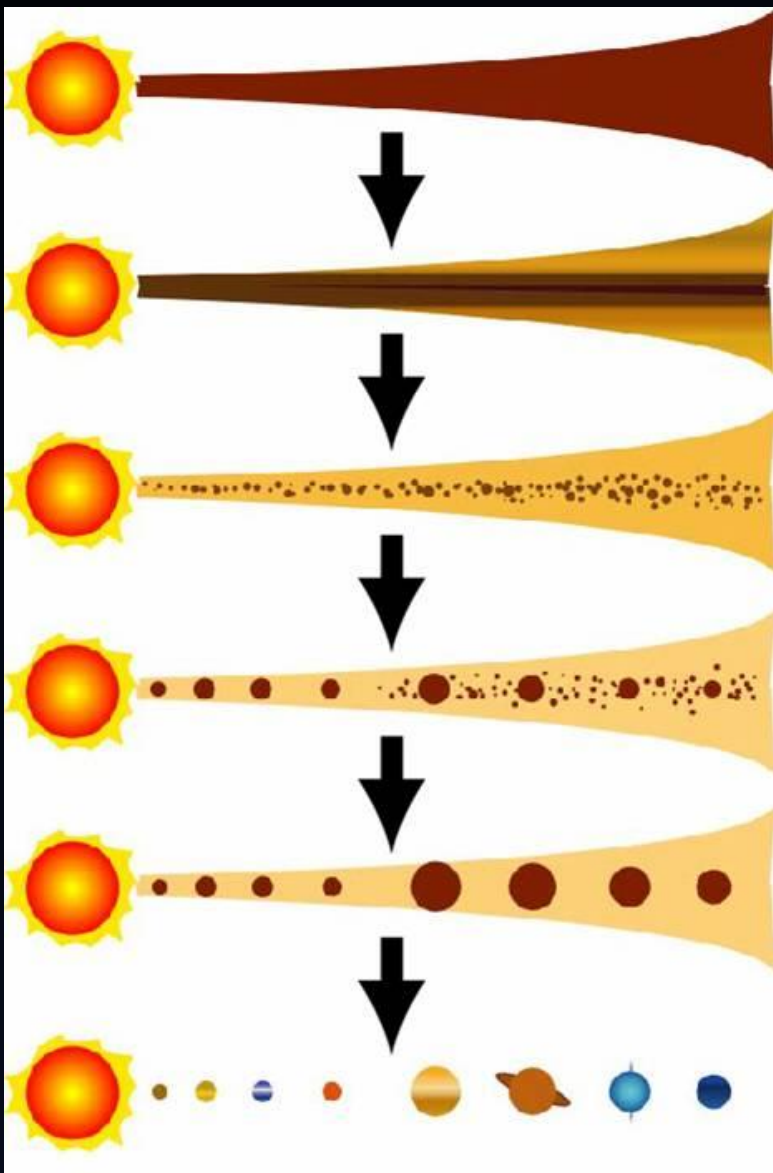


Остаточные диски возникают уже после того, как протопланетный диск иссяк. Остаточные диски пополняются веществом благодаря столкновению небольших тел.



Упрощенная картина рождения

http://www.planet.sci.kobe-u.ac.jp/study/list/astrophysics/index_e.html



Долгое время мы представляли себе образование планетных систем в рамках достаточно упрощенной картины:

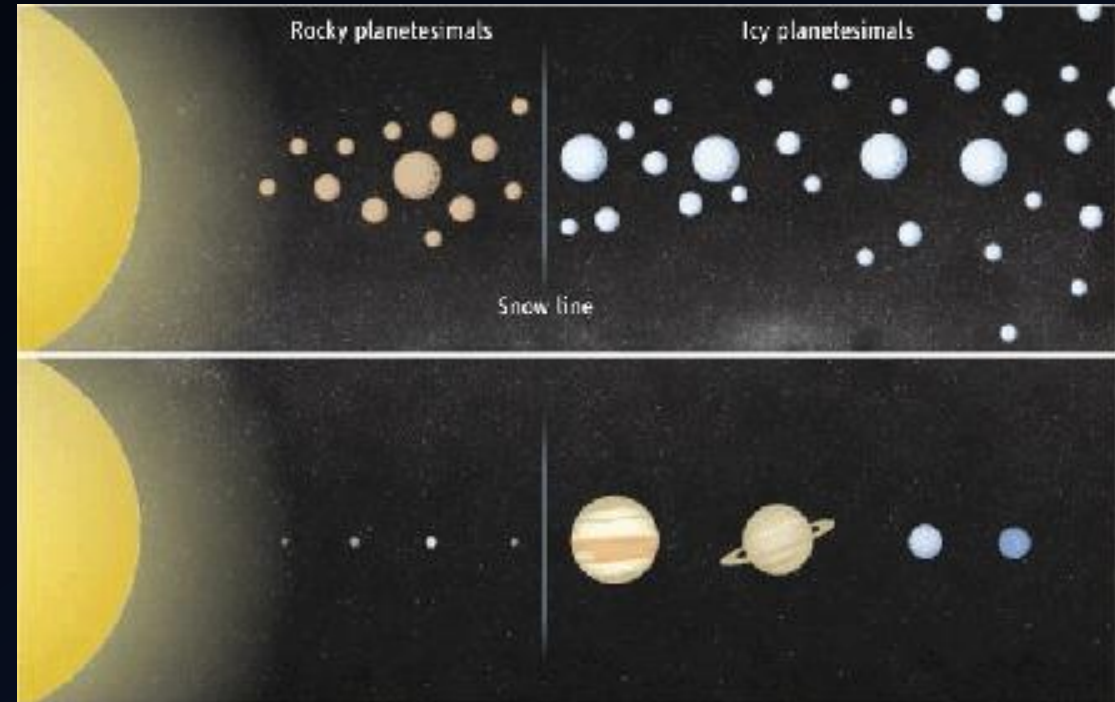
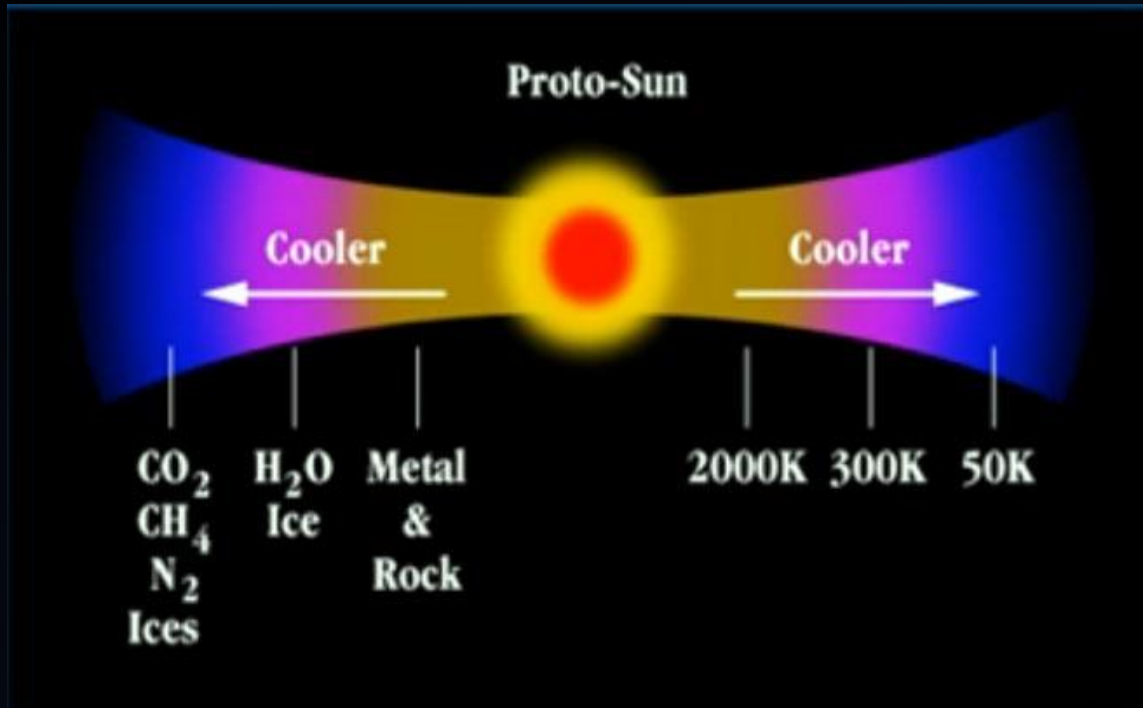
- а) возникает звезда и диск вокруг нее
- б) в диске начинается слипание пылевых частиц
- в) постепенно из них образуются планетезимали
- г) крупные планетезимали растут, поглощая мелкие
- д) наконец, остаются крупные планеты.

Все планеты стоят примерно на своих местах:

- вблизи звезды – маленькие железно-каменные
- далее – газовые гиганты
- еще дальше – газово-ледяные гиганты

Эта картина усложнилась с открытием экзопланет.

Снеговая линия



Вблизи звезды жарко, поэтому лед не может существовать.
Там образуются каменные и железно-каменные тела.

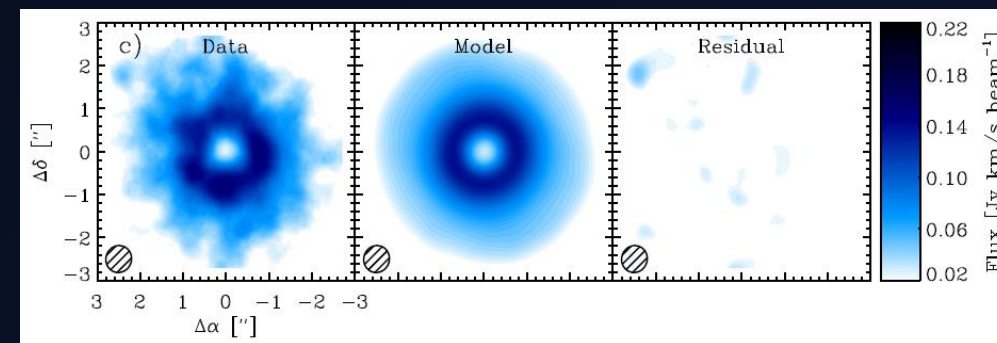
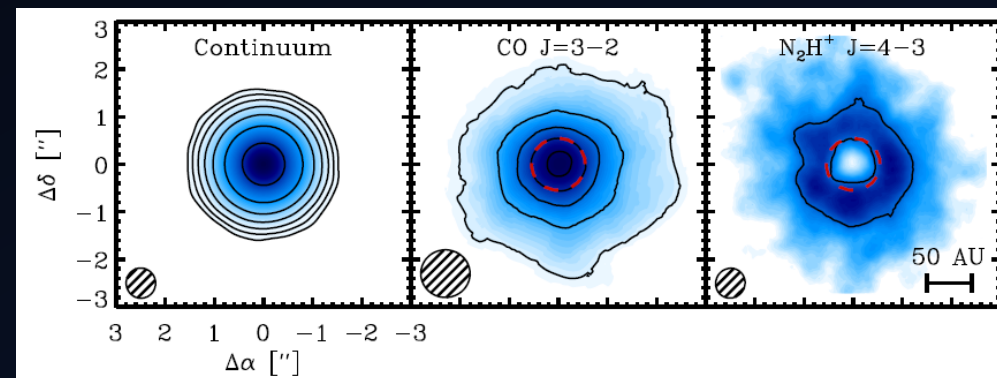
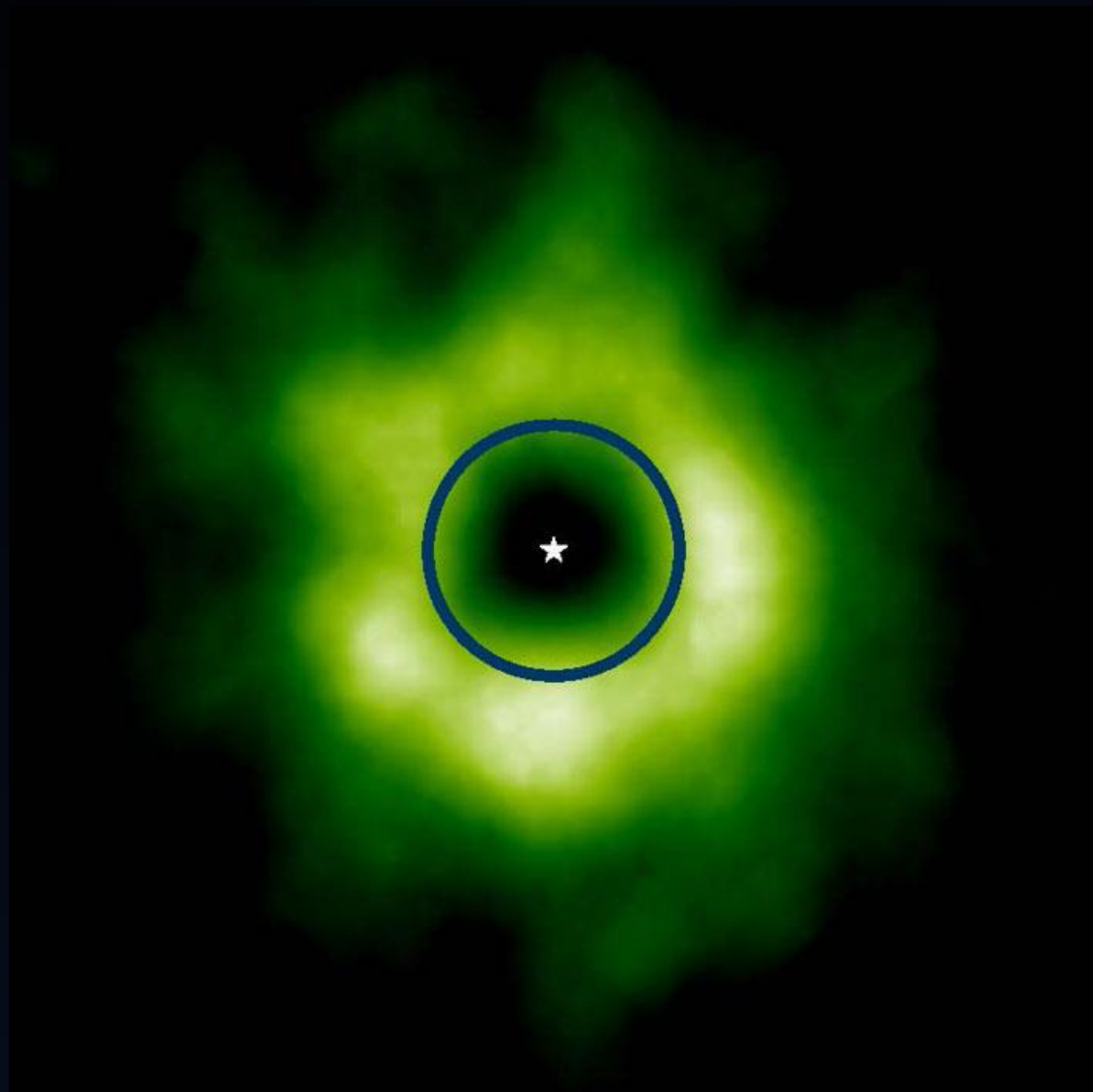
В Солнечной системе снеговая линия соответствует примерно 5 а.е.

Однако, ледяные объекты после образования могут попасть ближе к звезде,
а каменные могут быть выброшены во внешние области системы.

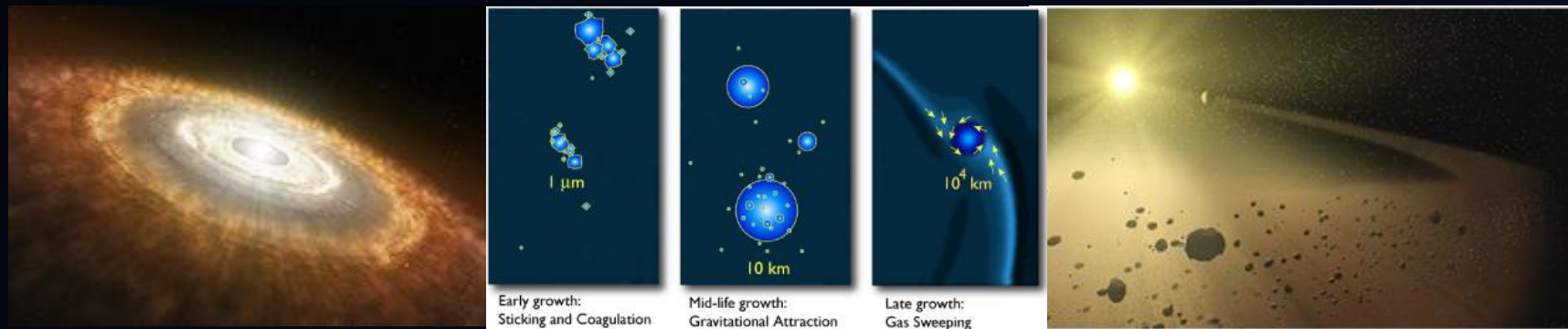
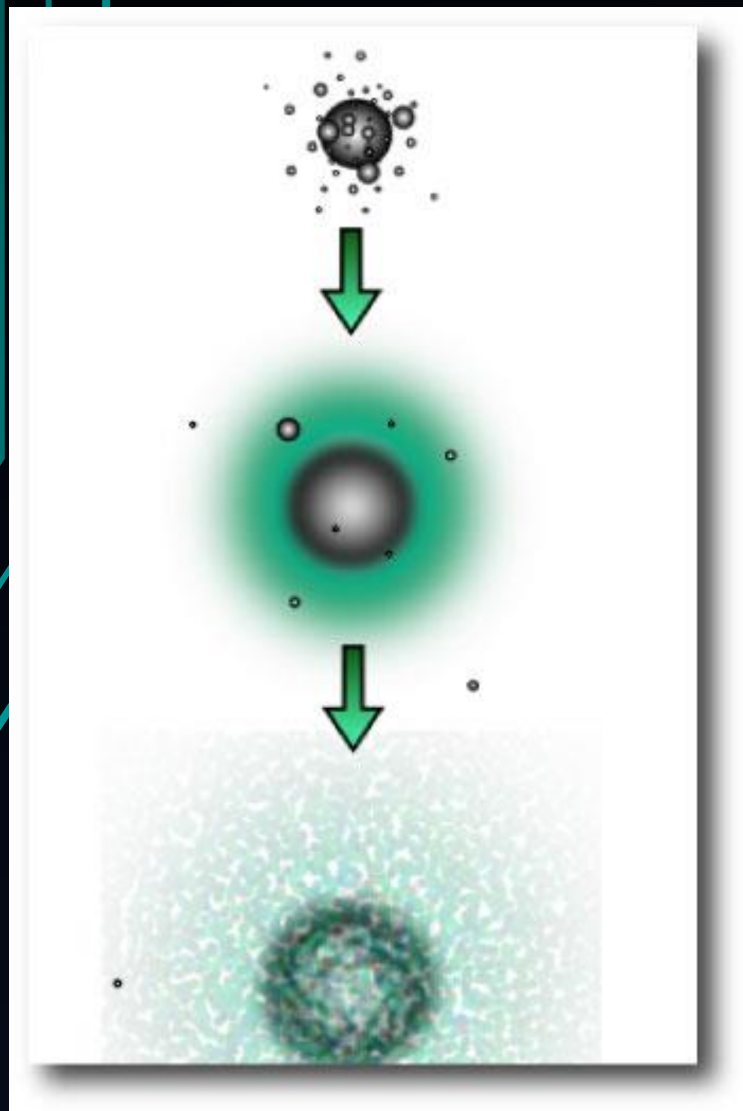
TW Гидры: наблюдения на ALMA

Замерзание CO

Наблюдали излучение ионов N_2H^+
Они обильны,
только если CO вымерз.



От пылинок до километров



Так можно быстро создать частицы миллиметрового размера.
... Дальше возникают проблемы ...

