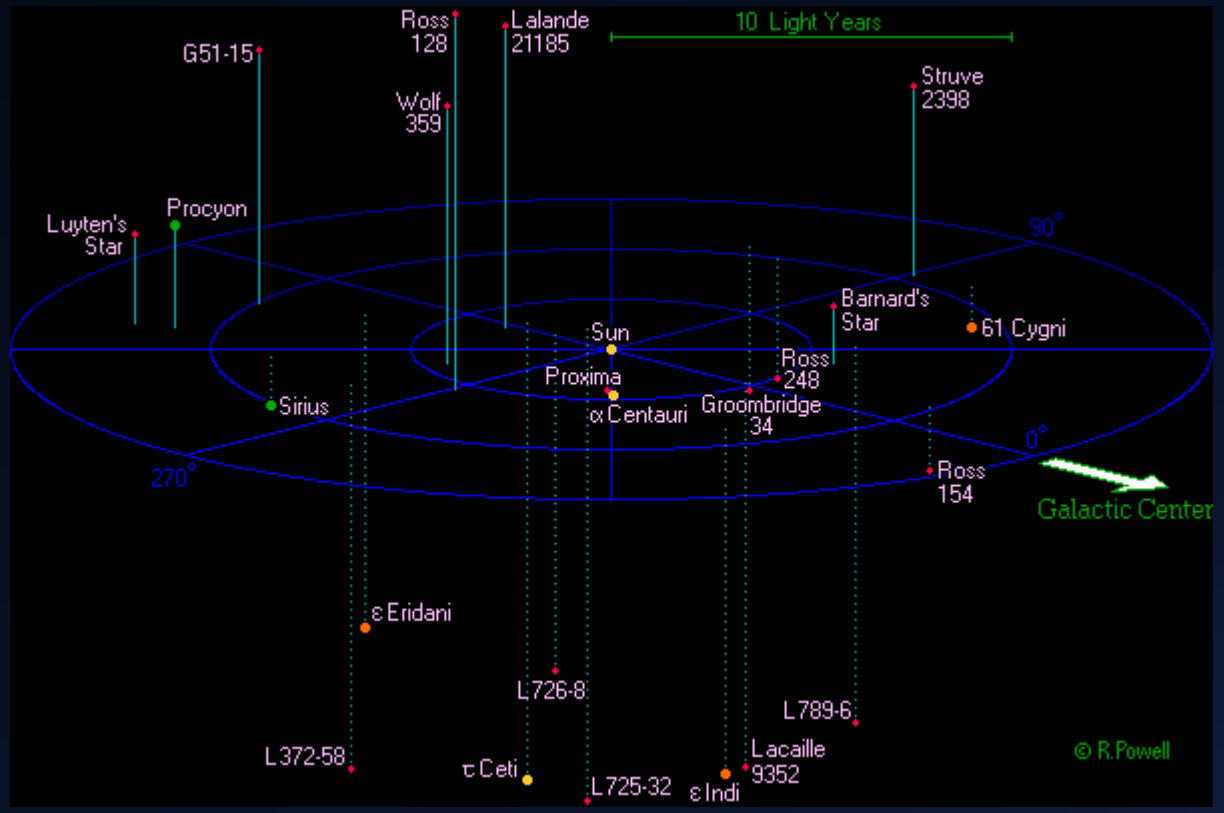
Солнечная система

И ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

Размеры Солнечной системы

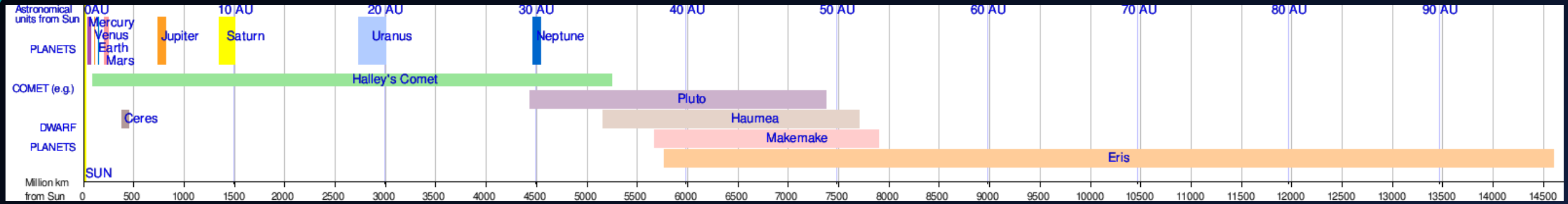
Большие планеты располагаются на расстояниях <30 а.е. от Солнца.

Однако гравитационное влияние Солнца простирается гораздо дальше.



Структура Солнечной системы

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



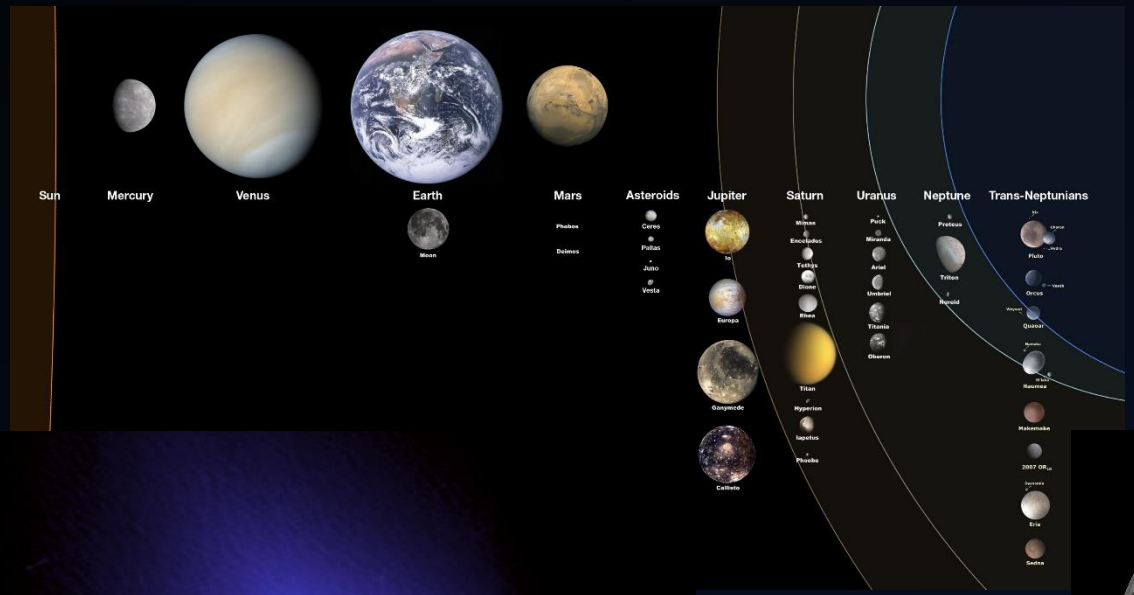
Параметры планет

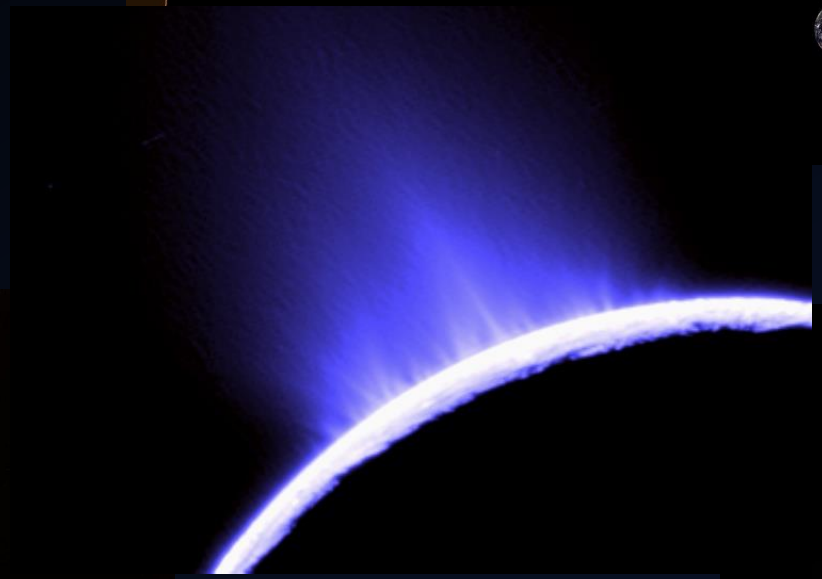
Планеты земной группы, газовые гиганты, ледяные гиганты, карликовые планеты (основной пояс астероидов и транснептуновые)

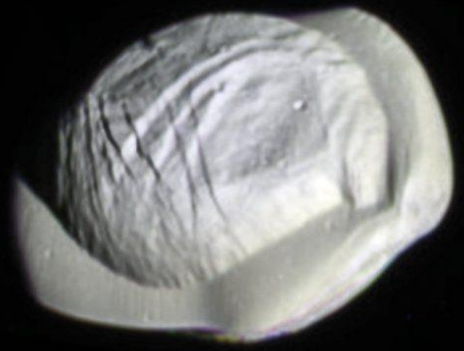
Планета (карликовая планета)	Диаметр, относительно	Масса, относительно	Орбитальный радиус, а. е.	Период обращения, земных лет	Сутки, относительно	Плотность, кг/м³
Меркурий	0,382	0,055	0,38	0,241	58,6	5427
Венера	0,949	0,815	0,72	0,615	243[130]	5243
Земля[131]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5515
Марс	0,53	0,107	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

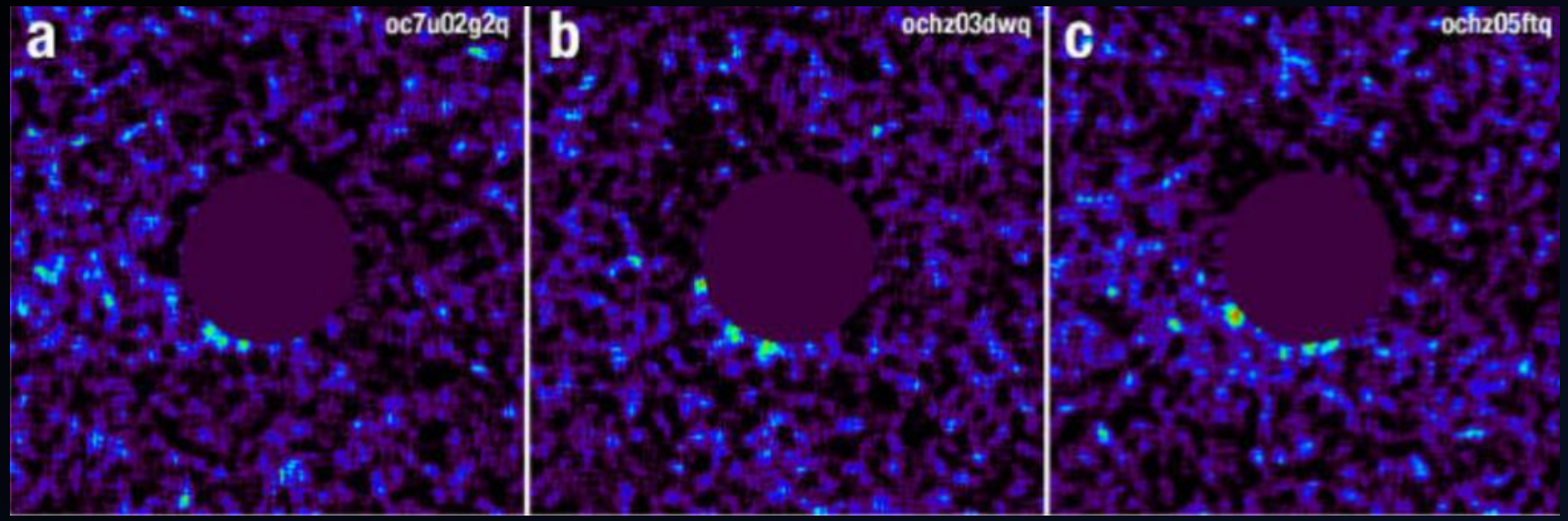
- Регулярные
- Иррегулярные
- «Особые» (Луна)

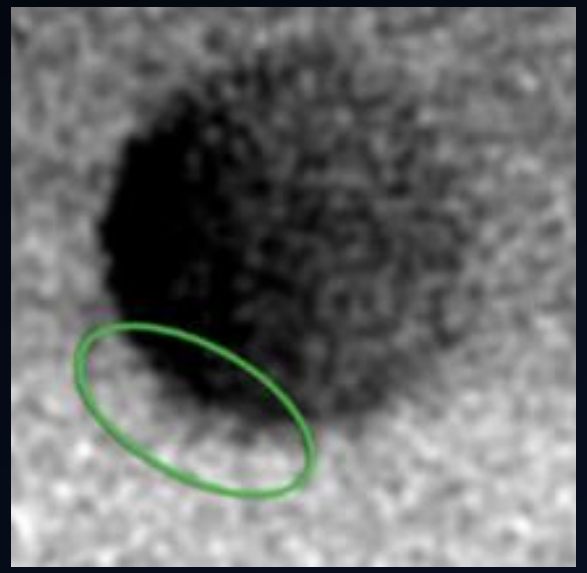






Водяные фонтаны на Европе



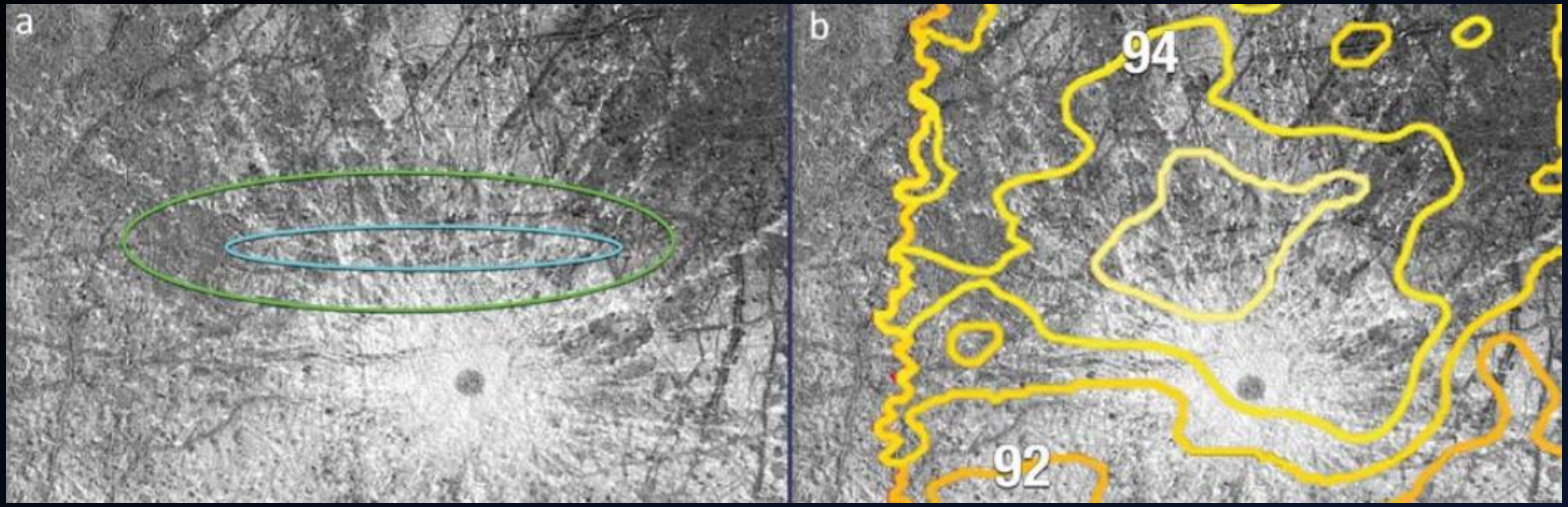


1609.08215

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.

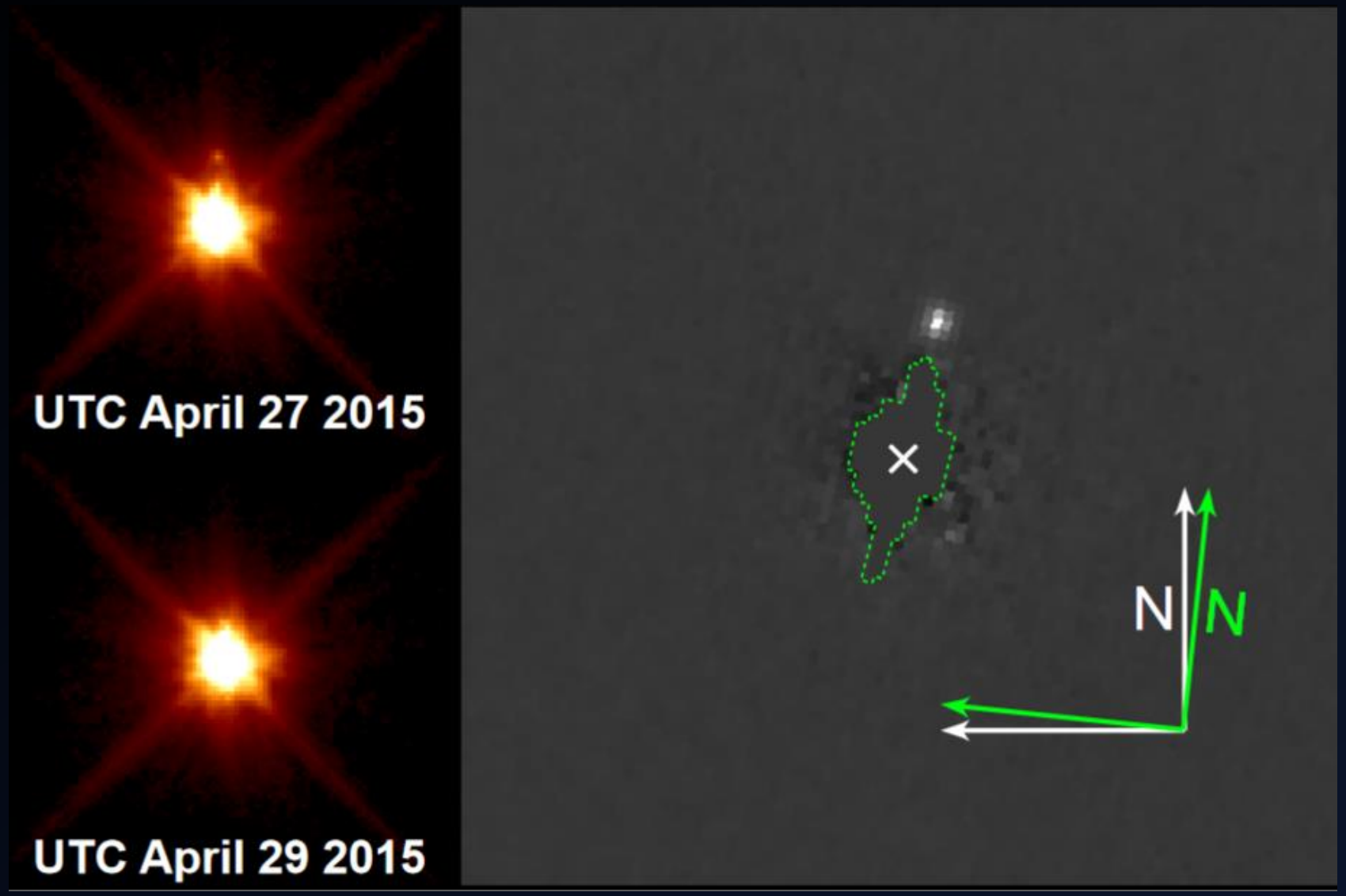
Криовулканизм на Европе



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

1704.04283

Спутник Макемаке



1604.07461

Теперь все четыре занептуновые карликовые планеты имеют спутники.

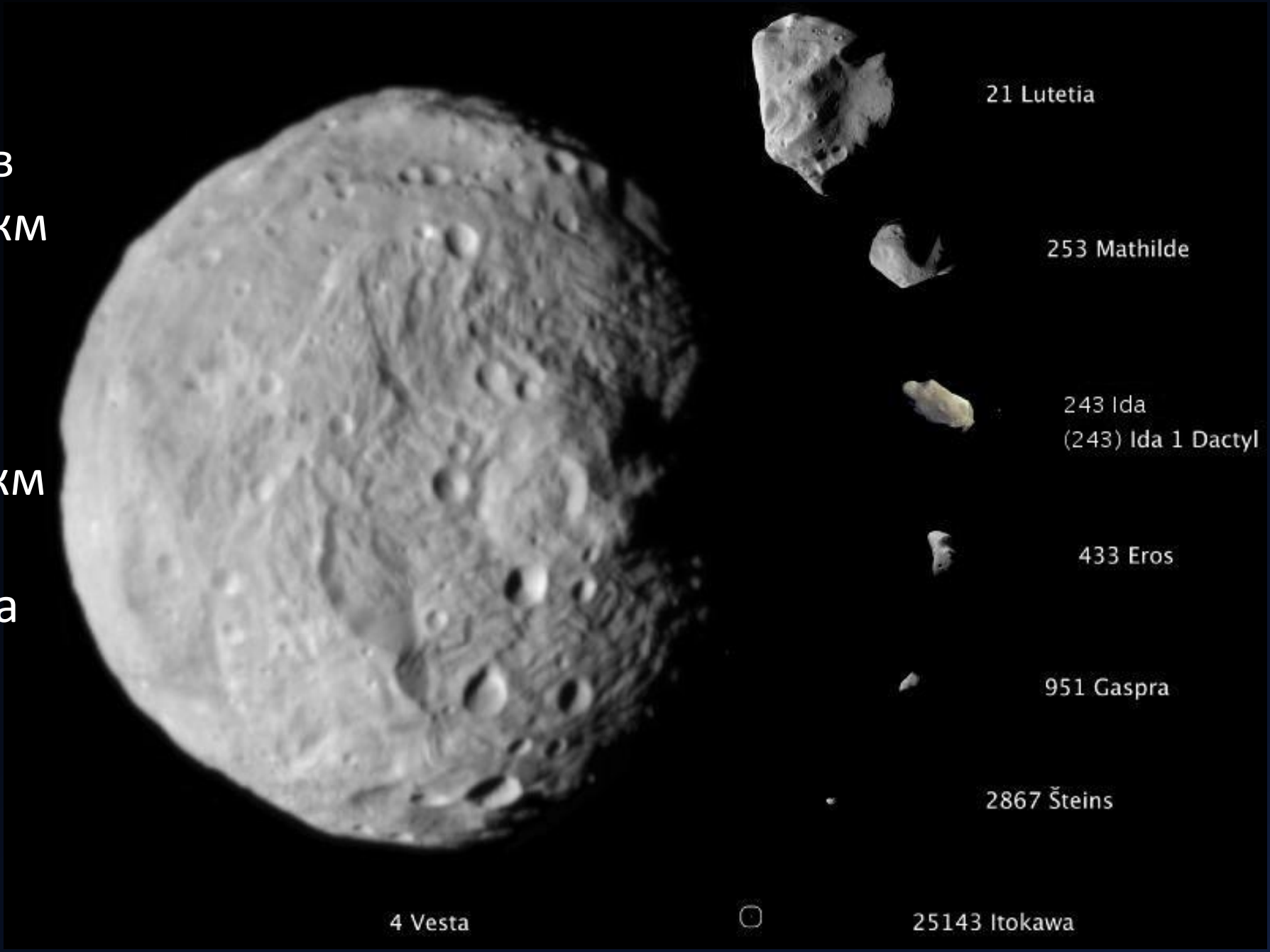
Астероиды

1-2 млн объектов
с размерами >1 км

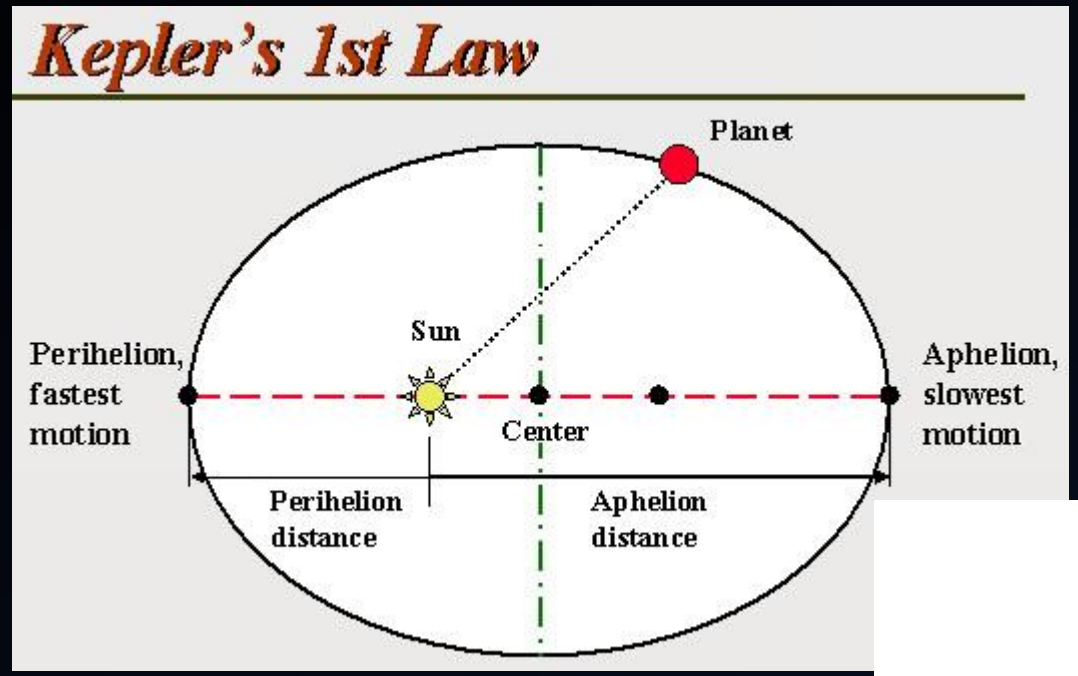
Известно <1 млн

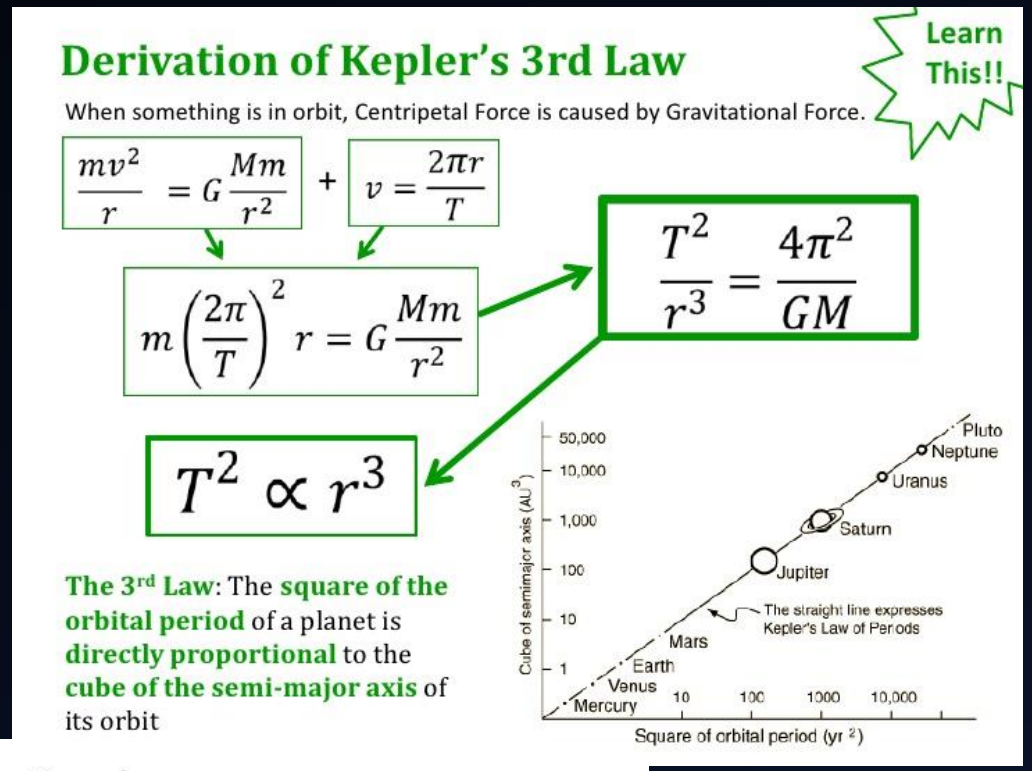
Диаметры <500 км

Суммарная масса
несколько % от
массы Луны

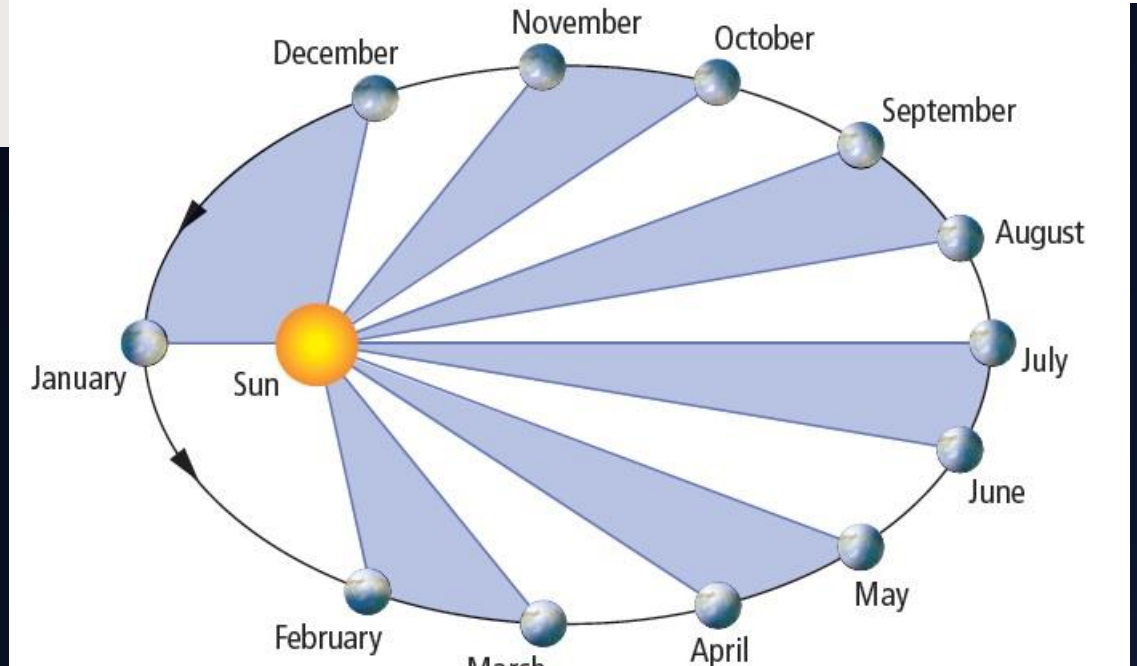


Законы Кеплера

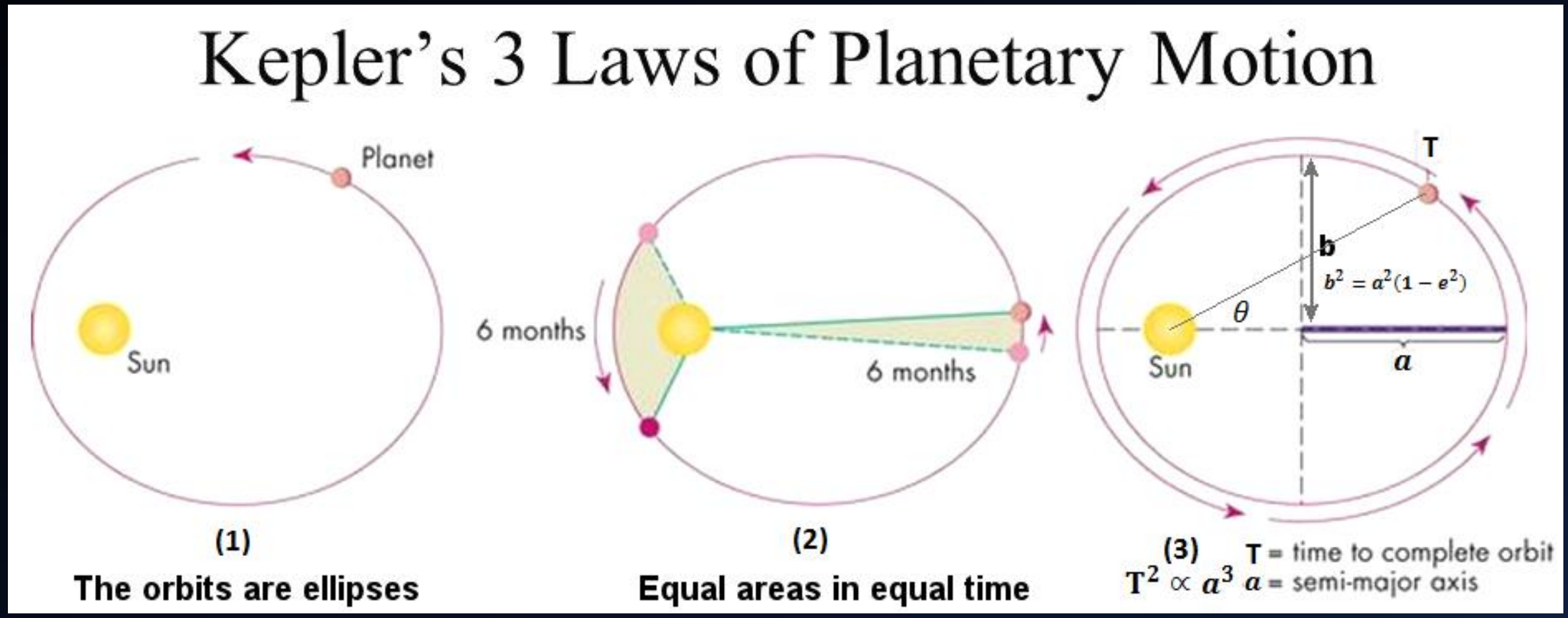




- Эллиптические орбиты
- Закон площадей
- Квадраты периодов vs. Кубы полуосей



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



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

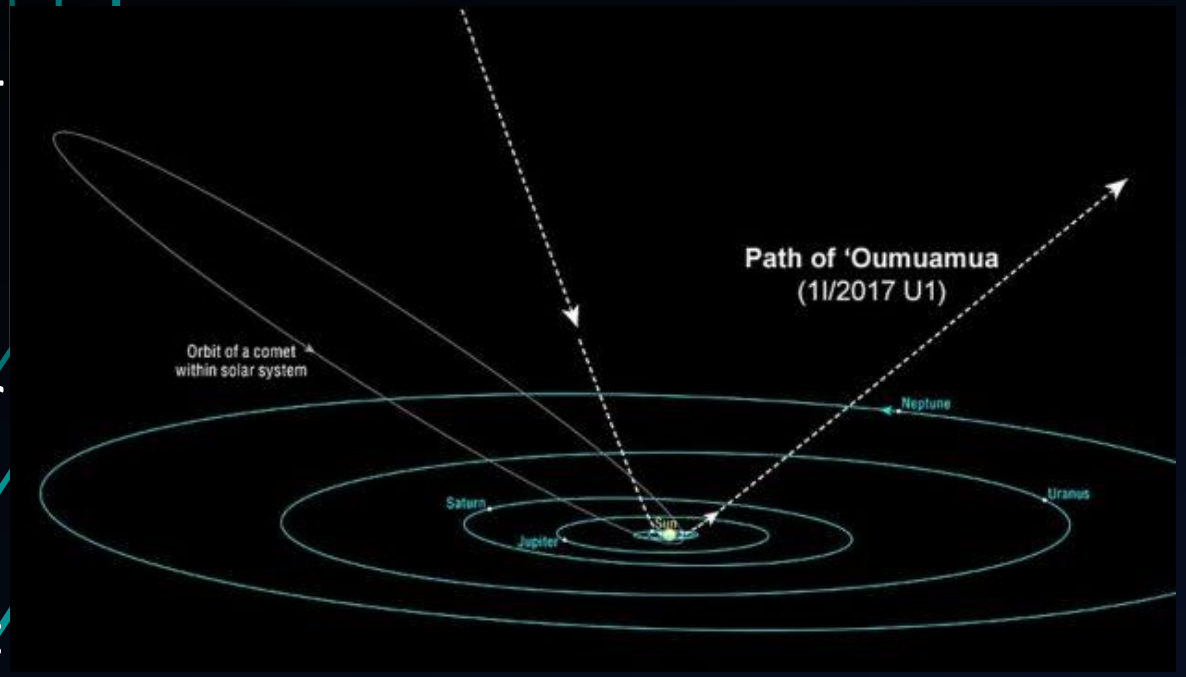
R=2.95 км (M/Msolar)

