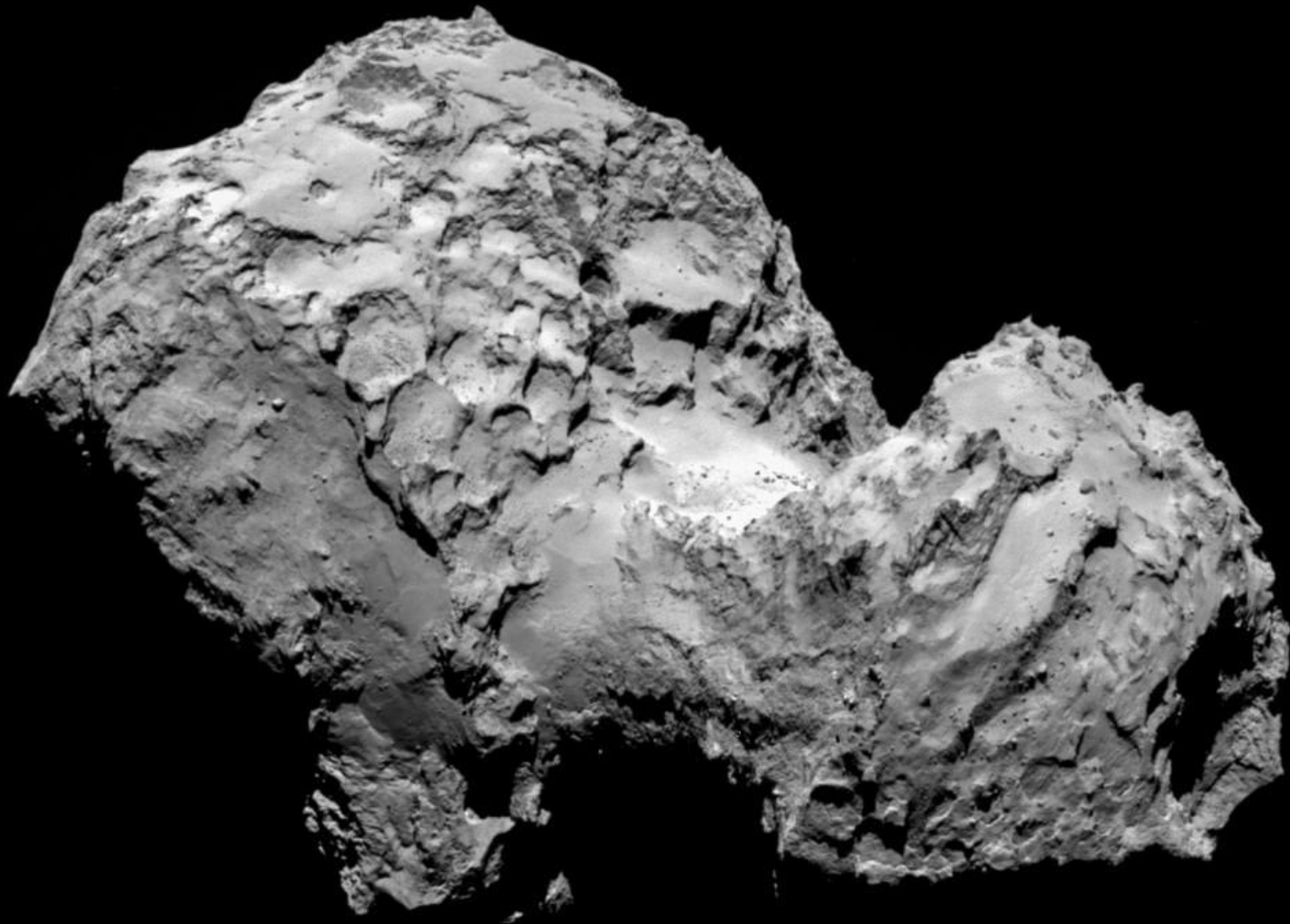


Лекция 2

СТРОЕНИЕ И ИСТОРИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Первый закон Кеплера:

Орбиты планет имеют форму эллипсов,
Солнце находится в одном из фокусов



Второй закон Кеплера:

Радиус-вектор планеты за равные промежутки
времени заметает равные площади

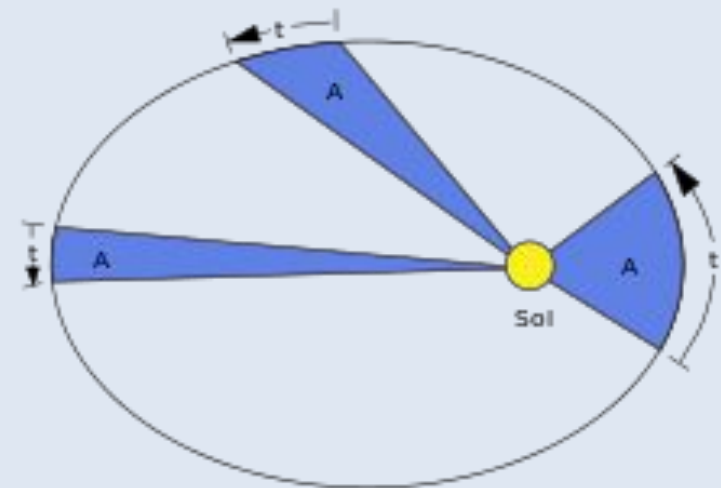
Третий закон Кеплера:

$$T_1^2 / T_2^2 = a_1^3 / a_2^3$$

Закон всемирного тяготения

$$F = G (m_1 m_2) / r^2$$

(из него выводятся все законы
Кеплера)