- а) сантиметровые тела при столкновении начинают разрушаться, а не расти
- б) из-за взаимодействия с газом такие частицы быстро тормозятся и выпадают на звезду

Возможно, что или происходит быстрое формирование планетезималей за счет гравитационных эффектов, или же – из-за аэродинамических.

От километров до Земли

Тут все просто!

Столкновения происходят на такой скорости, что осколки войдут в состав крупного тела.

Так можно делать твердые планеты (ядра) массой до нескольких масс Земли.

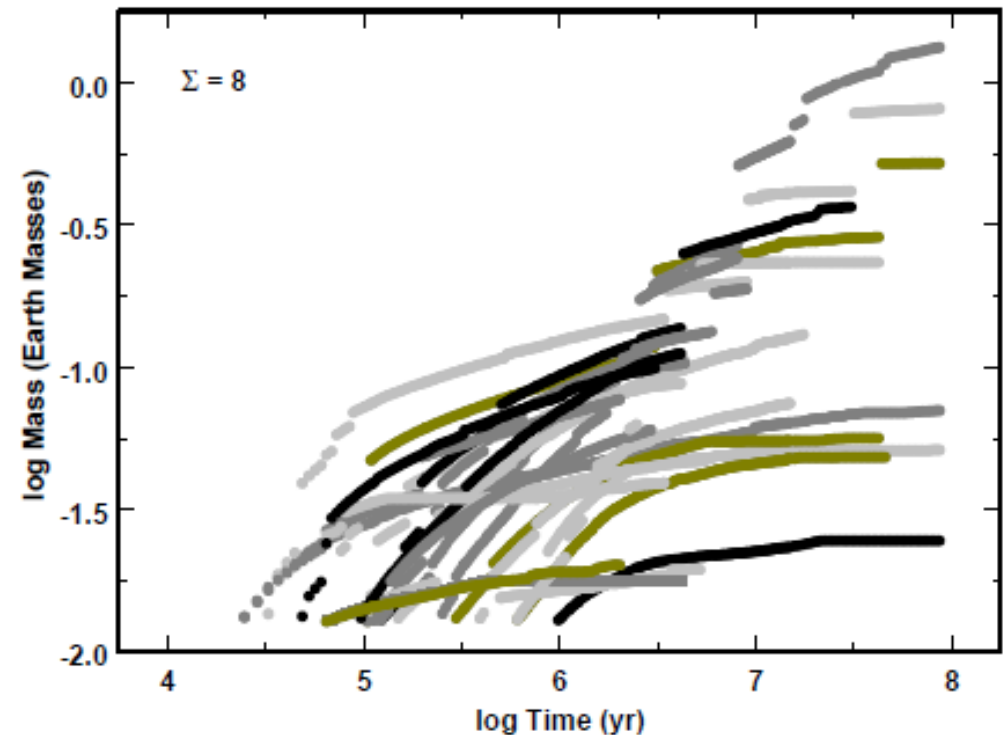
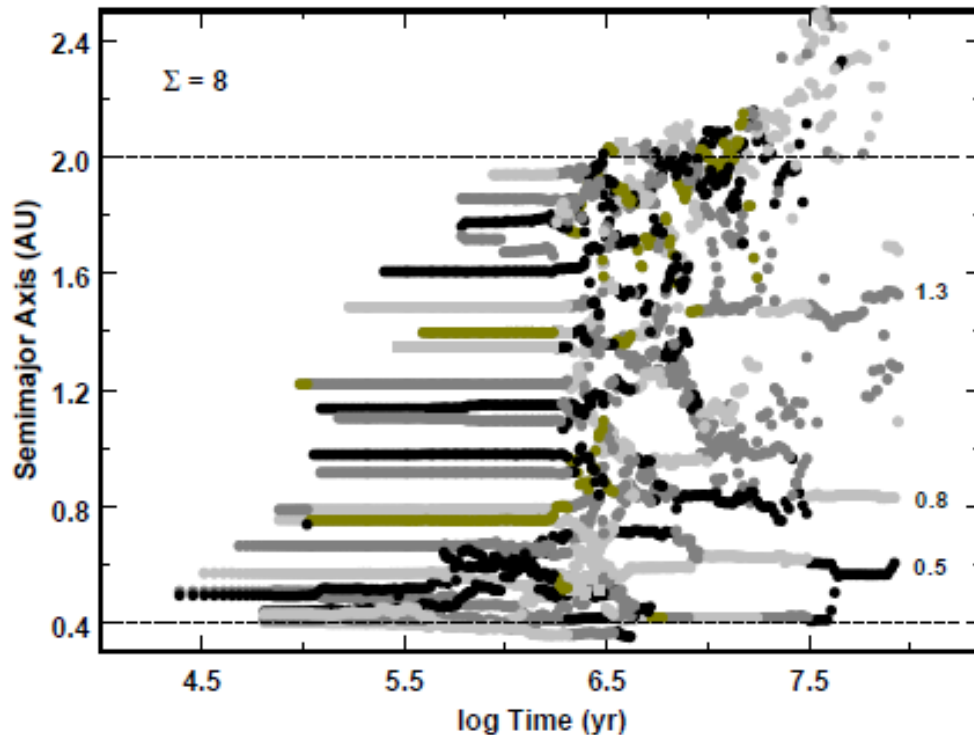
Дальше, чтобы стать Юпитером, надо набирать газ.



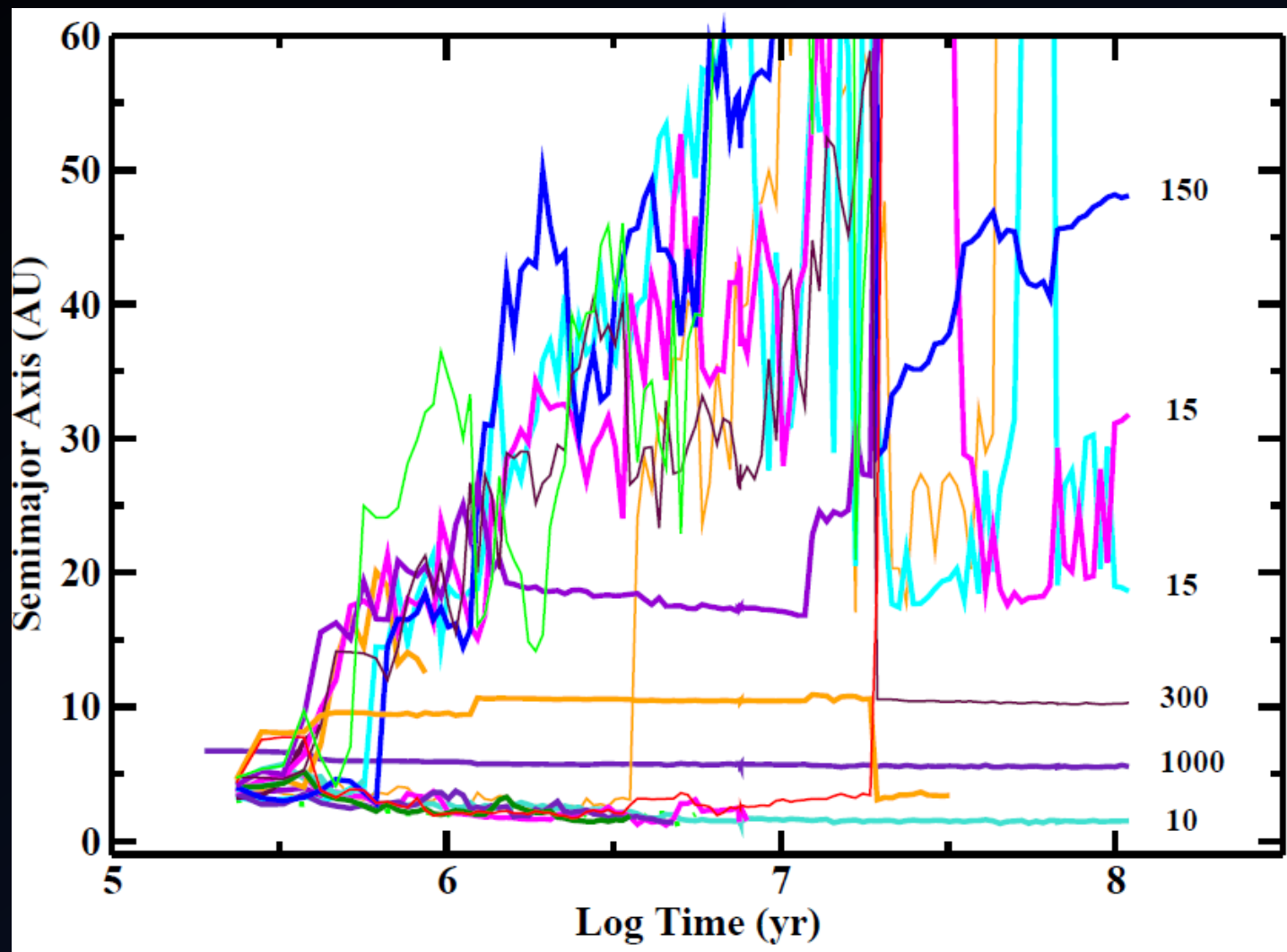
Олигархический рост планетезималей

Крупные планетезимали активно поглощают более мелкие. Это называется «олигархический рост», т.к. чем крупнее объект, тем быстрее он растет.

Наконец, остается лишь несколько крупных тел, которые уже почти не мешают друг другу.



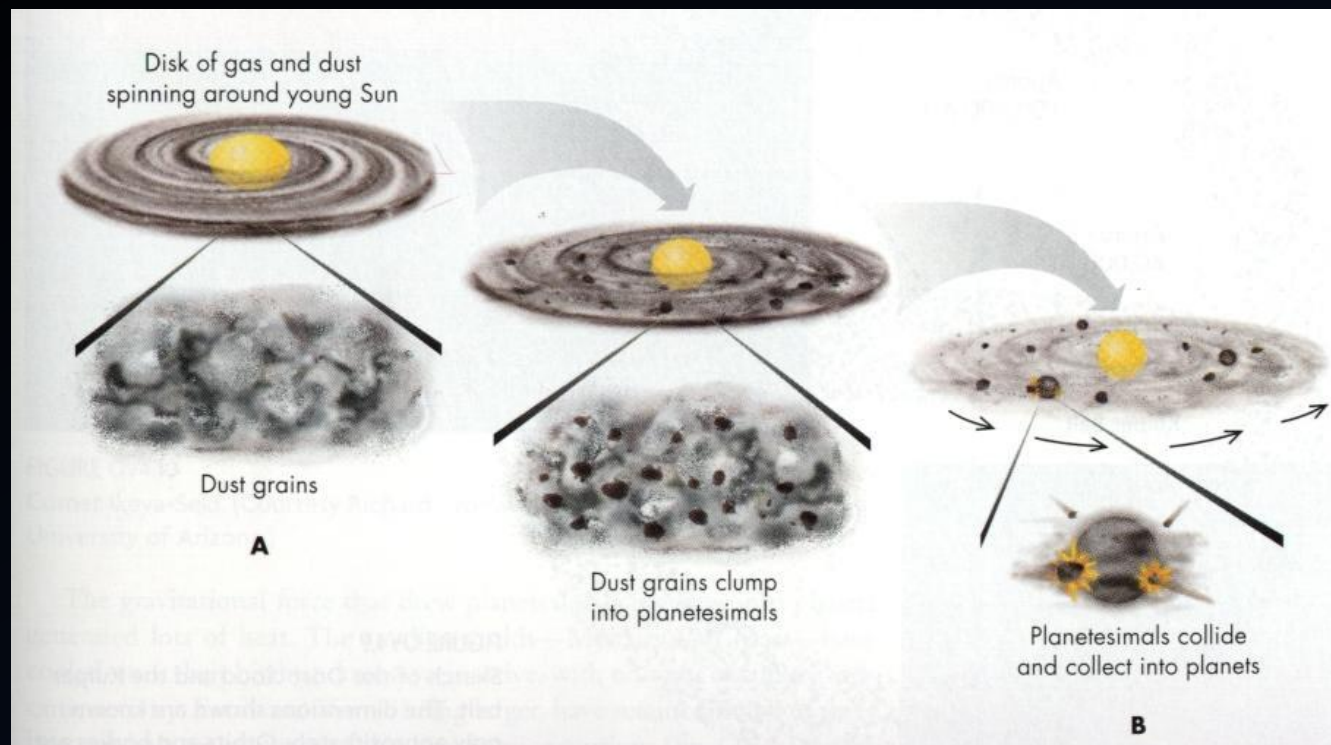
Эволюция орбит ледяных олигархов



Из-за взаимодействия меняется не только масса объектов, но и их местоположение в системе (т.е. орбита).

Выбросить проще легкие объекты, но потом они еще могут нарастить свою массу.

От Земли до Юпитера



Стать Юпитером легко, если быстро набрать 20 масс Земли. Но модели показывают, что сделать это совсем не просто!

Дело в том, что протопланетный диск постепенно теряет массу, поэтому время формирования планет ограничено.

Если тело будет просто своей гравитацией захватывать газ, то времени не хватит.

Формирование Солнечной системы

Формирование планет-гигантов

— миллионы лет.

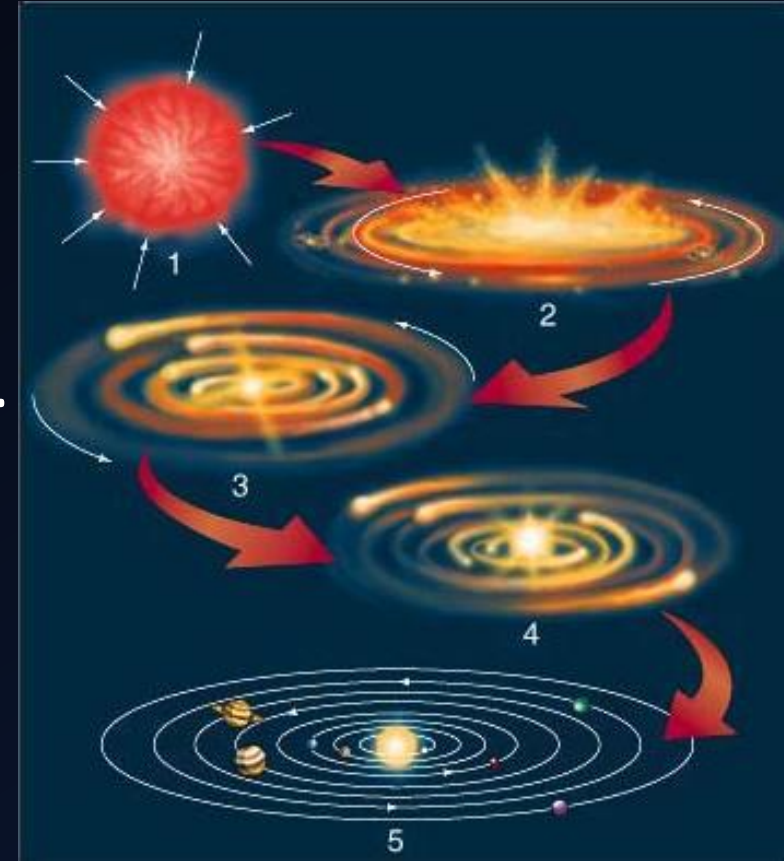
Формирование планет типа Земли —

десятки миллионов.

«Поздняя тяжелая бомбардировка» —

около 600 млн лет после формирования.

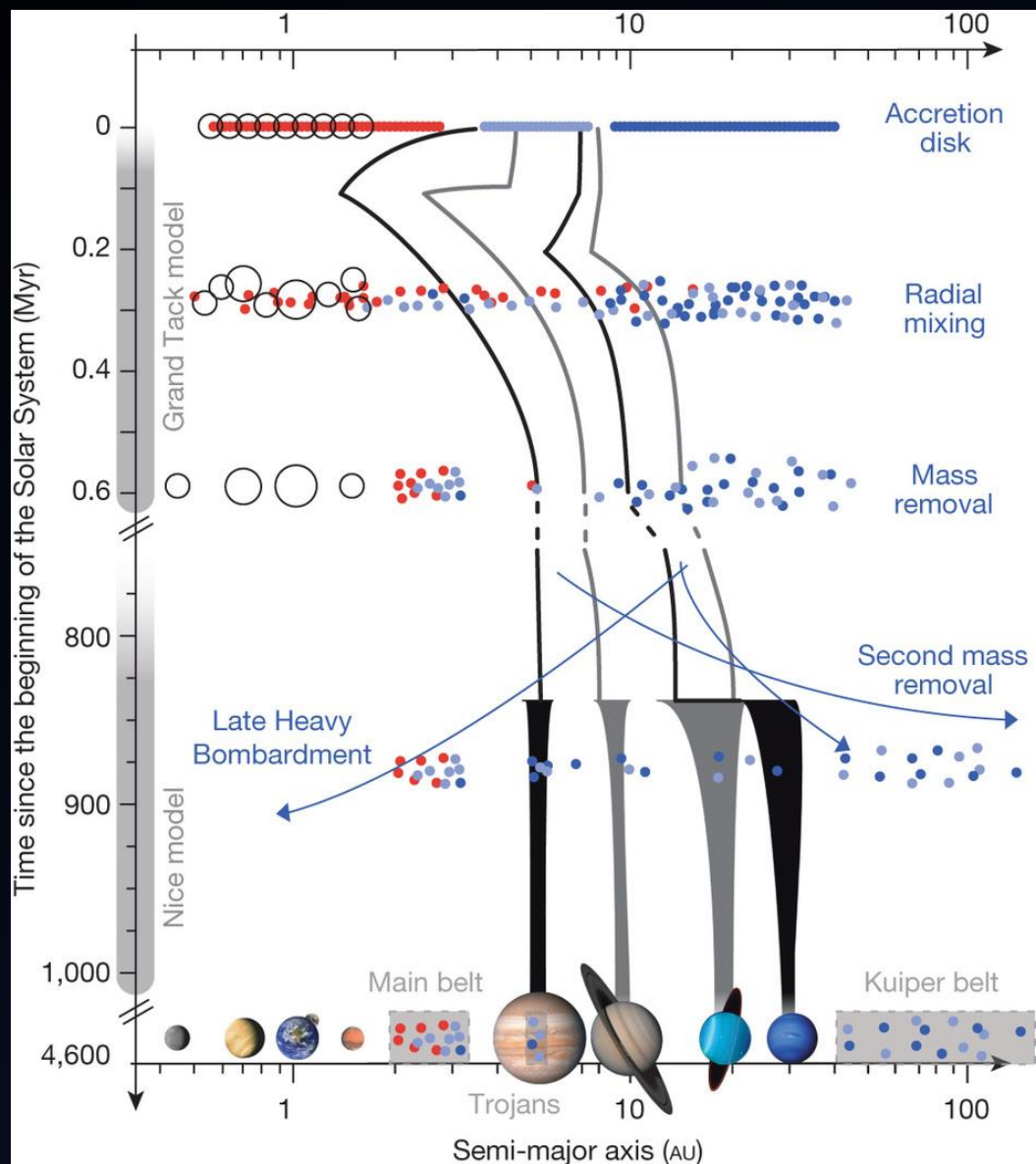
Возраст 4.567 млрд лет.



Изотопный состав говорит о том, что Солнце формировалось в звездном скоплении.

Calcium–aluminium-rich inclusion

Солнечная система: миграция планет



Как мигрировали планеты в Солнечной?

Авторы использовали данные по астероидам, которые были вынуждены активно перемещаться из-за воздействия на них больших планет.