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

Частота излучения = 2/T

Длина волны =cT/2

Оумуамуа – первый межзвездный

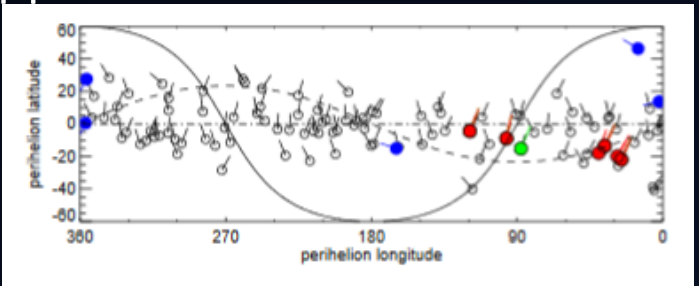


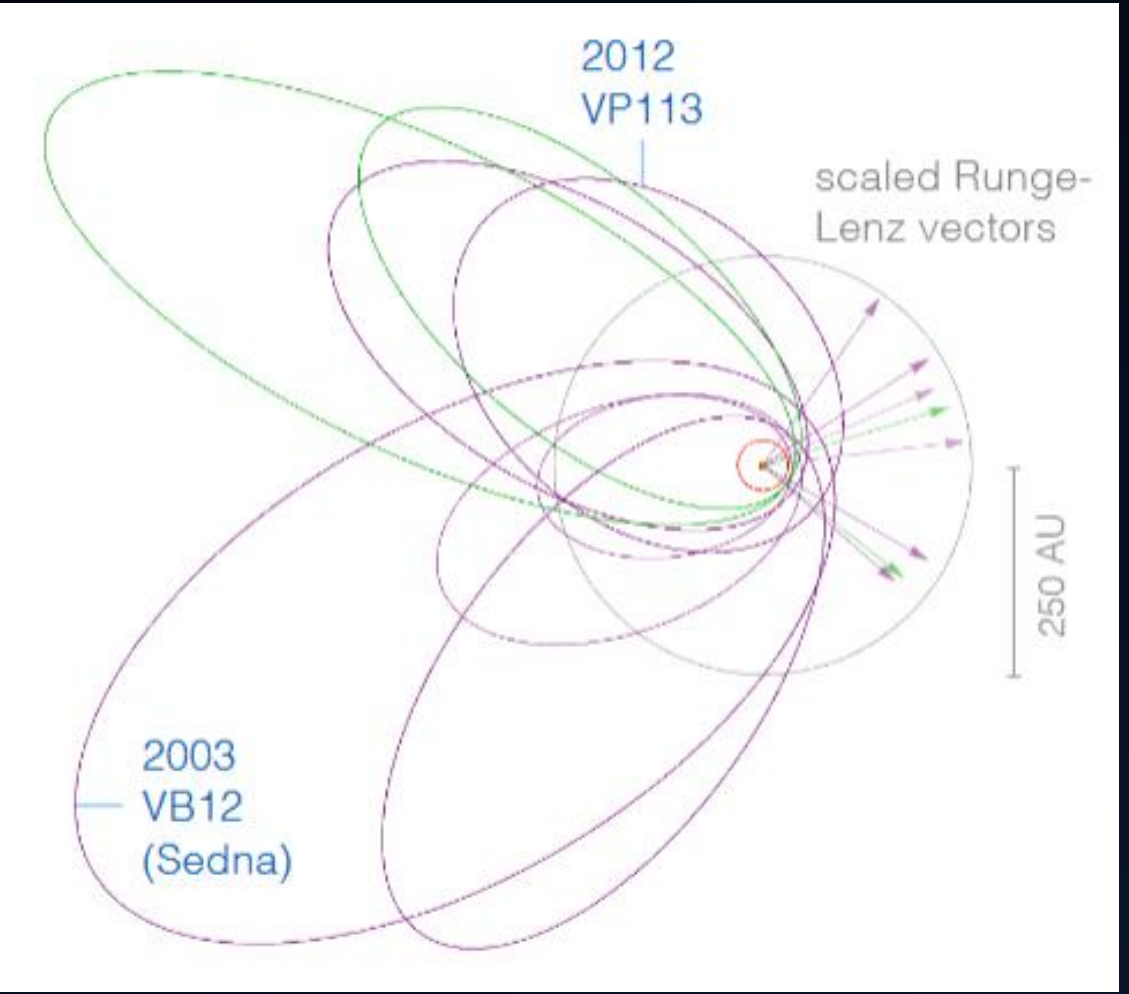
http://www.skyandtelescope.com

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.

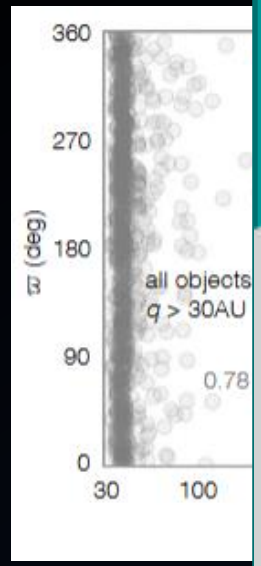


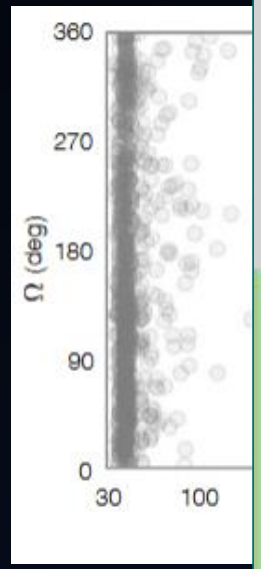


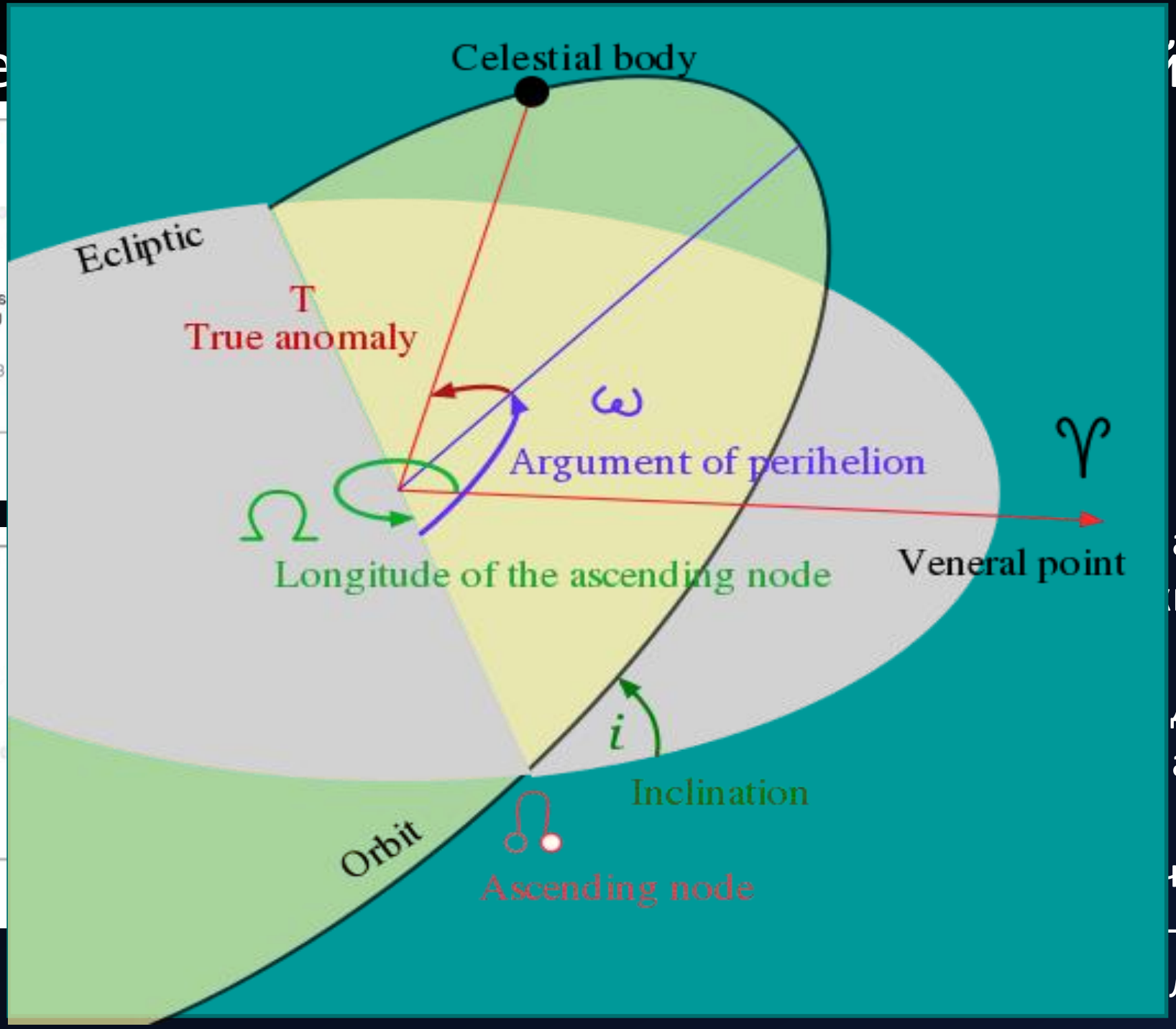
1601.05438, 1603.05712

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.

Кластер й планеты







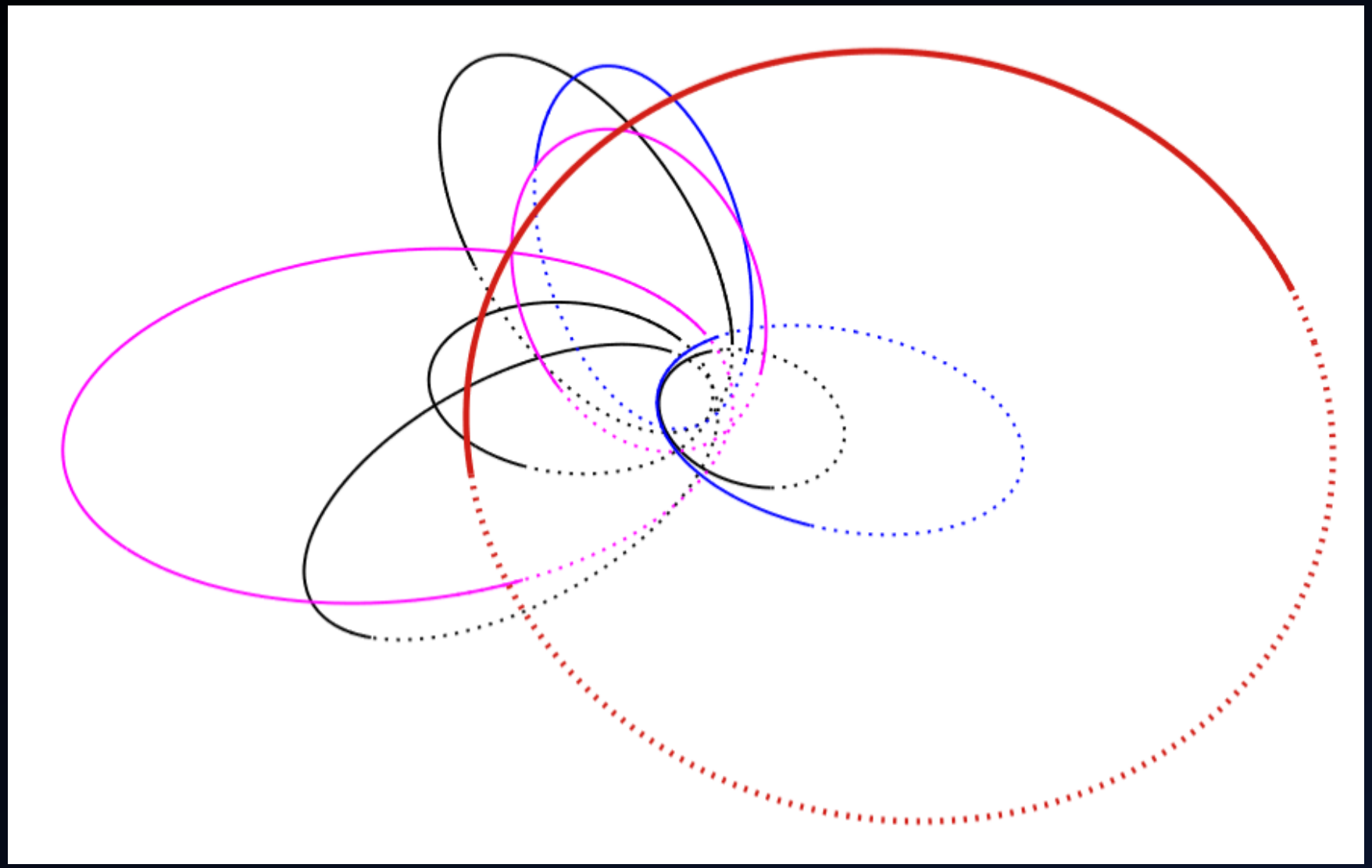
ая с Седны,
ки.

дения
а.

чить
нет или
лнца.

1601.05438

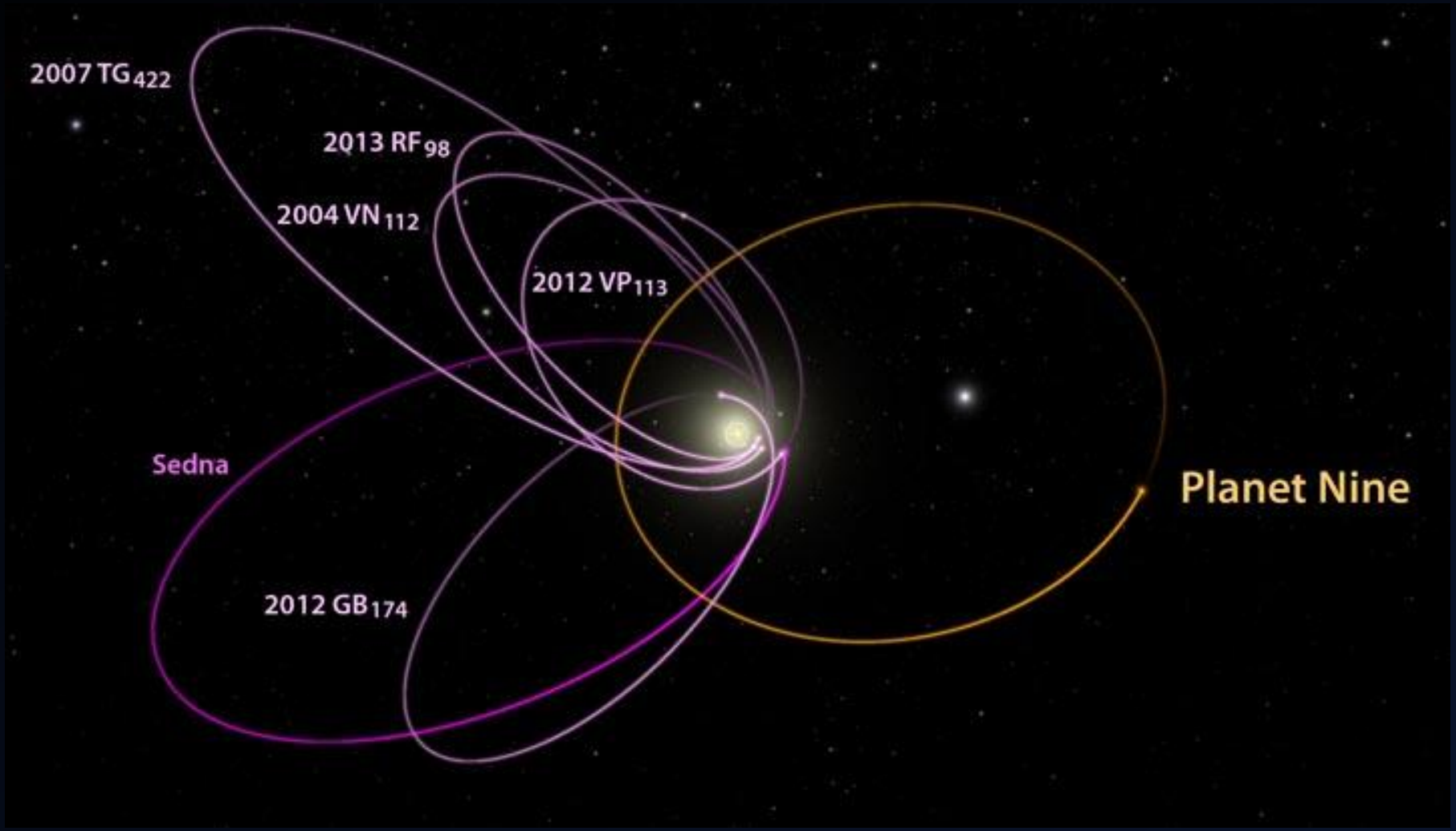
Новые открытия



1608.08772

В 2016 г. были сделаны новые открытия, подтверждающие модель с девятой планетой.

«Будем искать….»



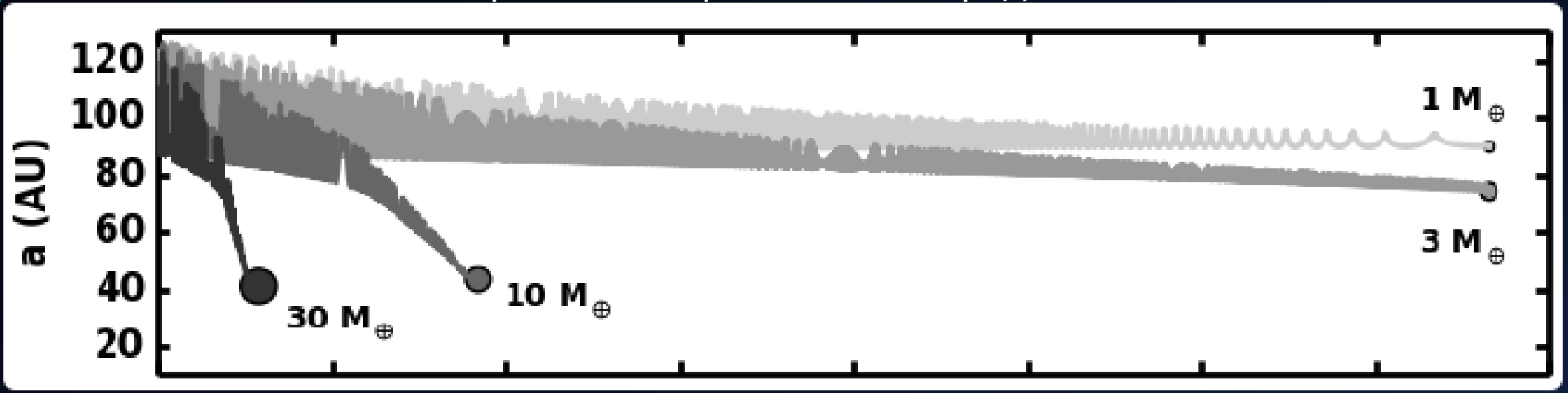
skyandtelescope.com

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

Судьба рассеянных планет

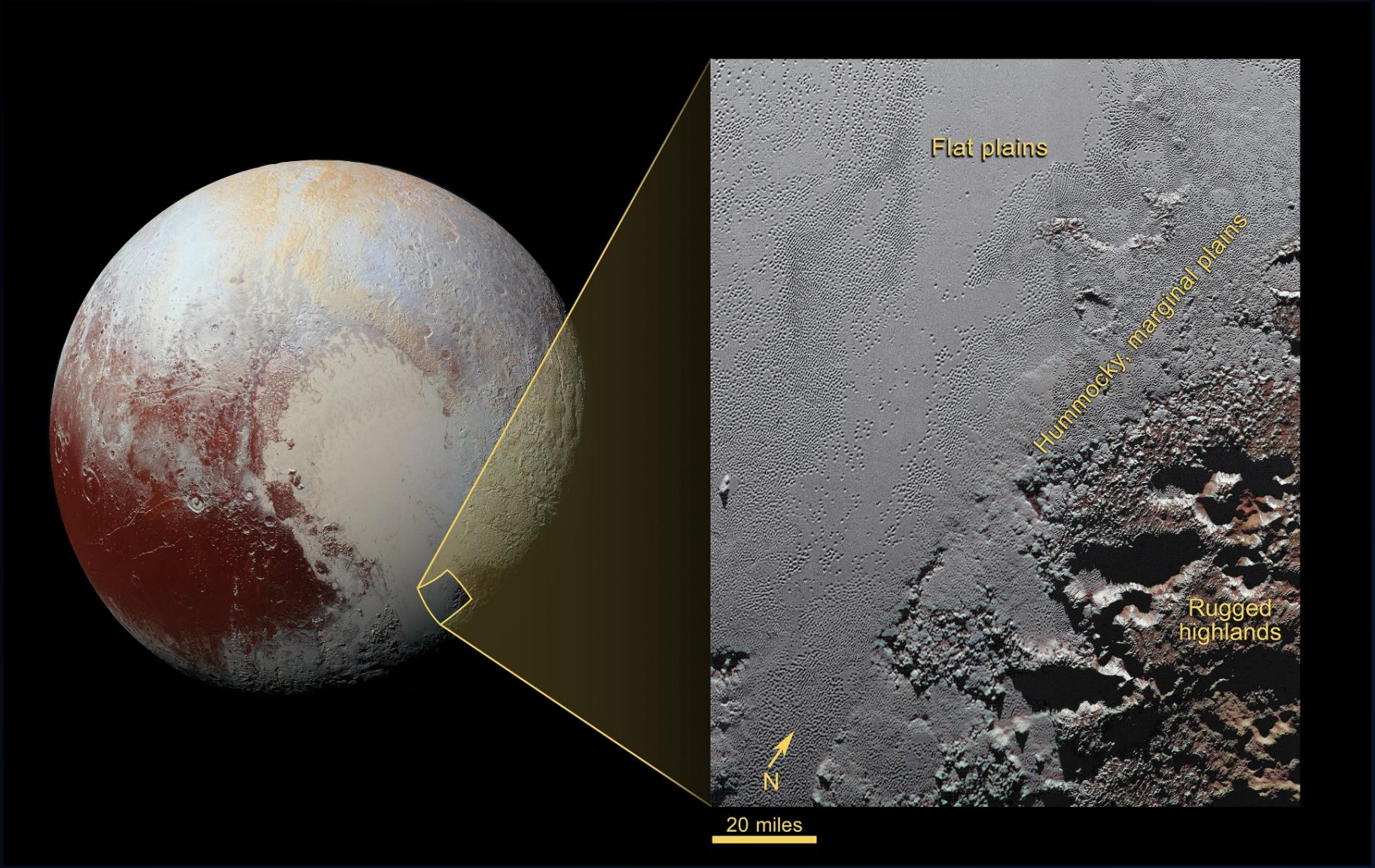
Взаимодействие тел в протопланетном диске может приводить к выбрасыванию на далекие внешние орбиты достаточно крупных тел. Орбиты самых массивных рассеянных тел быстро становятся круглыми. А вот легкие могут оставаться на вытянутых орбитах.

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



1410.2816

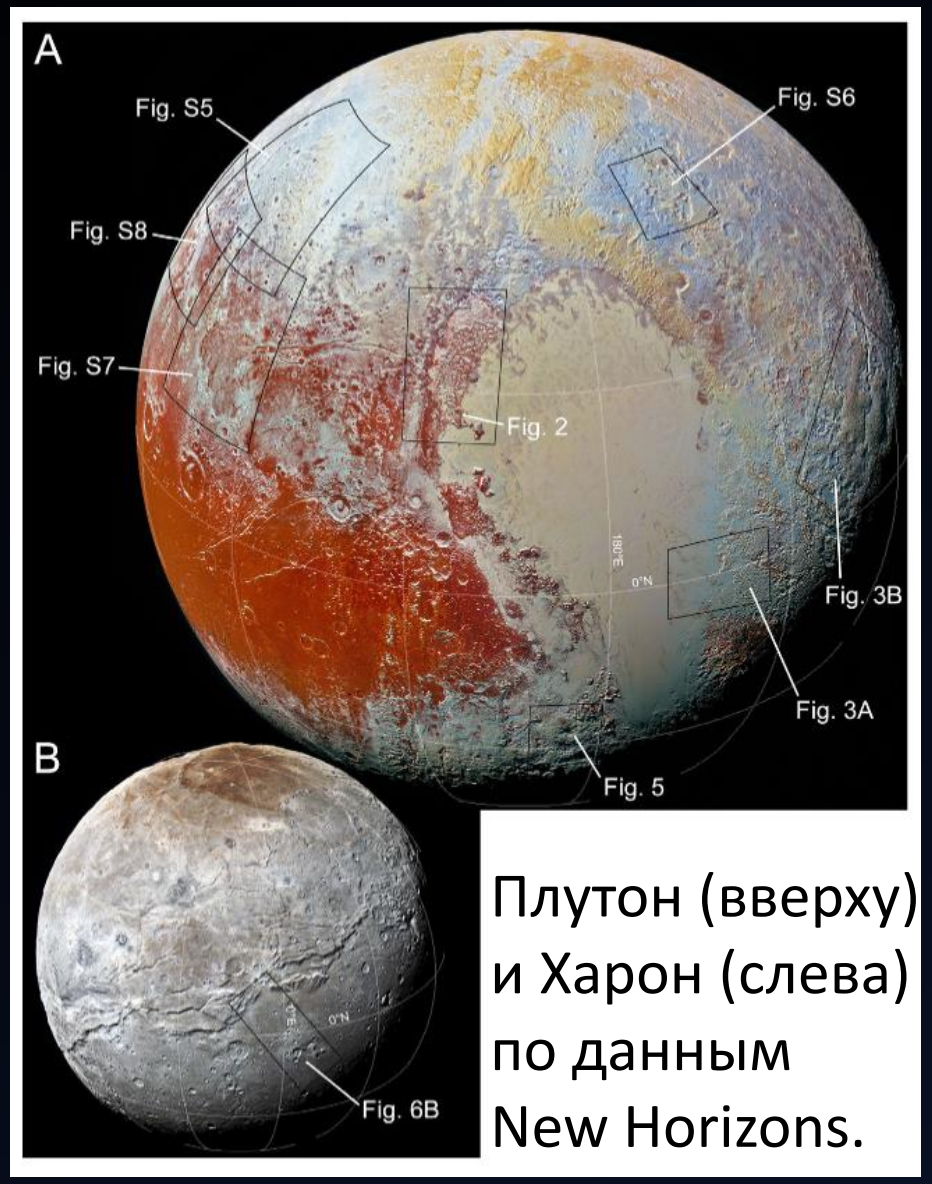
New Horizons



Первые подробные снимки поверхности Плутона и его спутников.

www.nasa.gov

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.