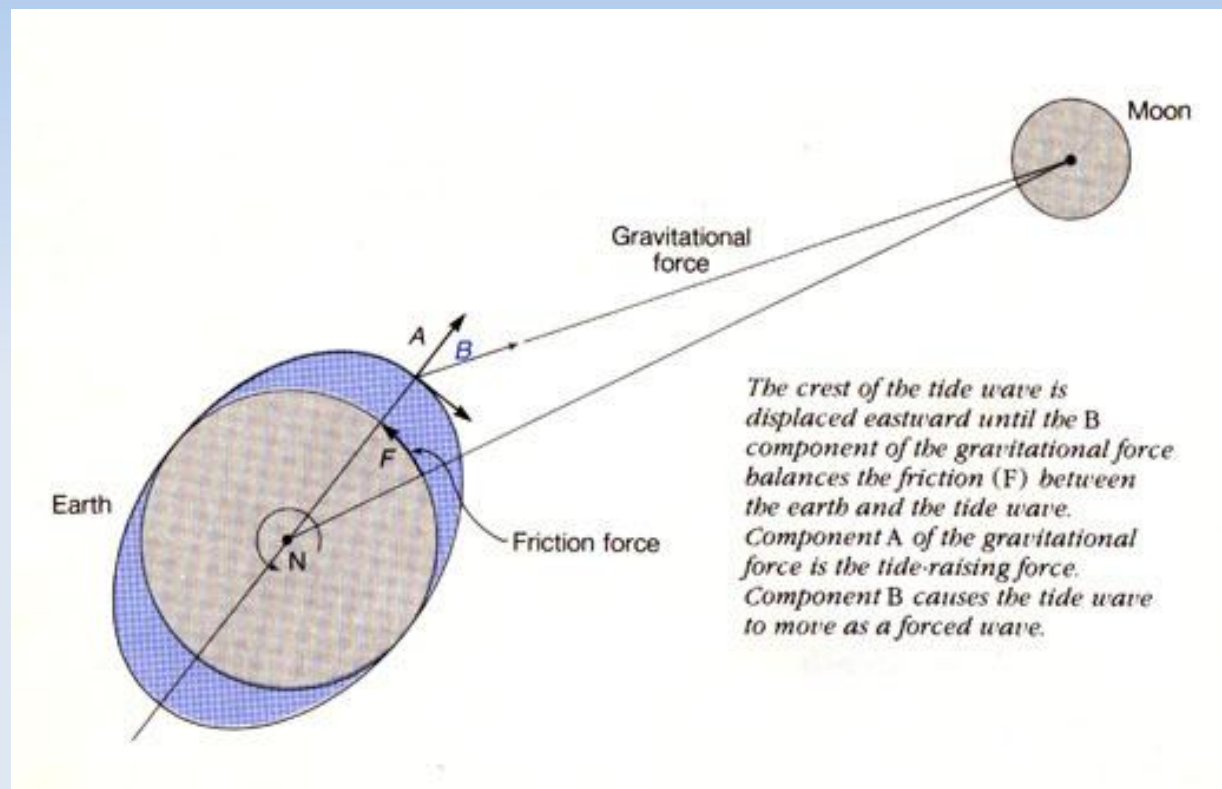


ПРИЛИВЫ

Планеты и спутники
вытягиваются в
сторону
притягивающего тела

Деформирующая сила
убывает как куб
расстояния, а не
квадрат

Механическая энергия
рассеивается в тепло и
передается от одного
тела к другому