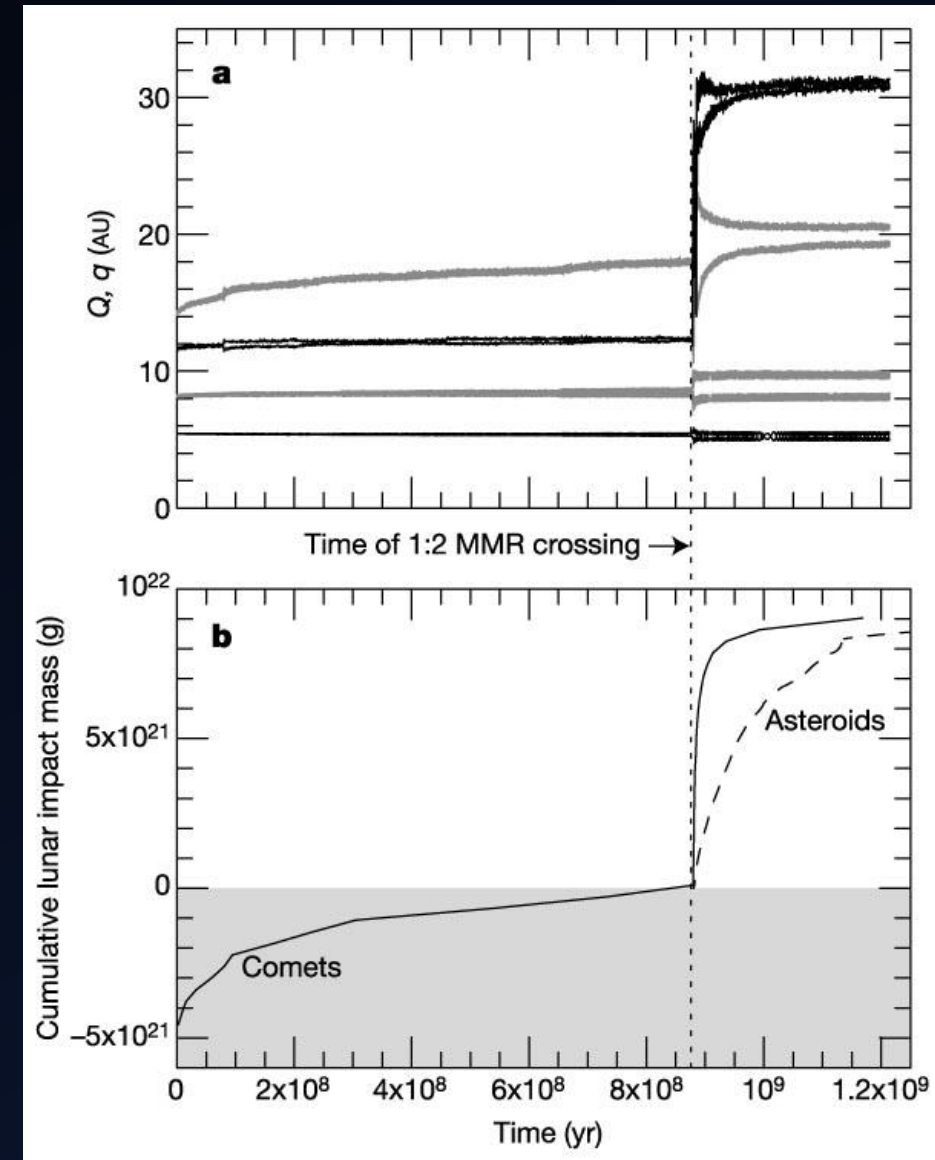
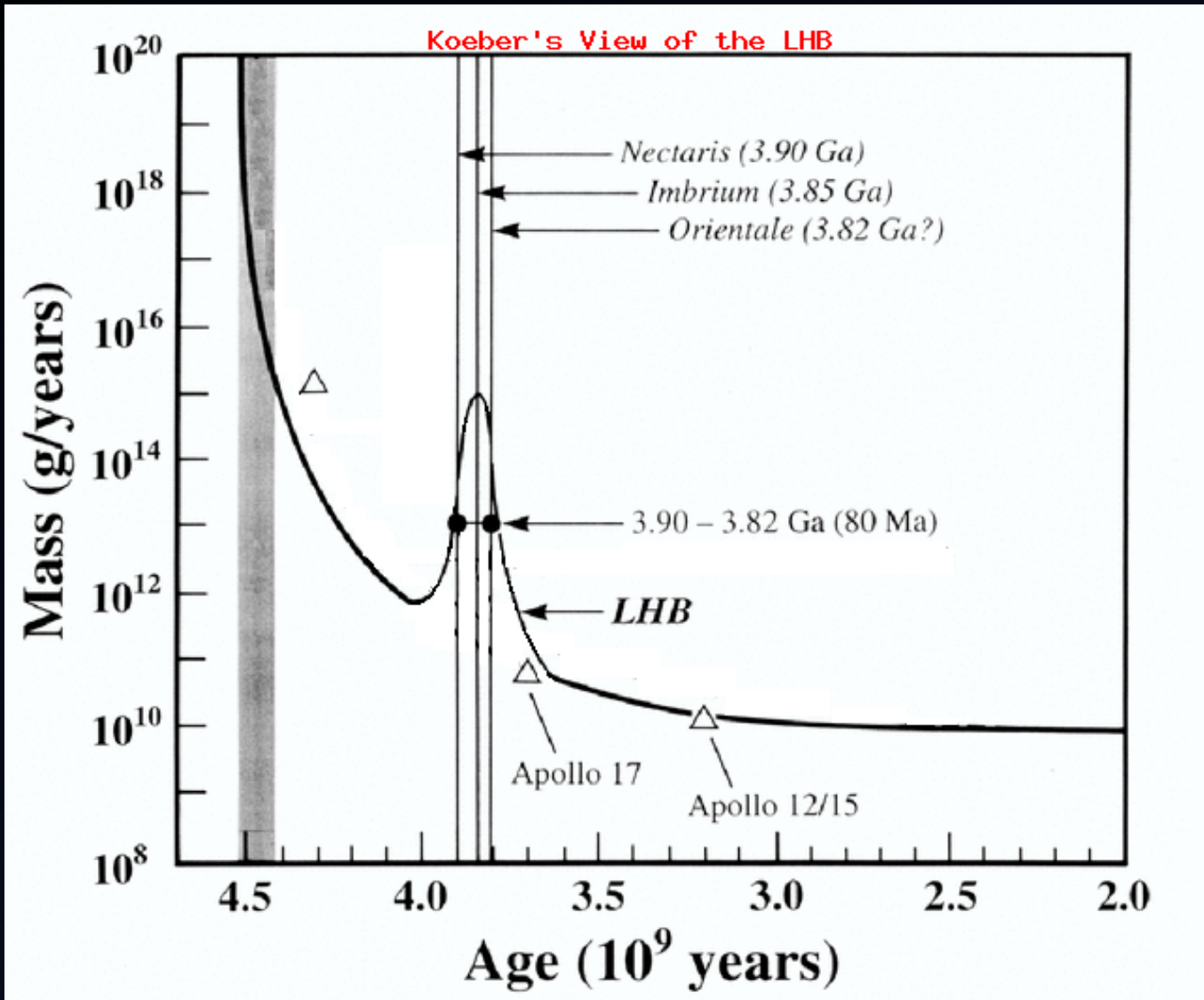
Поэтому по распределению астероидов можно отследить историю миграции.

Планетная миграция полностью заканчивается менее чем за миллиард лет. Правда, астероиды продолжают менять свои орбиты, например, за счет эффекта Ярковского.

Историю миграции отчасти можно восстановить по свойствам орбит малых тел.

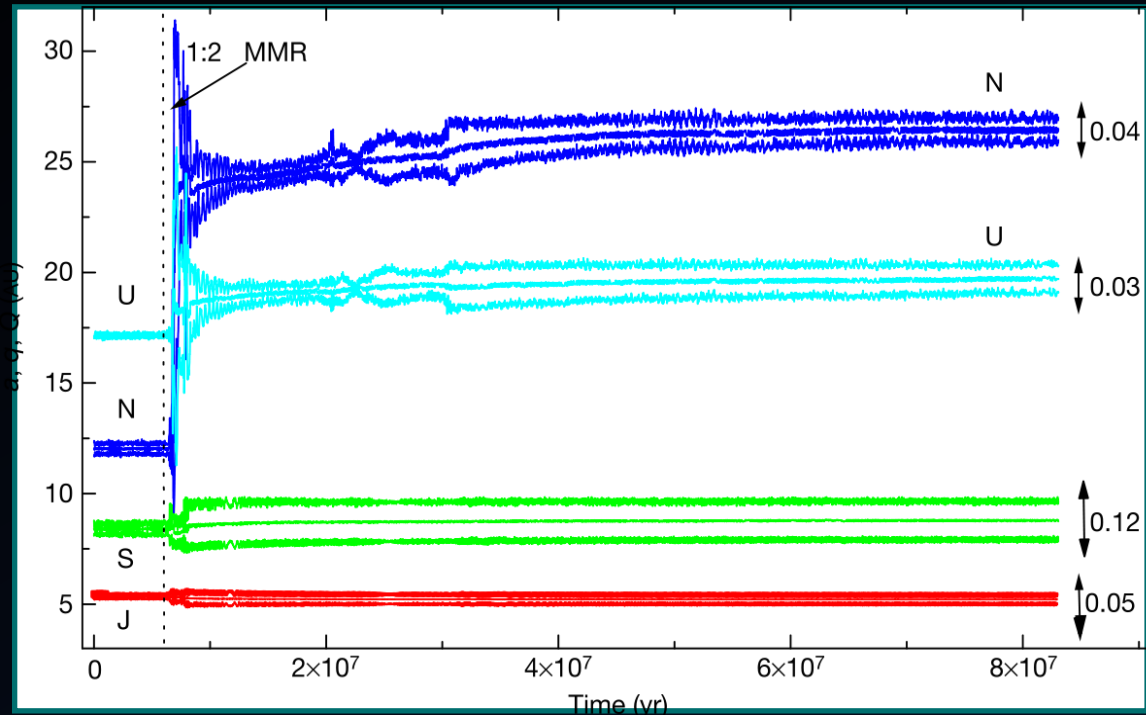
Поздняя тяжелая бомбардировка

<http://www.boulder.swri.edu/~hal/talks/KB/tno2006/LHB.html>



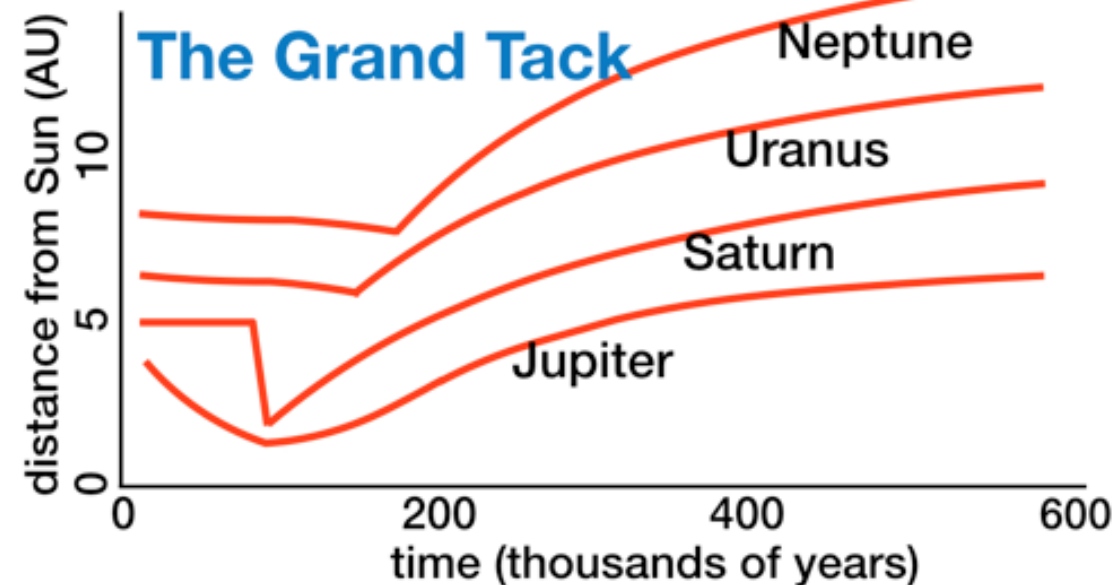
Gomes et al. (2005) Nature

Nice model и Grand Tack



Резкая перестройка орбит массивных тел может приводить к неустойчивости орбит малых тел.

Неустойчивости орбит планет и малых тел за счет миграции.



Эжекция

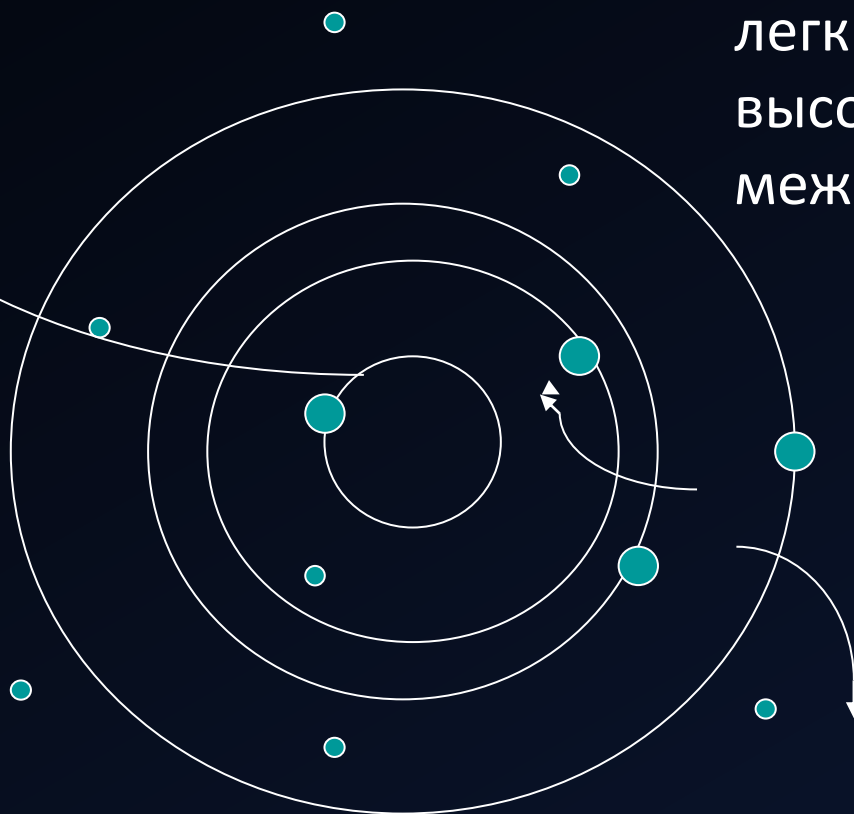
Взаимодействие тел (планет, планетезималей) в диске должно приводить к тому, что значительная часть более легких объектов (с размерами порядка километров) будет выбрасываться.

в облако Оорта
и из Сол. Сист.

В результате действия планет-гигантов
легкие объекты выбрасывались на
высокие орбиты и даже совсем в
межзвездное пространство.

Также на этой стадии
происходит т.н.
*поздняя тяжелая
бомбардировка.*

в пояс Койпера
и облако Оорта

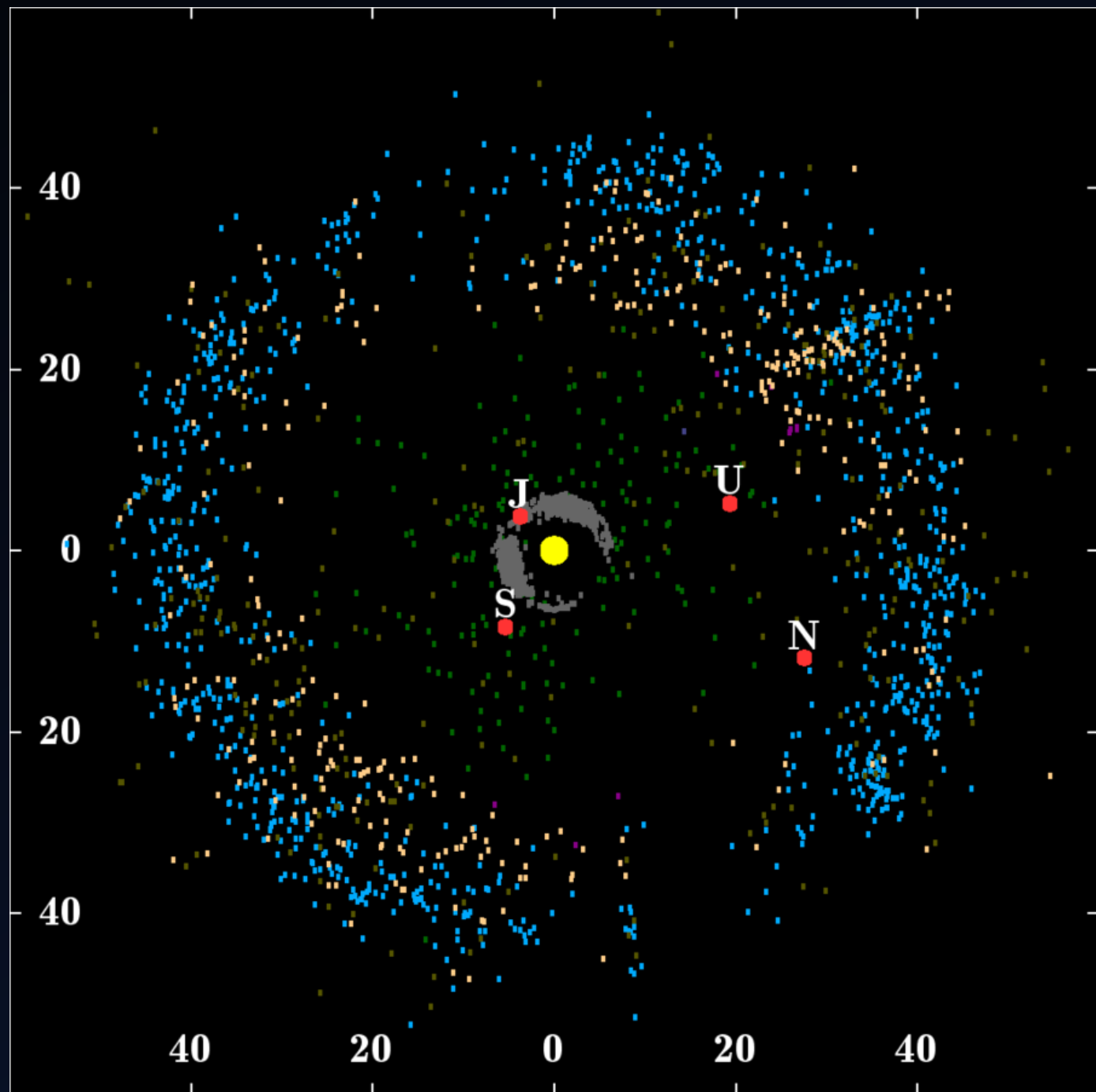


Пояс Койпера

На расстоянии 40-50 а.е.
располагается большая
группа тел, имеющих
орбиты с низким
эксцентриситетом < 0.2