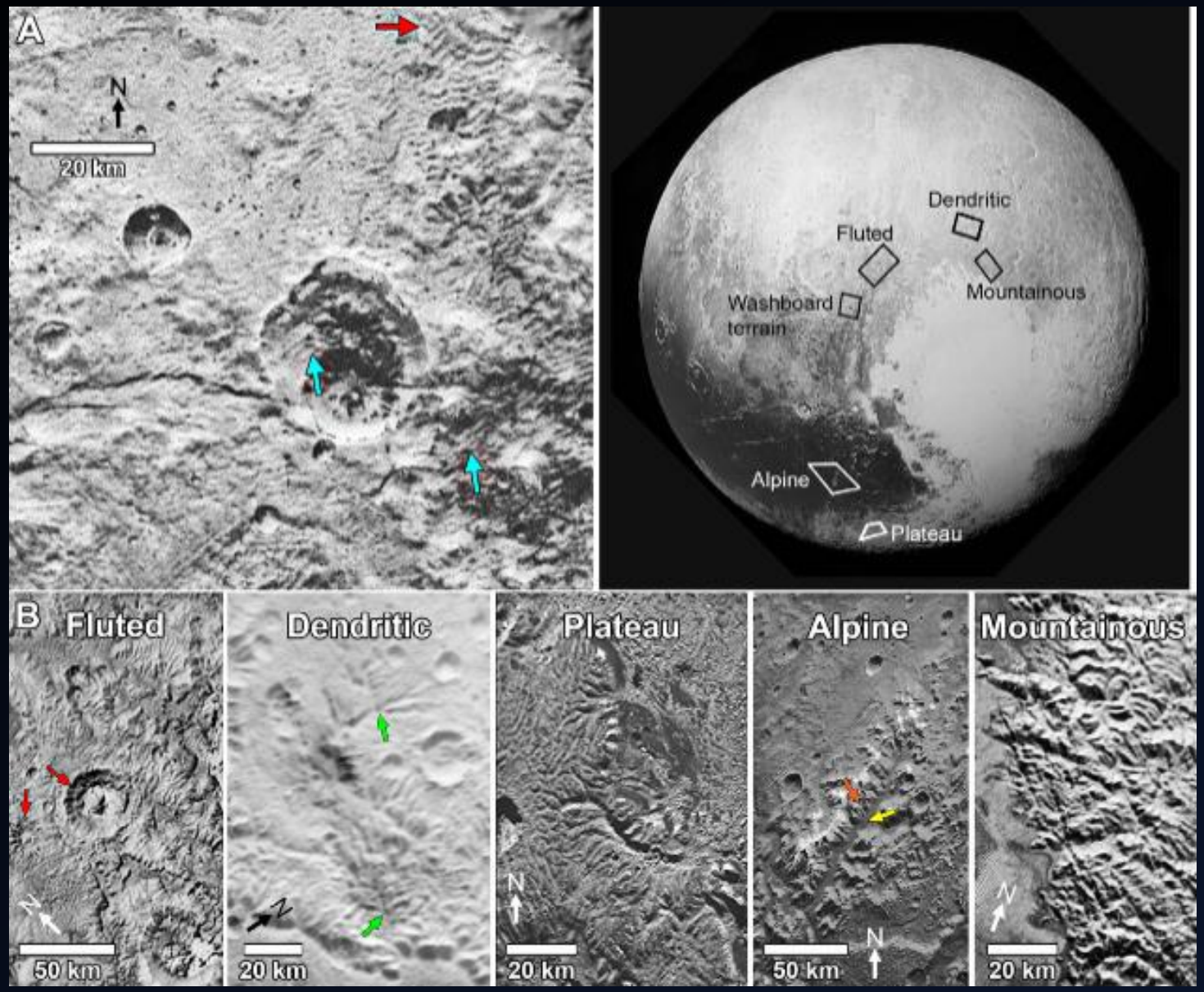
Столь детальные снимки позволяют делать выводы об истории формирования различных структур на поверхности и об их составе.

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).

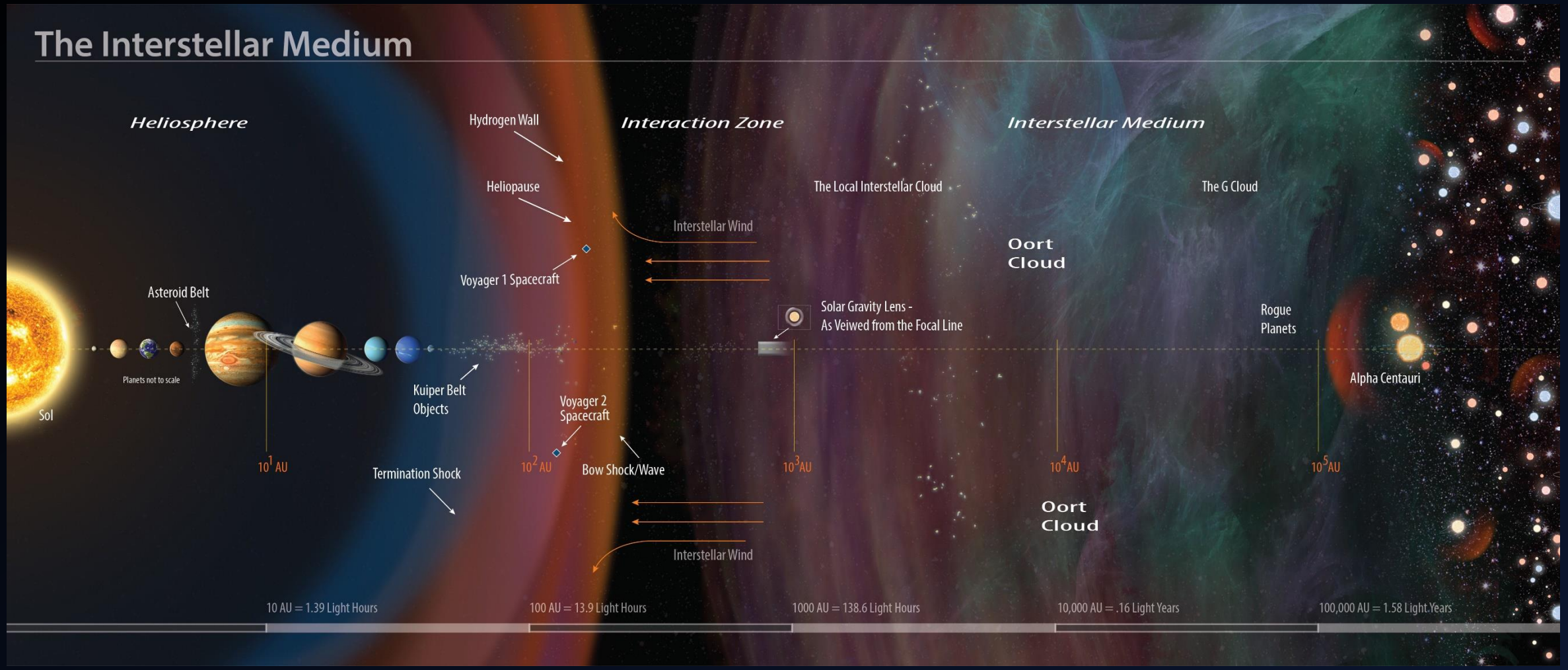
1604.05702

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.

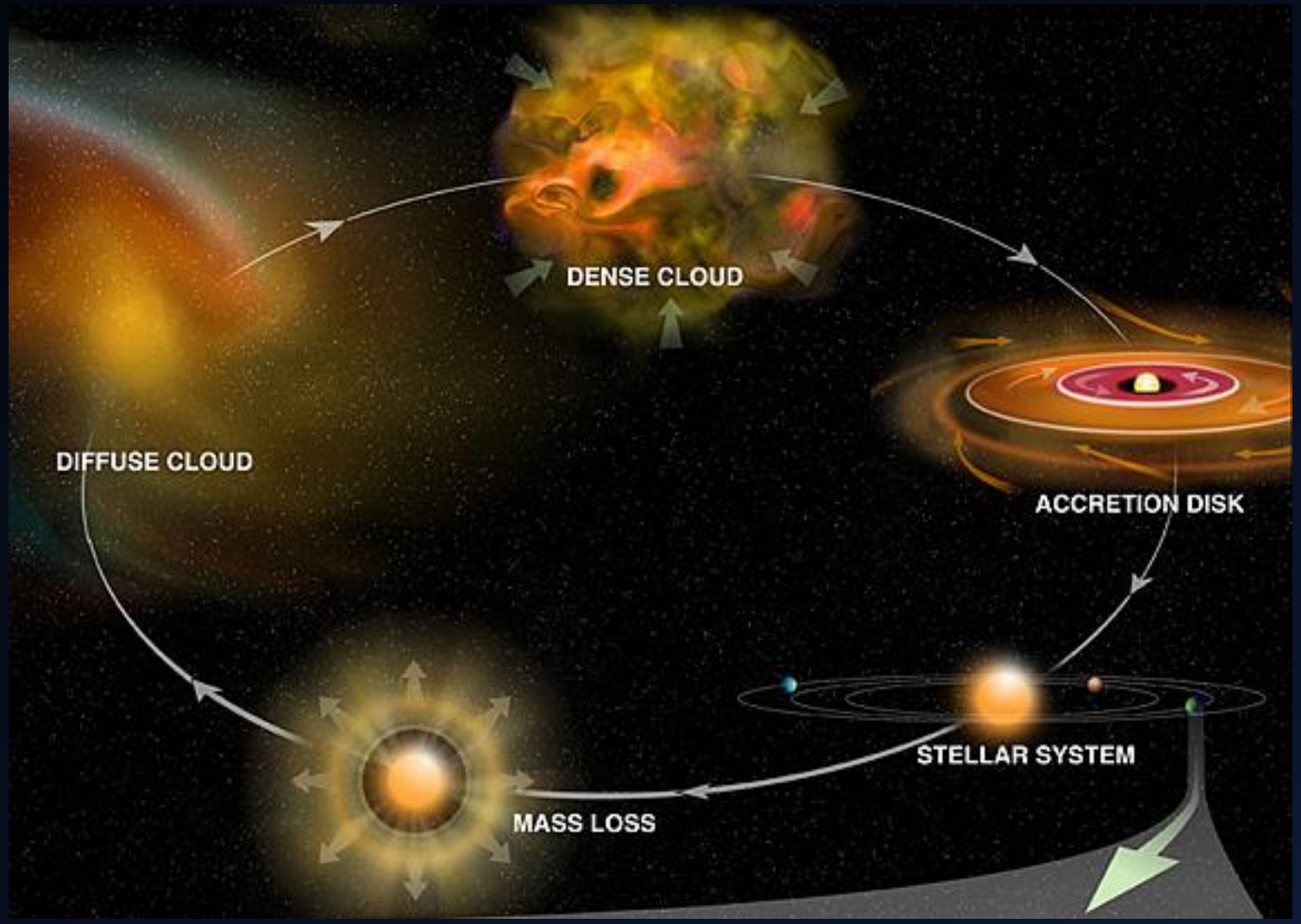
Галактический спиралеворот

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.

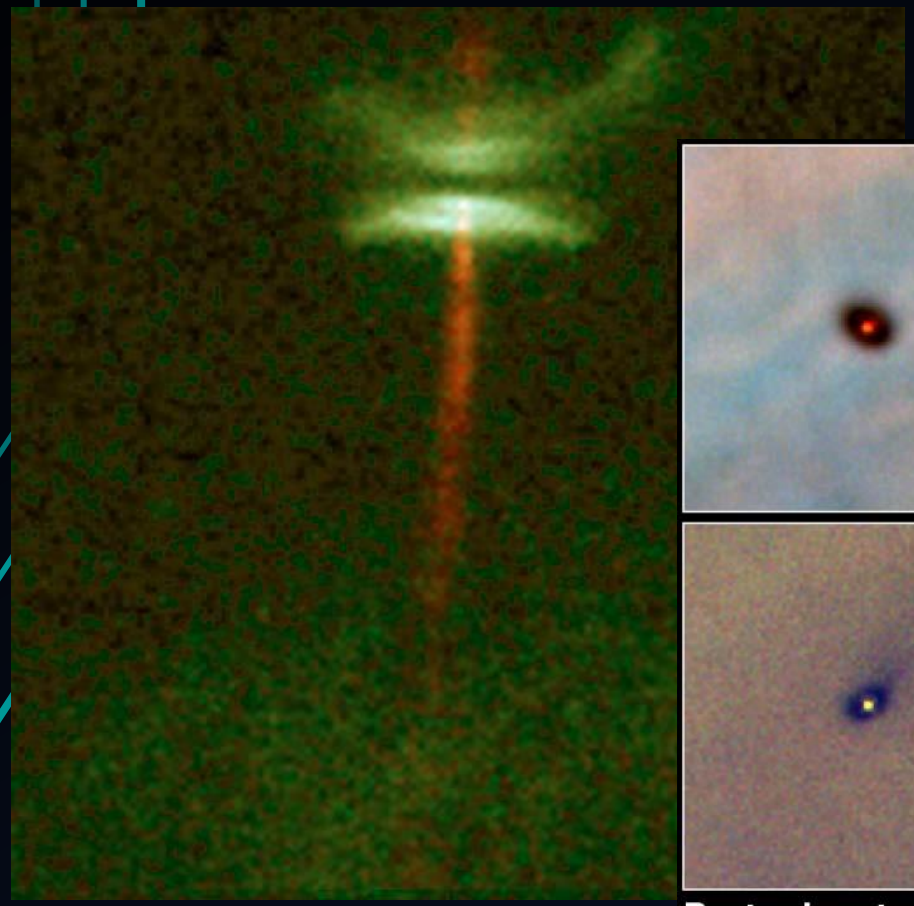
Наконец, появилась жизнь.

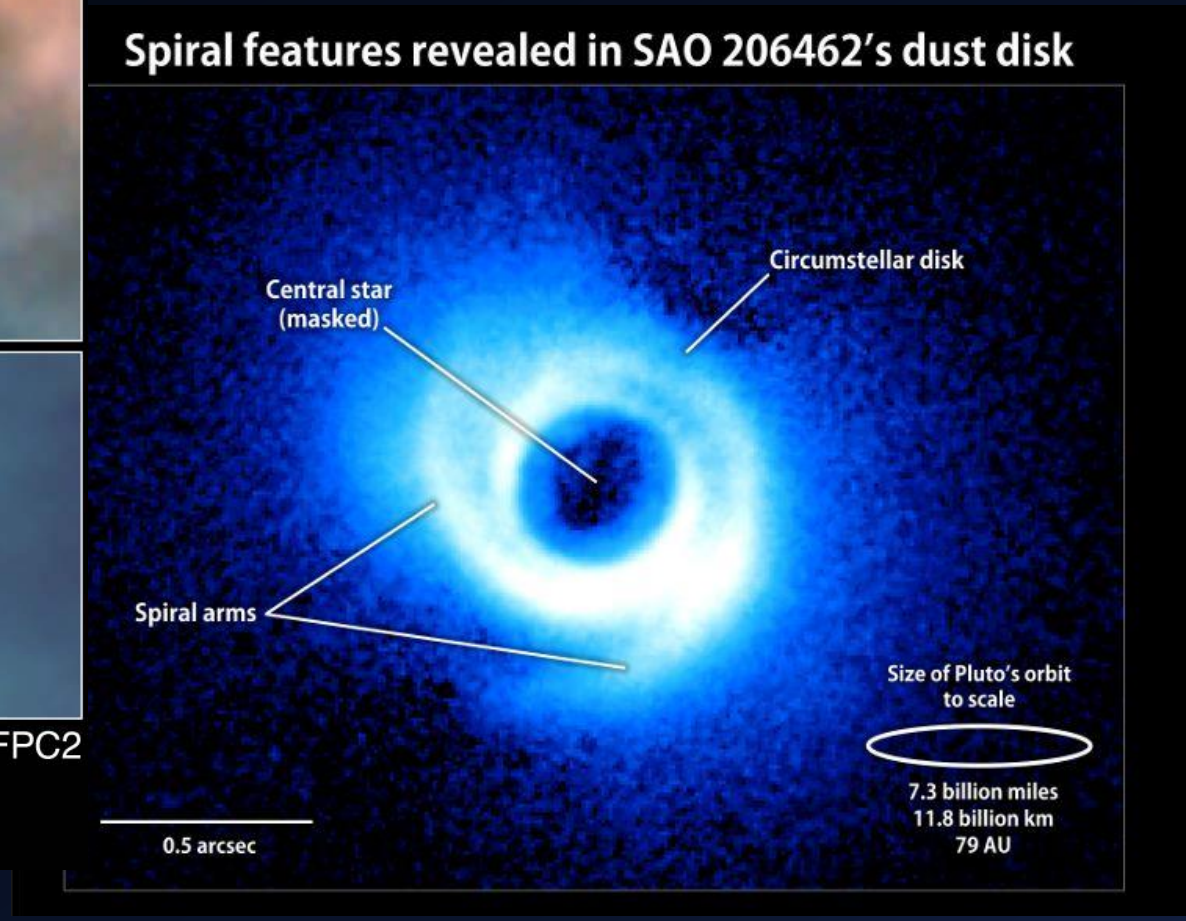


http://spaceref.com/onorbit/the-stuff-of-life-comes-from-space.html

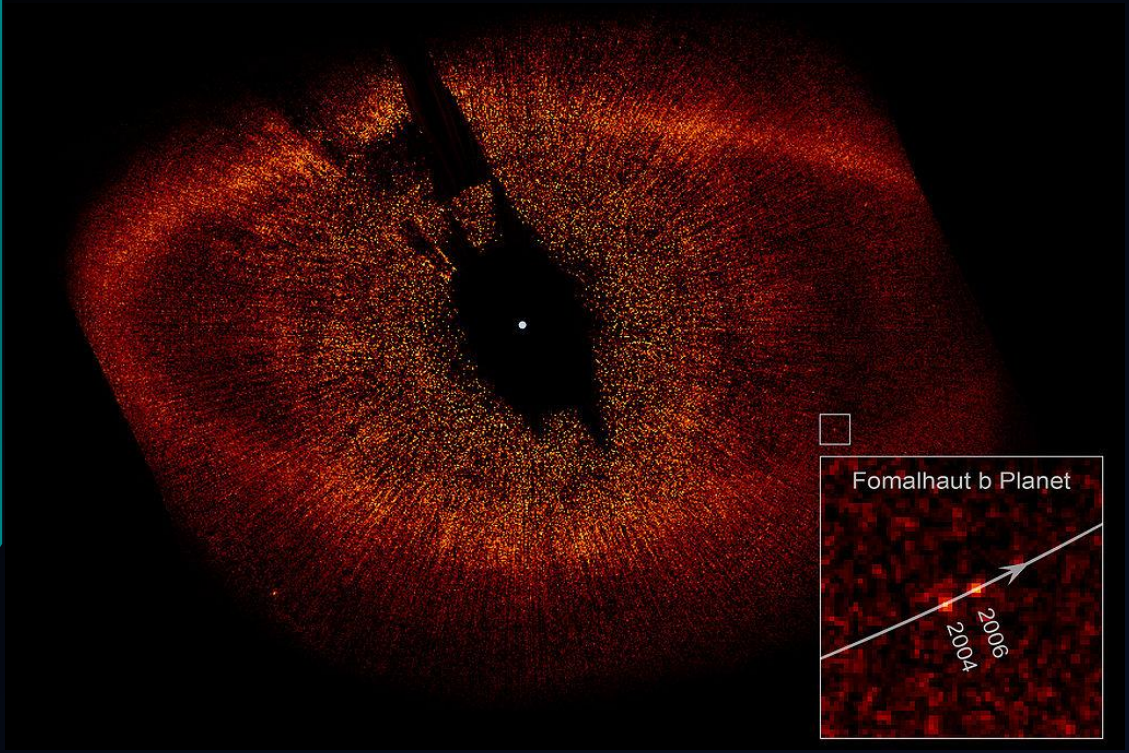
Протопланетные диски

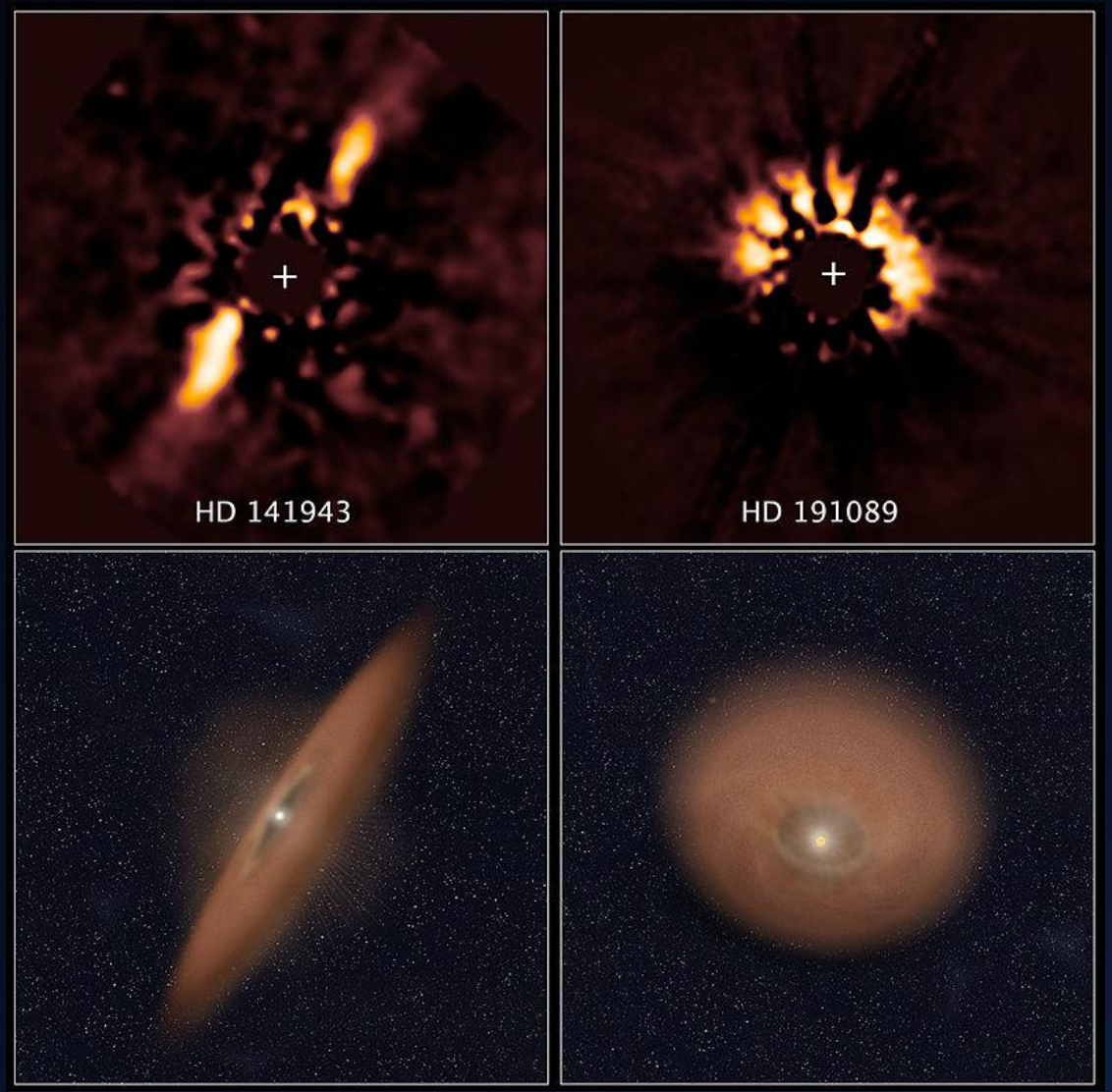
Мы видим, как образуются планеты и звезды. В некоторых случаях удается даже рассмотреть структуру протопланетных дисков.





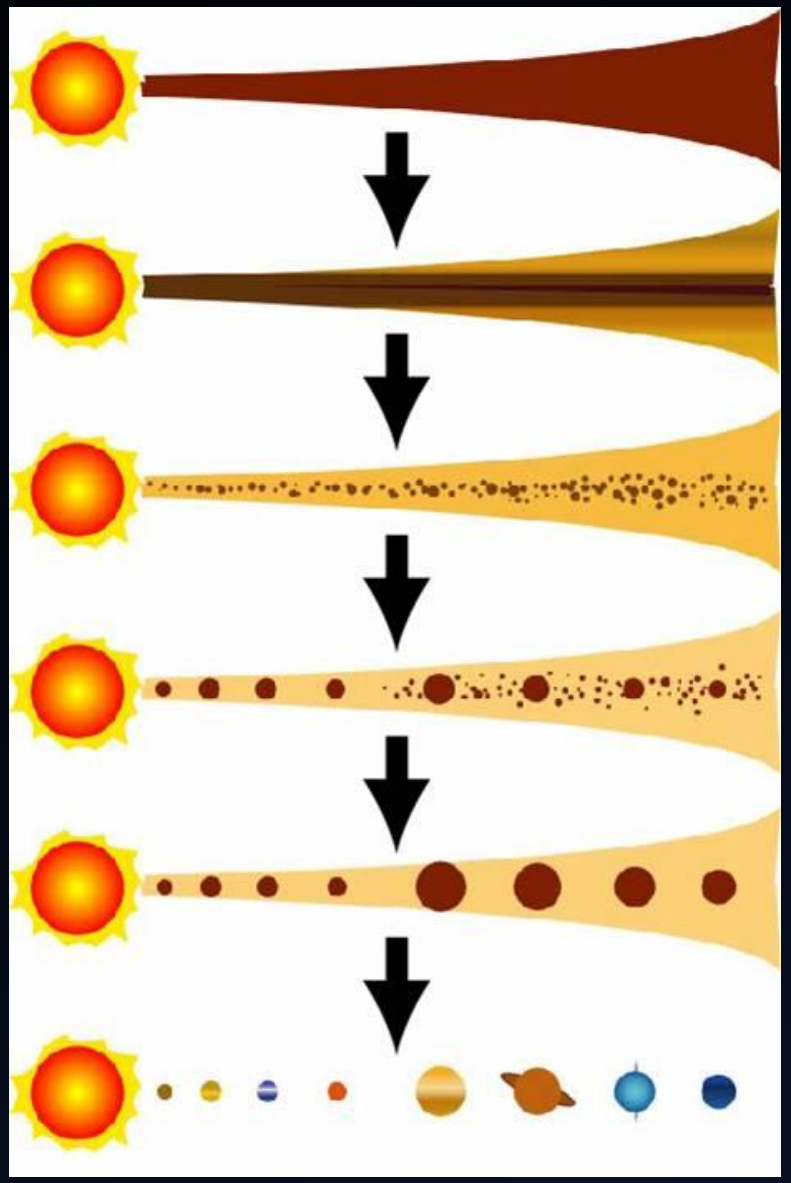
Остаточные диски





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:

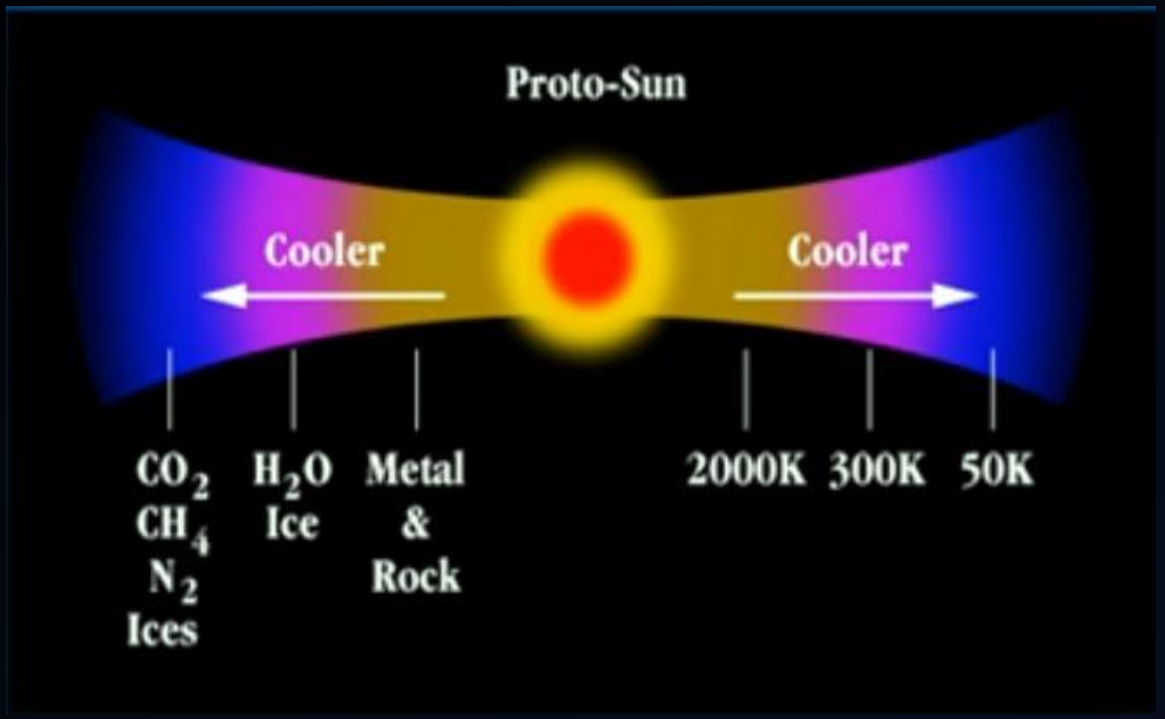
а) возникает звезда и диск вокруг нее
б) в диске начинается слипание пылевых частиц
в) постепенно из них образуются планетезимали
г) крупные планетезимали растут, поглощая мелкие
д) наконец, остаются крупные планеты.

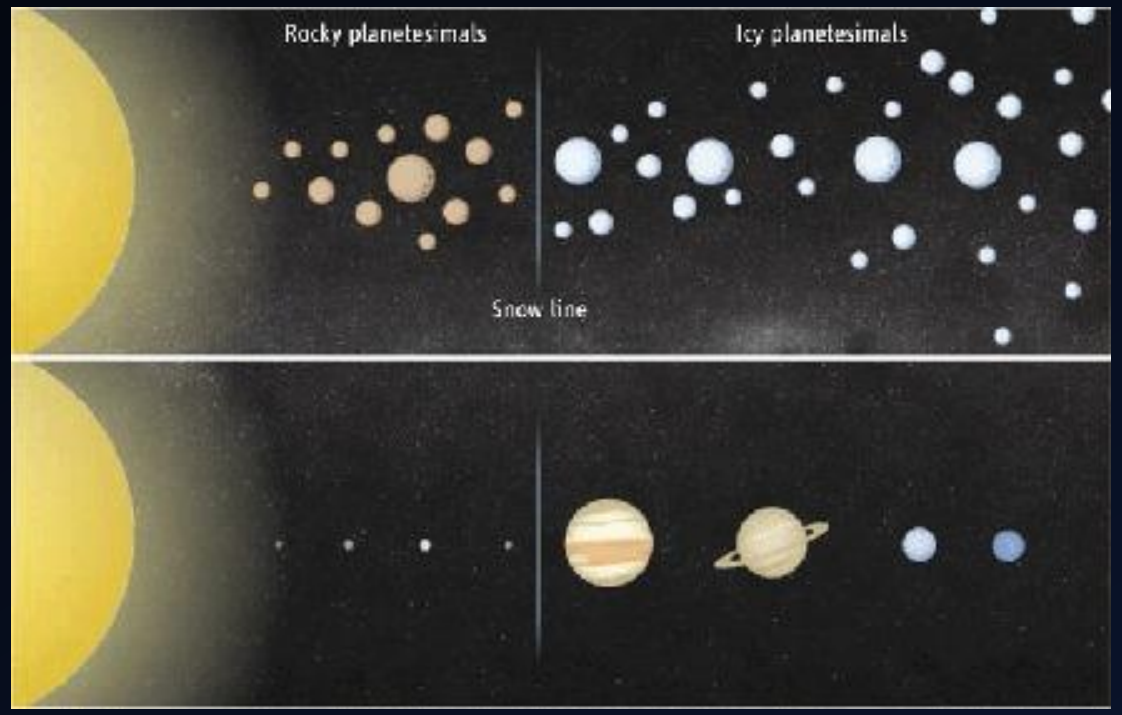
Все планеты стоят примерно на своих местах:

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

Эта картина усложнилась с открытием экзопланет.