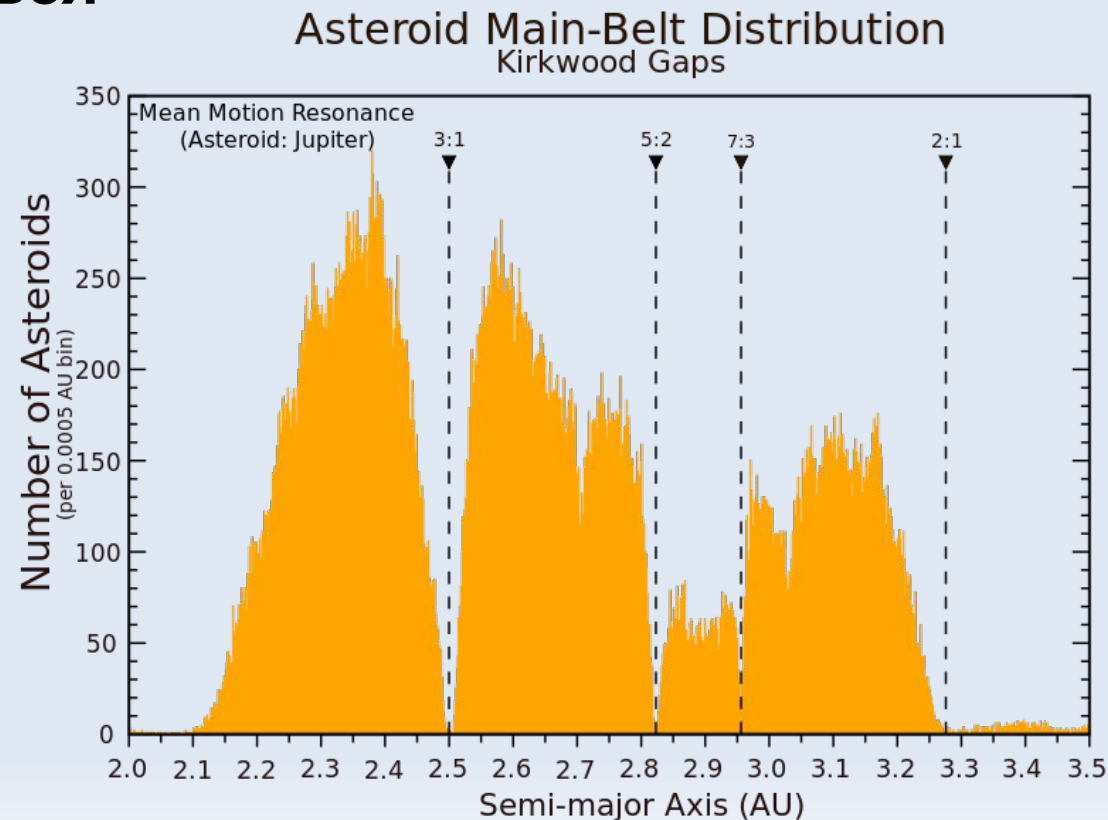


ОРБИТАЛЬНЫЕ РЕЗОНАНСЫ

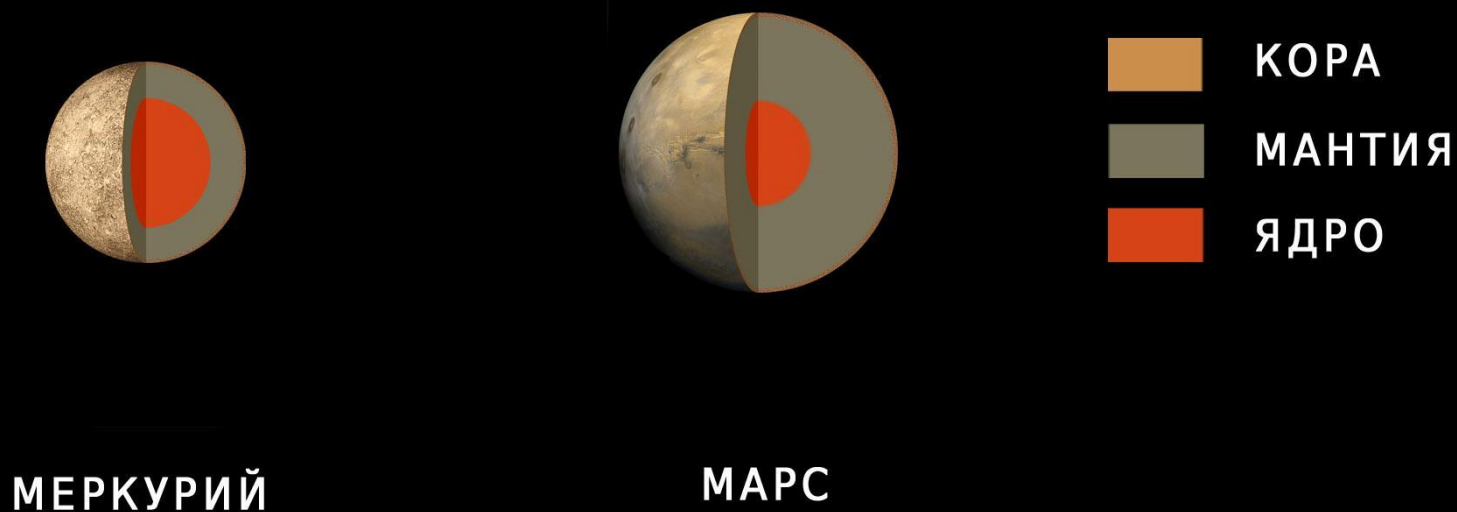
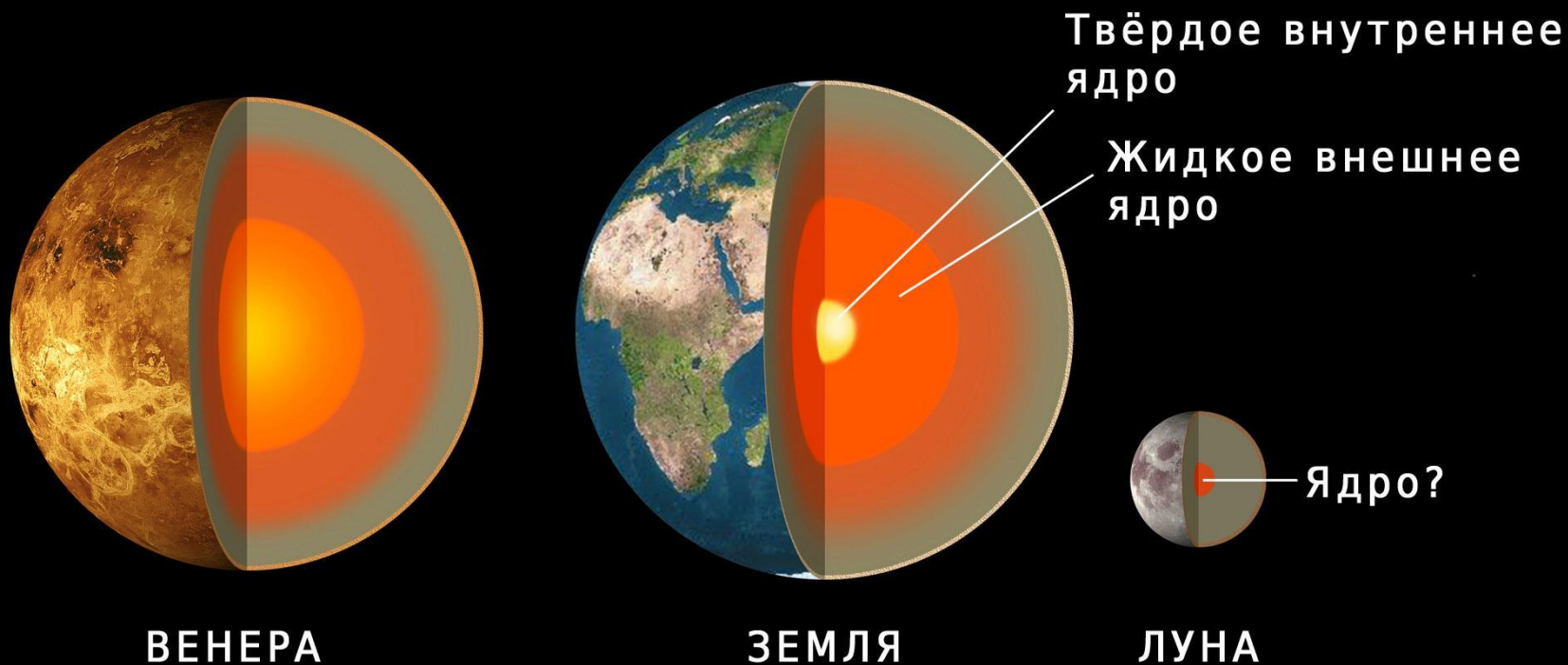
Притяжением планет друг к другу можно пренебречь, если их противостояния происходят в случайных точках орбиты