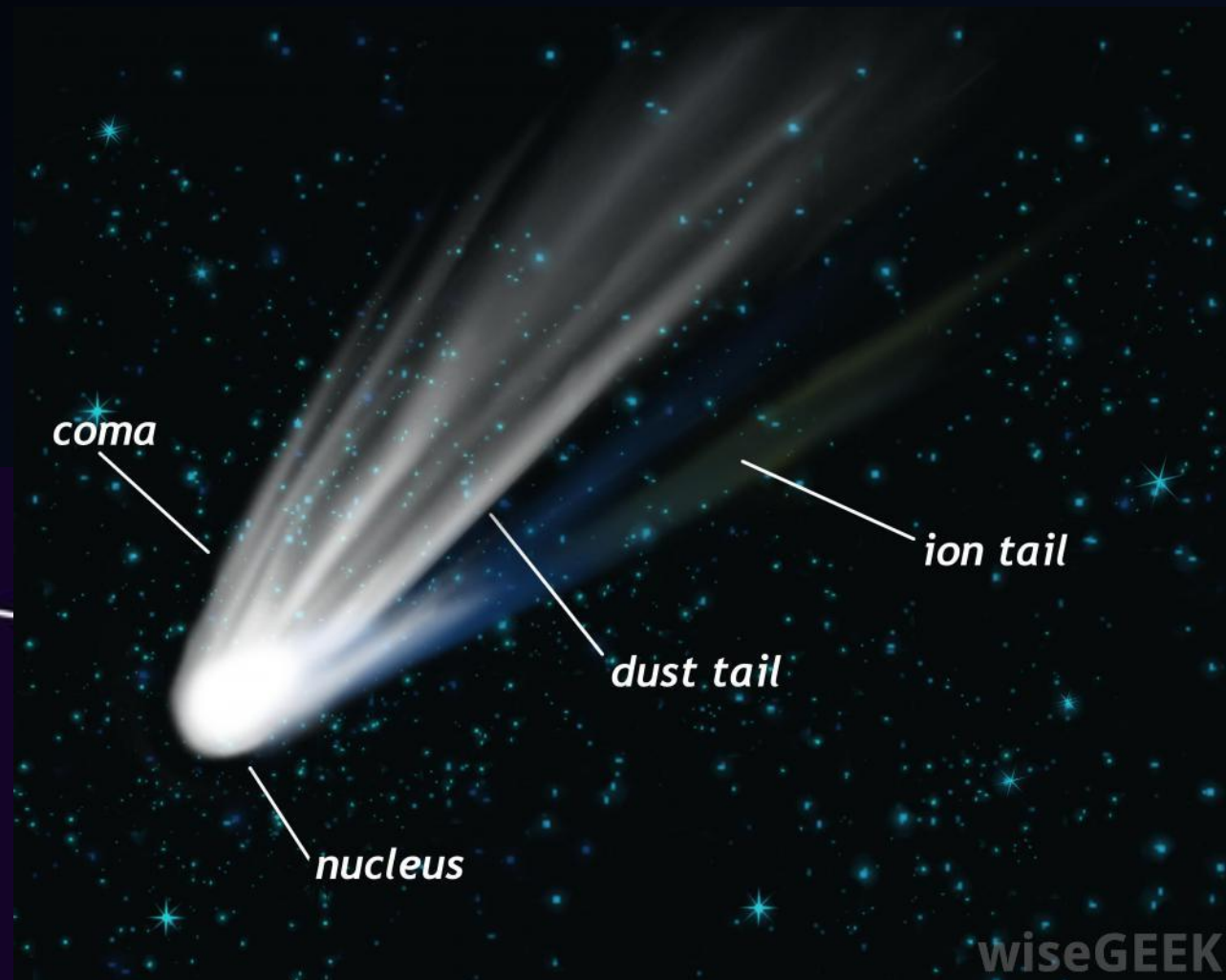
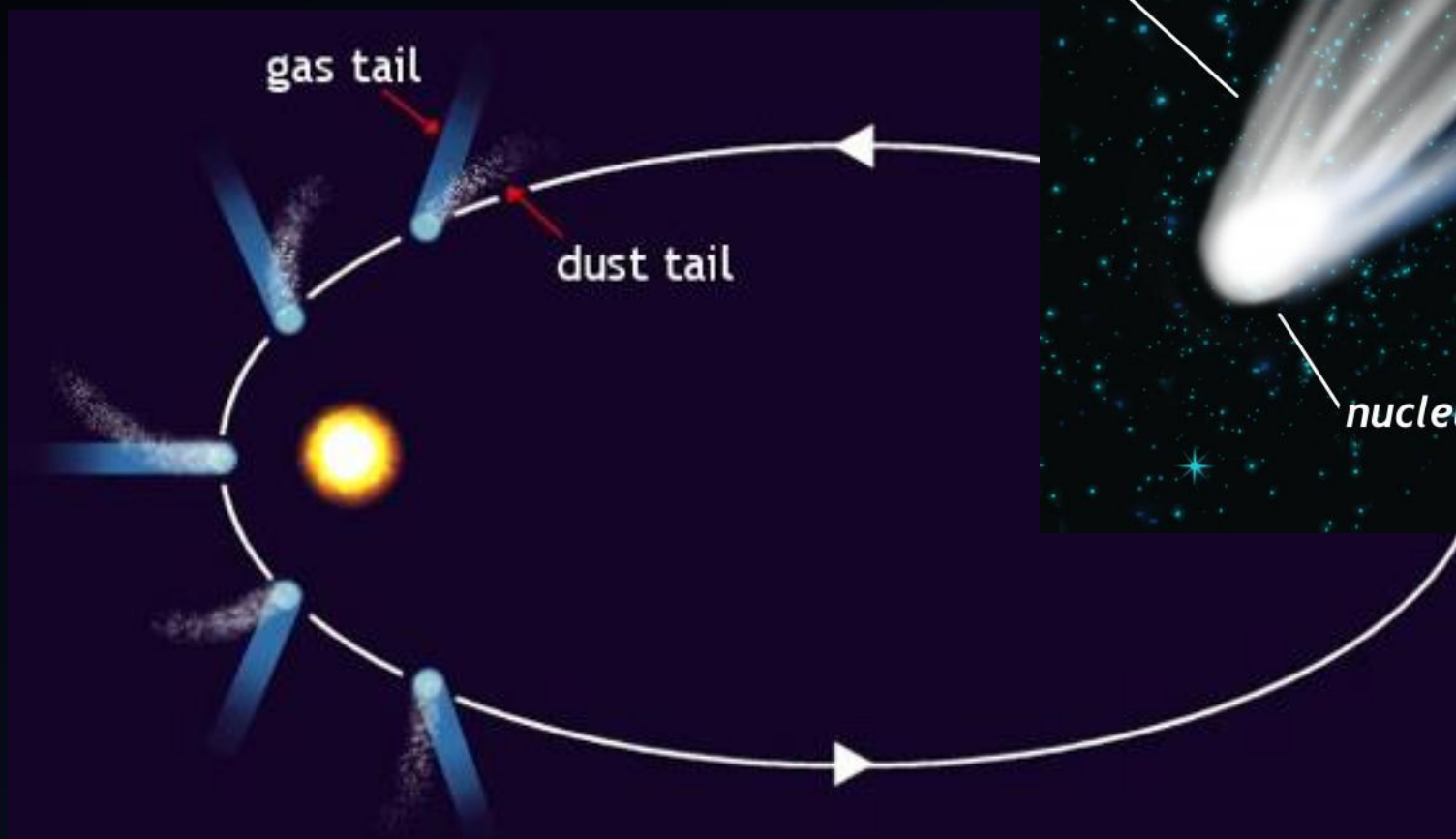
Первый объект открыт
в 1992 г.

Суммарная масса
около 0.001 земной.



Кометы

Типичные массы 10^{16} - 10^{18} г.
В составе много летучих
веществ в виде льдов.



Ядро имеет размер
около неск. Км
Голова — до млн,
хвост — до сотни млн

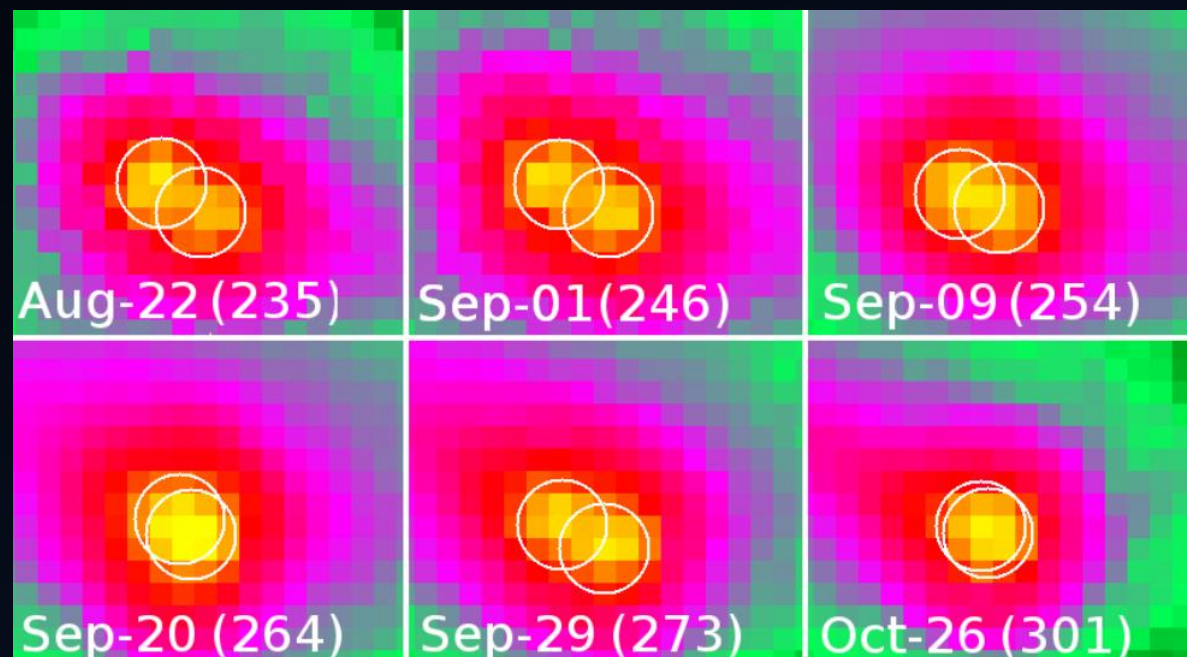
Двойная комета Главного пояса

288P (300163)

Большой эксцентриситет двойной $e > 0.6$

Орбитальный период 100-175 дней.

Расстояние между телами ~ 100 км.



Очень нетипичный двойной астероид.
Значит, особый механизм формирования

Возможно, активность астероида
запущена столкновением с телом
размером около метра.

Эволюция орбиты двойной может
быть связана с истечением вещества.

Он же 288P, он же 300163,
он же 2006 VW₁₃₉, он же P/2006 VW₁₃₉



Открыт Spacewatch в 2006 г.

Кометная активность открыта
в 2011 г. на Pan-STARRS.

Размеры компонент 1-2 км.

Последний кадр ROLIS

После окончательного «упокоения» камера ROLIS на борту зонда Philae сделала 5 снимков.

Из них 4 – с подсветкой светодиодами.

Наконец, через

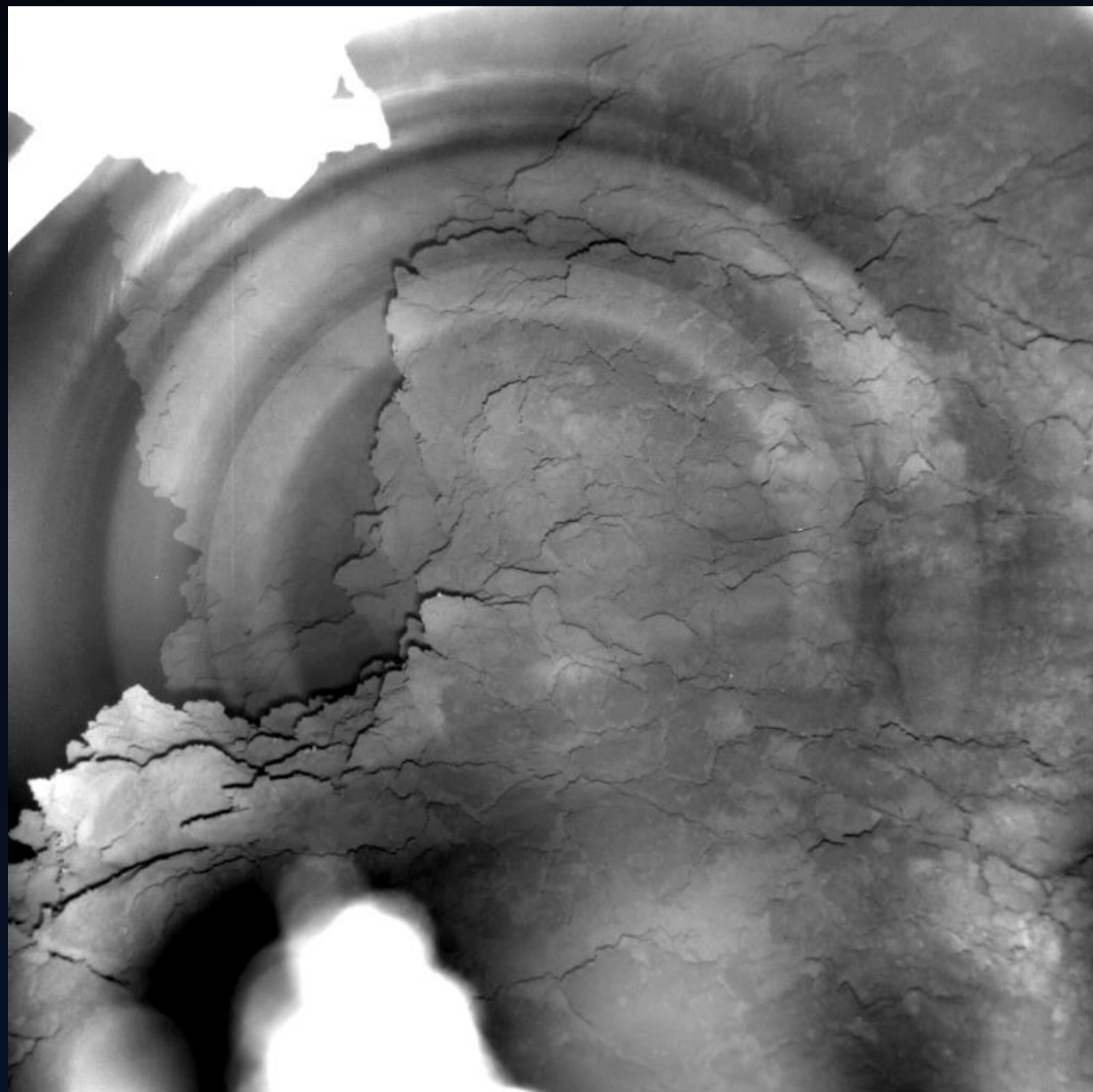
два земных дня на поверхности

был сделан последний снимок.

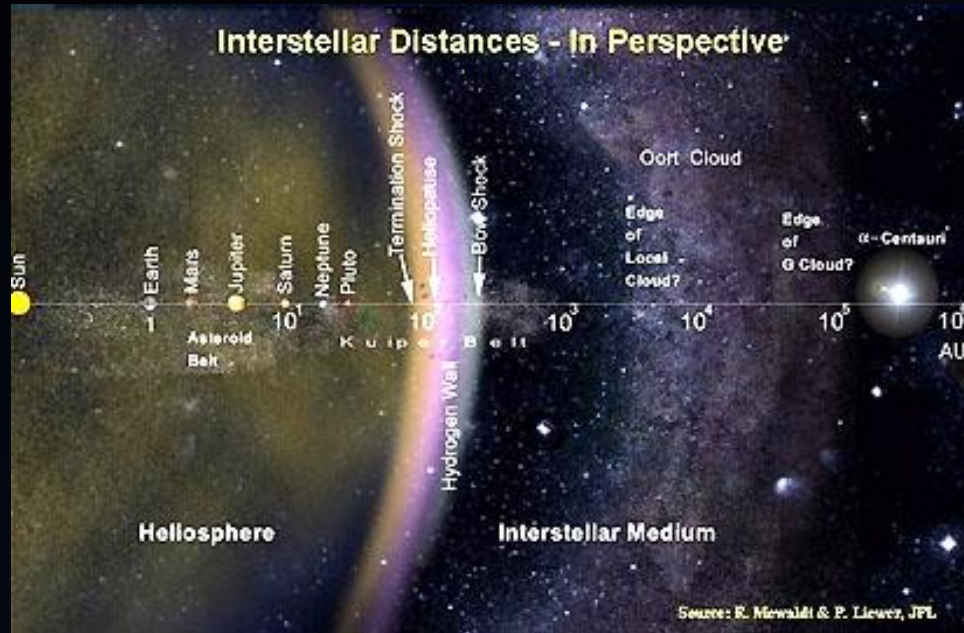
Его передача закончилась

за секунды до исчерпания

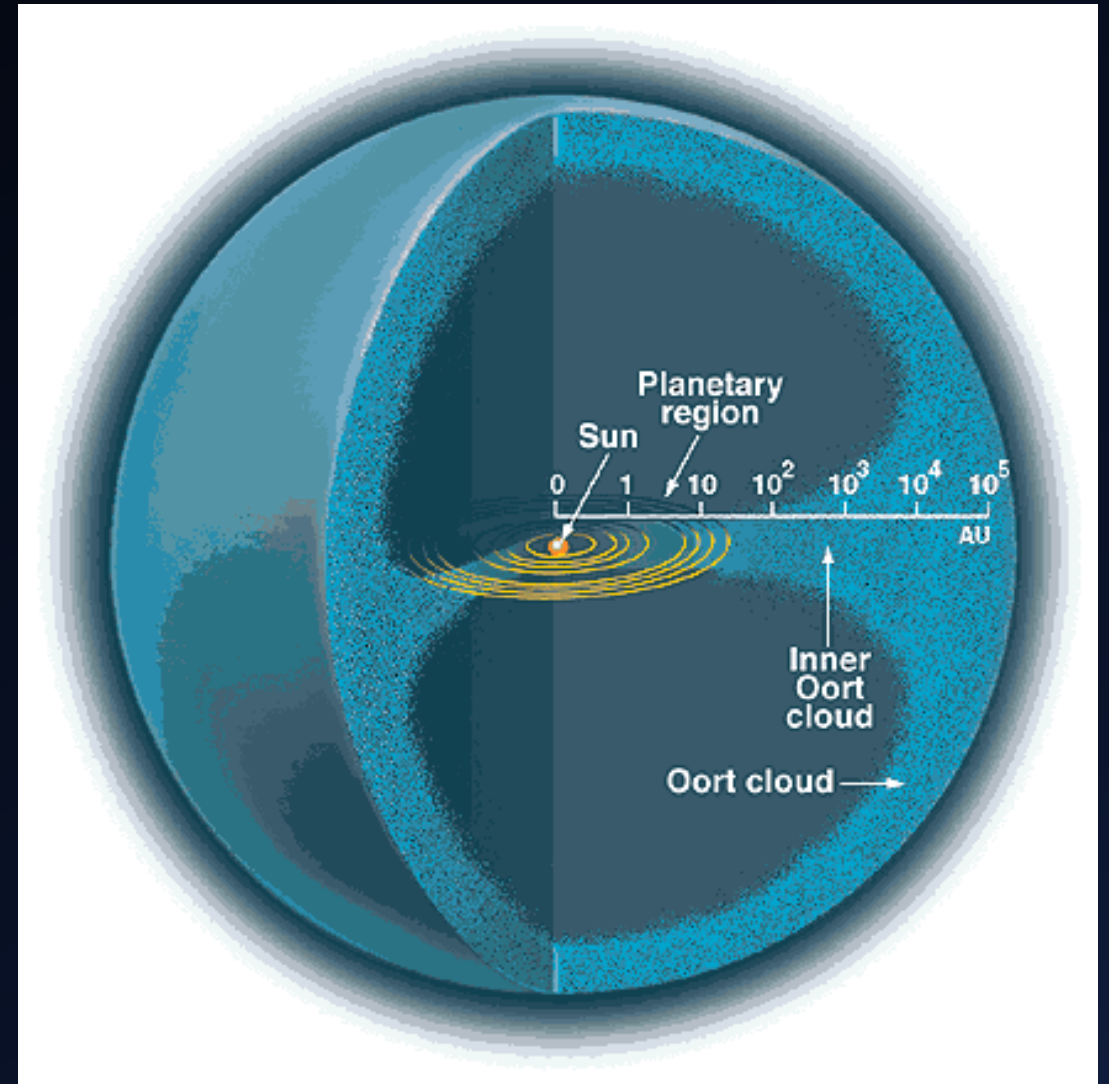
запасов батарей.