Снеговая линия



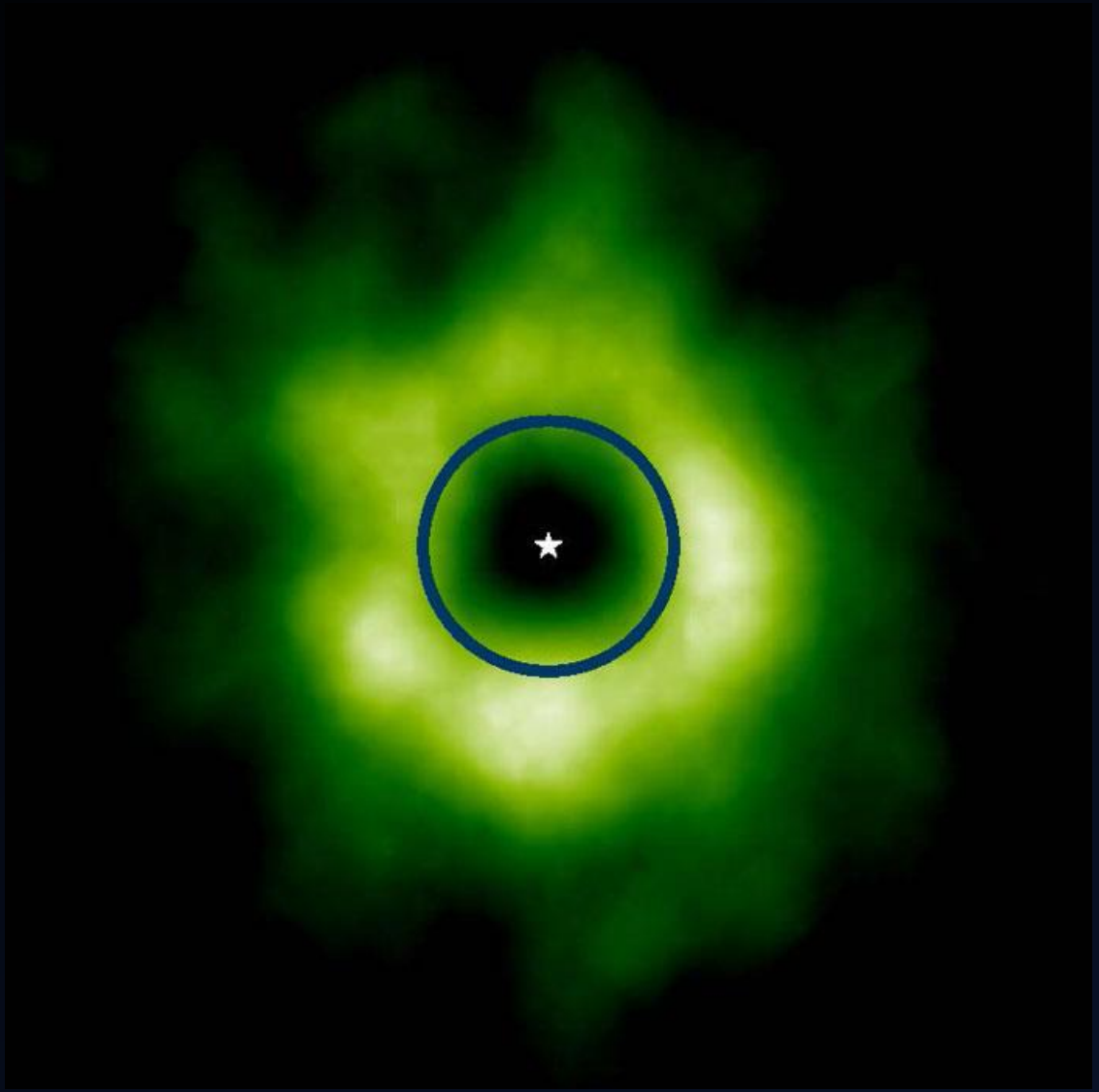


Вблизи звезды жарко, поэтому лед не может существовать.
Там образуются каменные и железно-каменные тела.

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

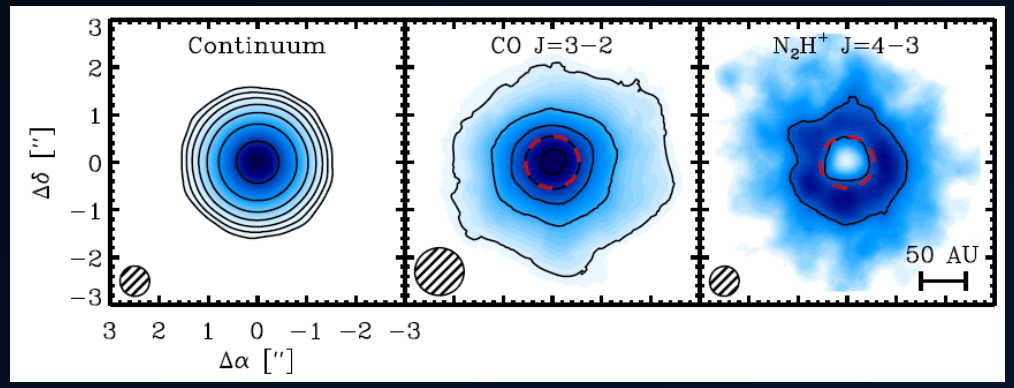
Однако, ледяные объекты после образования могут попасть ближе к звезде, а каменные могут быть выброшены во внешние области системы.

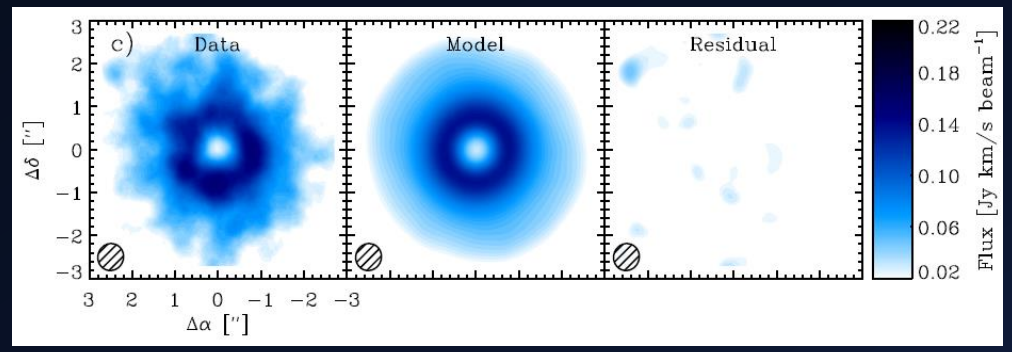
TW Гидры: наблюдения на ALMA



Замерзание CO

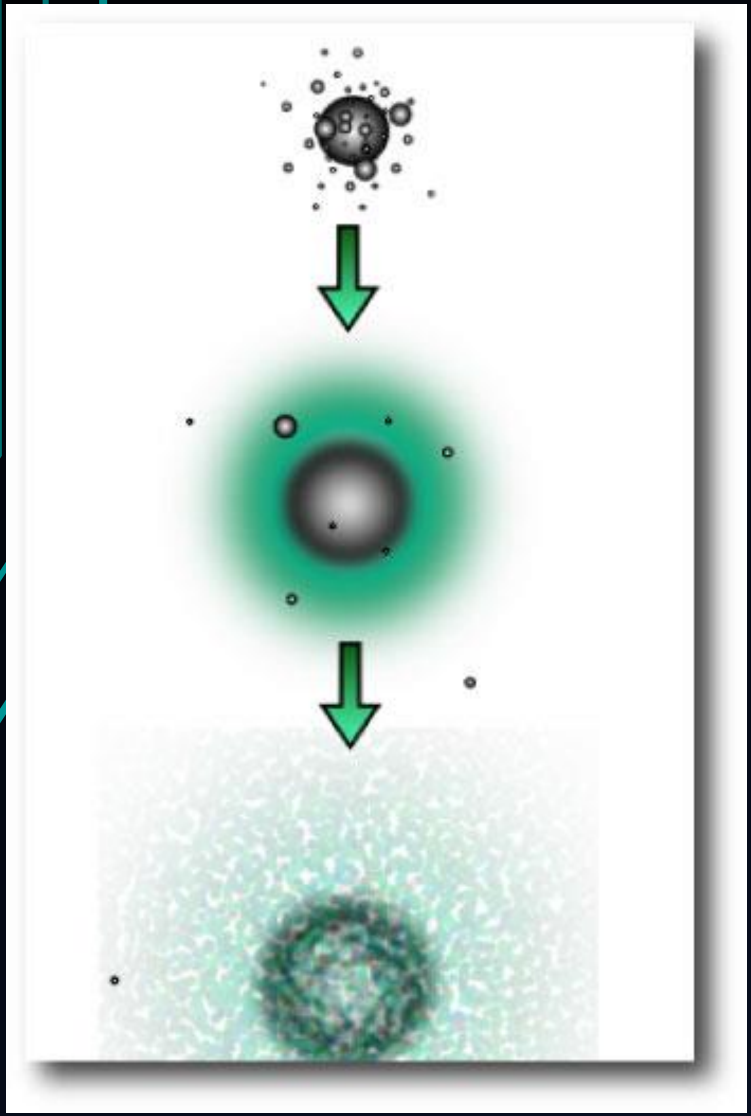
Наблюдали излучение ионов N_2H^+
Они обильны,
только если CO вымерз.

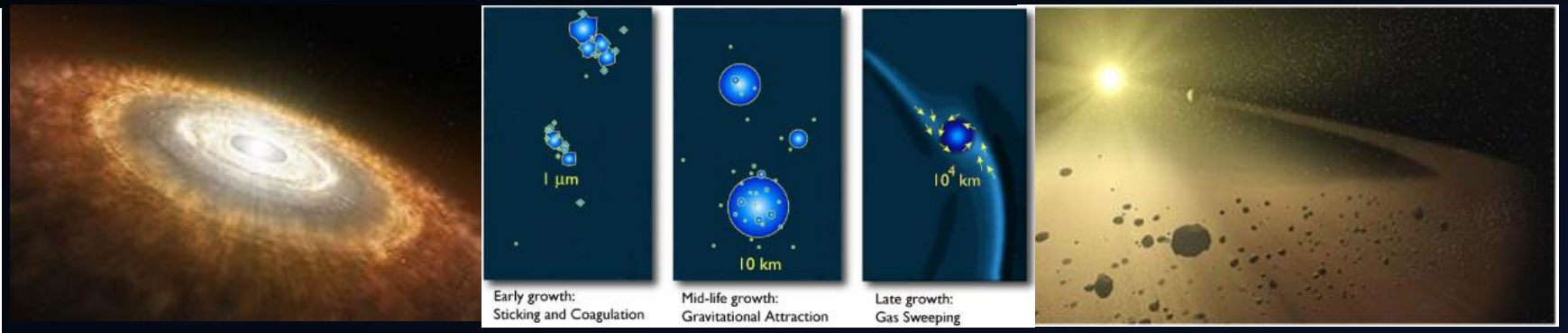




1307.7439

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.

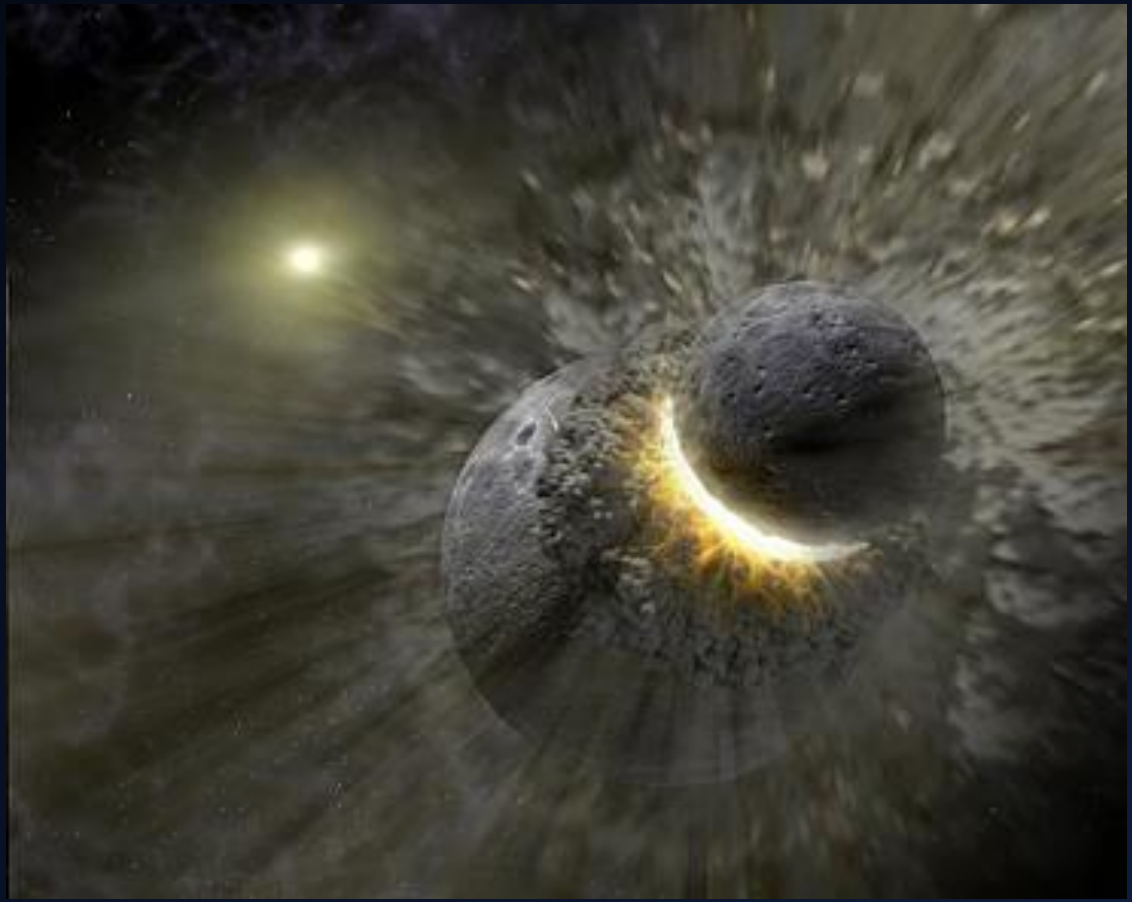
От километров до Земли

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.

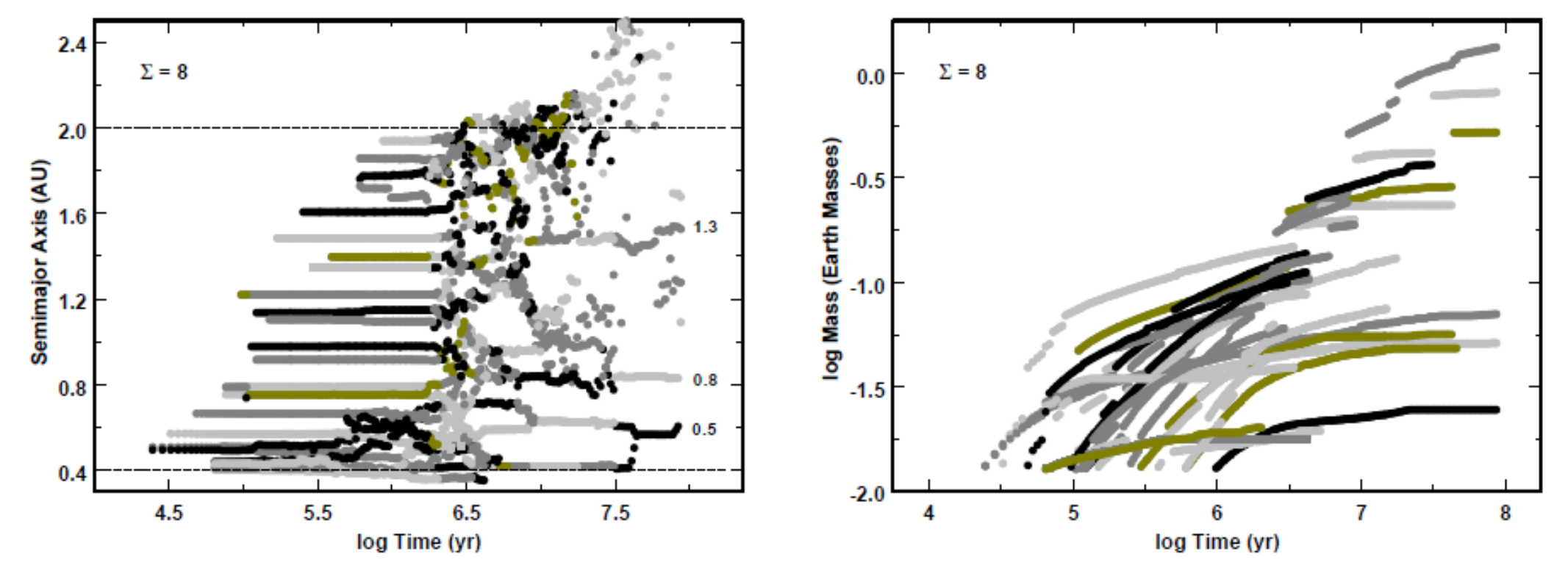
Дальше, чтобы стать Юпитером,
надо набирать газ.



http://phys.org/news/2010-12-earth-growth-spurt.html

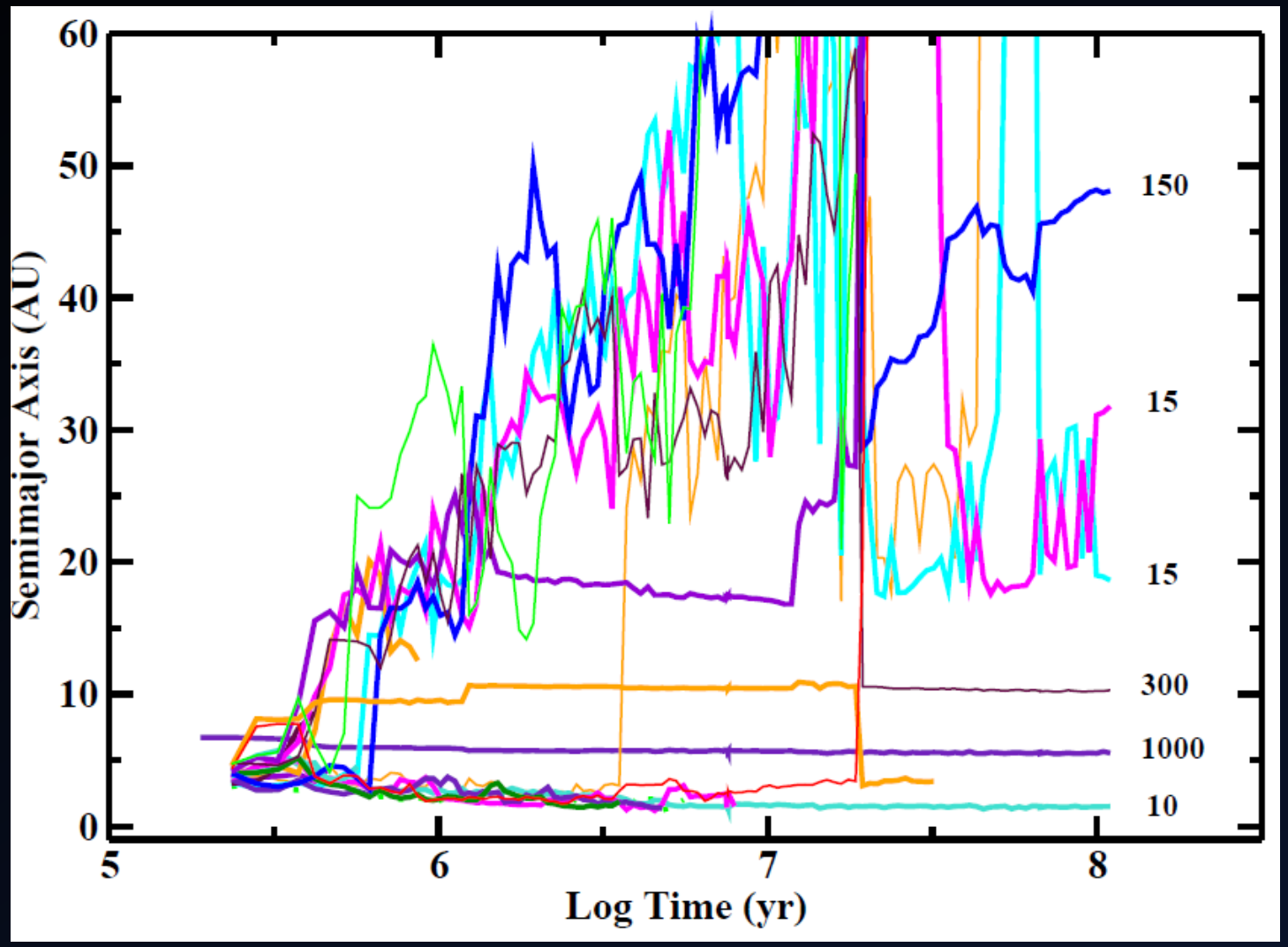
Олигархический рост планетезималей

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.



1206.0738

Эволюция орбит ледяных олигархов

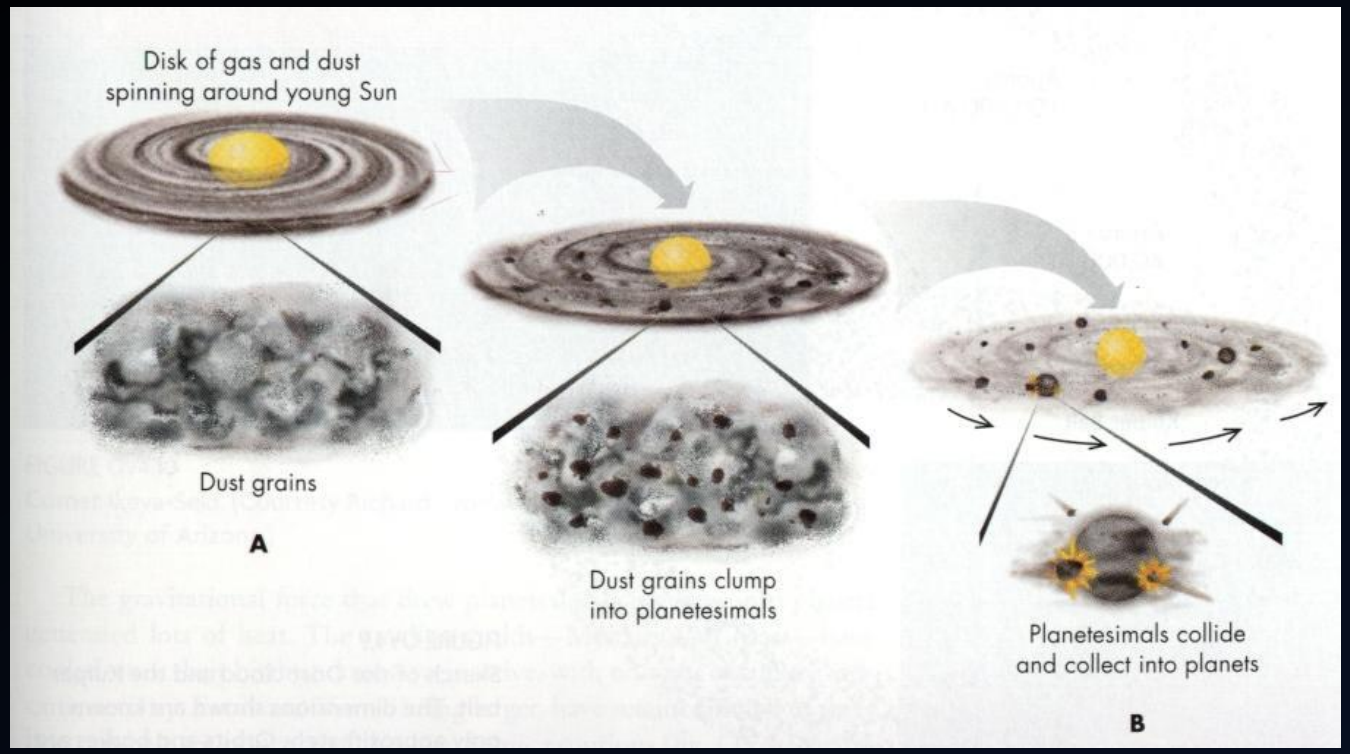


Из-за взаимодействия меняется не только масса объектов, но и их местоположение в системе (т.е. орбита).

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

1206.0738

От Земли до Юпитера



www.sos.siena.edu

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.

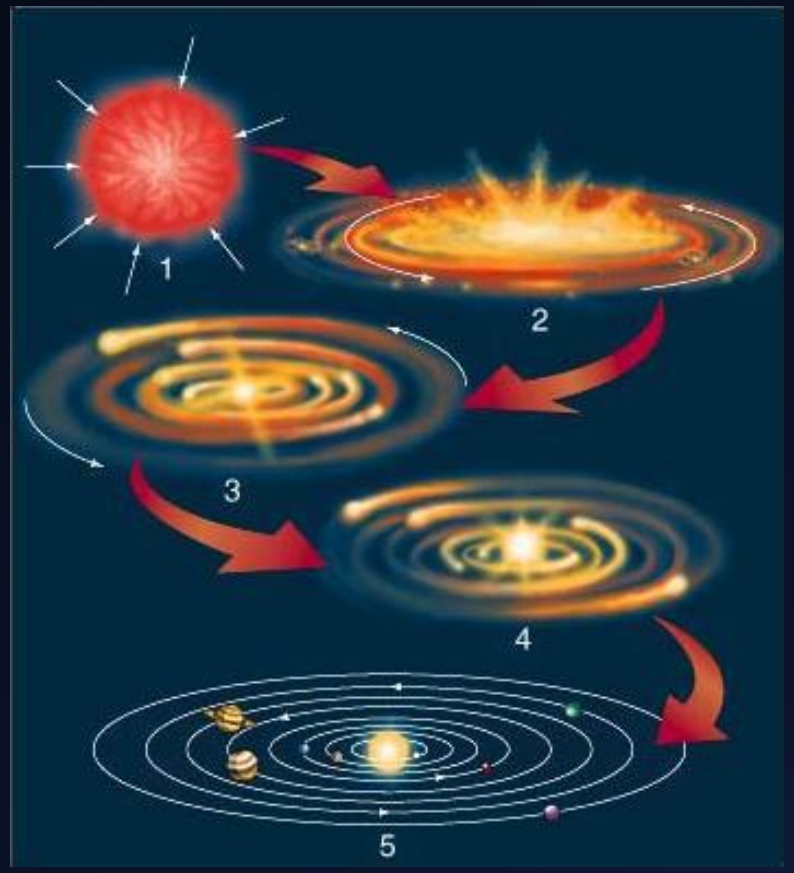
Формирование Солнечной системы

Формирование планет-гигантов – миллионы лет.

Формирование планет типа Земли – десятки миллионов.

«Поздняя тяжелая бомбардировка» – около 600 млн лет после формирования.

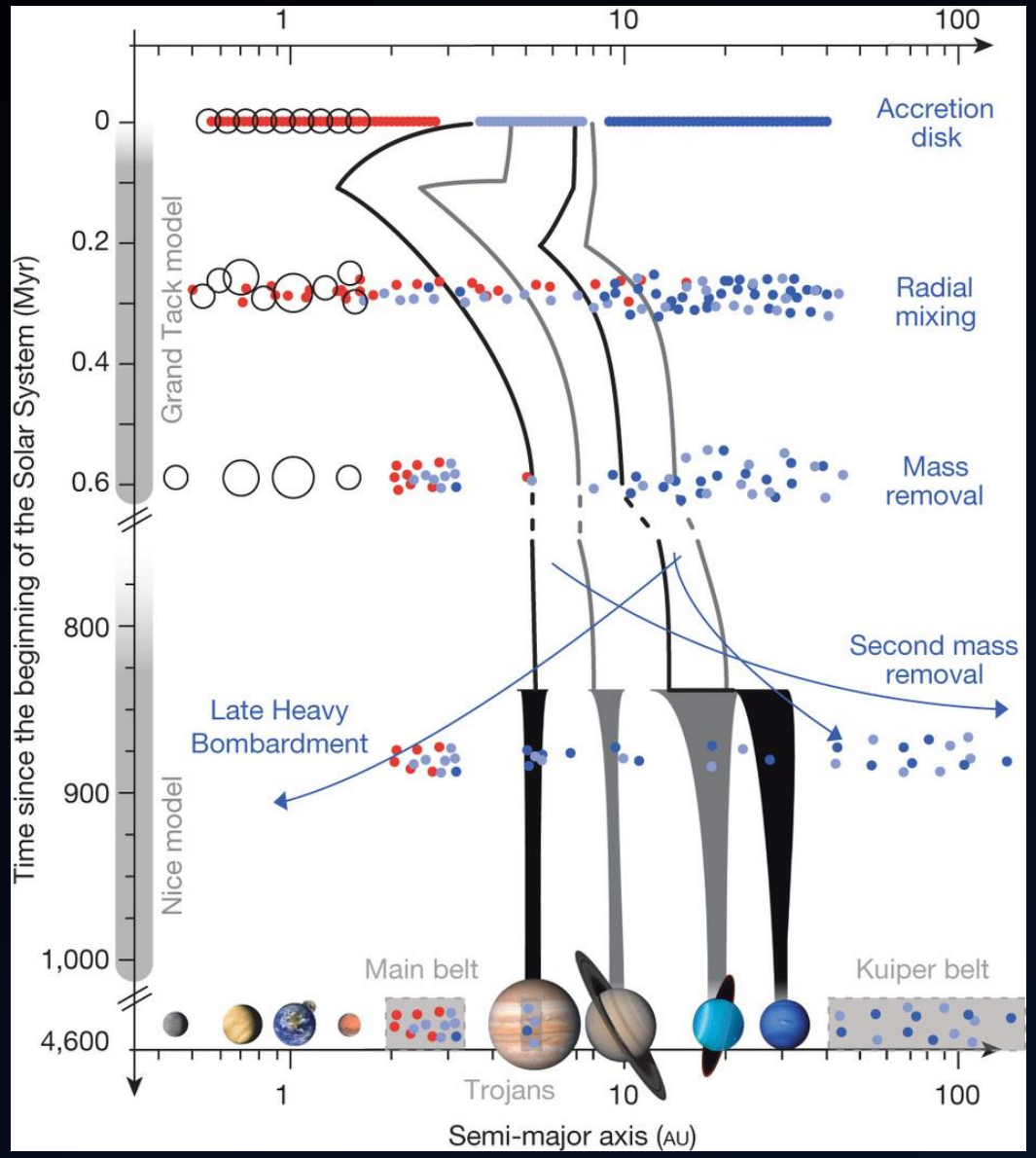
Возраст 4.567 млрд лет.



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

Calcium–aluminium-rich inclusion

Солнечная система: миграция планет



1408.2787

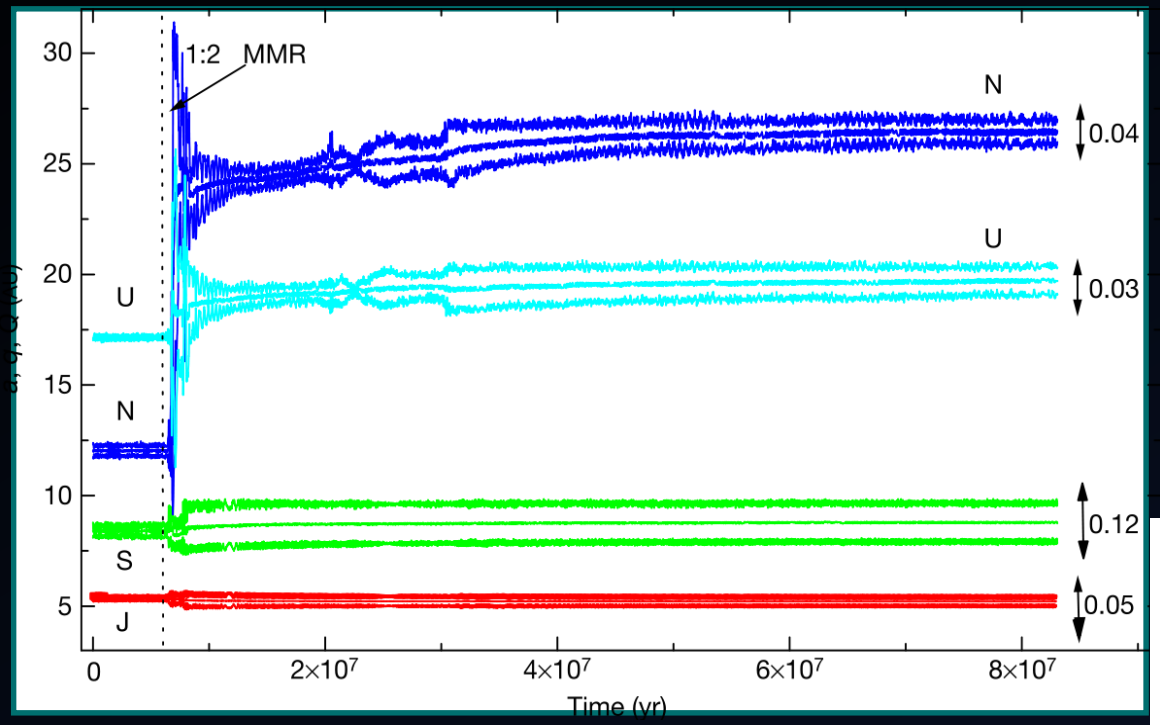
Как мигрировали планеты в Солнечной?