Если противостояния происходят в одном и том же месте, орбиты планет могут быстро меняться

Резонансы 2:1, 3:1, 5:2, 7:3
обычно разрушают
орбиты
Резонансы 2:3 и 3:4 -
стабилизируют



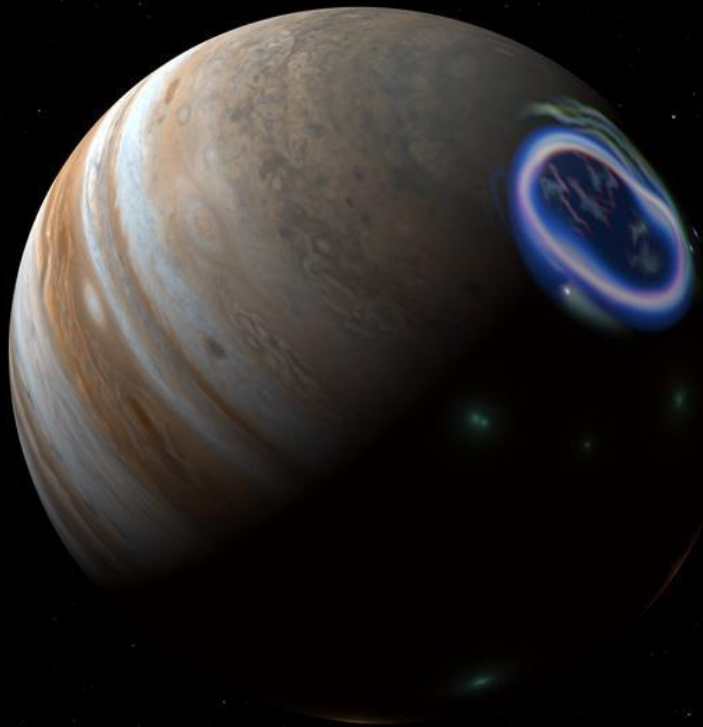
ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ



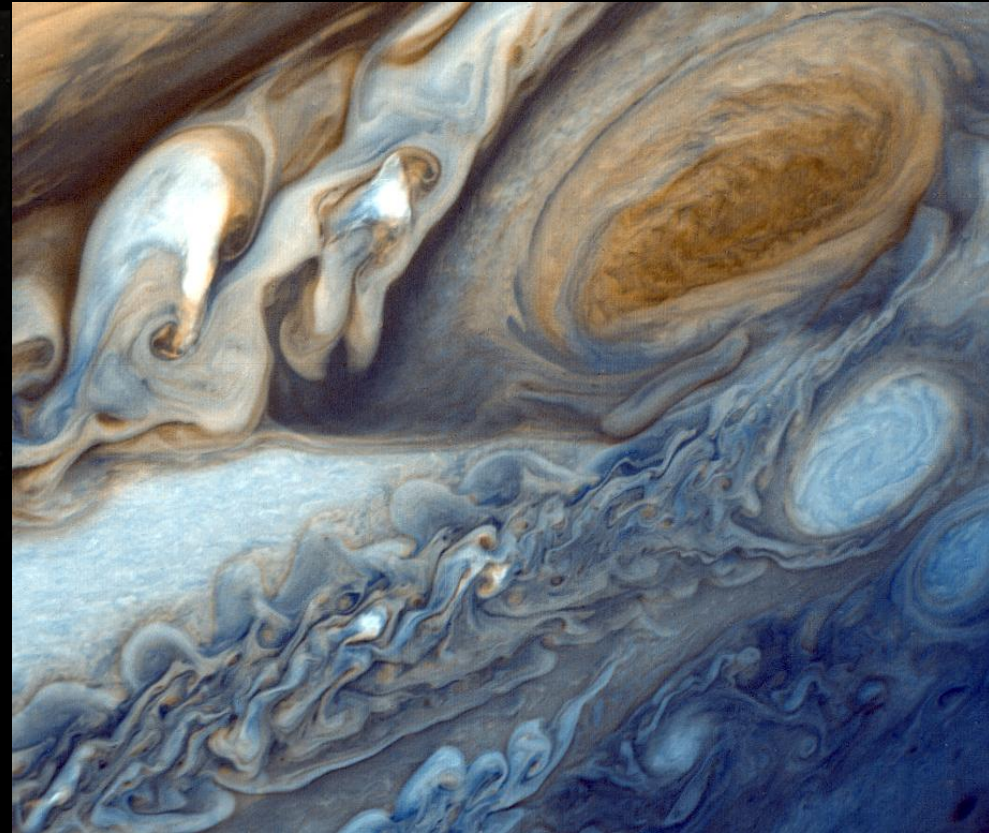
ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Планета	Диаметр (км)	Масса (относительно Земли)	Средняя плотность (г/см ³)	Период осевого вращения (сут)	Наклон оси вращения (град.)	Период орбитального вращения (сут)
Меркурий	4880	0,055	5,43	58,7	0,01	88
Венера	12100	0,815	5,24	243	177,3	224
Земля	12750	1	5,51	1	23,5	365
Марс	6750	0,107	3,93	1,05	25,2	687
Луна	3470	0,012	3,35	28	1,5	28