Облако Оорта



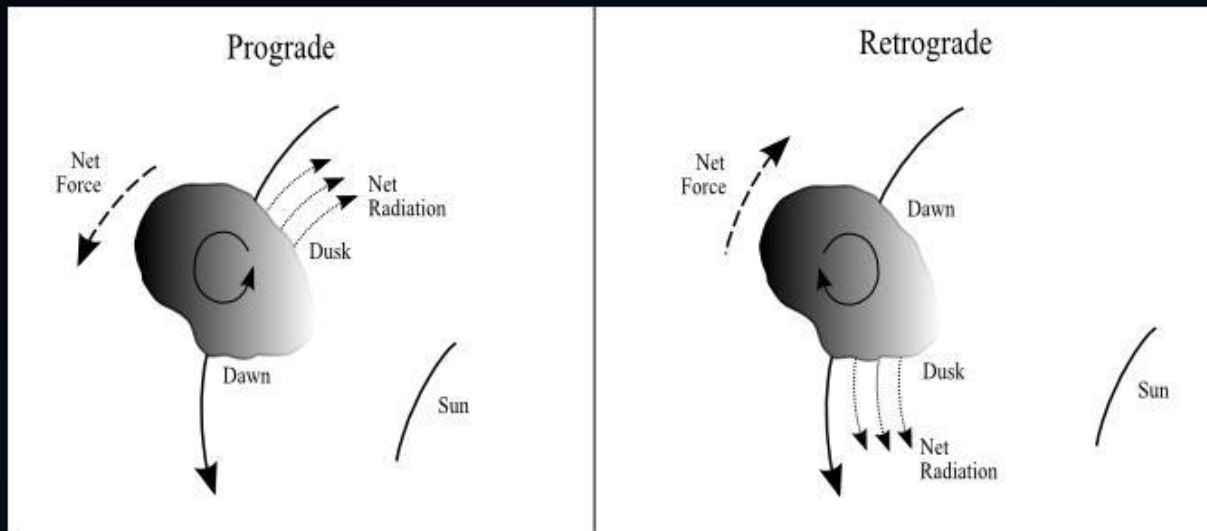
Современная масса облака Оорта составляет примерно 1-10 масс Земли. Эти объекты родились гораздо ближе к Солнцу: на $<(40-50)$ а.е. Они были выброшены оттуда благодаря взаимодействию с массивными телами.



Эффект Ярковского

При таком вращении горячая часть будет разгонять объект. Т.е., орбита будет раскручивающейся спиралью.

При обратном вращении тело будет тормозиться и приближаться к звезде.

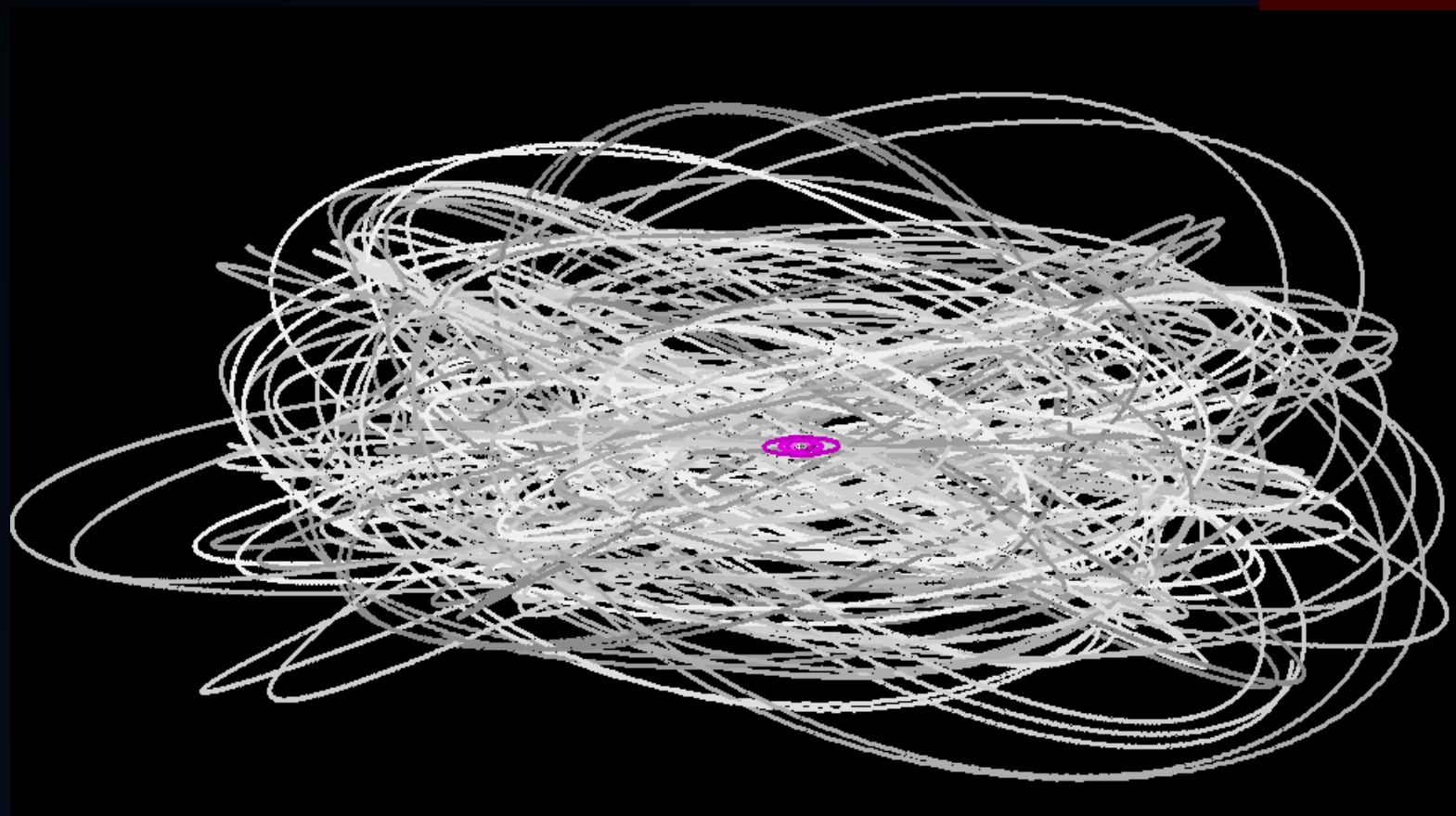


Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

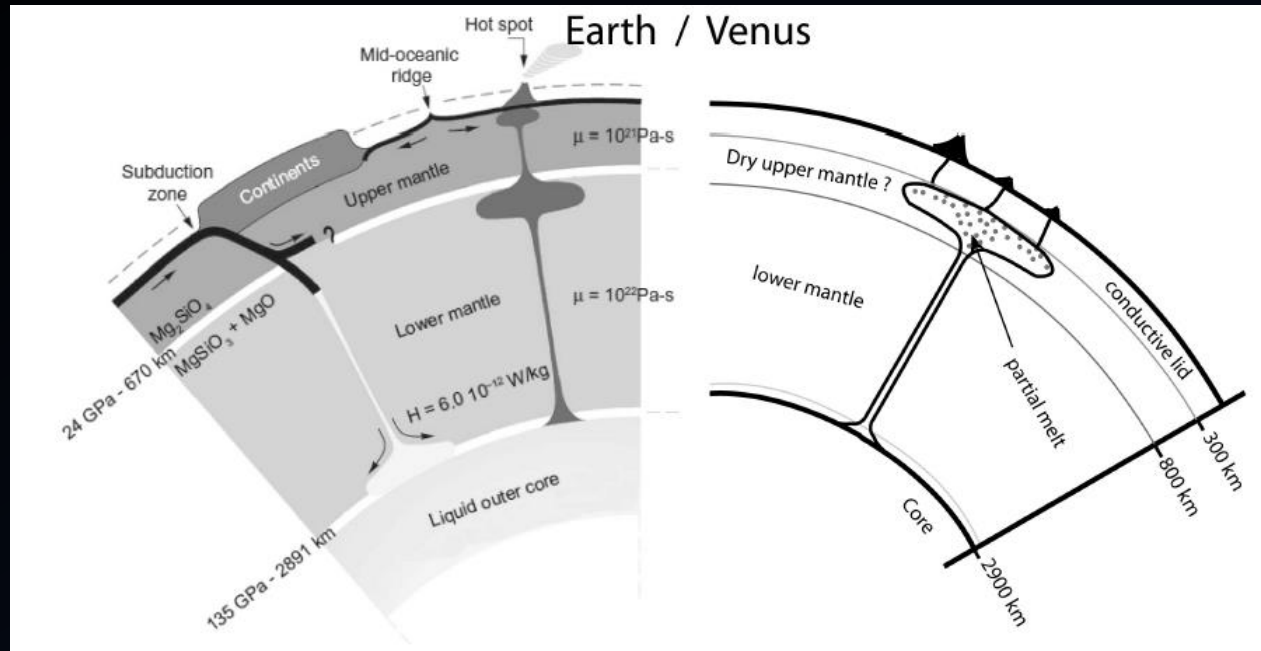
Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

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



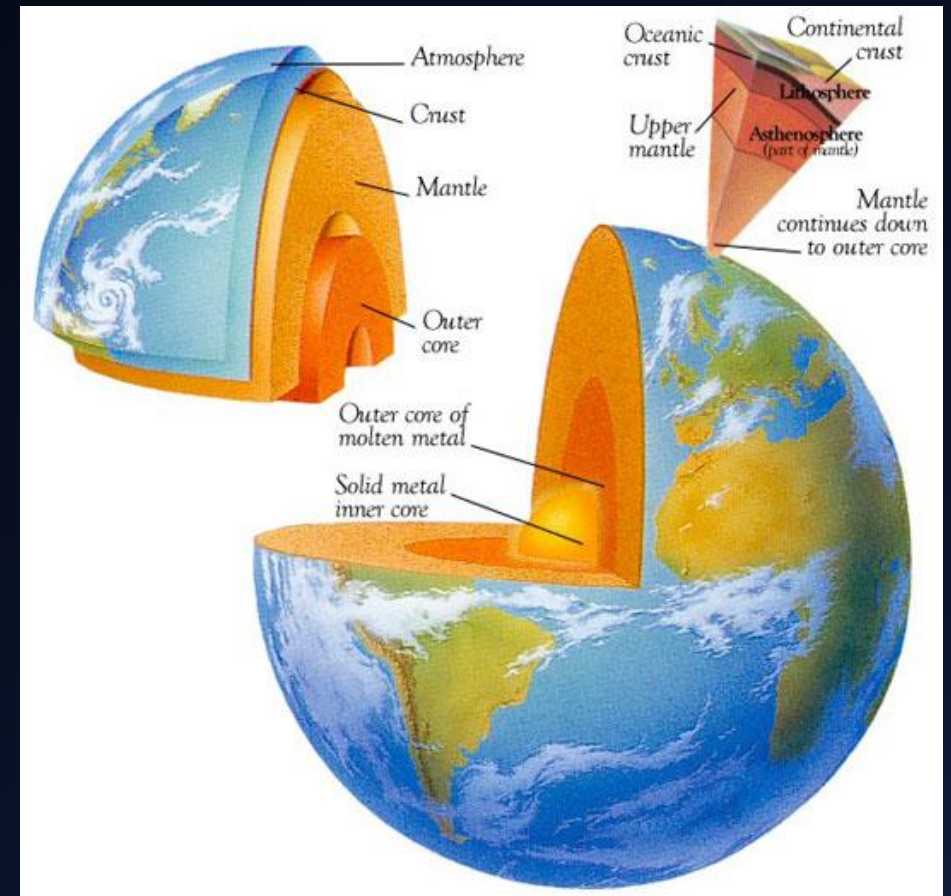
Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 г., а затем в 1962 г. был описан Козаи для астероидов.

Структура планет

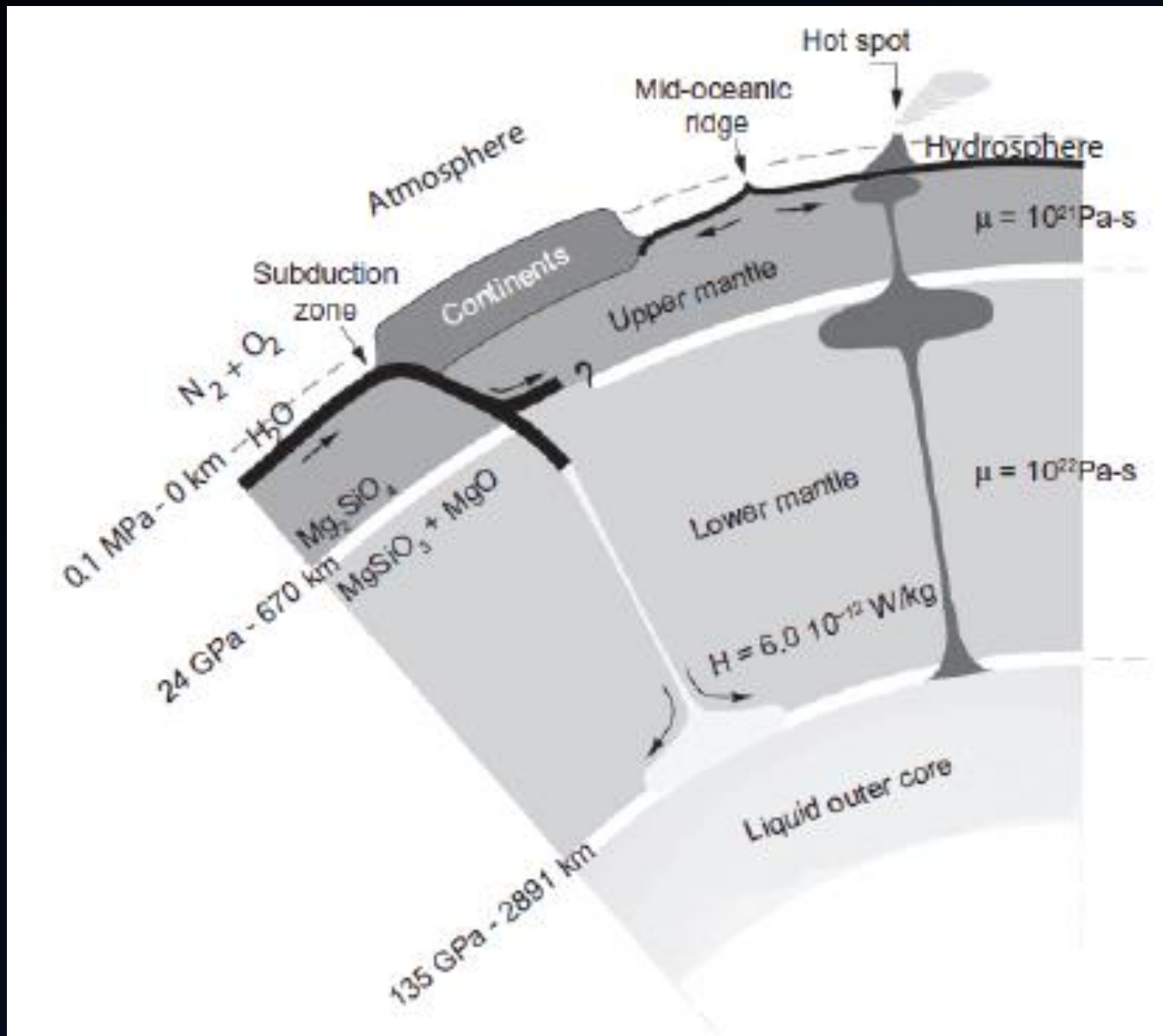


Мы недостаточно хорошо знаем даже Землю.
Дальше идут тела Солнечной системы.
А еще дальше — экзопланеты.

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



Земля издалека

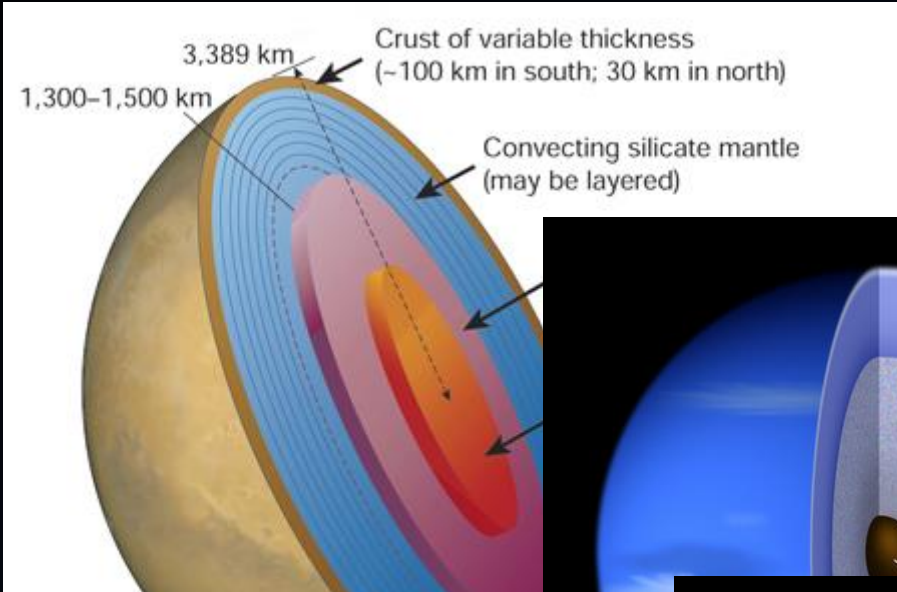


Если бы мы наблюдали Землю, как экзопланету, т.е. у нас были бы данные только по ее массе и радиусу, мы не смогли бы ничего сказать об:

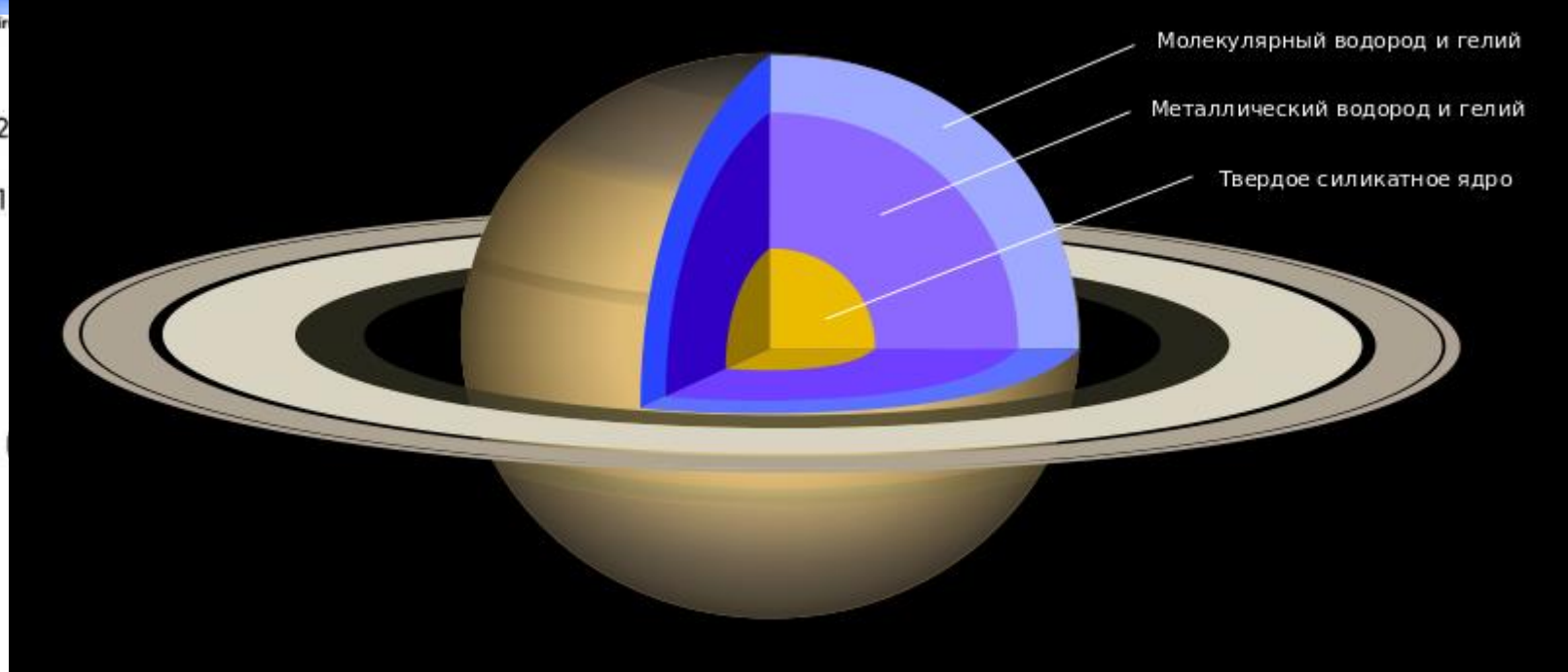
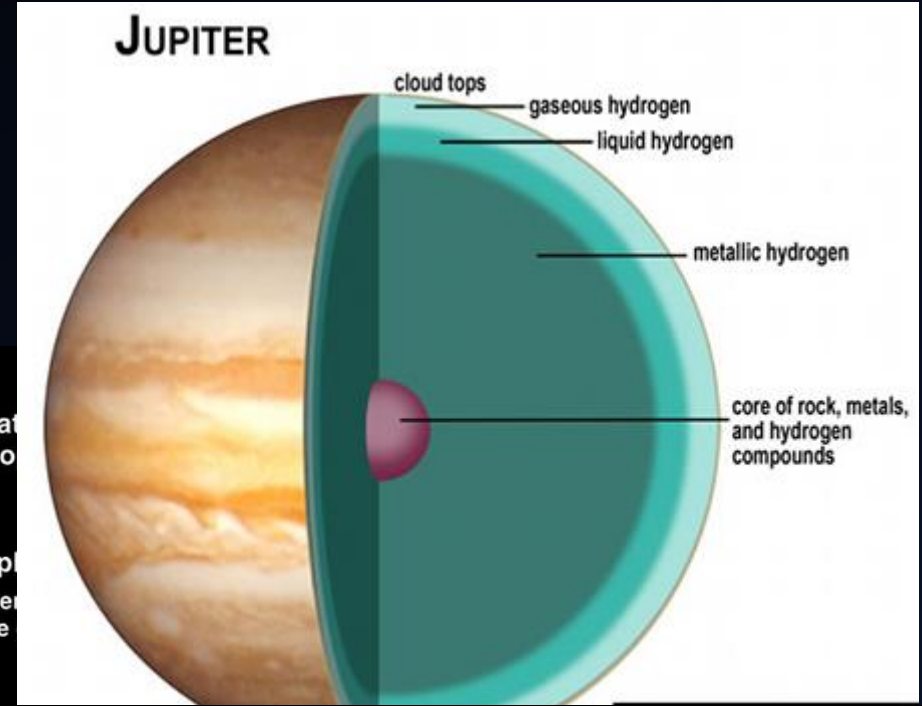
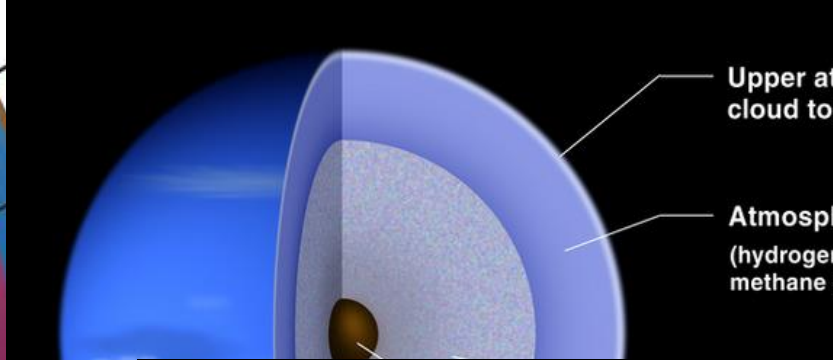
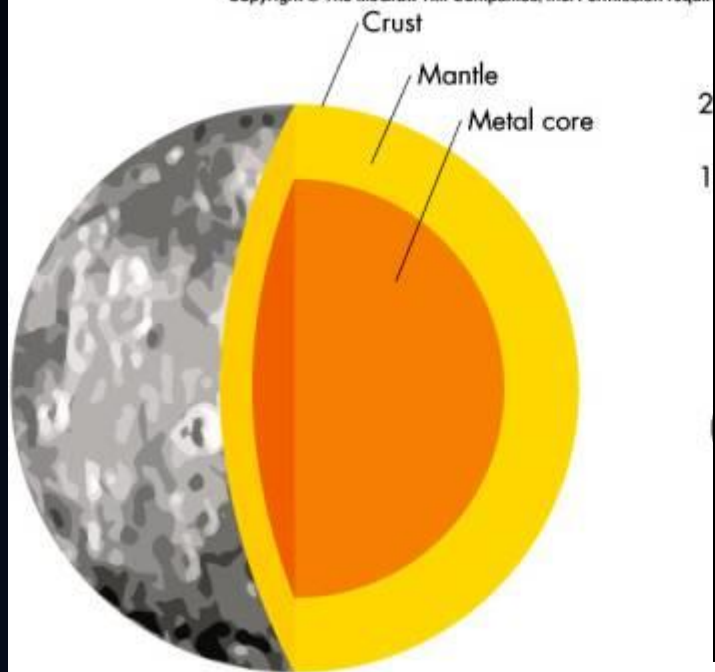
- атмосфере
- гидросфере
- коре

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

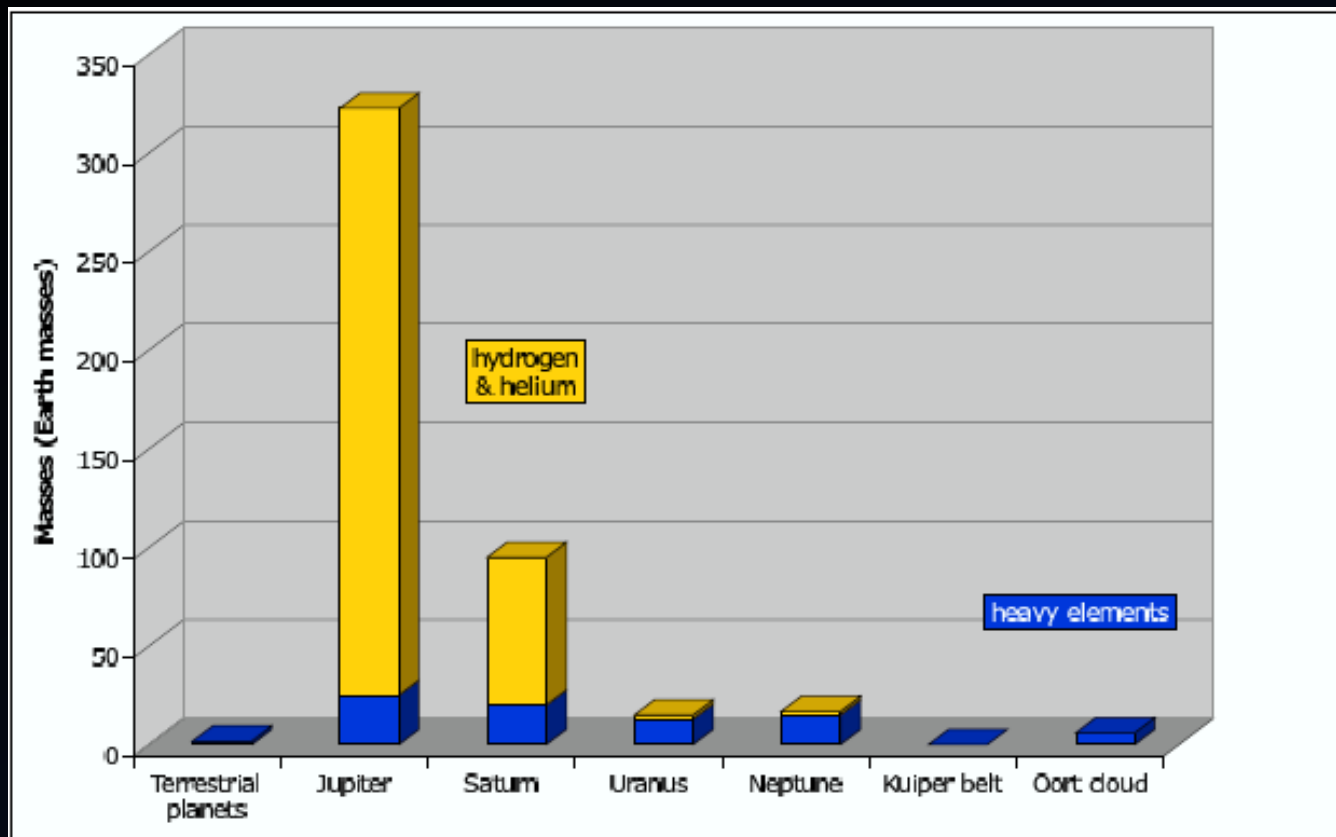
Структура планет



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction.



Легкие и тяжелые



Планеты делятся на несколько групп по своему составу.

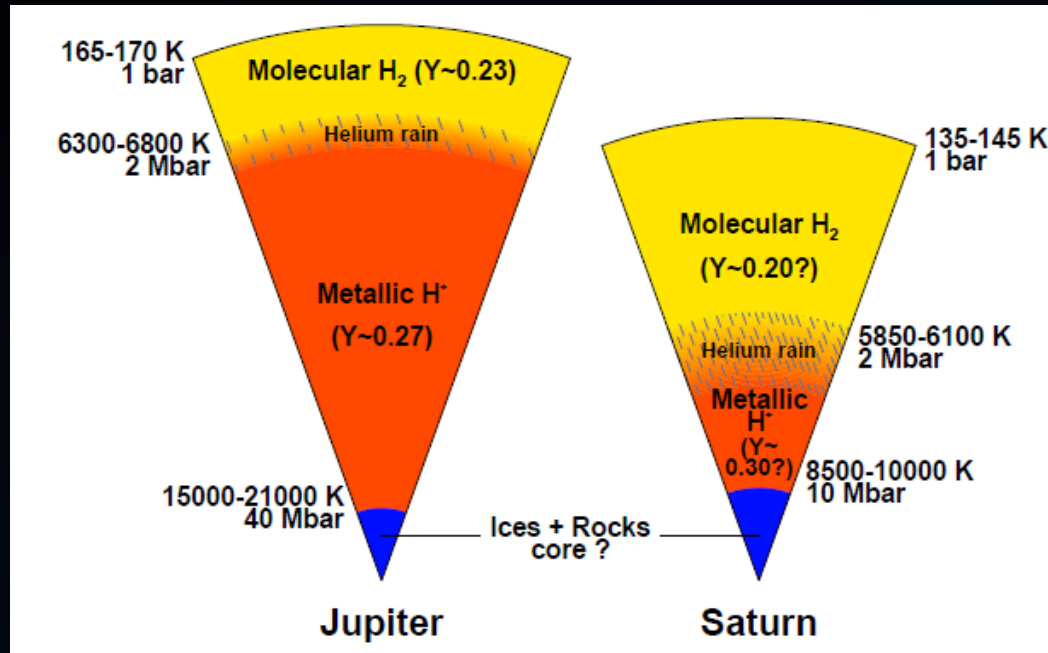
В планетах земного типа, астероидах и кометах относительно мало водорода и почти нет гелия.

В газовых гигантах они доминируют.

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



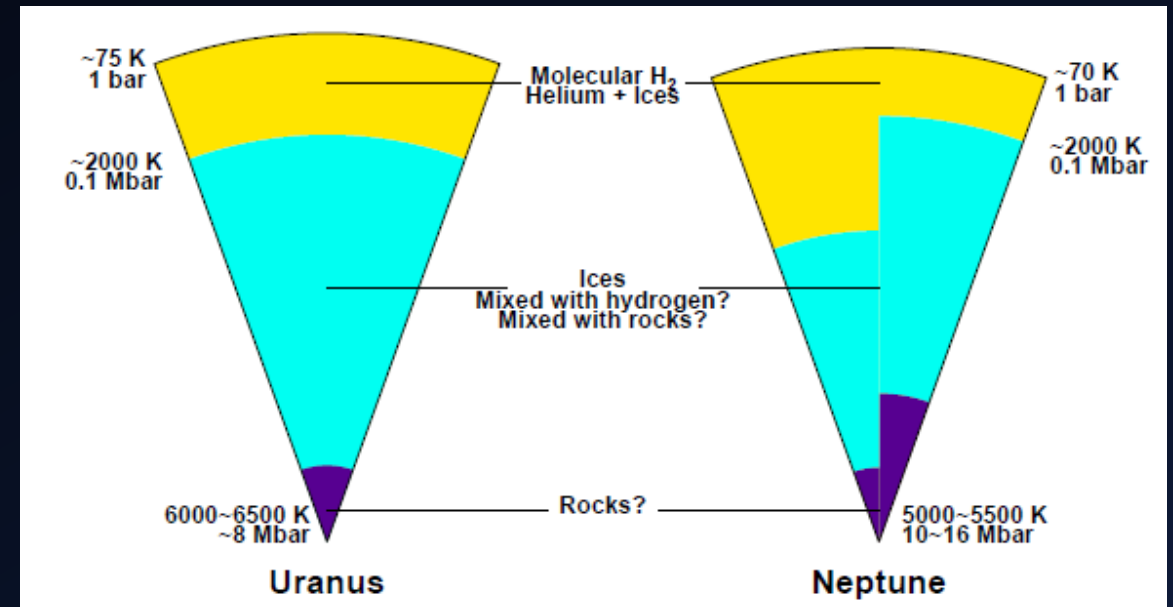
Структура гигантов



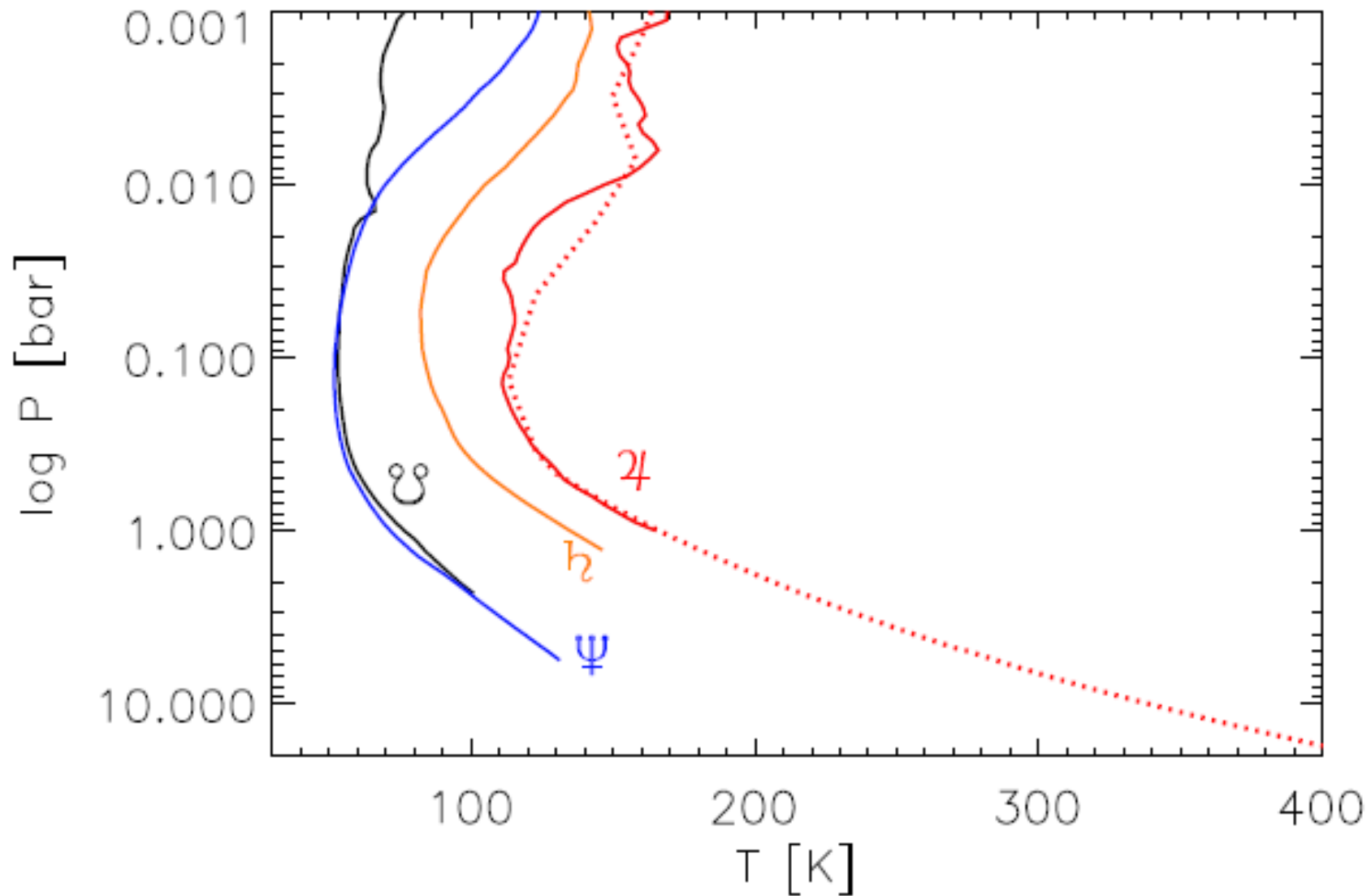
В центрах массивных планет плотность и температура достигают больших значений. Это усложняет построение точных моделей, т.к. неизвестно поведение вещества при таких условиях.

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

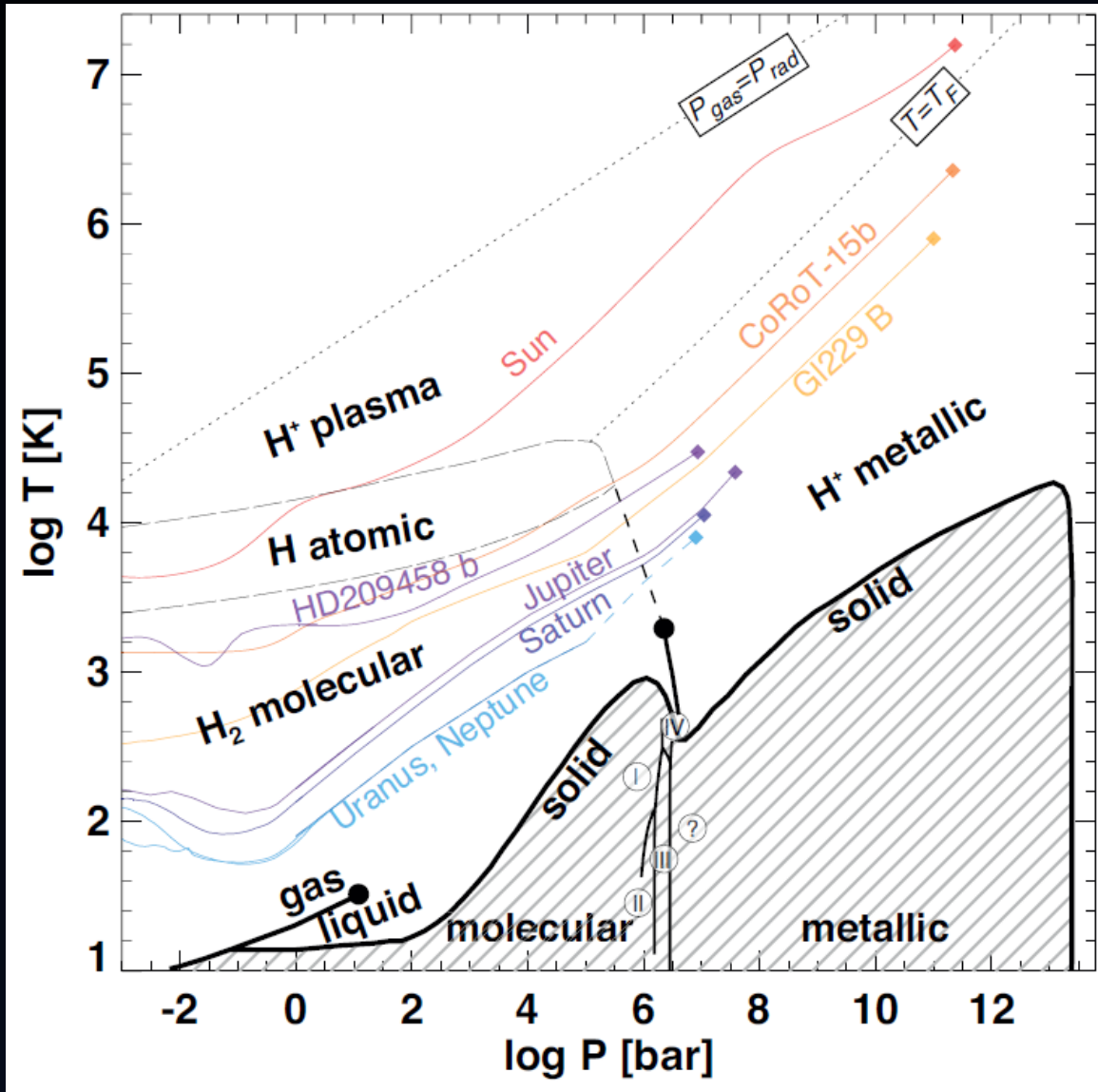
Элементы сегрегированы под действием гравитации.