Авторы использовали данные по астроидам, 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.

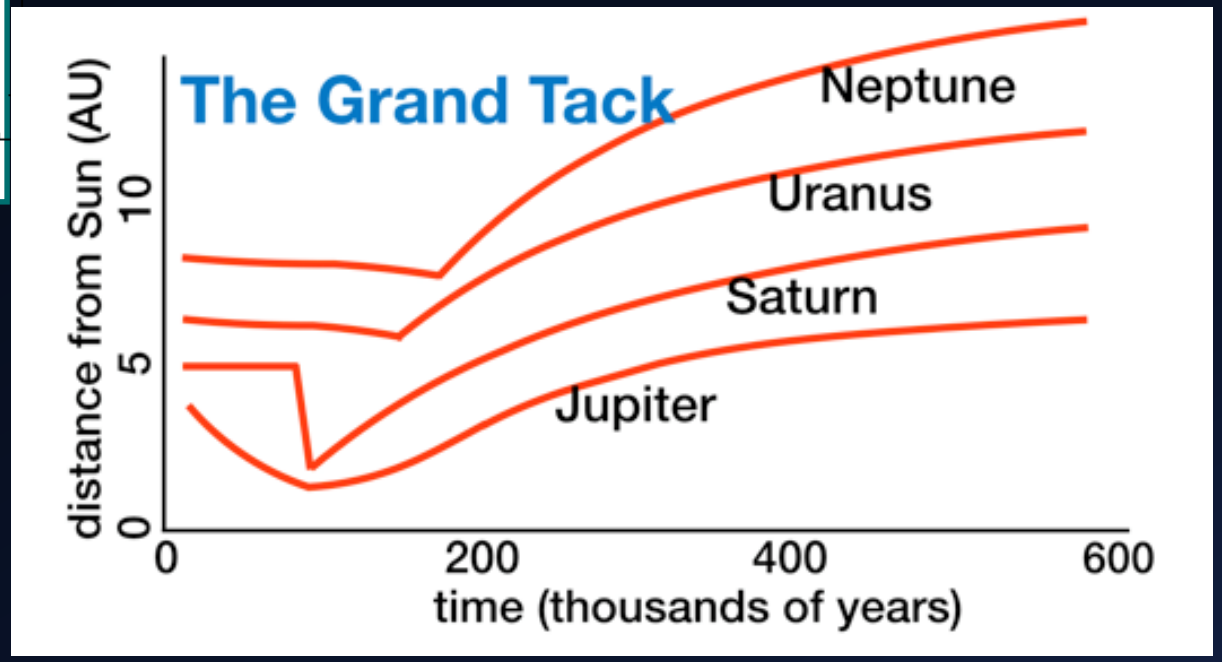
Историю миграции отчасти можно восстановить по свойствам орбит малых тел.

Nice model и Grand Tack

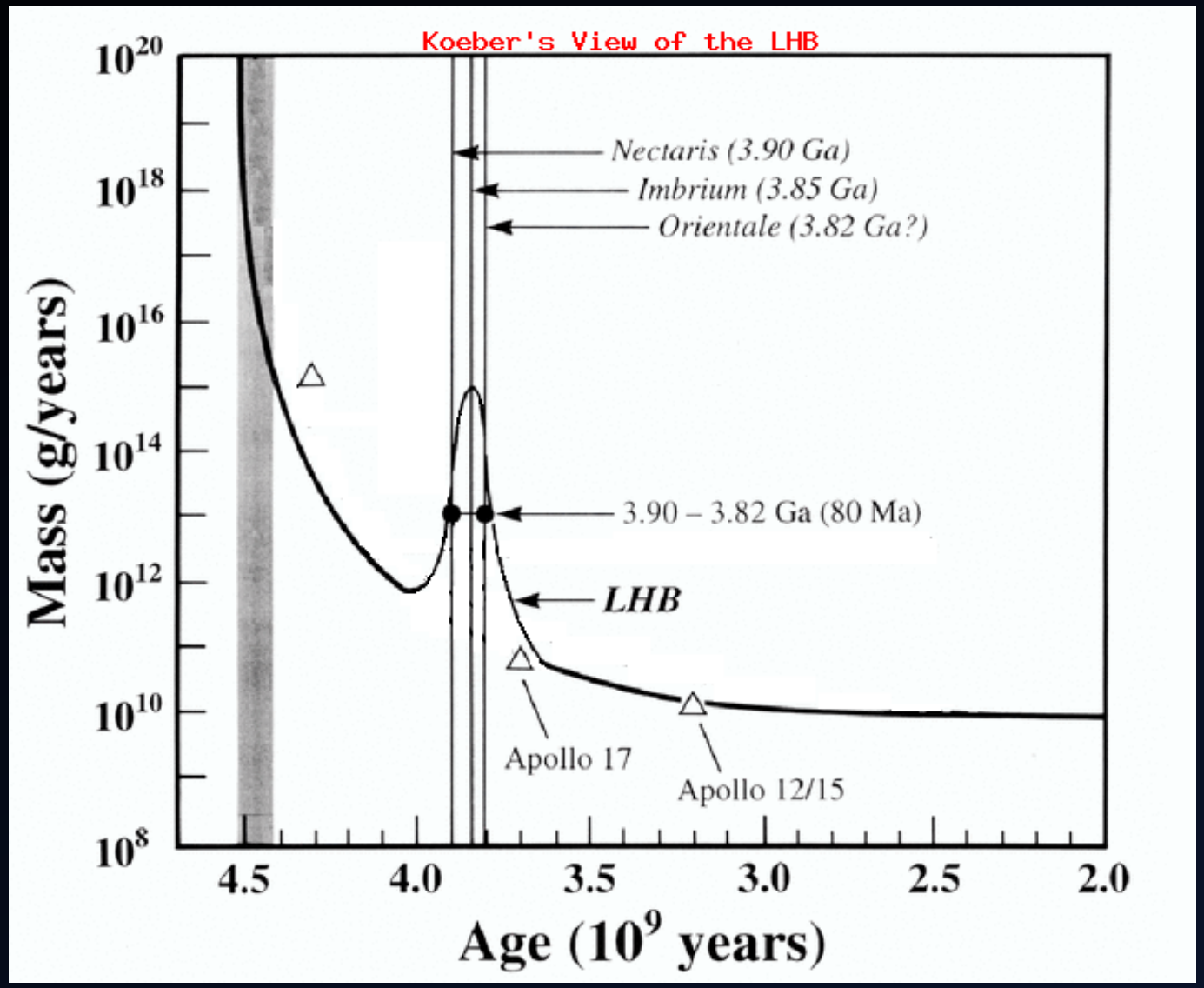


Неустойчивости орбит планет и малых тел за счет миграции.

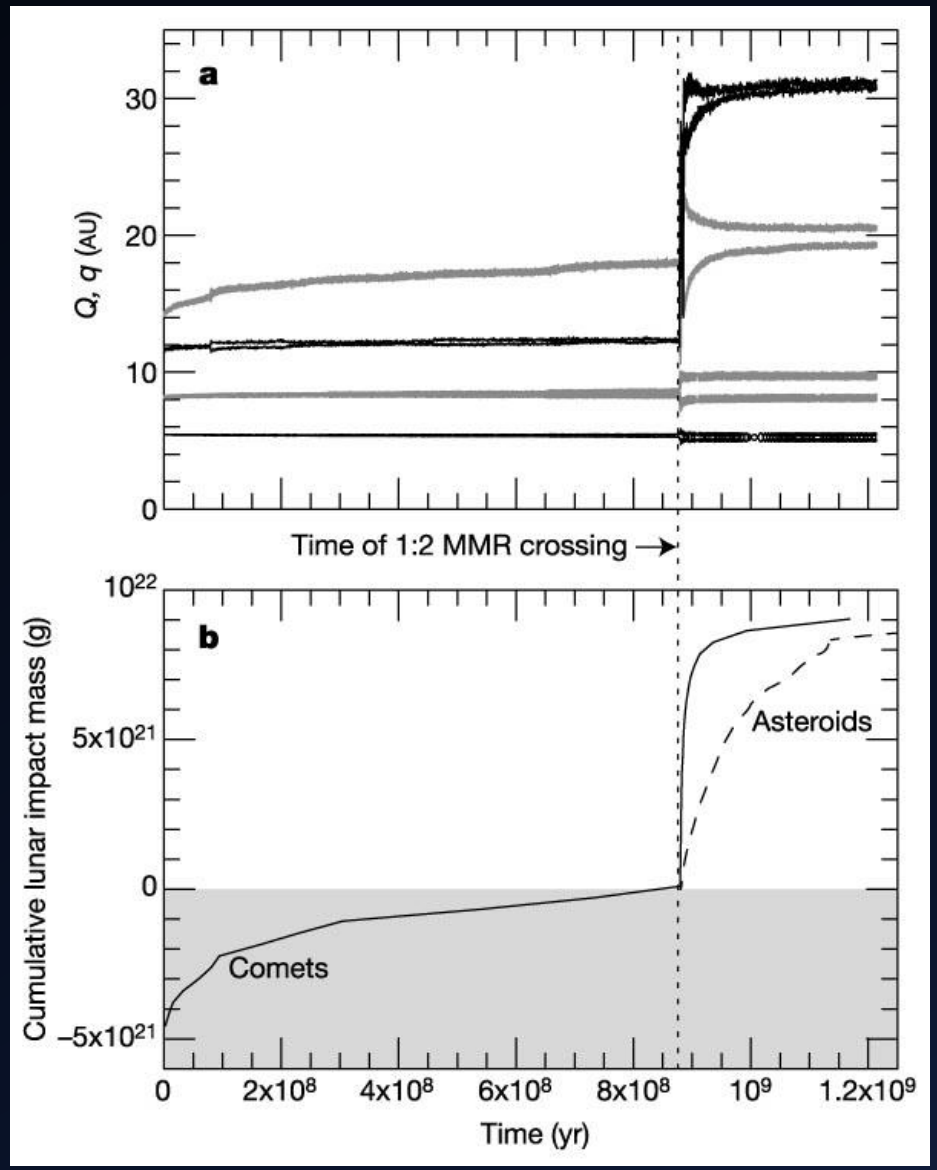
Резкая перестройка орбит массивных тел может приводить к неустойчивости орбит малых тел.



Поздняя тяжелая бомбардировка



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

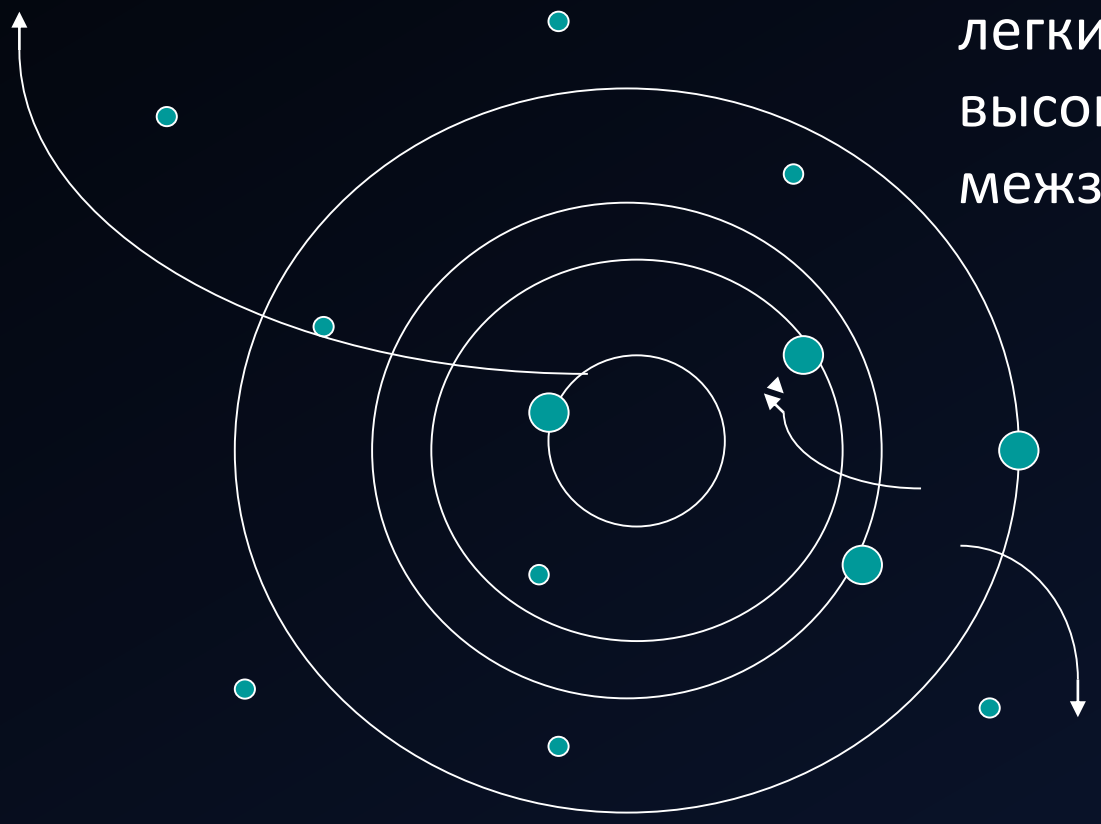


Gomes et al. (2005) Nature

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*.

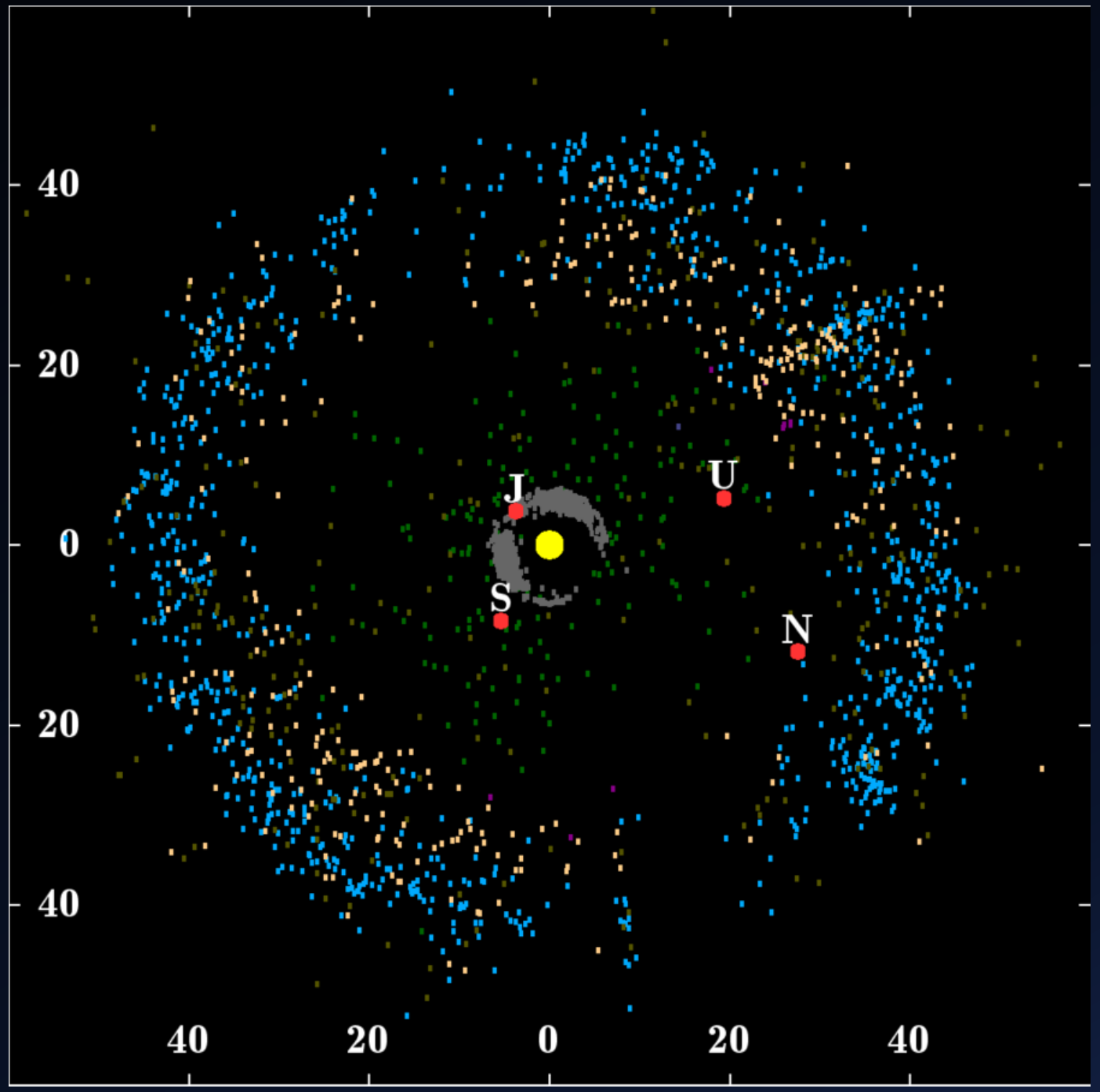
в пояс Койпера
и облако Оорта

Пояс Койпера

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

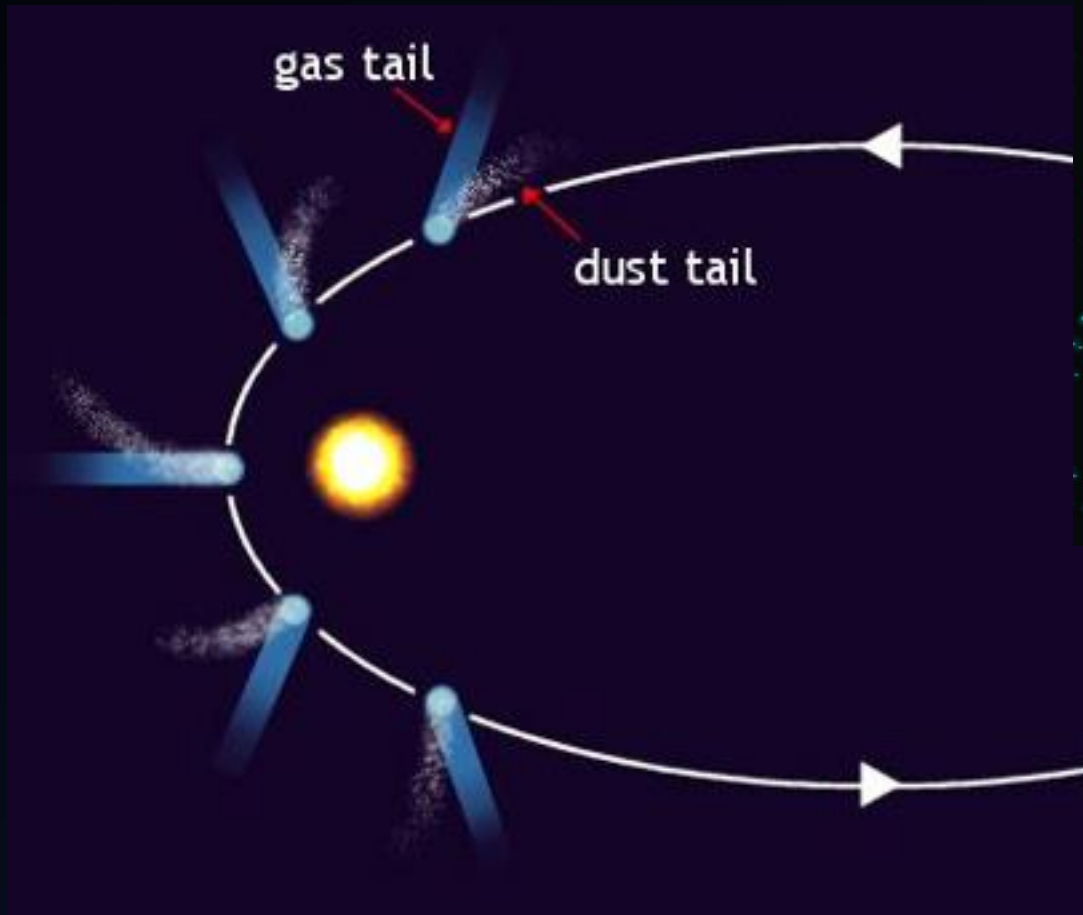
Первый объект открыт в 1992 г.

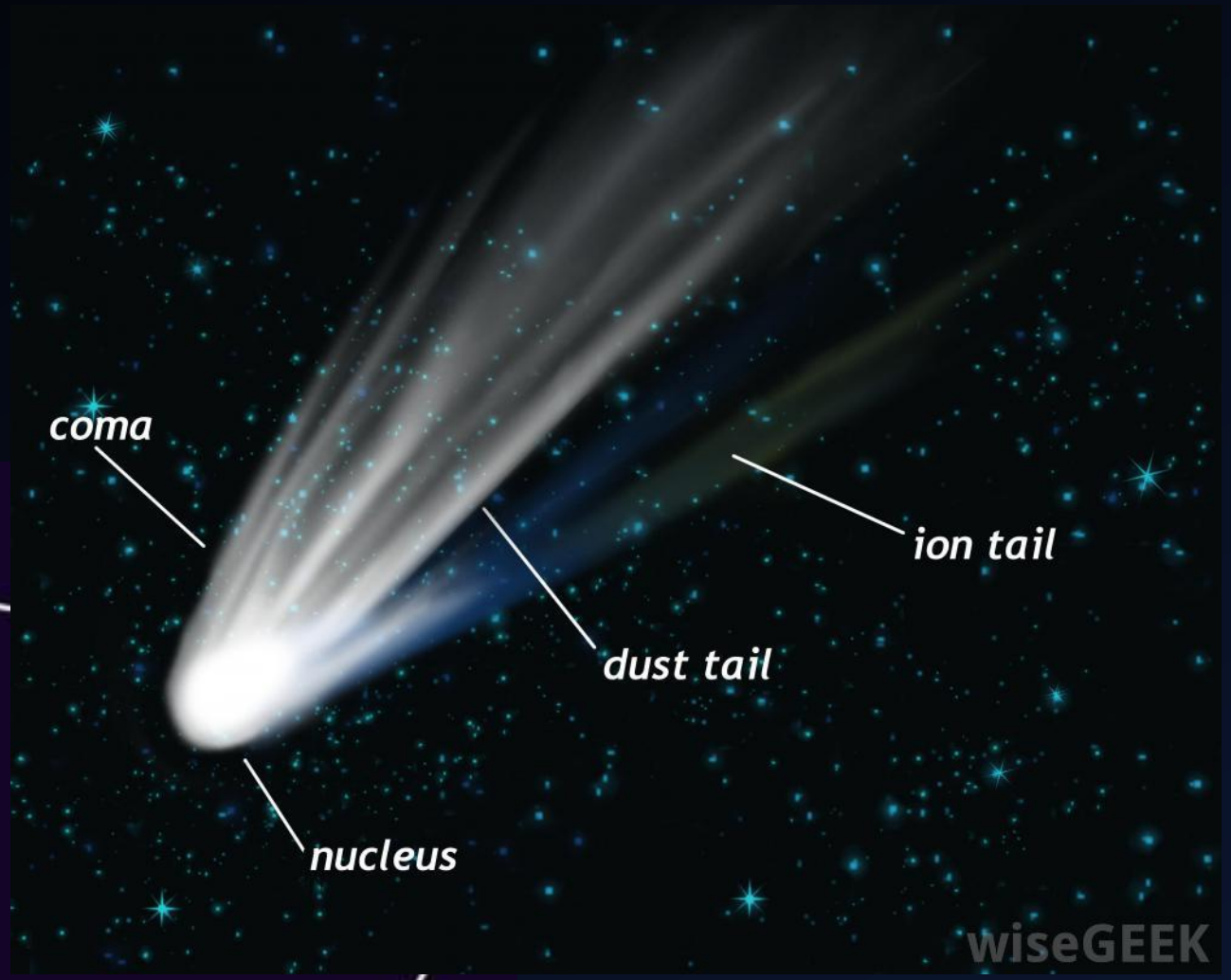
Суммарная масса около 0.001 земной.



Кометы

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



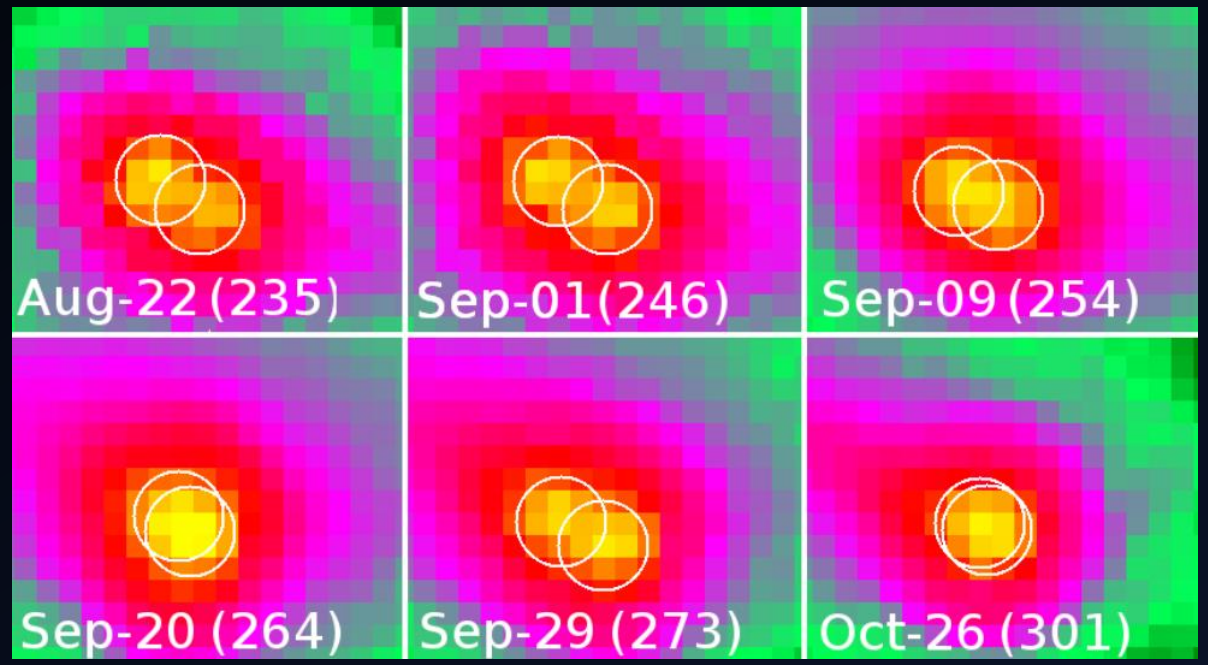


Ядро имеет размер около неск. Км
Голова – до млн,
хвост – до сотни млн

Двойная комета Главного пояса

288P (300163)

Большой эксцентриситет двойной e>0.6
Орбитальный период 100-175 дней.
Расстояние между телами ~100 км.



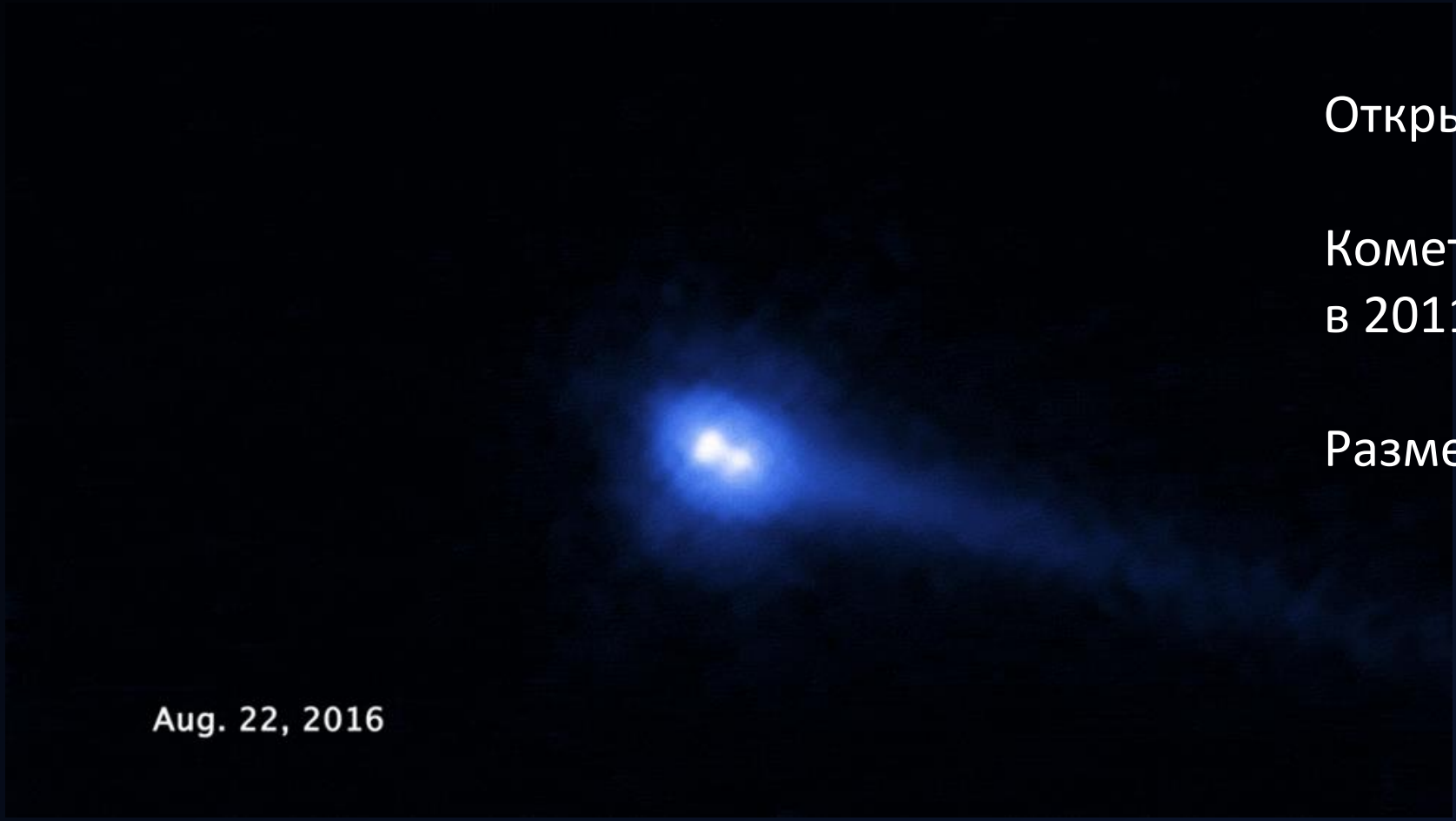
Очень нетипичный двойной астероид.
Значит, особый механизм формирования

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

Эволюция орбиты двойной может быть связана с истечением вещества.

1710.03454

Он же 288P, он же 300163, он же 2006 VW_{139}, он же P/2006 VW_{139}



Открыт Spacewatch в 2006 г.