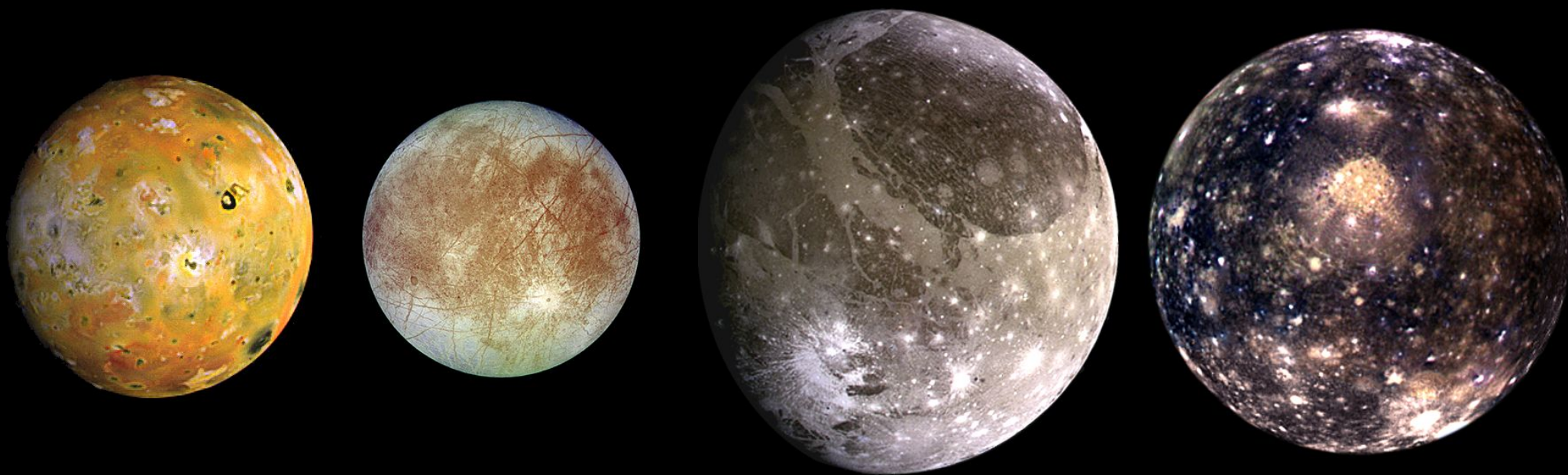
ЮПИТЕР



"Aurora on Jupiter"
Copyright © Walter Myers
<http://www.arcadiastreet.com>



СПУТНИКИ ЮПИТЕРА





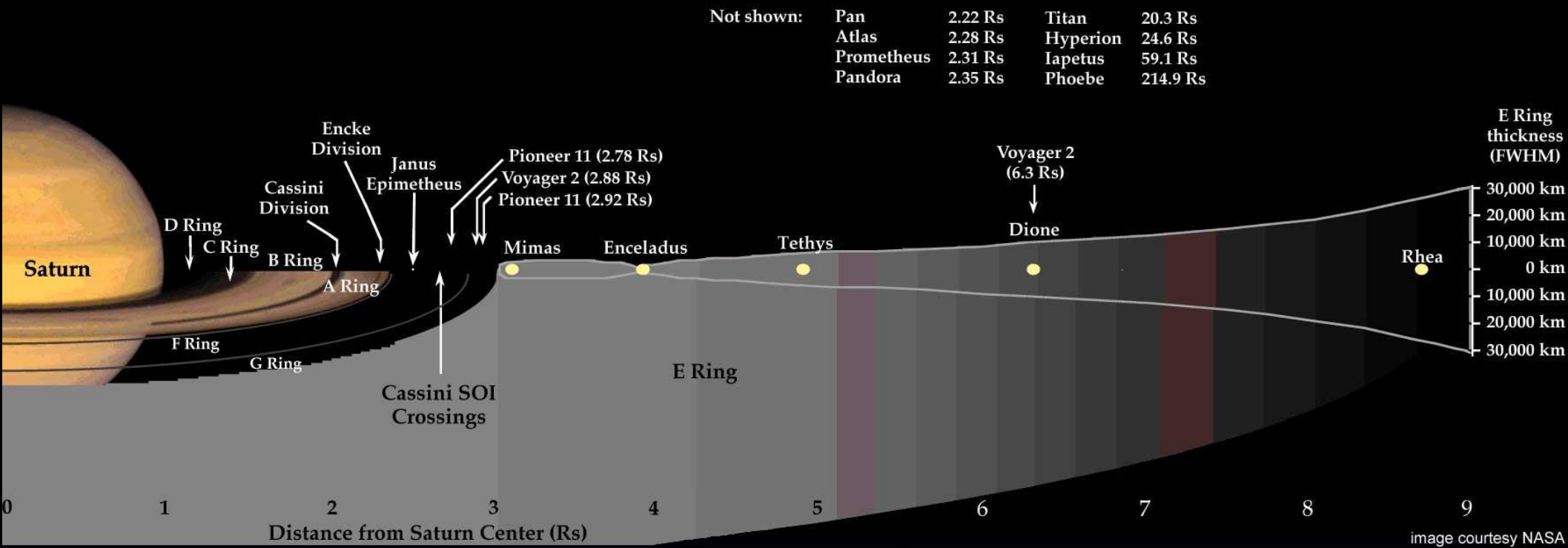
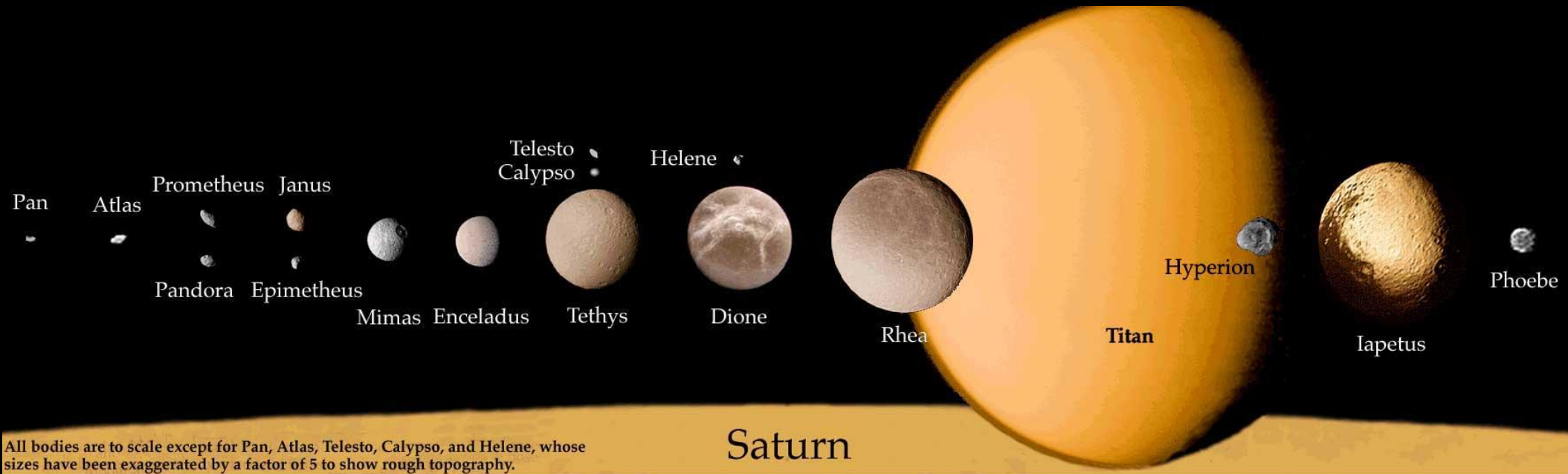
**СПУТНИКИ
ЮПИТЕРА**