Температура и давление в атмосферах гигантов

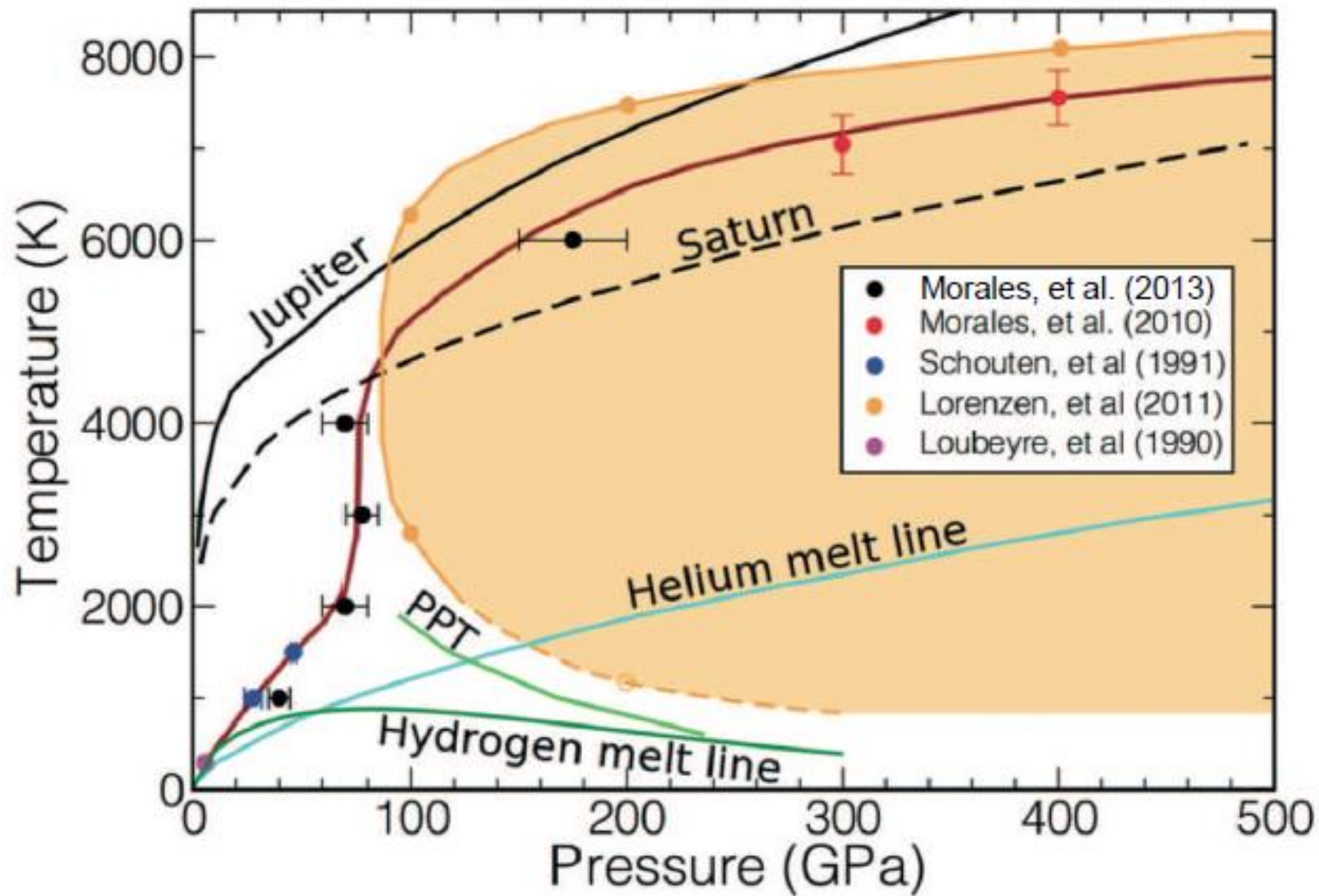


Уравнение состояния водорода

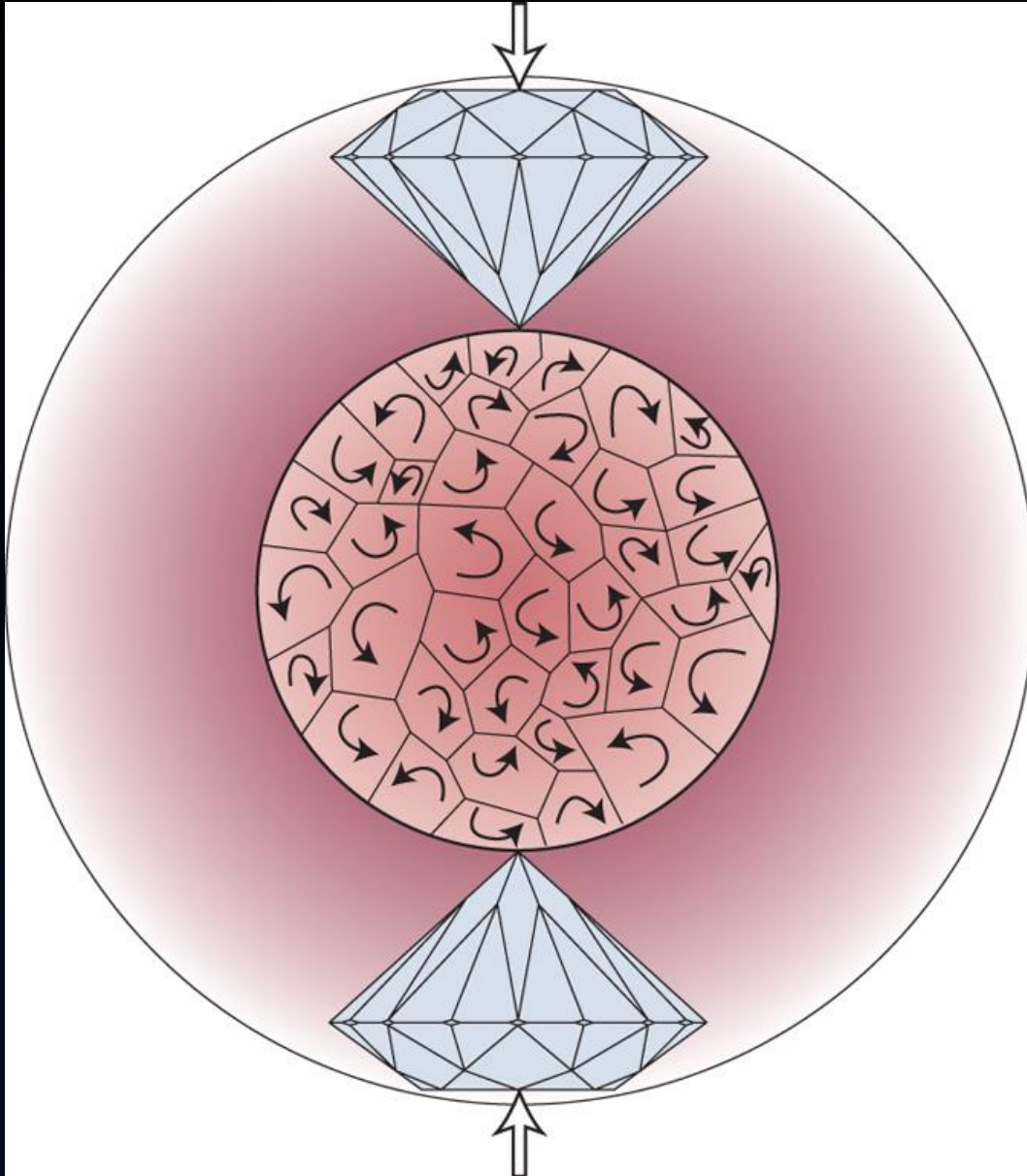


Даже водород – самый простой элемент таблицы Менделеева – имеет очень сложное поведение в разных условиях. Некоторые режимы изучены нами довольно плохо.

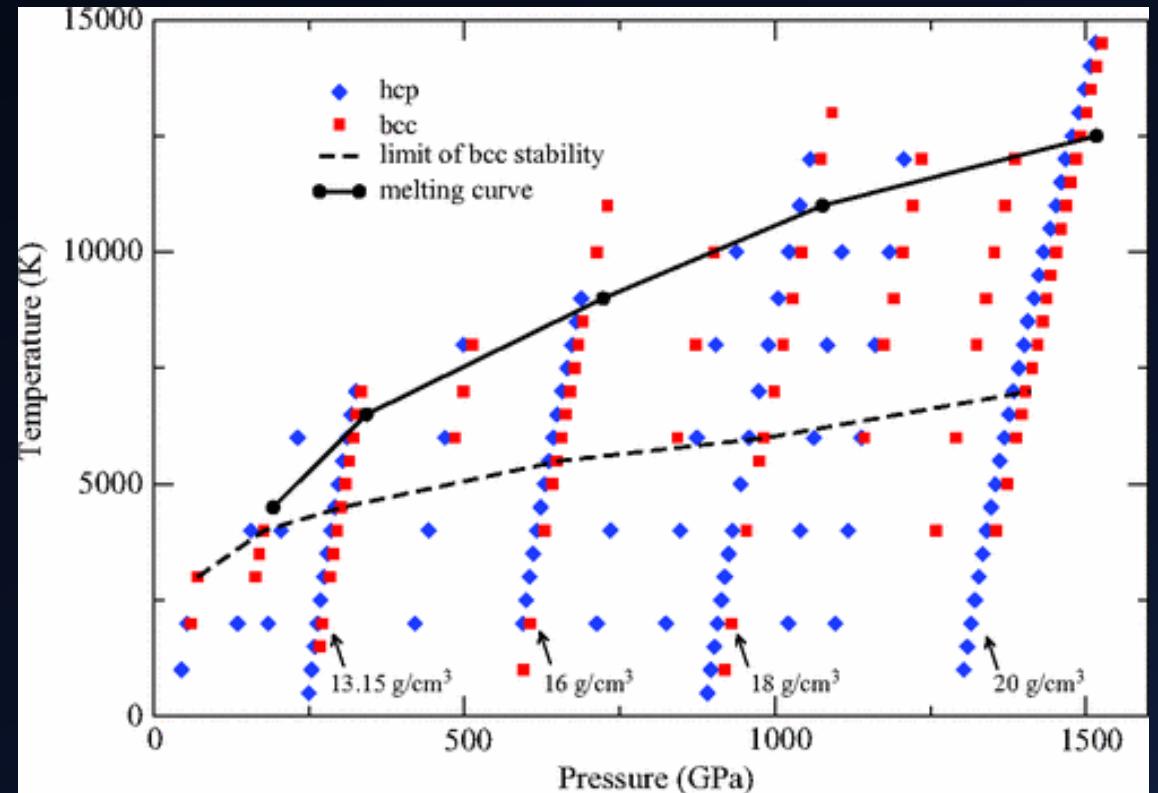
Смесь водорода и гелия



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

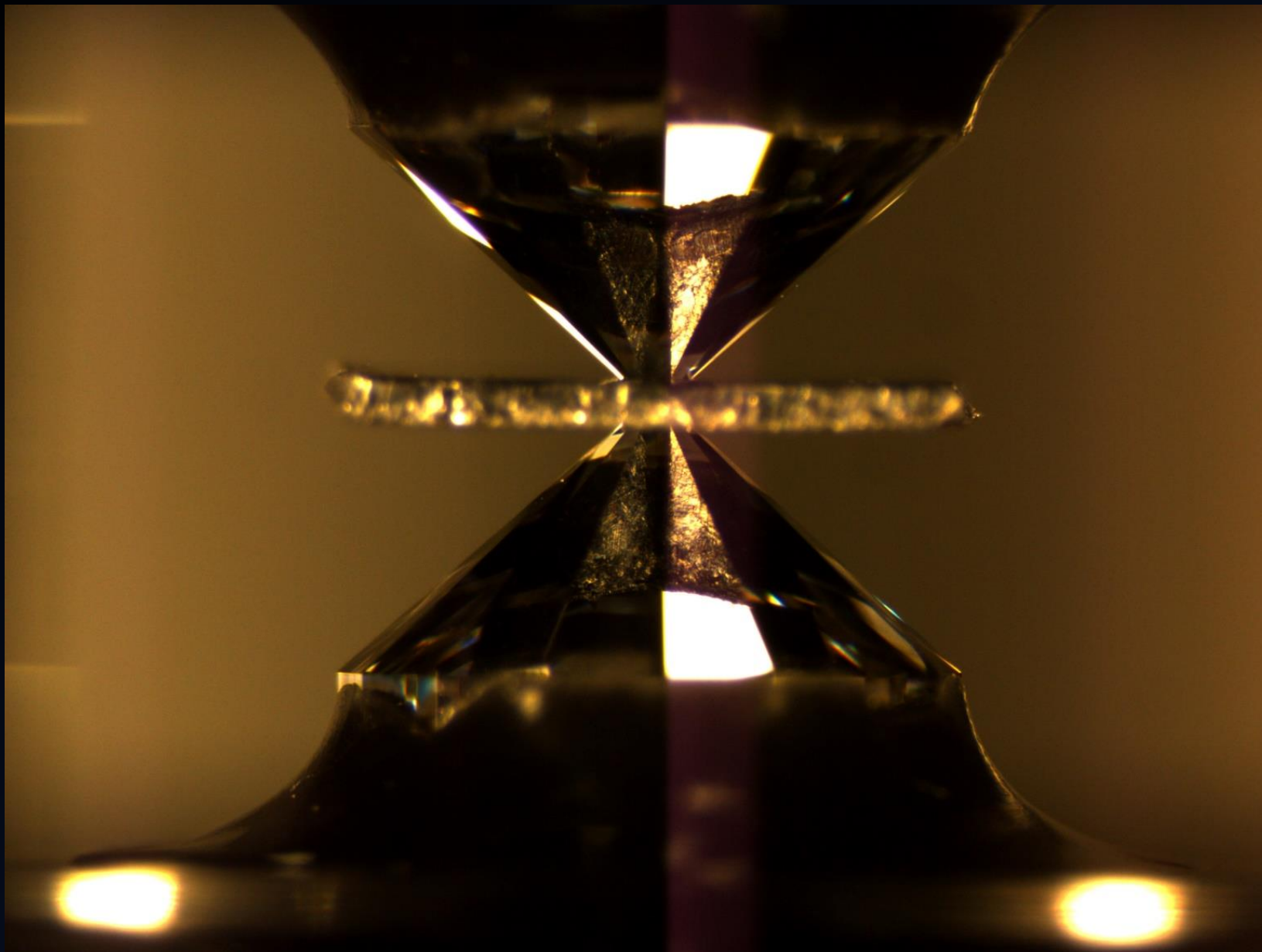
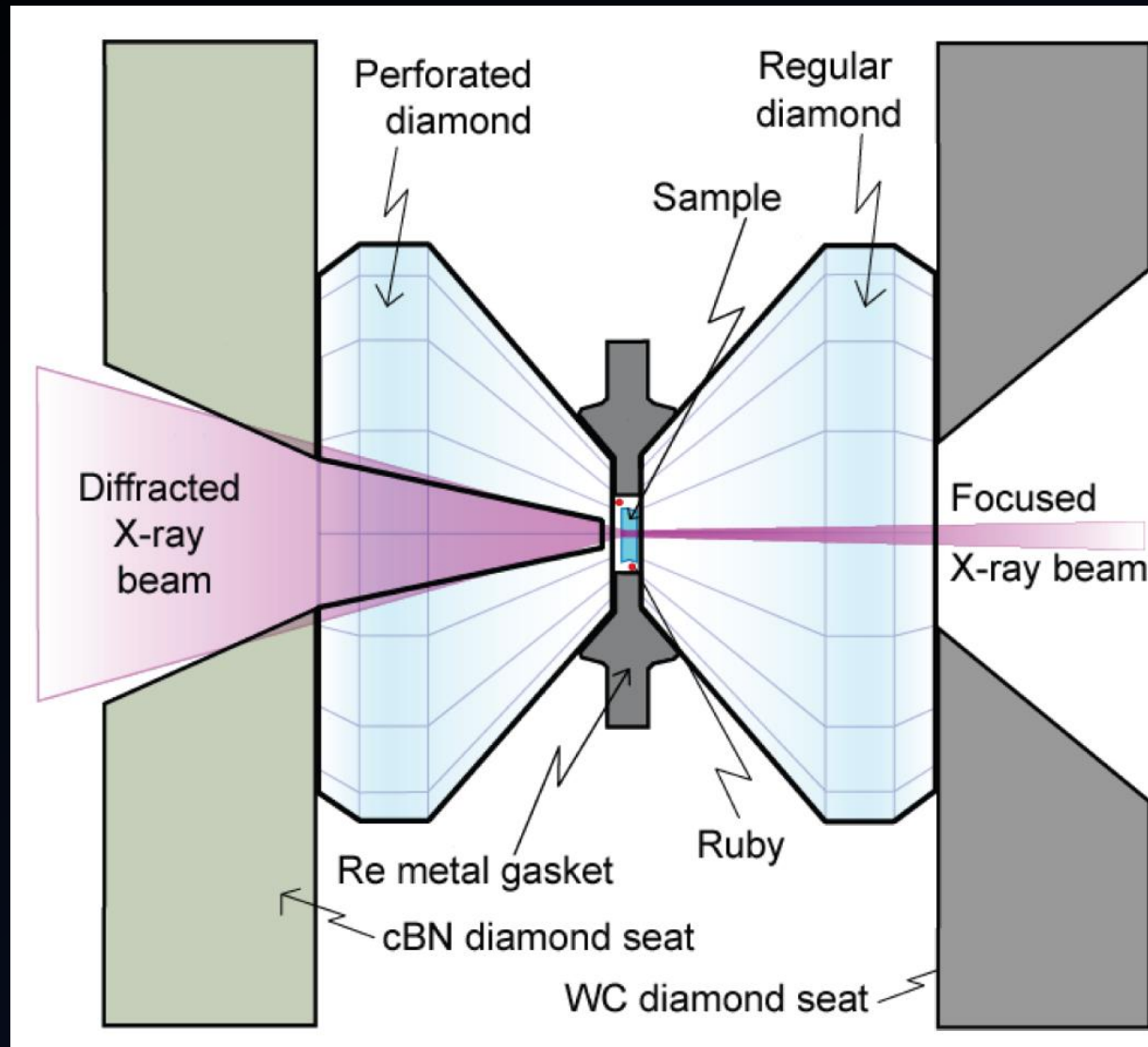
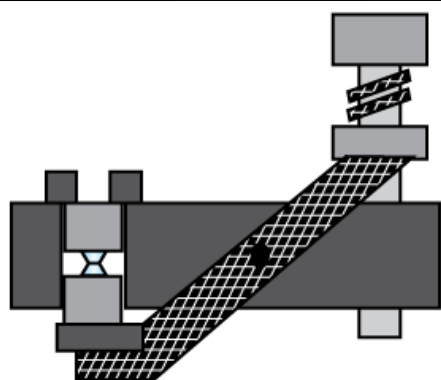


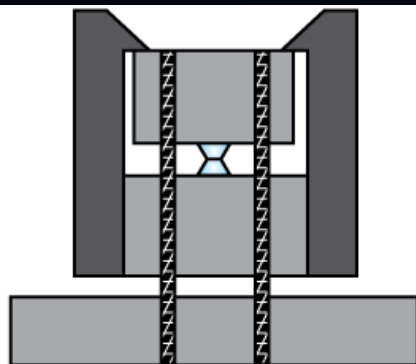
Схема эксперимента



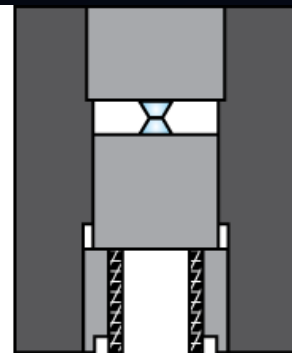
Как давить?