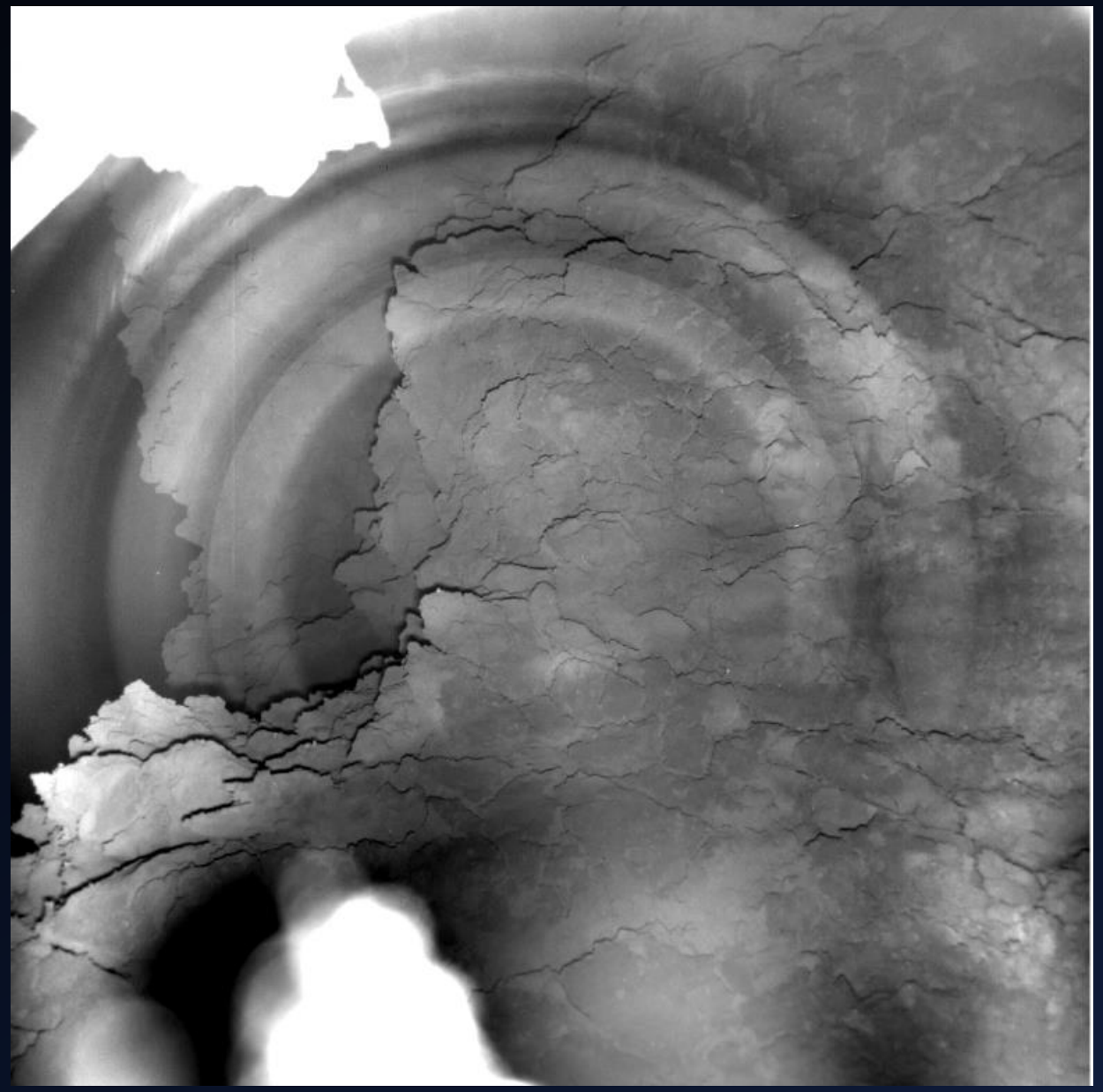
Кометная активность открыта в 2011 г. на Pan-STARRS.

Размеры компонент 1-2 км.

wikipedia.org

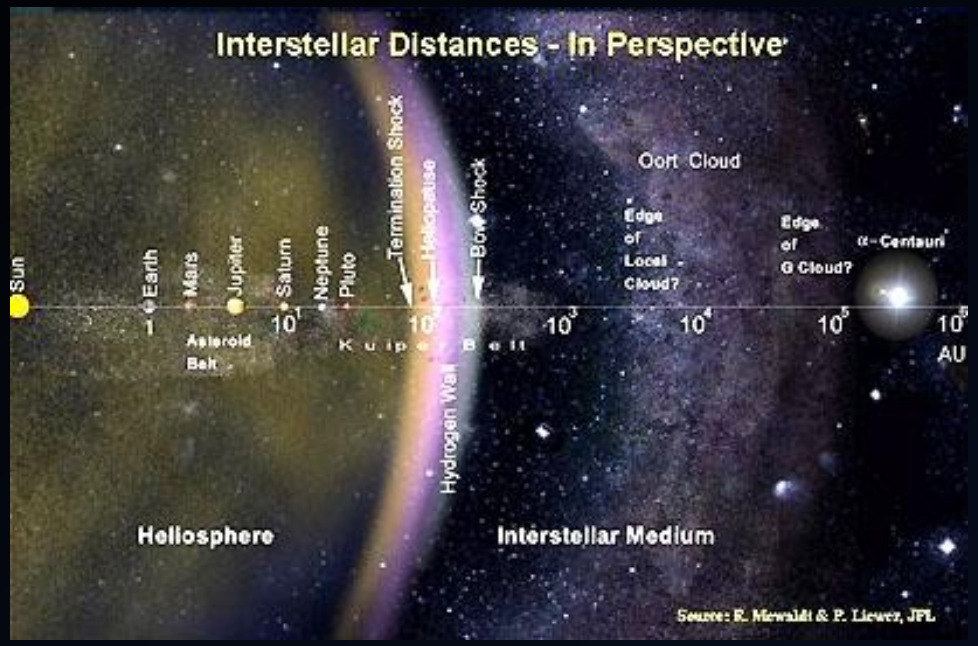
Последний кадр ROLIS

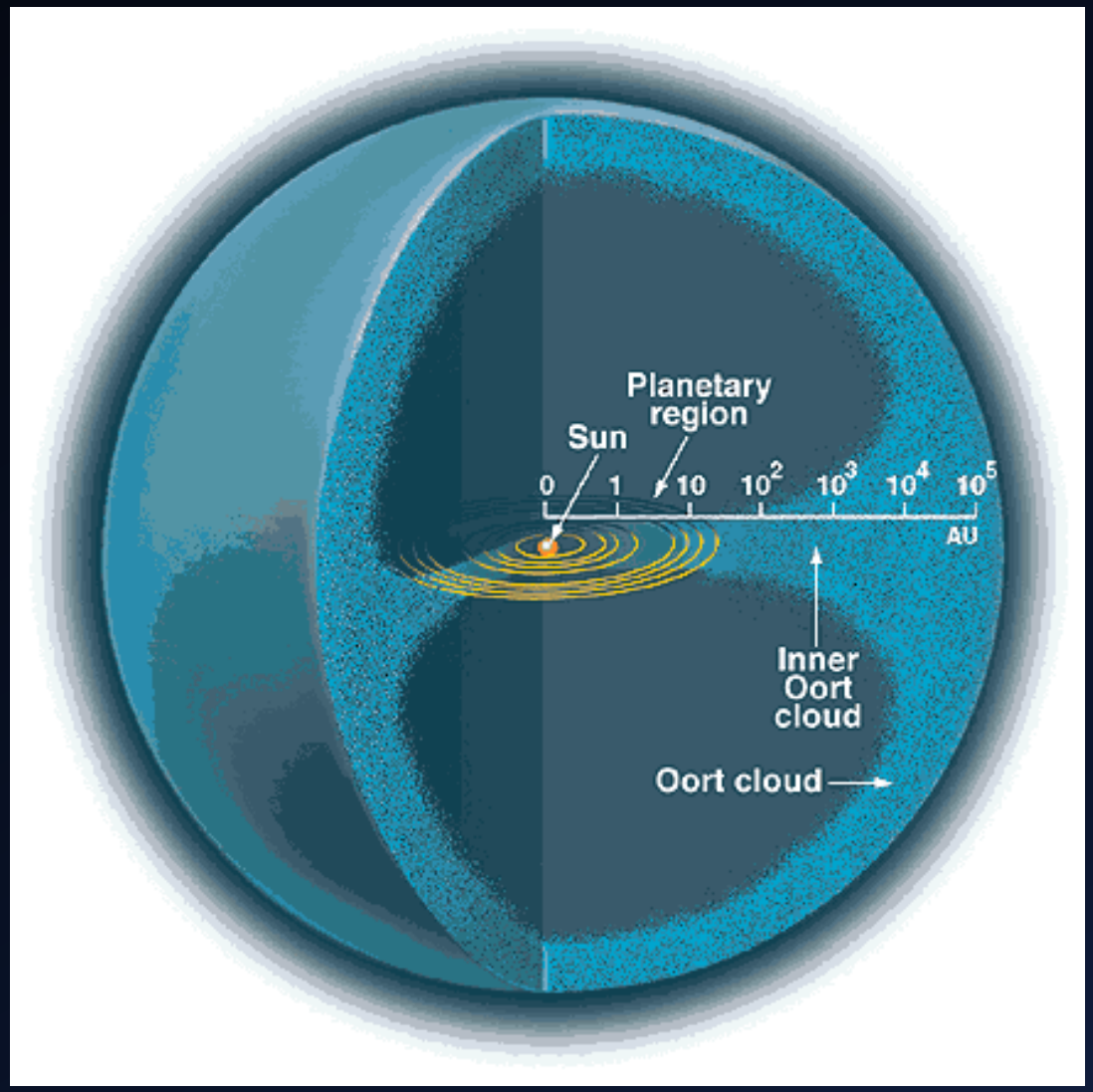
После окончательного «упокоения» камера ROLIS на борту зонда Philae сделала 5 снимков.
Из них 4 – с подсветкой светодиодами.
Наконец, через
два земных дня на поверхности
был сделан последний снимок.
Его передача закончилась
за секунды до исчерпания
запасов батарей.



1701.00685

Облако Оорта

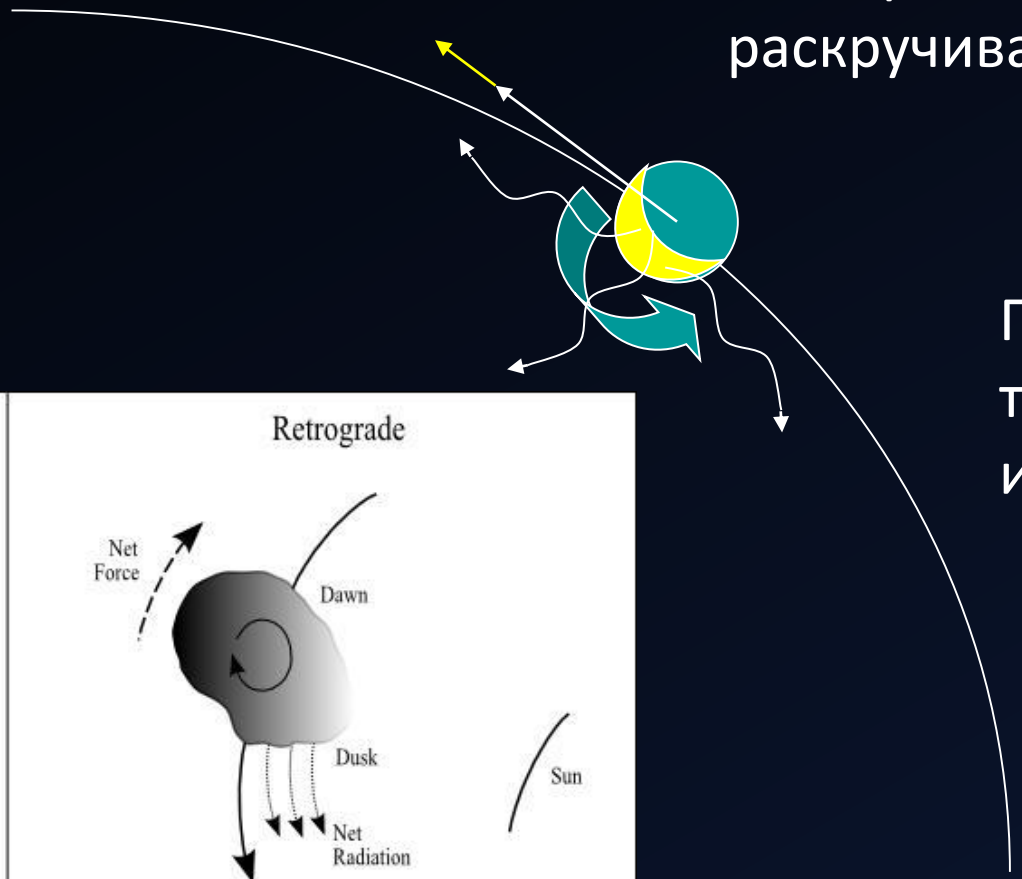




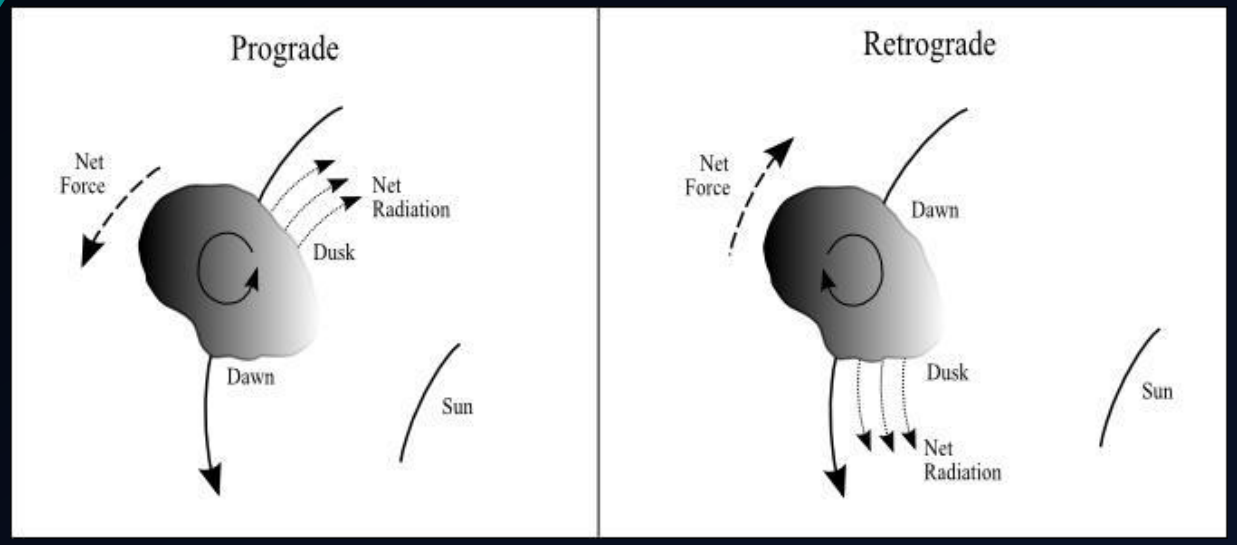
Современная масса облака Оорта составляет примерно 1-10 масс Земли. Эти объекты родились гораздо ближе к Солнцу: на <(40-50) а.е. Они были выброшены оттуда благодаря взаимодействию с массивными телами.

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.

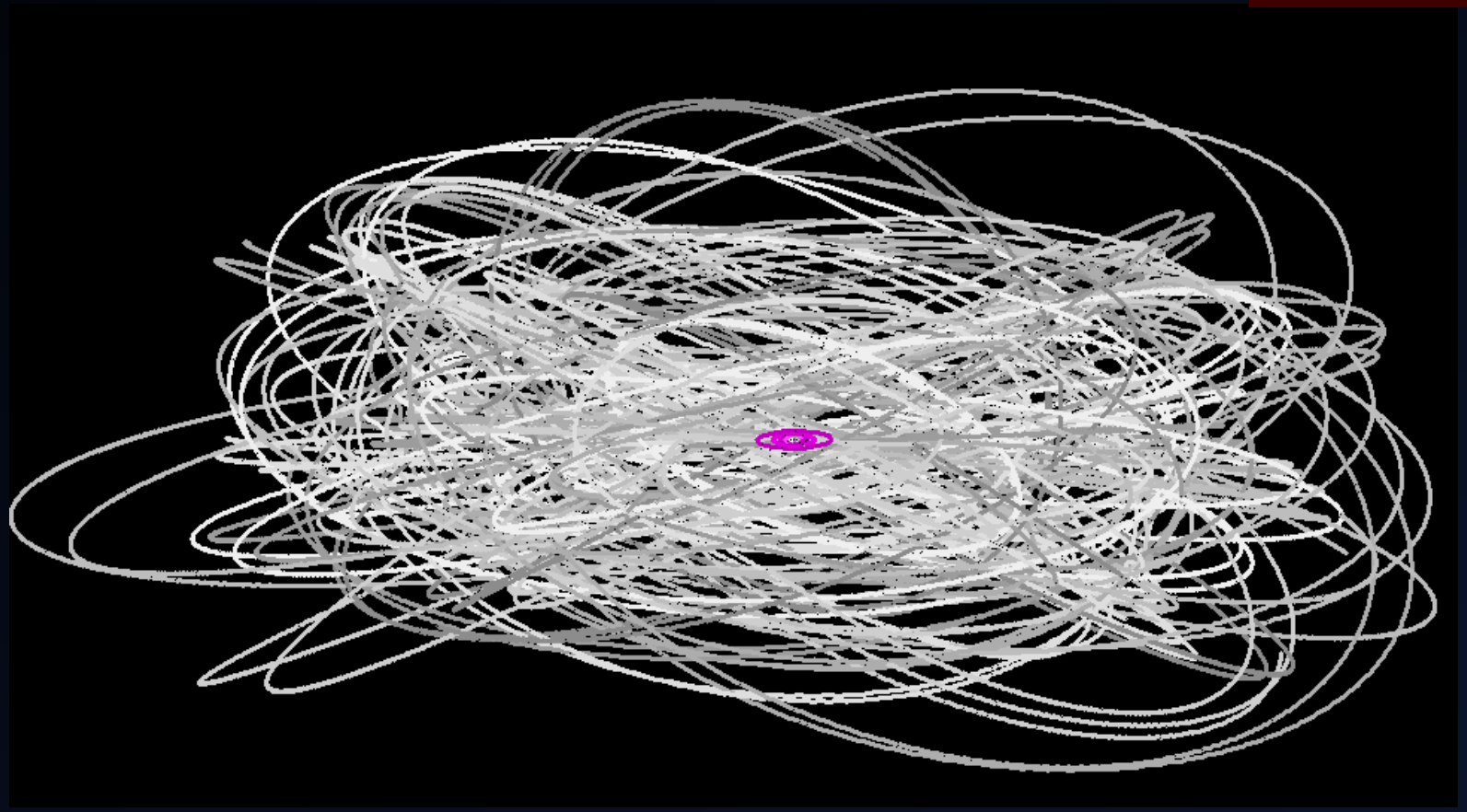


Эффект Лидова-Козаи

У орбиты могут одновременно меняться наклонение эксцентриситет.

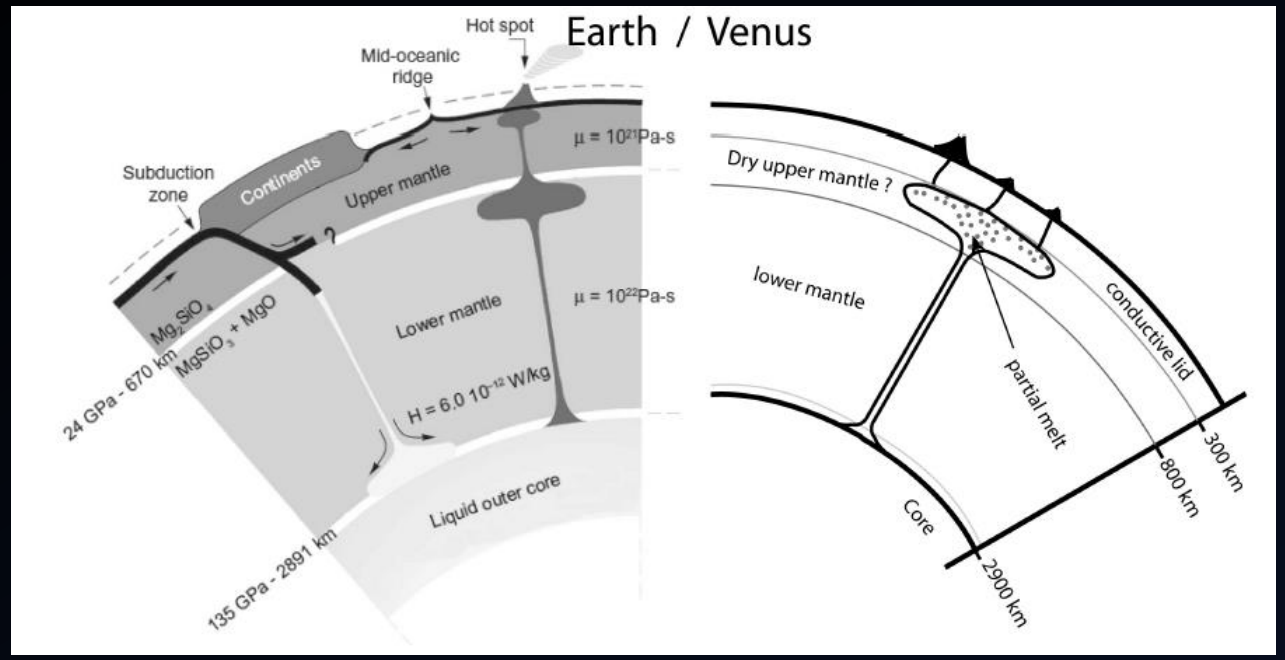
Эффект связан с воздействием тела, находящегося на внешней орбите.

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

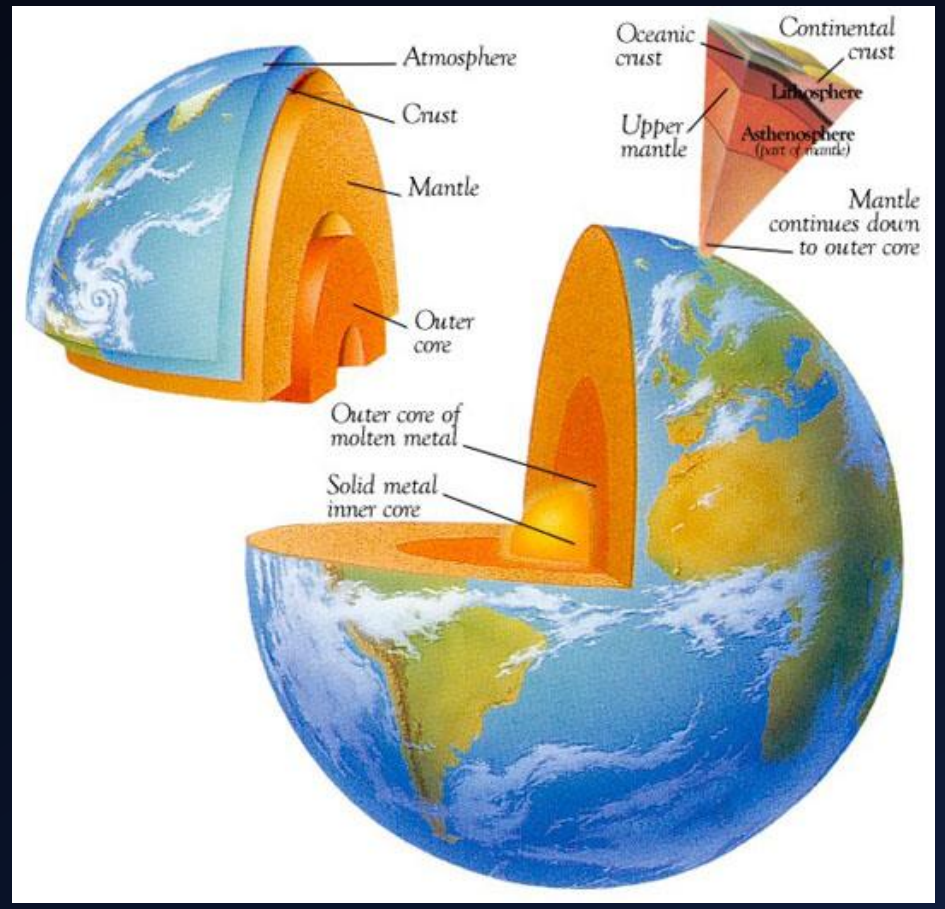


Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 г., а затем в 1962 г. был описан Козаи для астероидов.

Структура планет



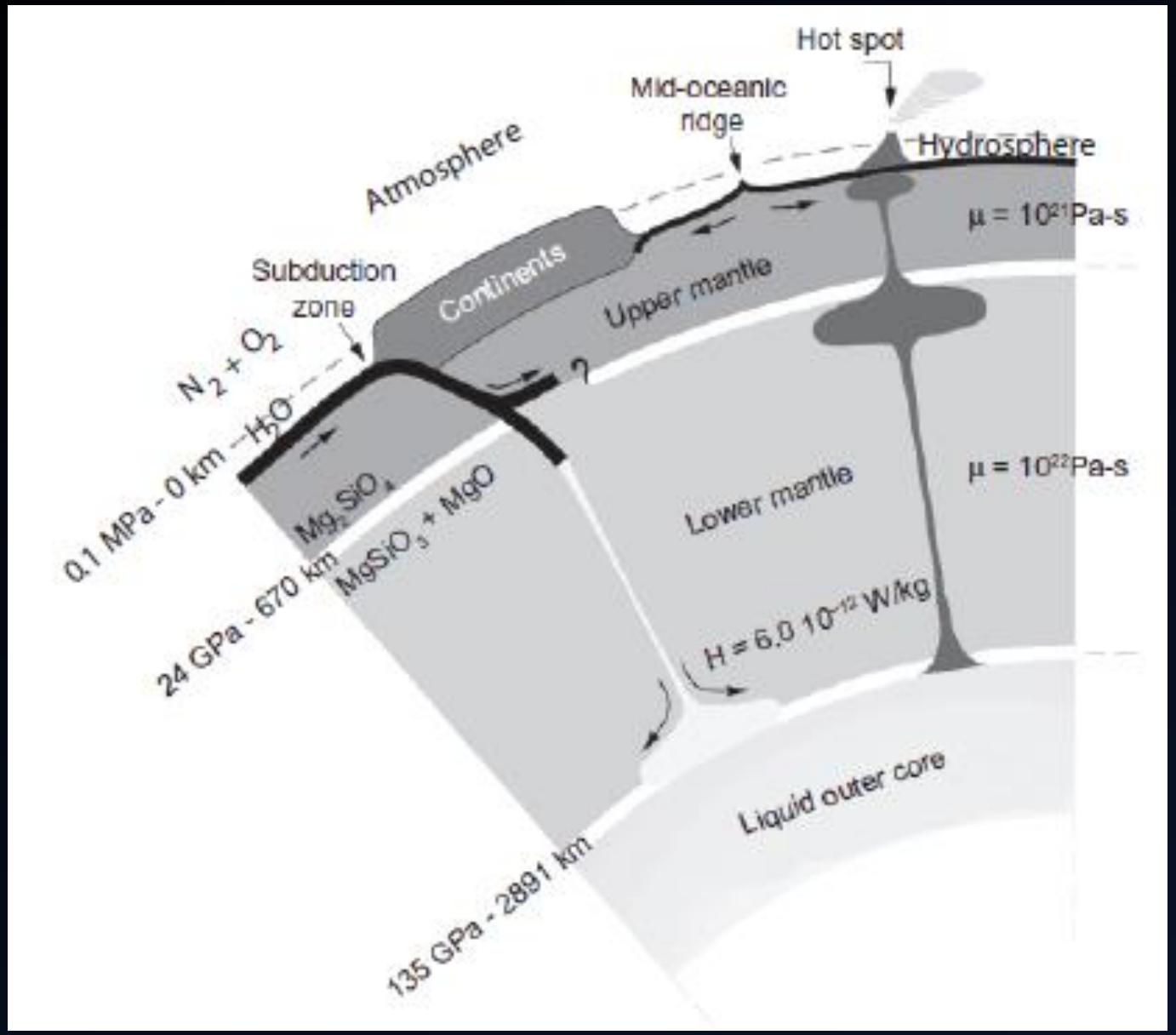
Даже изучая структуру
нашей планеты,
мы не имеем прямых данных.



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

1312.3323

Земля издалека



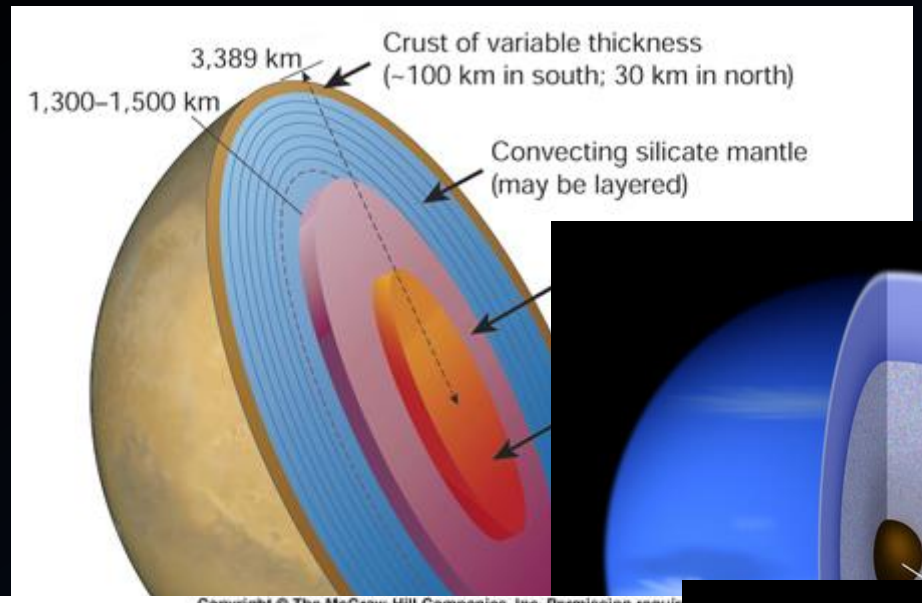
Если бы мы наблюдали Землю, как экзопланету, т.е. у нас были бы данные только по ее массе и радиусу, мы не смогли бы ничего сказать об:

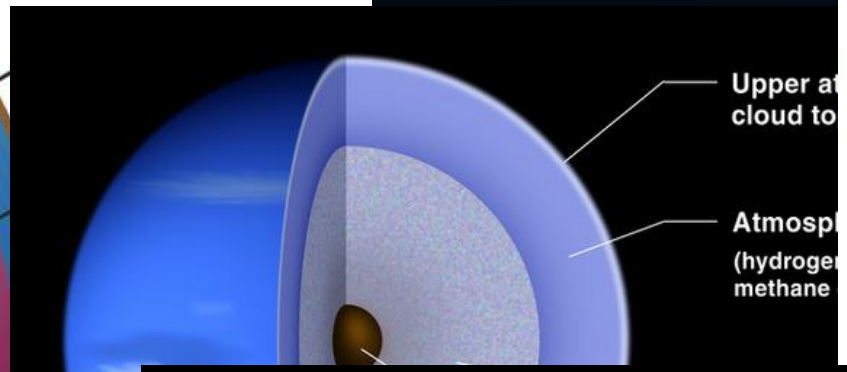
- атмосфере
- гидросфере
- коре

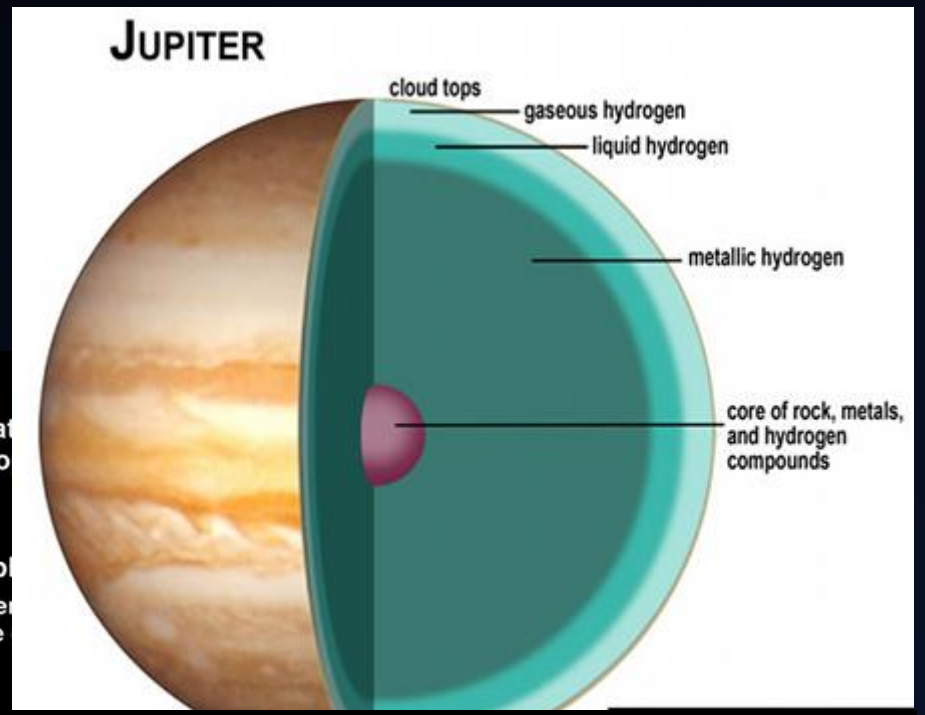
Важно, что все вещества ведут себя по-разному, при сильно изменяющихся давлении и температуре!