ИО

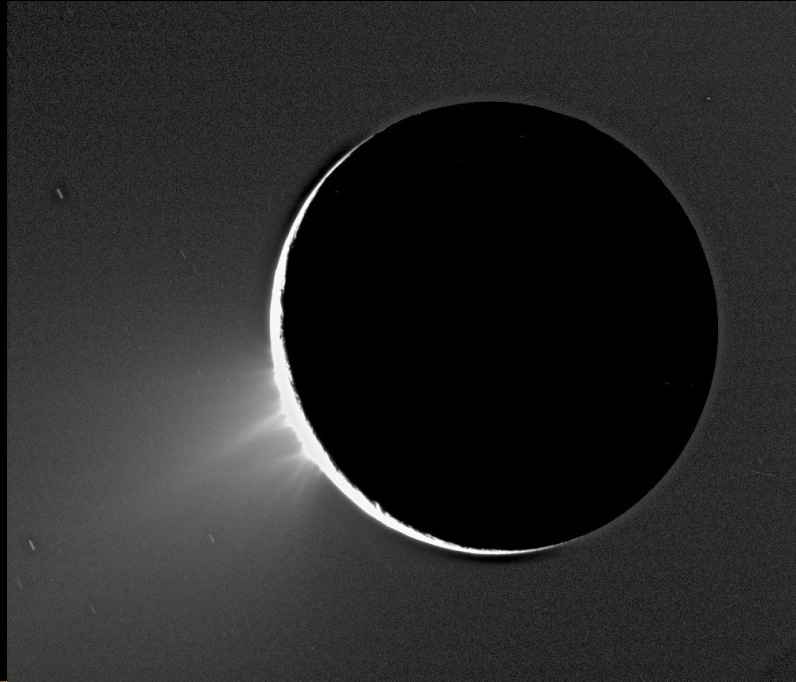
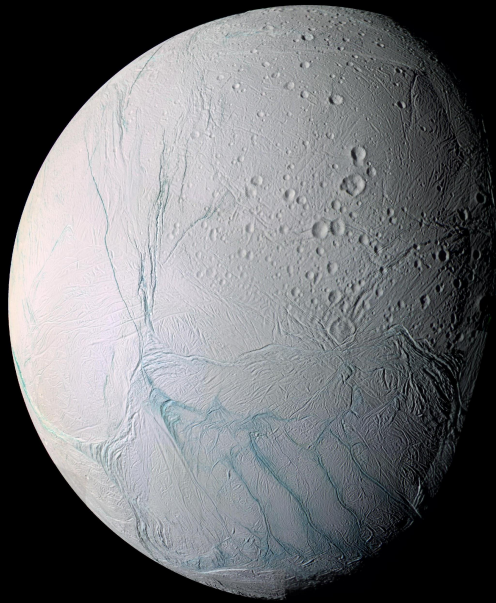


ЕВРОПА

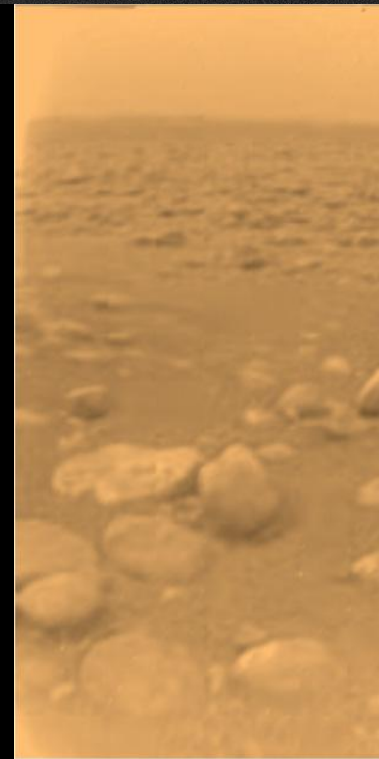
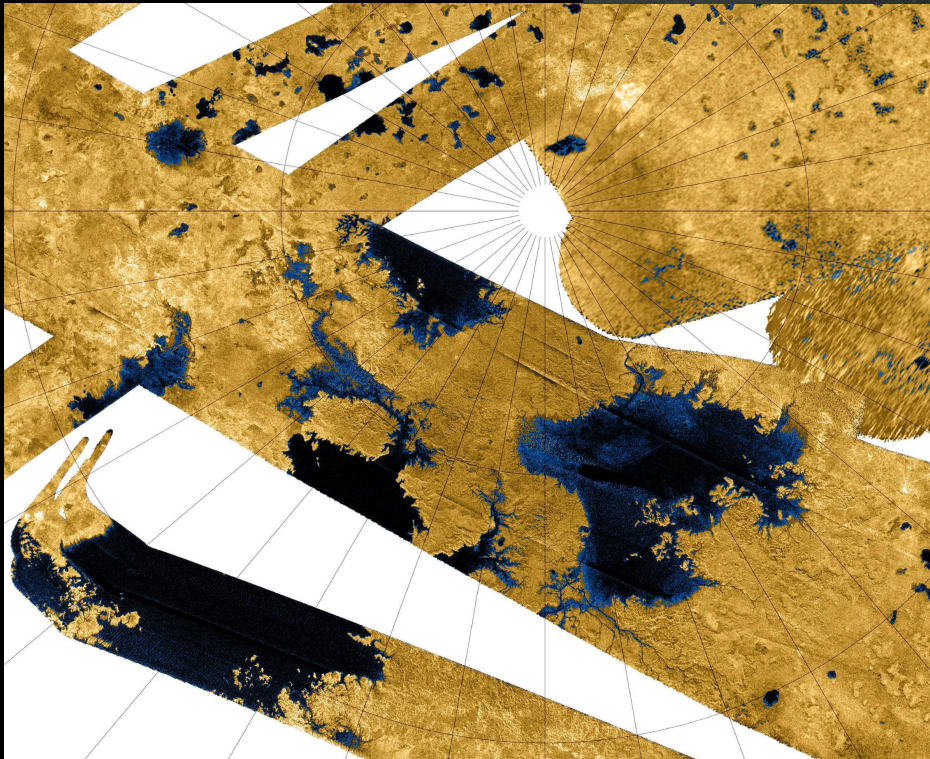
CATYPH