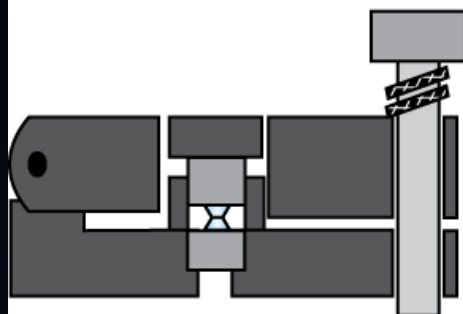
1st class lever drive



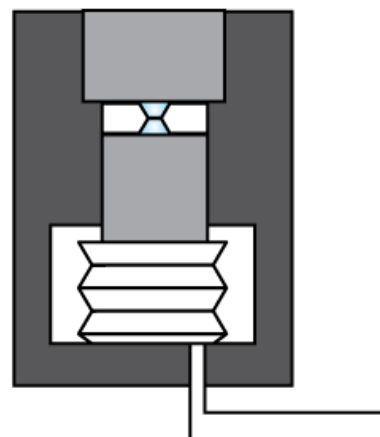
Pin - guide screw drive



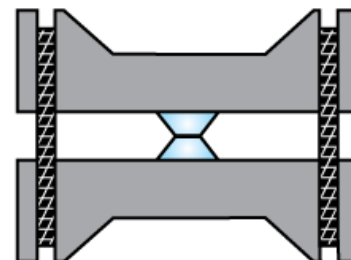
Screw piston drive



2nd class lever drive

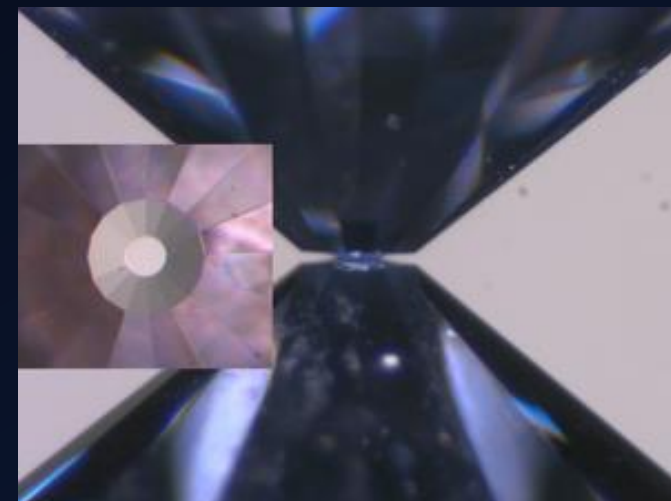
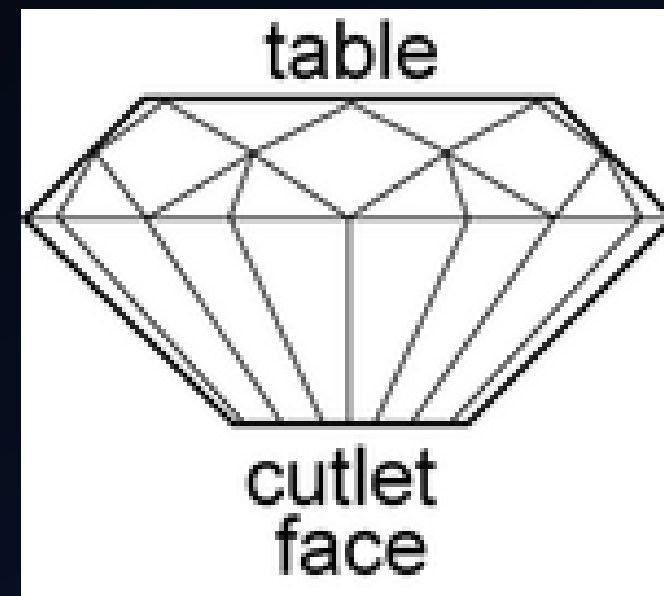


Fluid - bellows drive

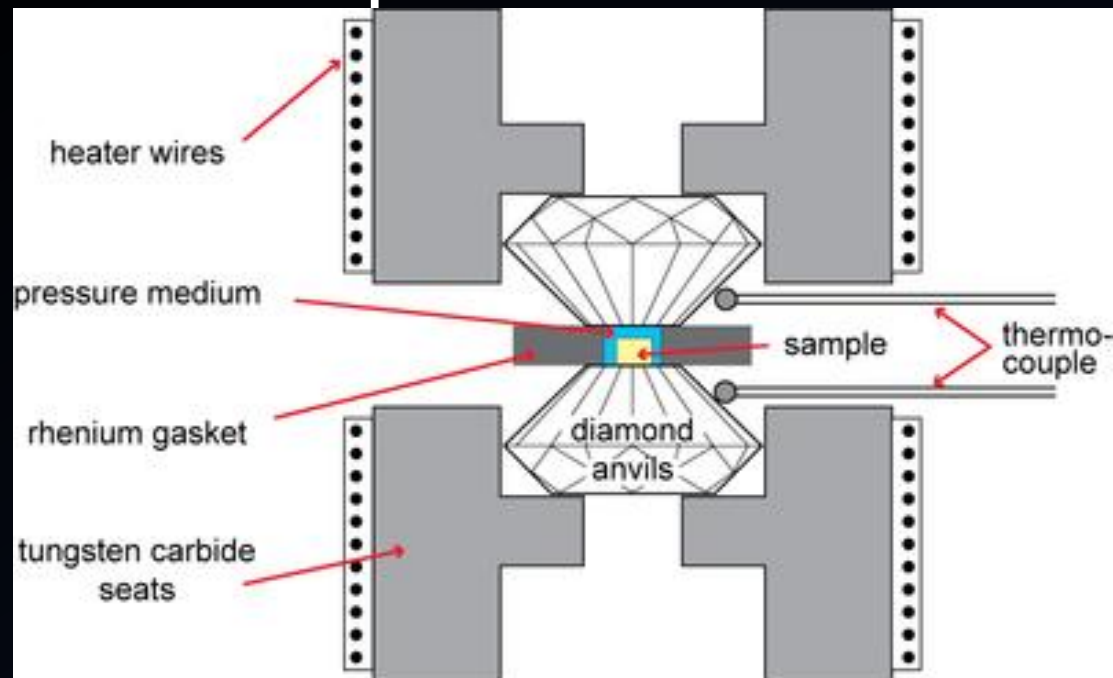


pull - platen drive

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

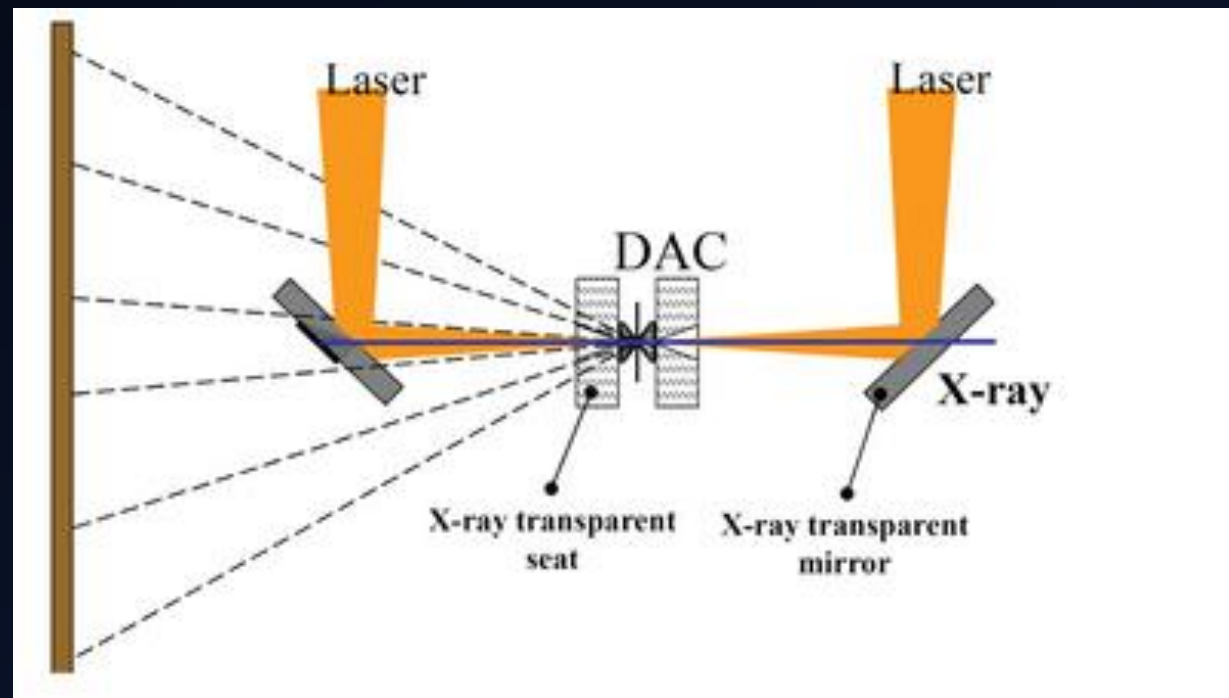


Как нагреть?

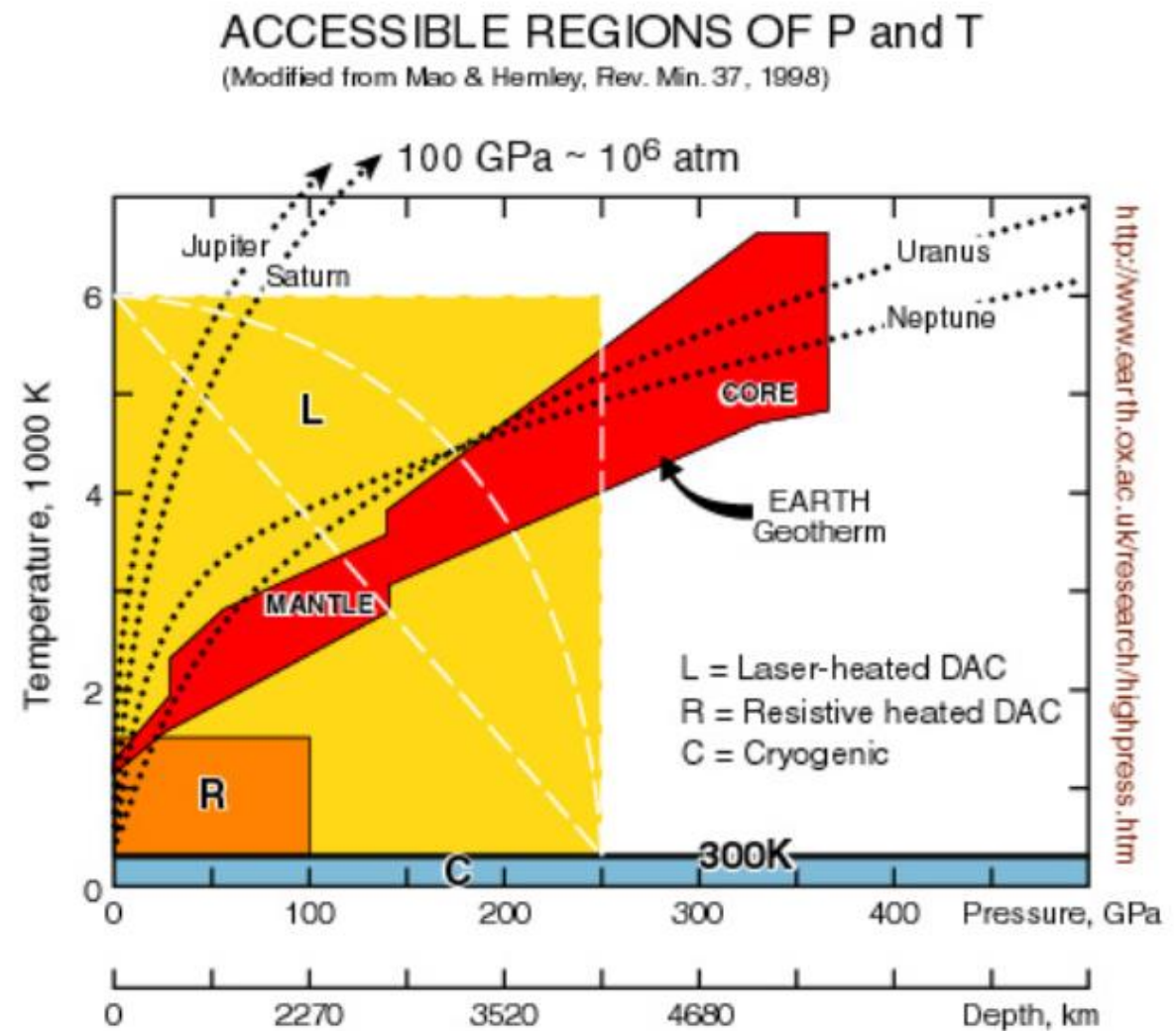
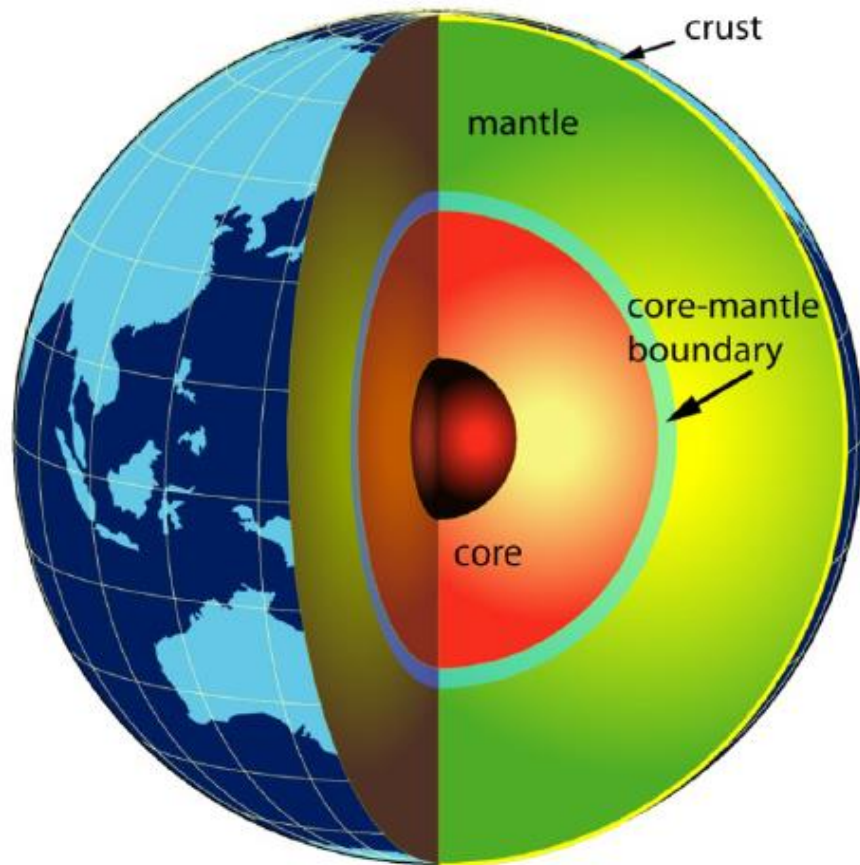


До 1300K

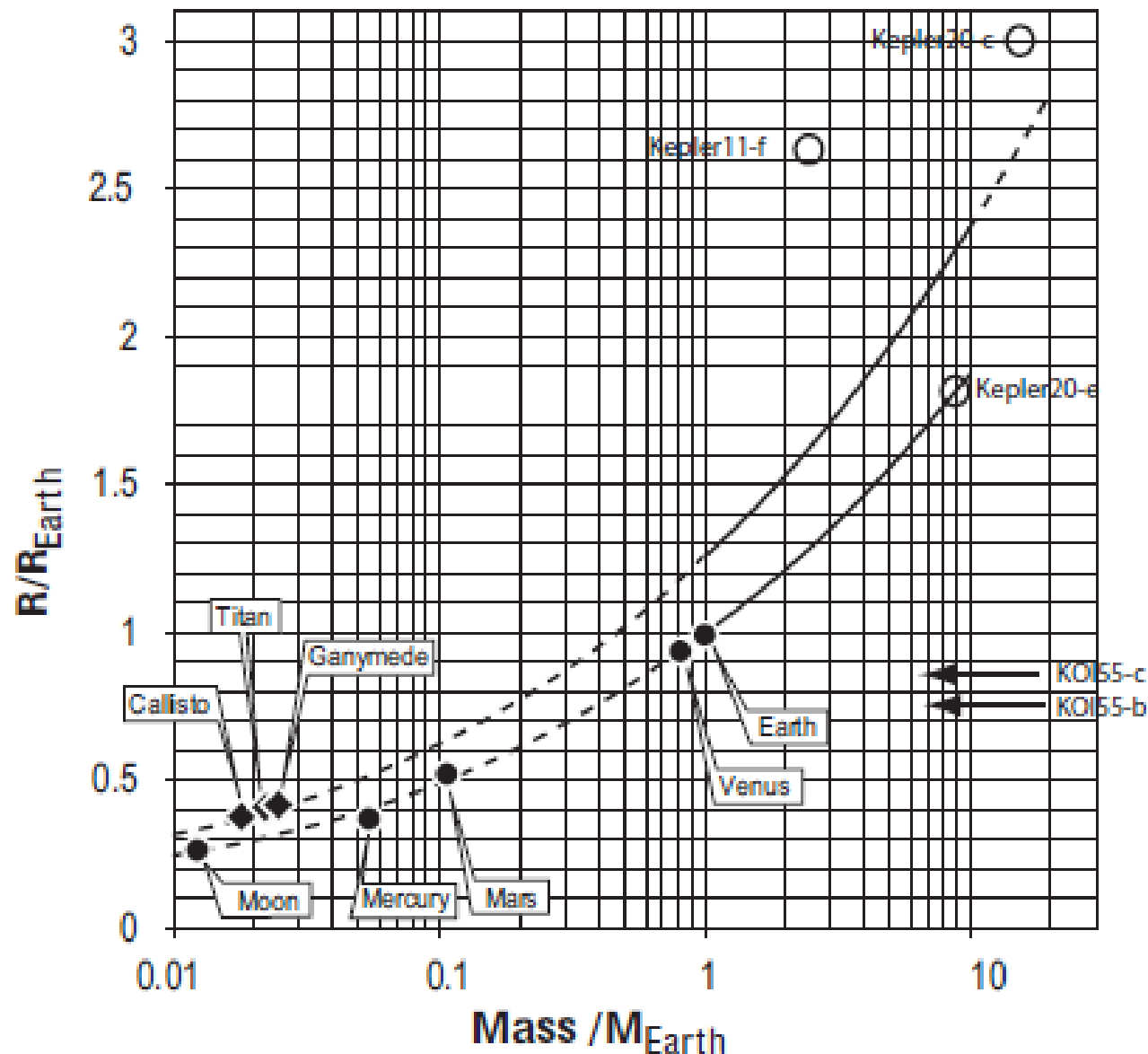
Выше 1300K



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.