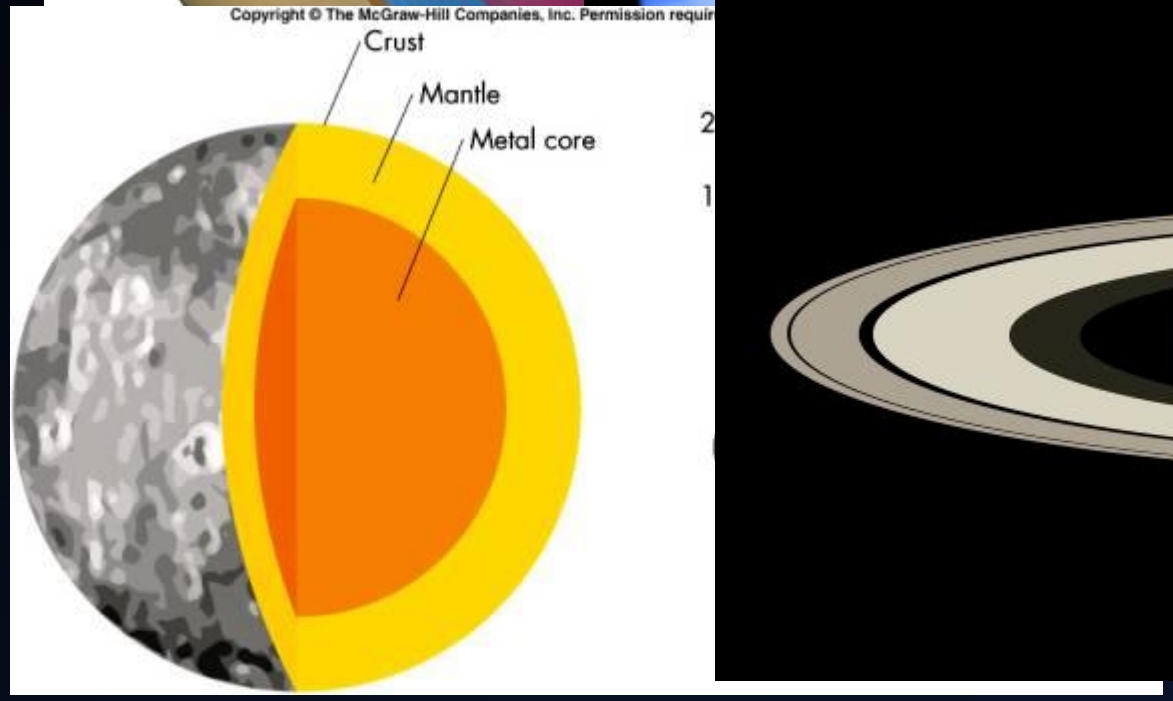
1401.4738

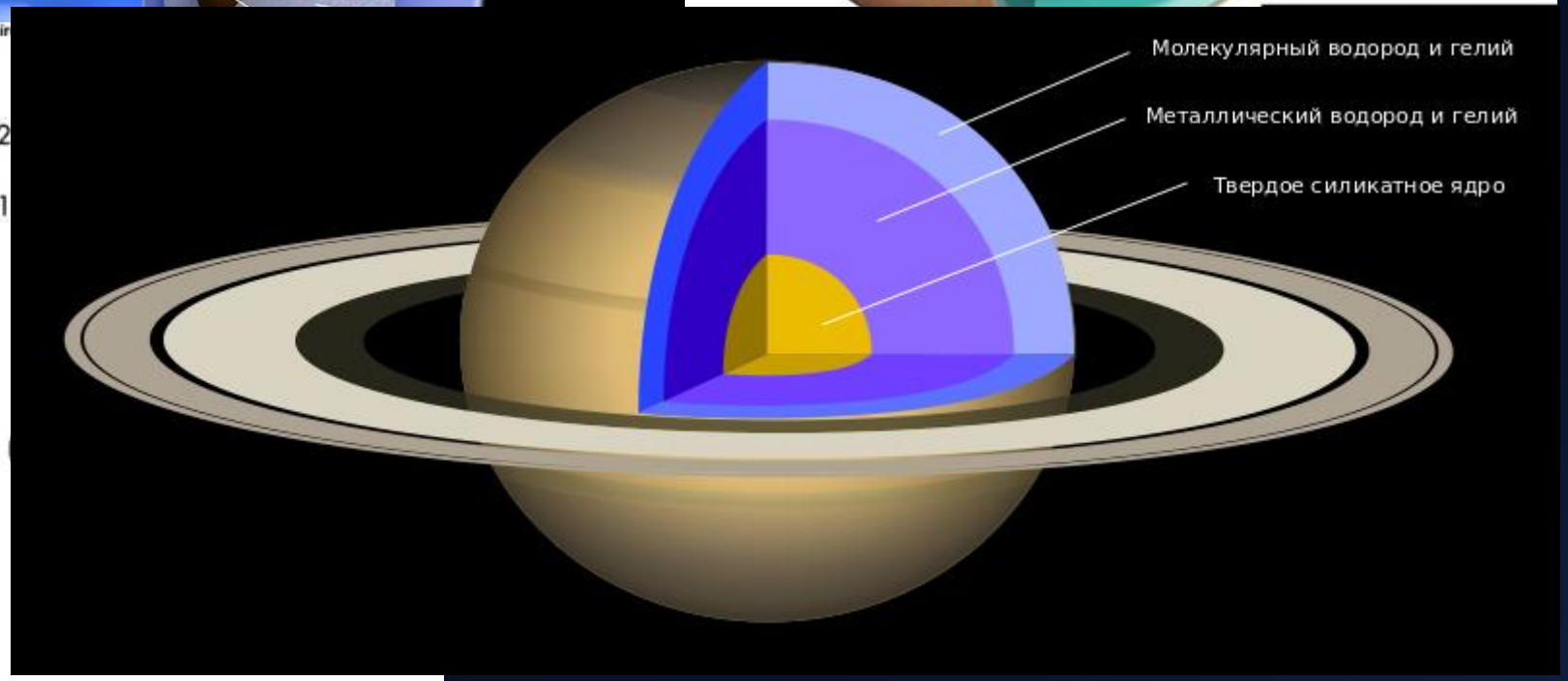
Структура планет



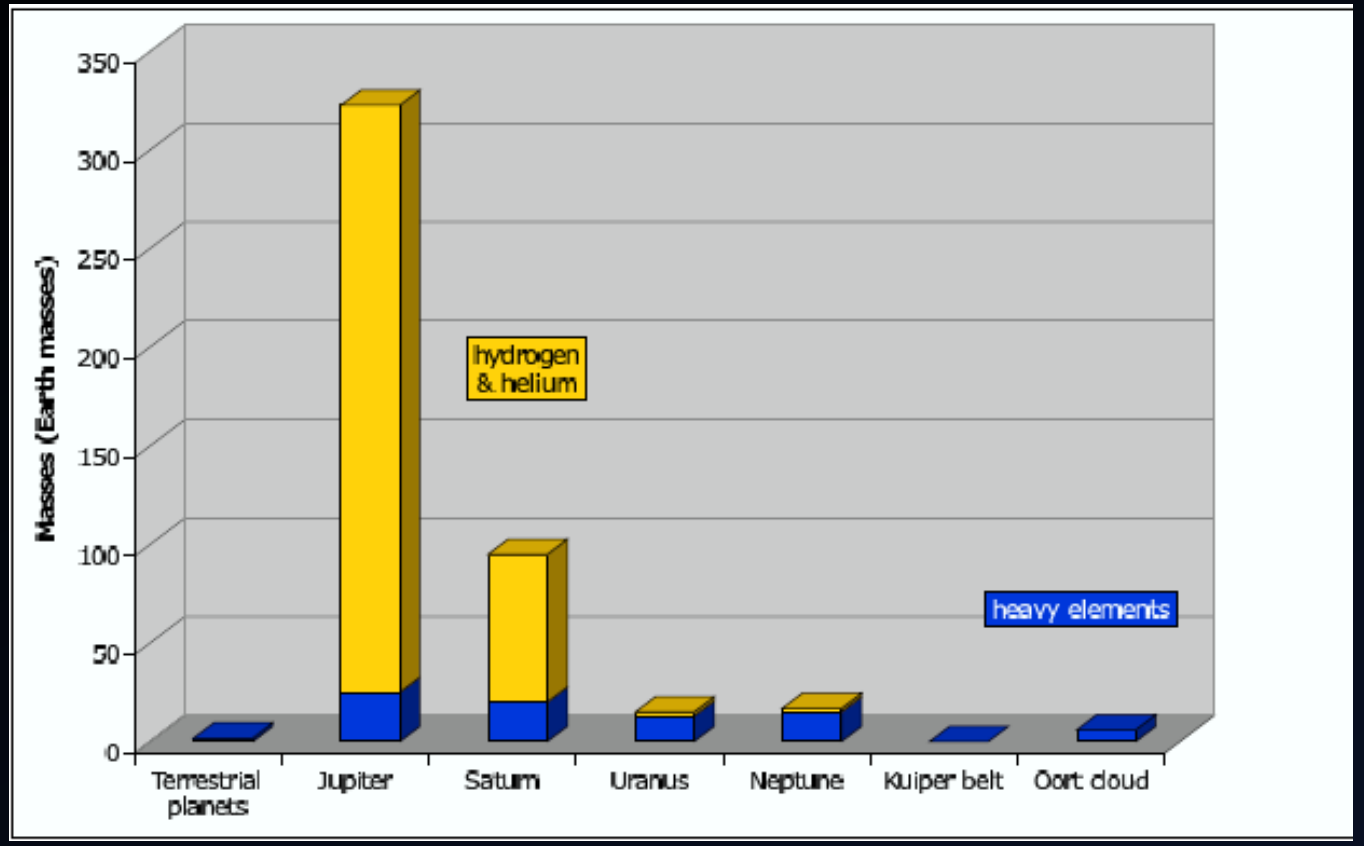








Легкие и тяжелые



Планеты делятся на несколько групп по своему составу.

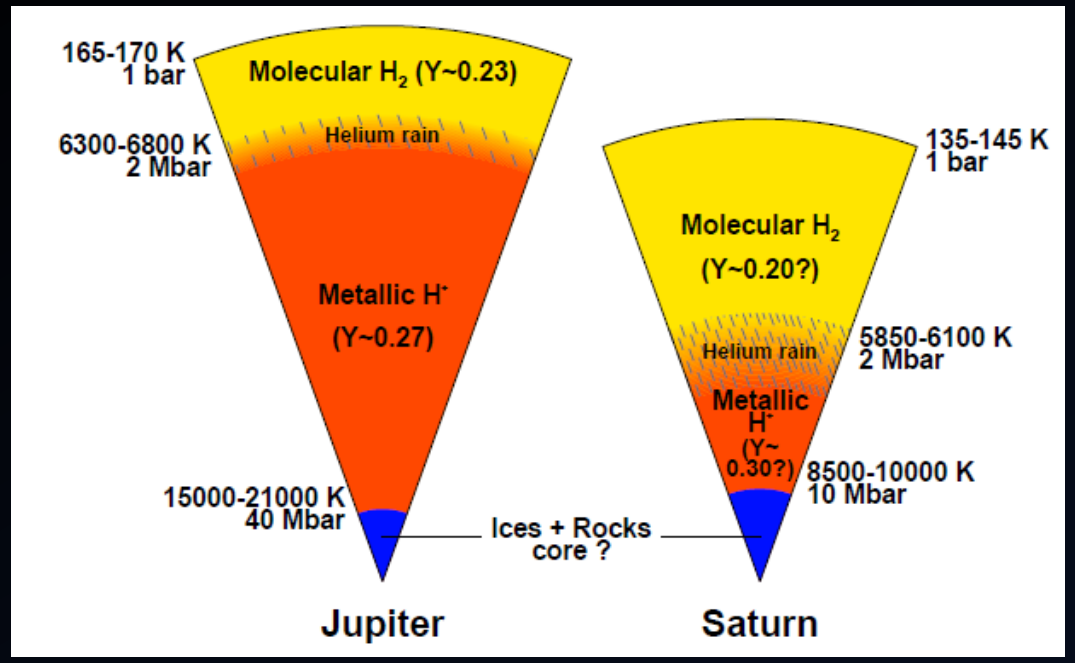
В планетах земного типа, астероидах и кометах относительно мало водорода и почти нет гелия.

В газовых гигантах они доминируют.

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

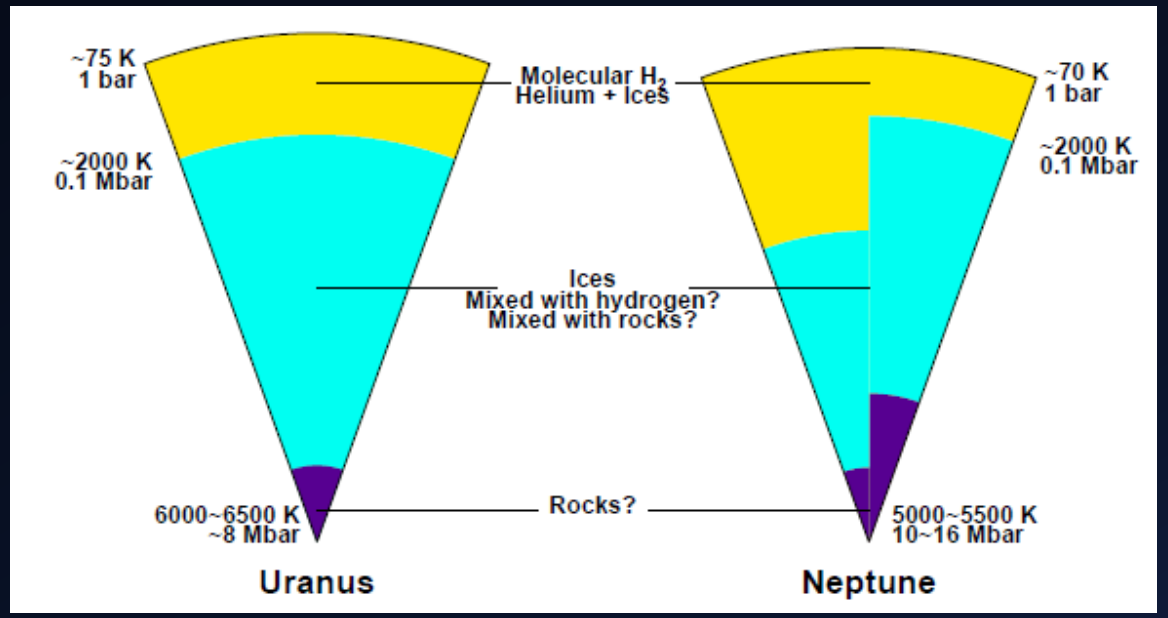
1405.3752

Структура гигантов



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

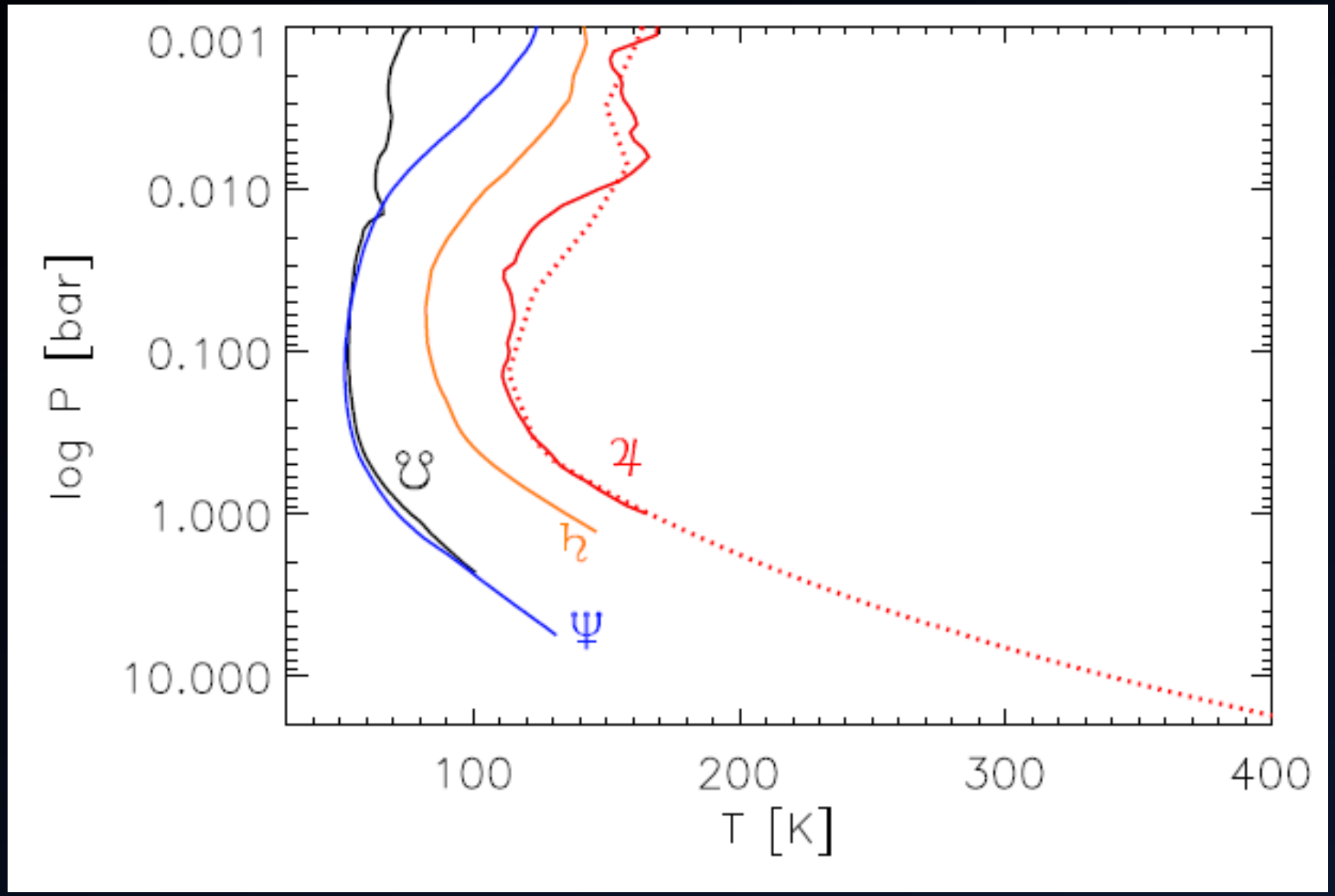
Элементы сегрегированы под действием гравитации.



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

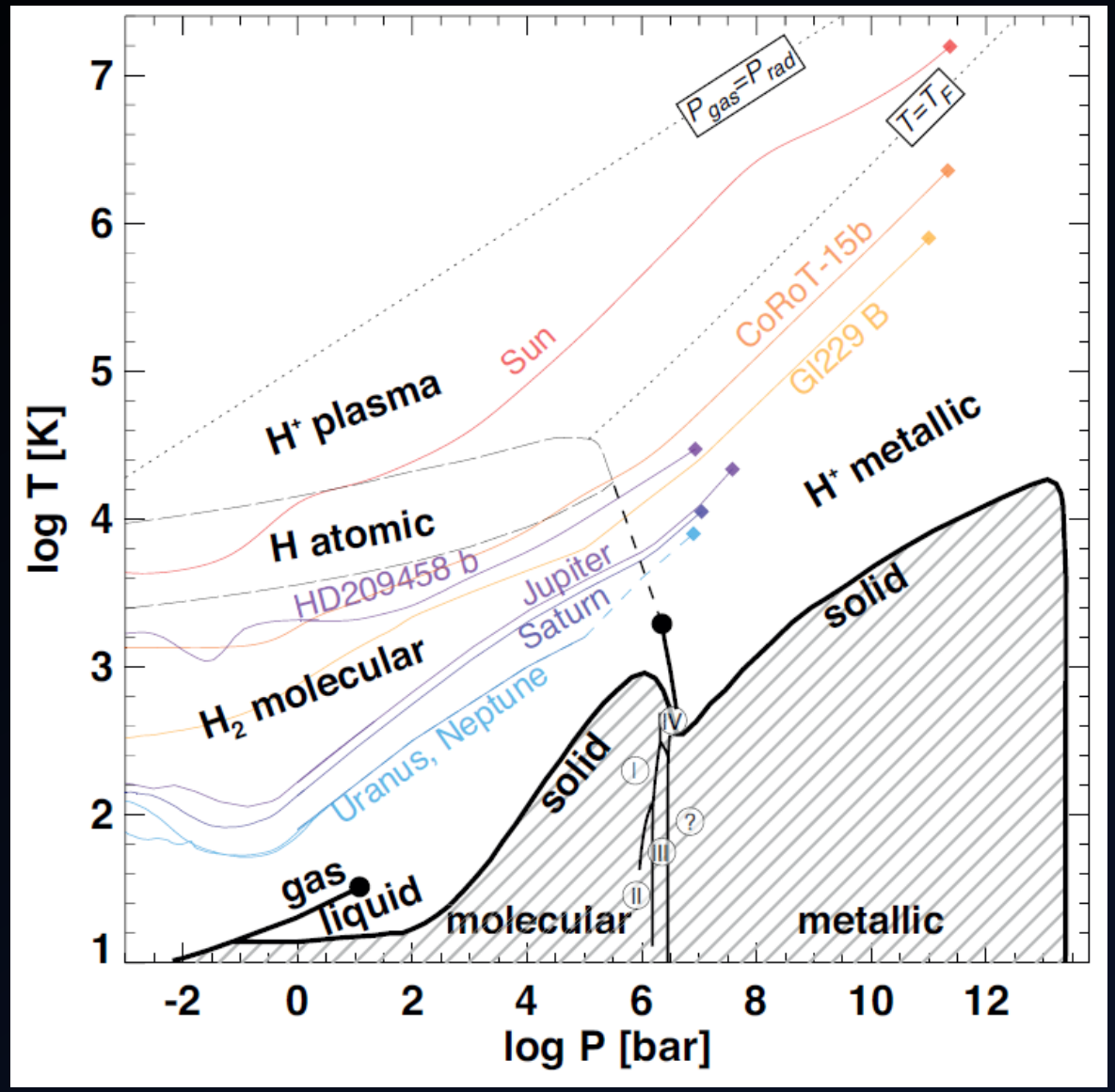
1405.3752

Температура и давление в атмосферах гигантов



1405.3752

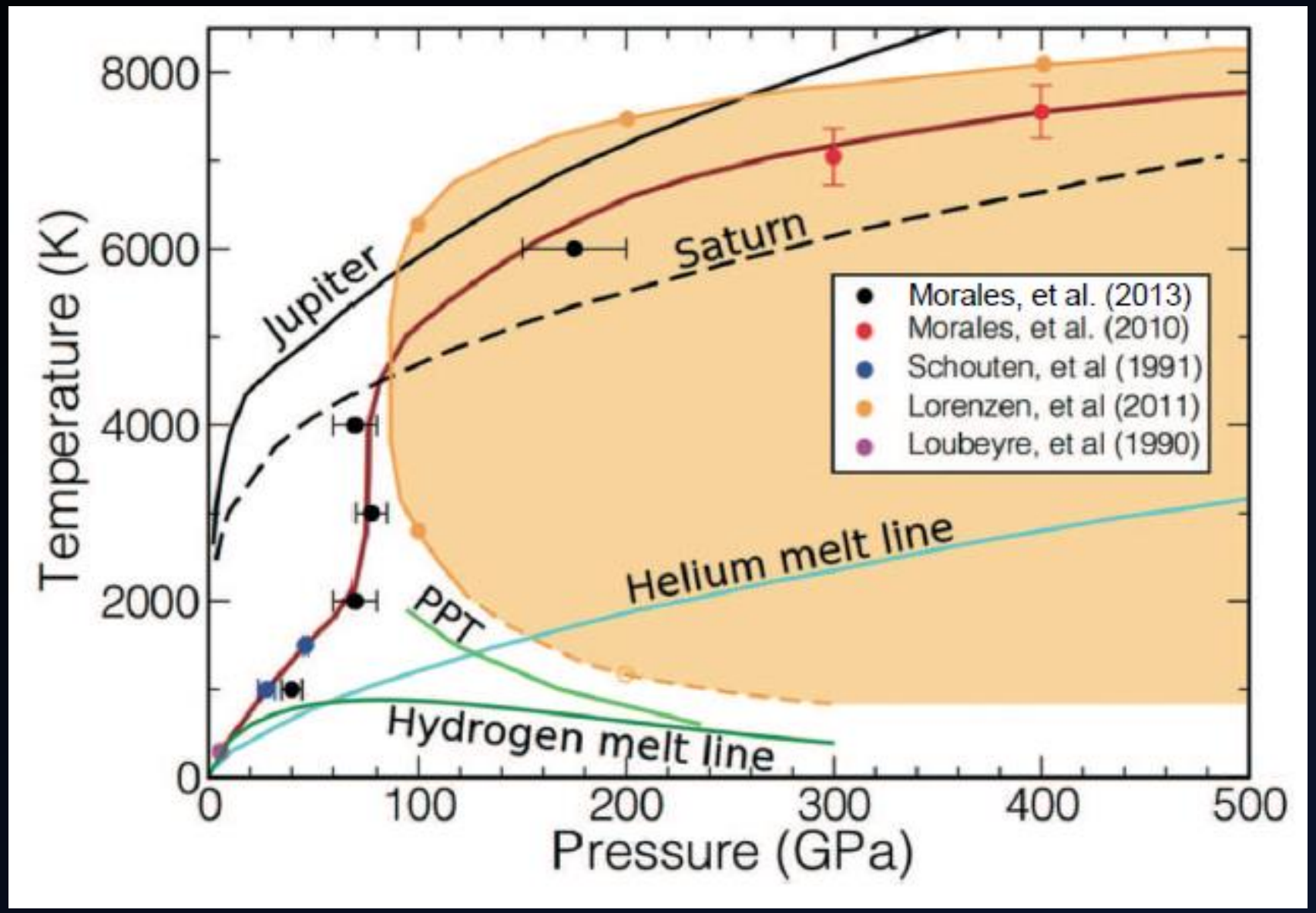
Уравнение состояния водорода



1405.3752

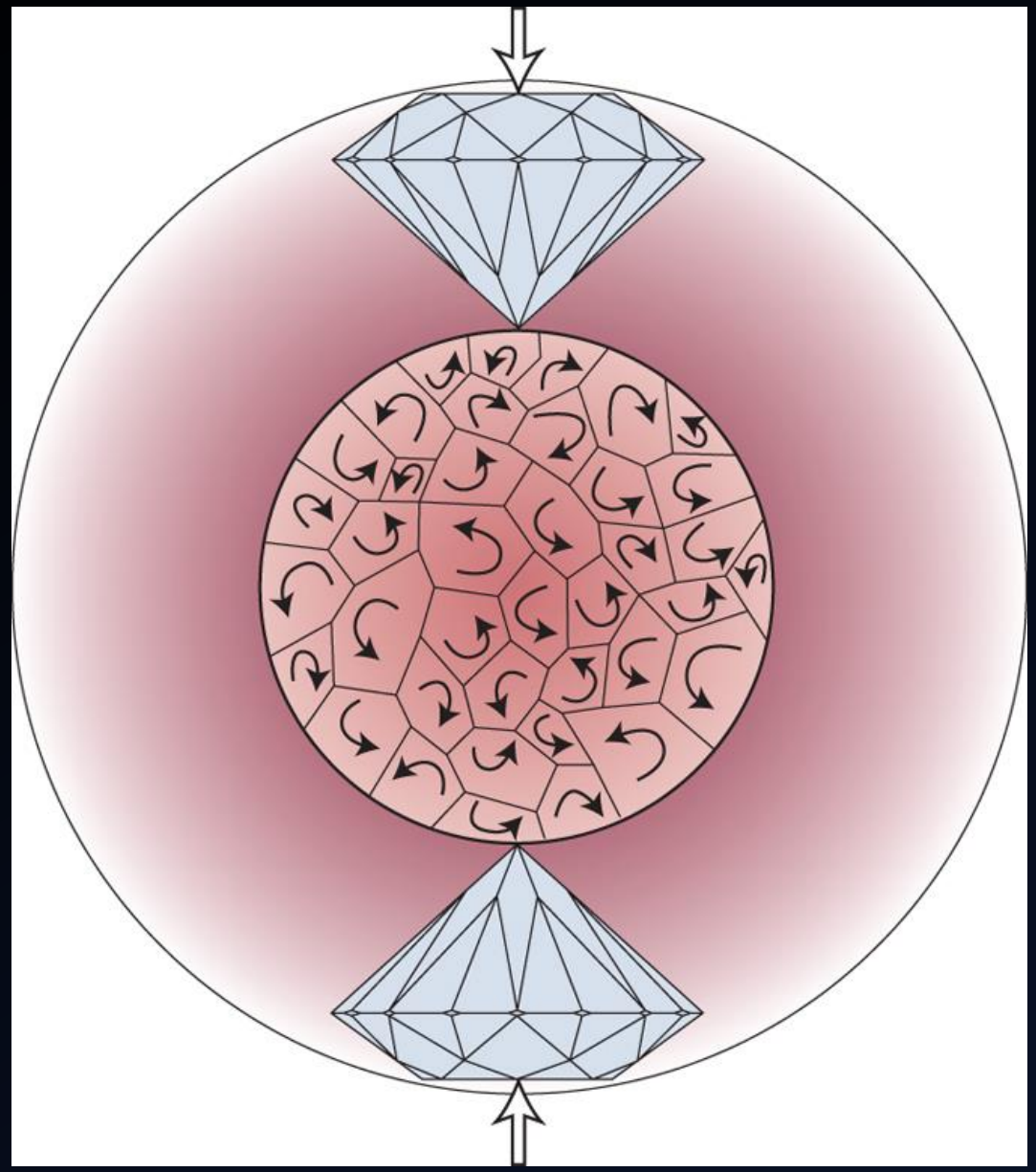
Даже водород – самый простой элемент таблицы Менделеева – имеет очень сложное поведение в разных условиях.
Некоторые режимы изучены нами довольно плохо.

Смесь водорода и гелия



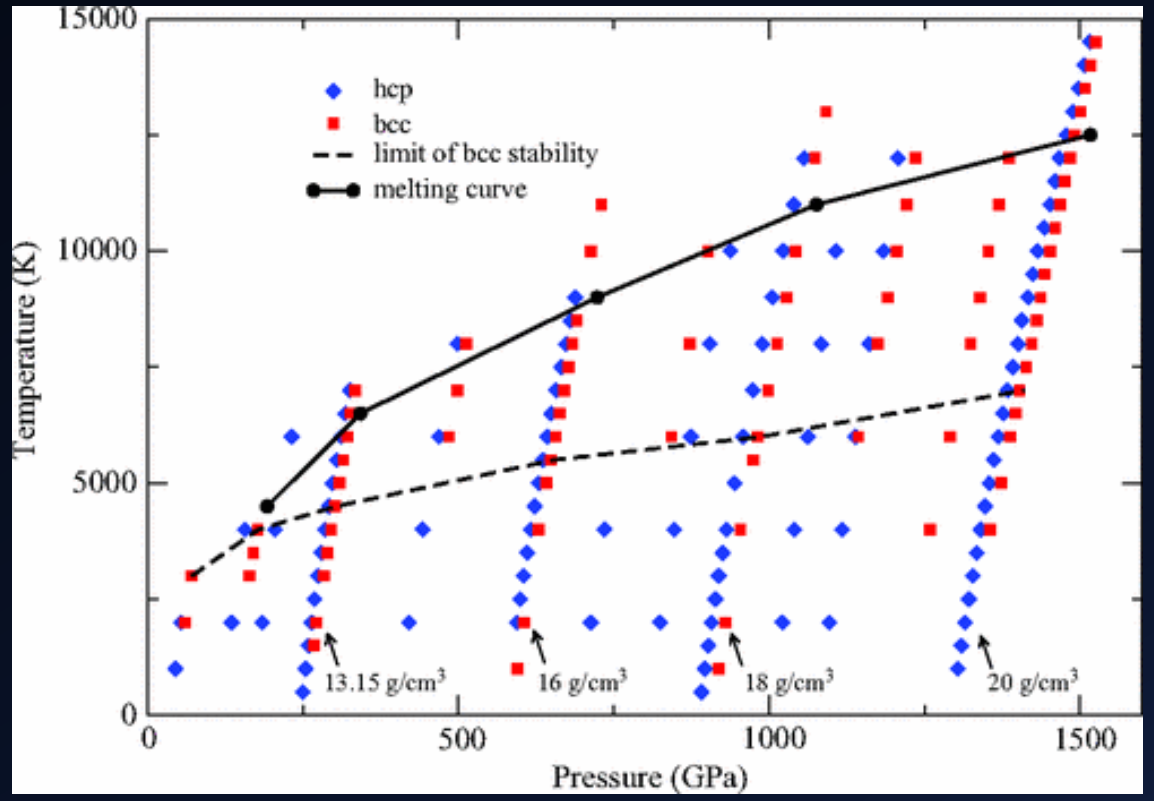
1405.3752

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

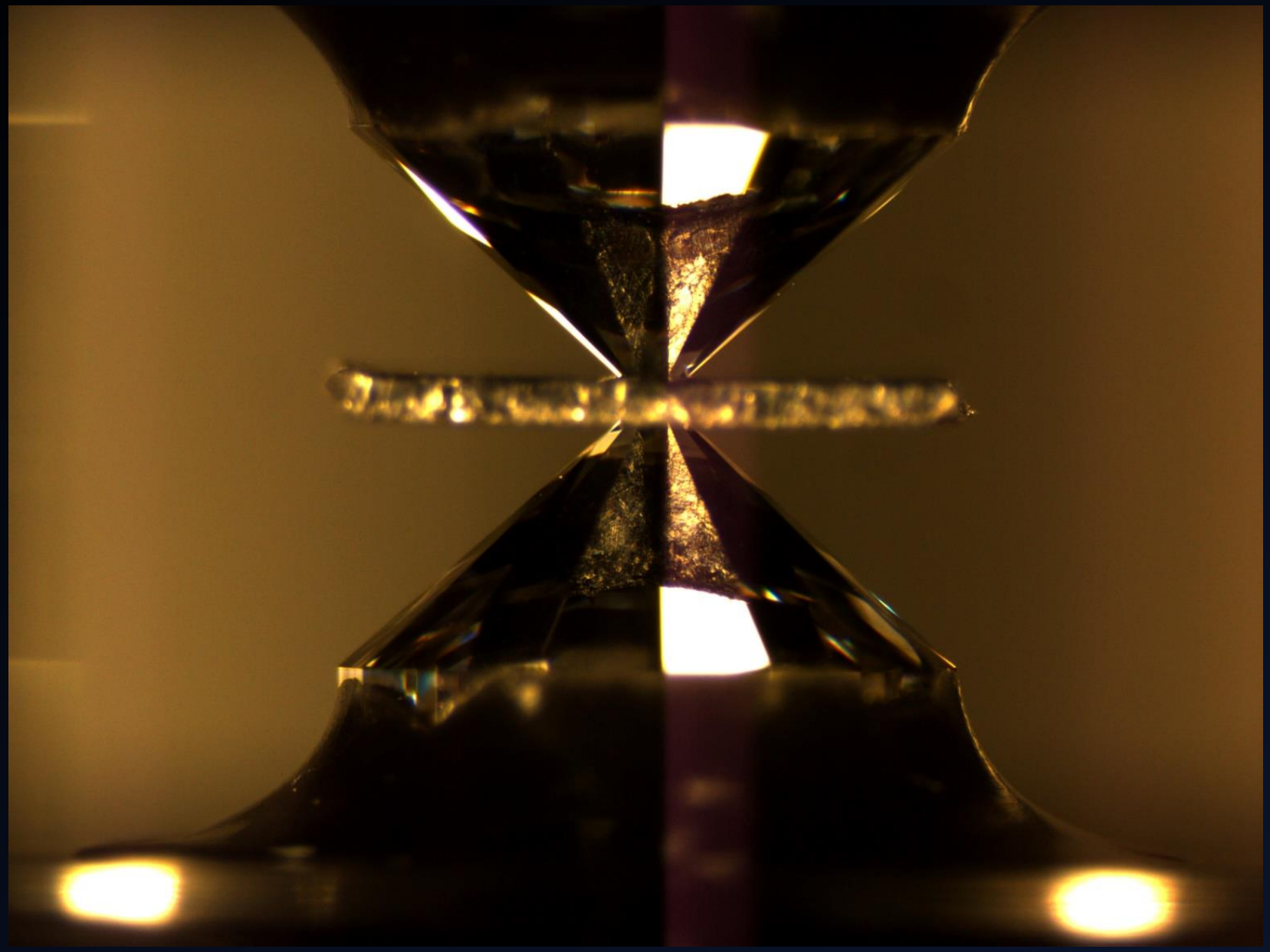
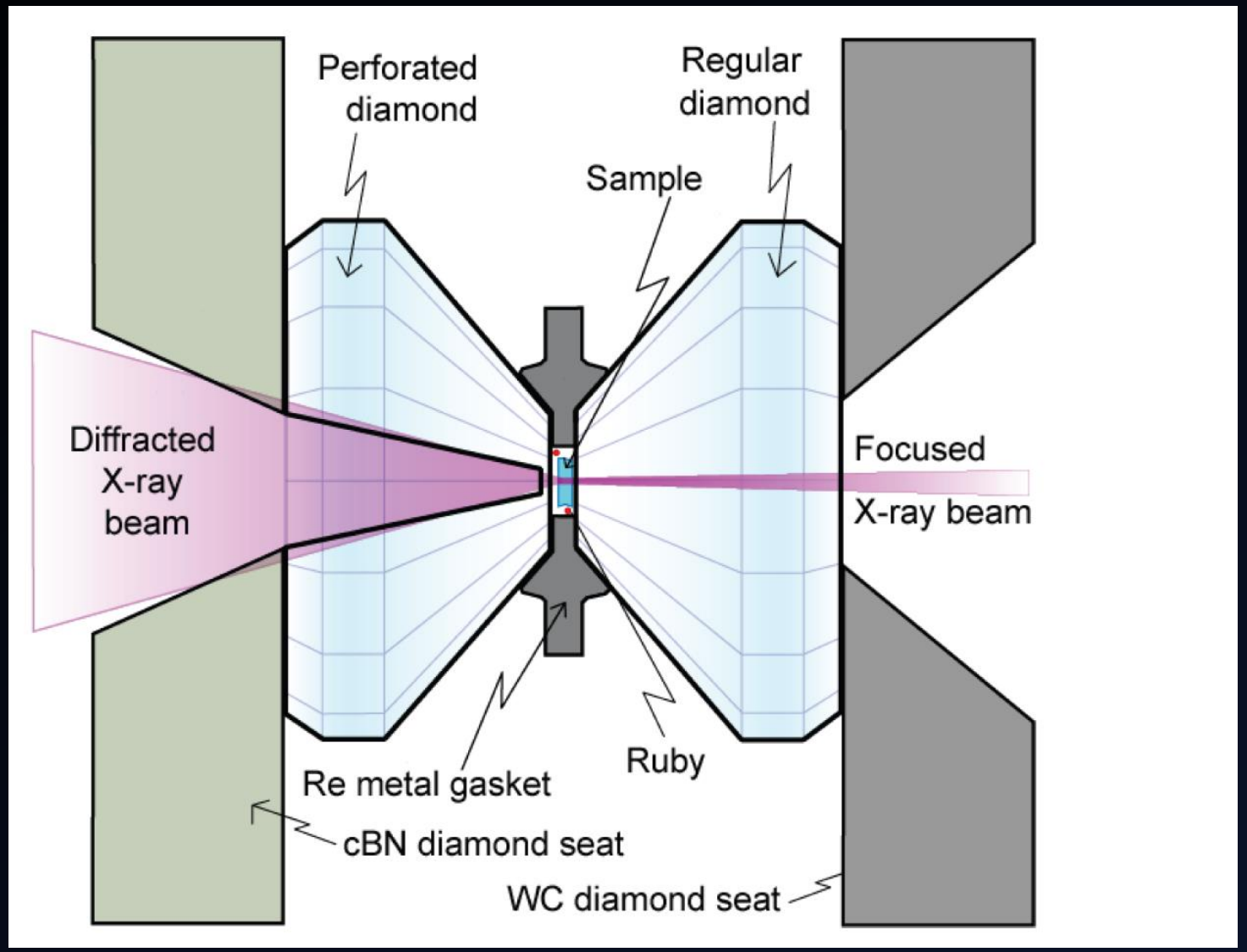
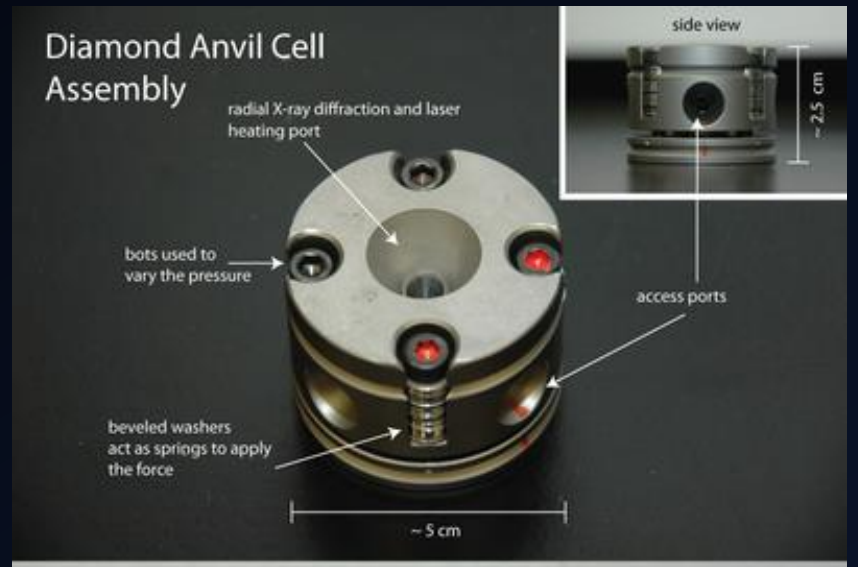
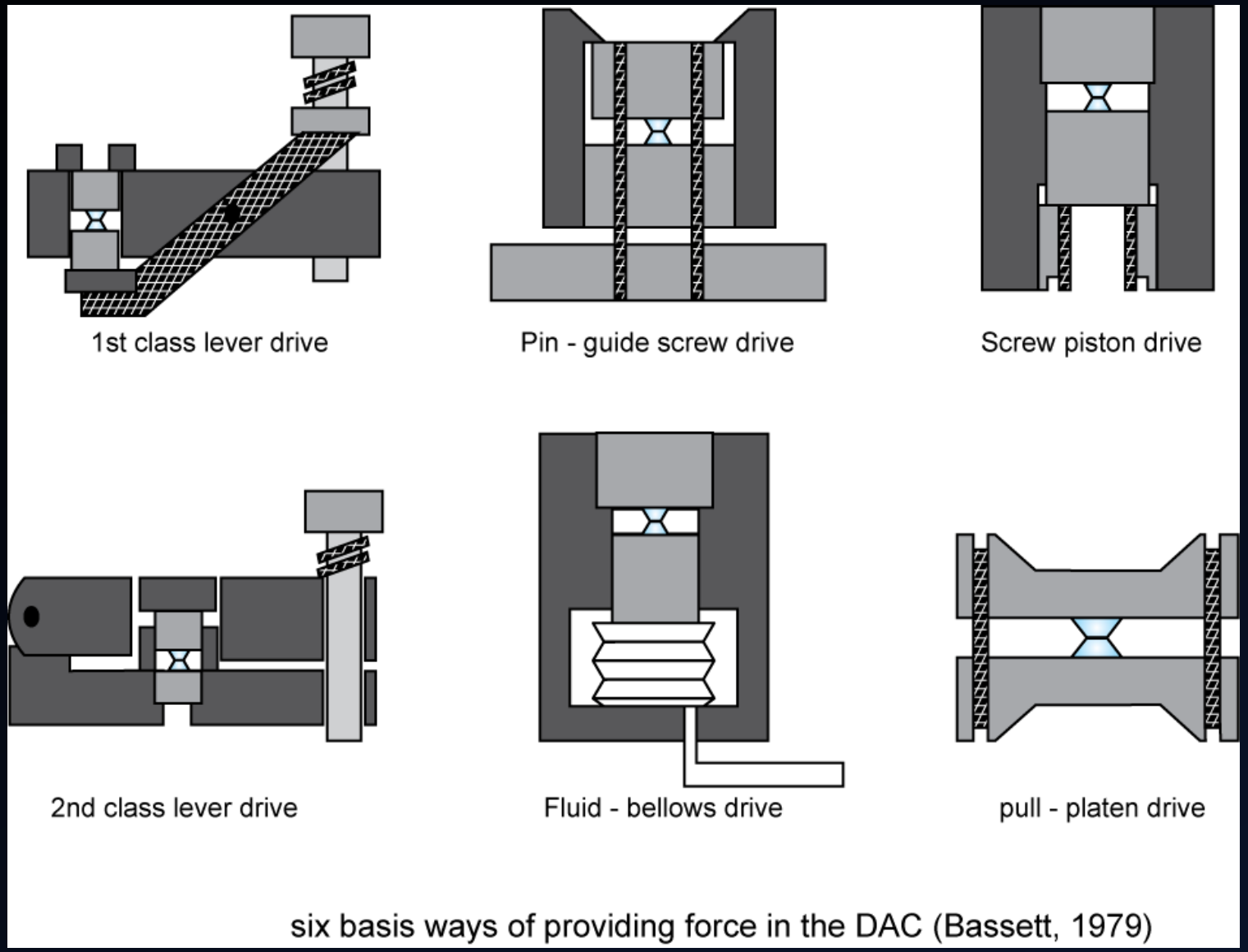


Схема эксперимента





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)

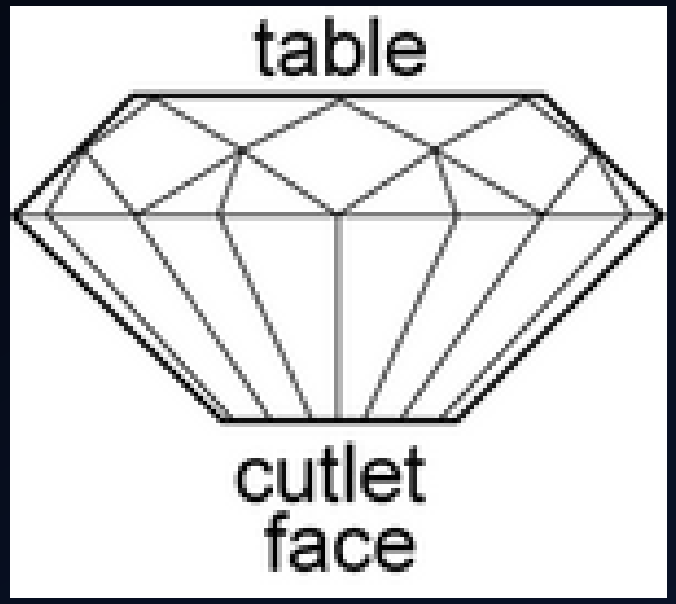
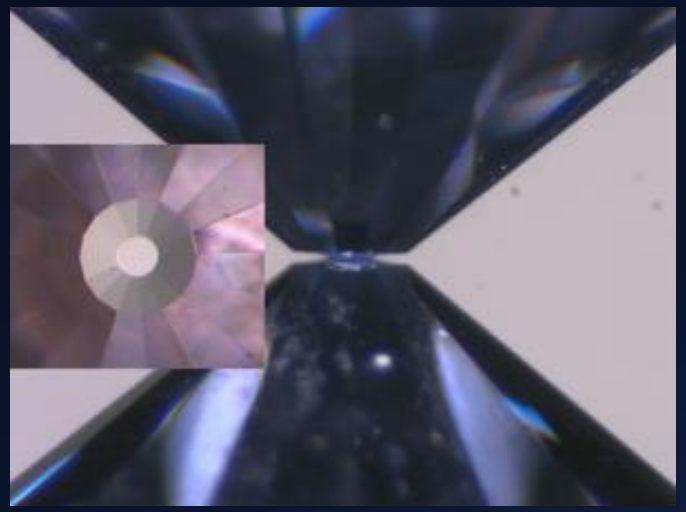
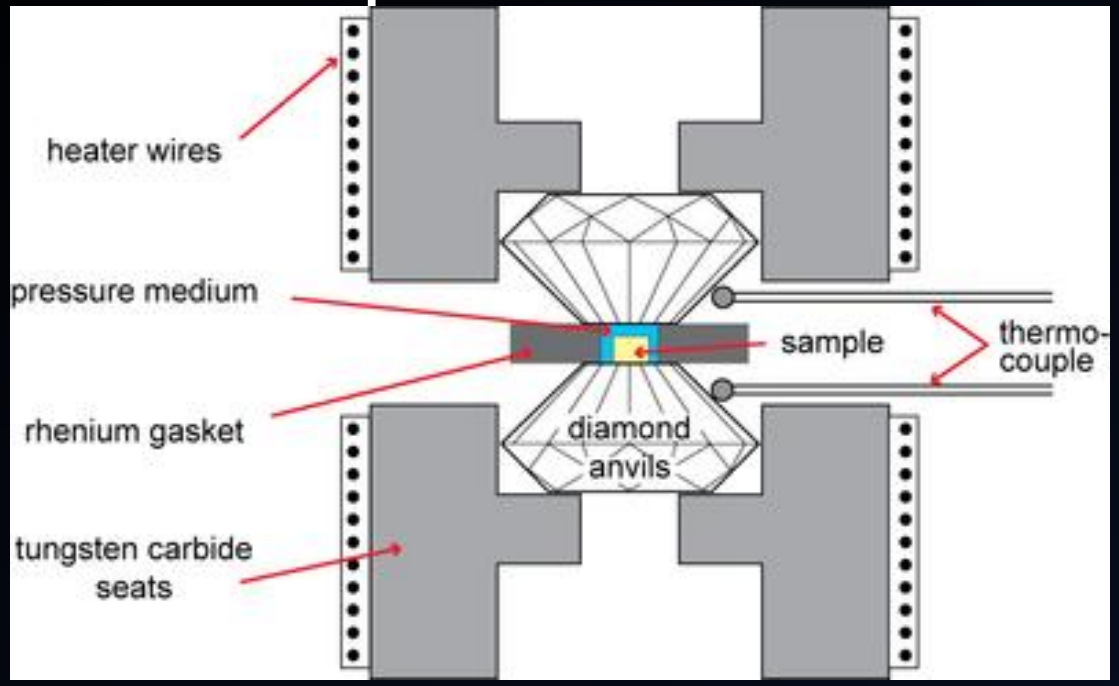


table
cutlet
face

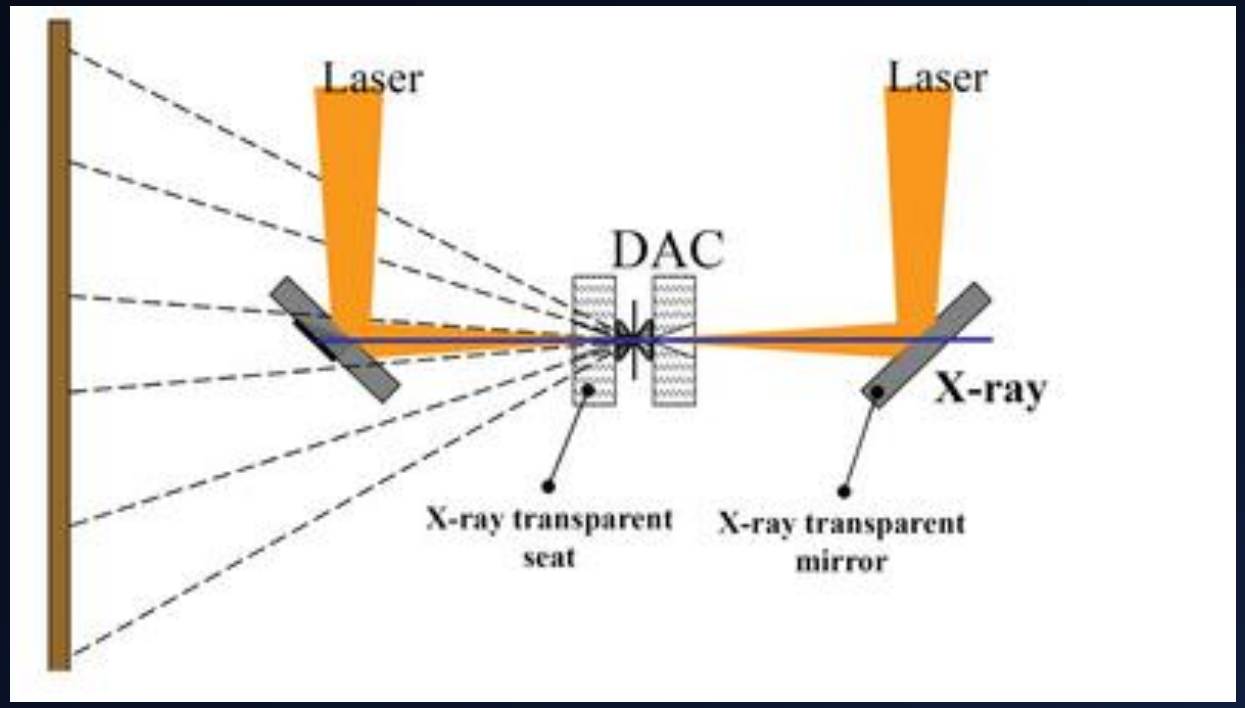


Как нагреть?

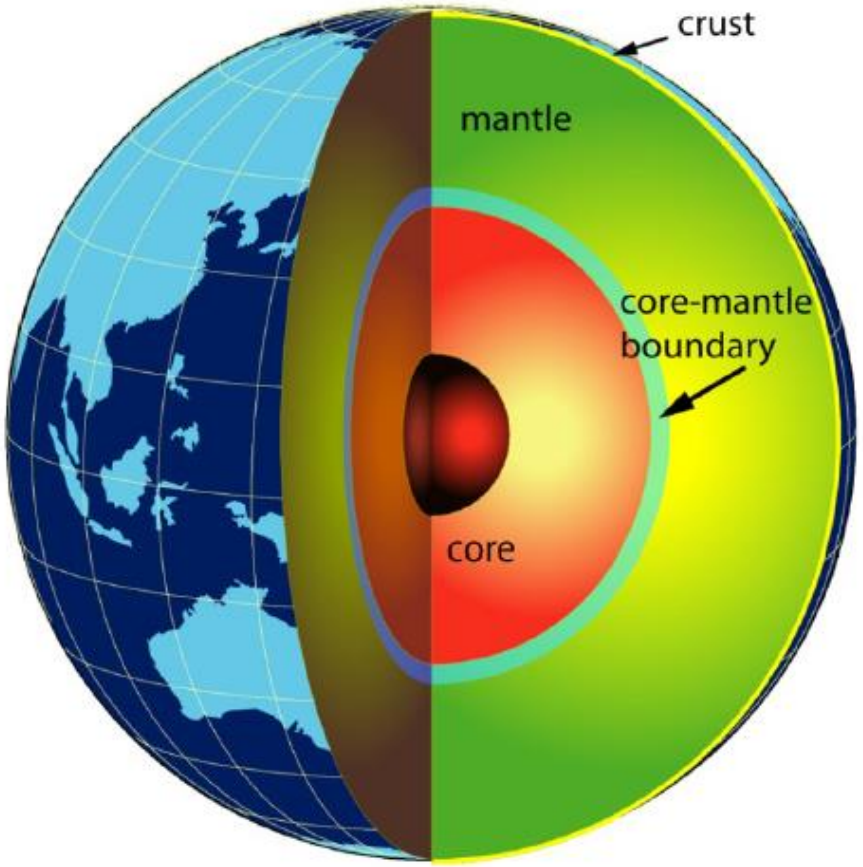


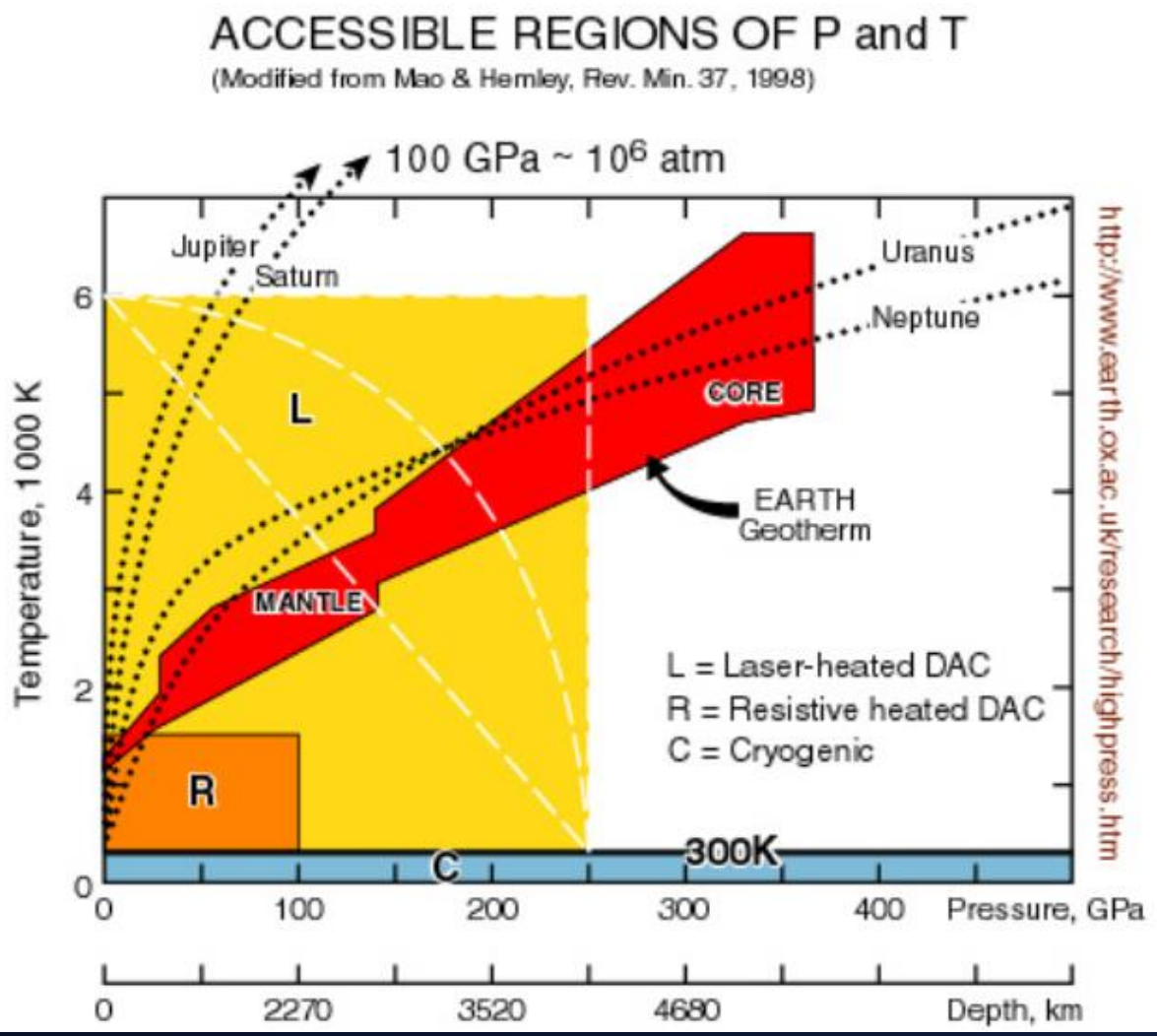
До 1300К

Выше 1300К

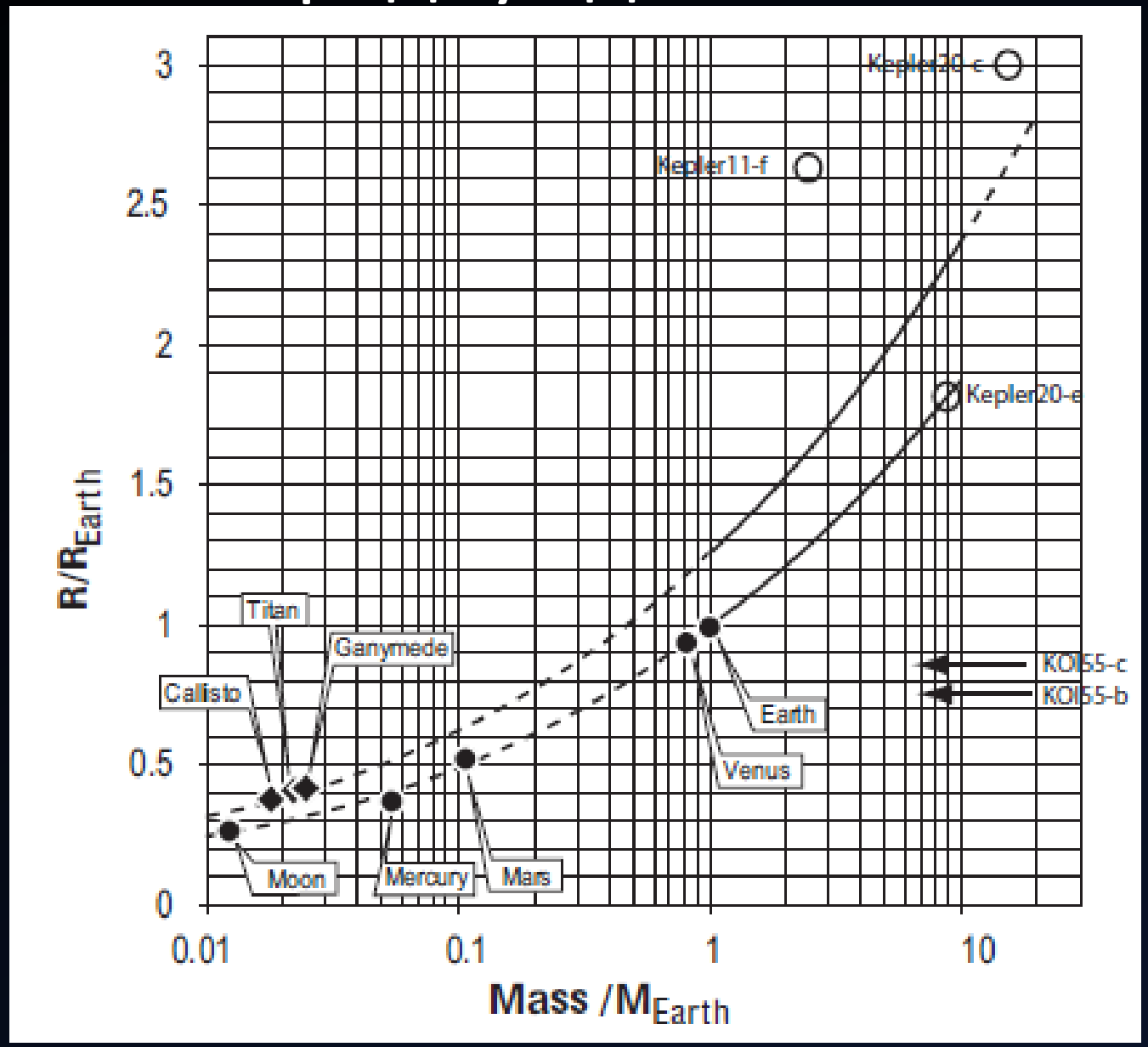


Приложение к недрам Земли





Масса-радиус для планет земного типа



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

1401.4738