СПУТНИКИ САТУРНА

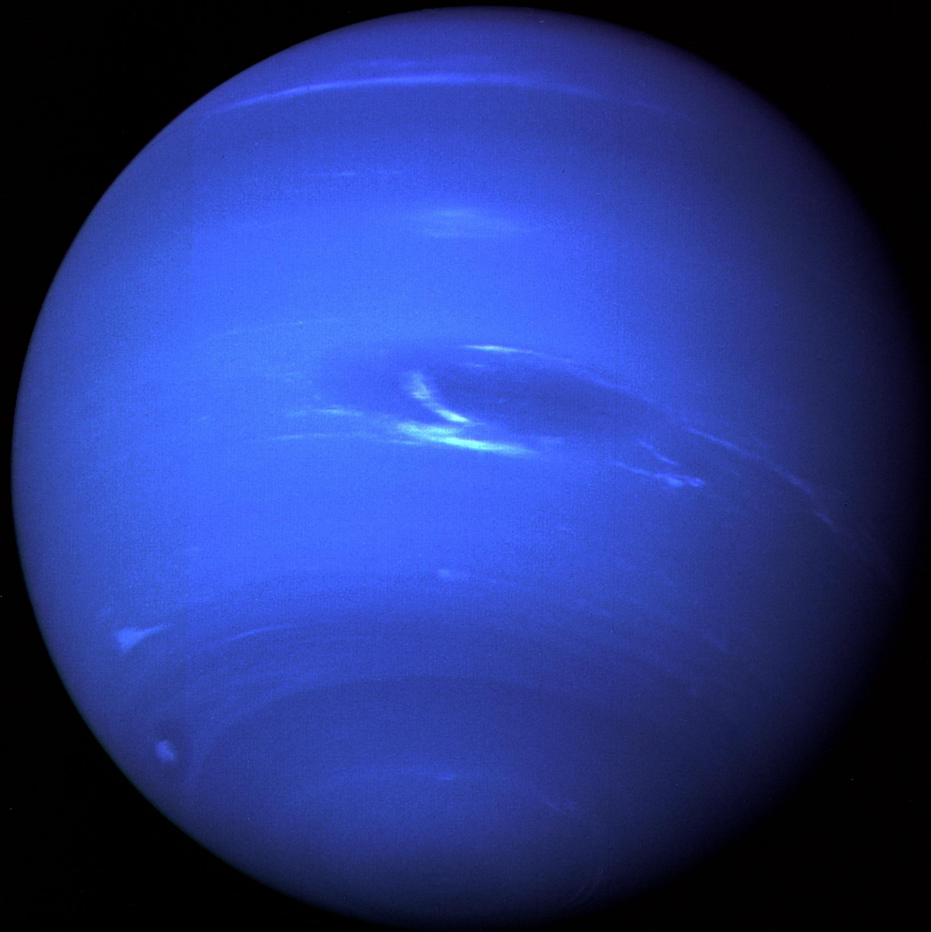


ЭНЦЕЛАД



ТИТАН

УРАН И НЕПТУН



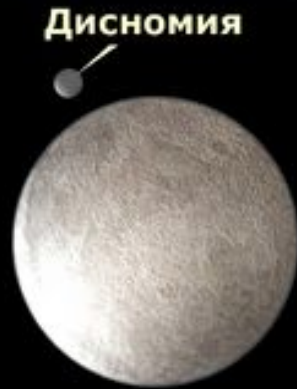
СПУТНИКИ УРАНА И НЕПТУНА



ПЛУТОН



КРУПНЕЙШИЕ ОБЪЕКТЫ ПОЯСА КОЙПЕРА



Эрида



Плутон



Макемаке



Хаумеа



Седна



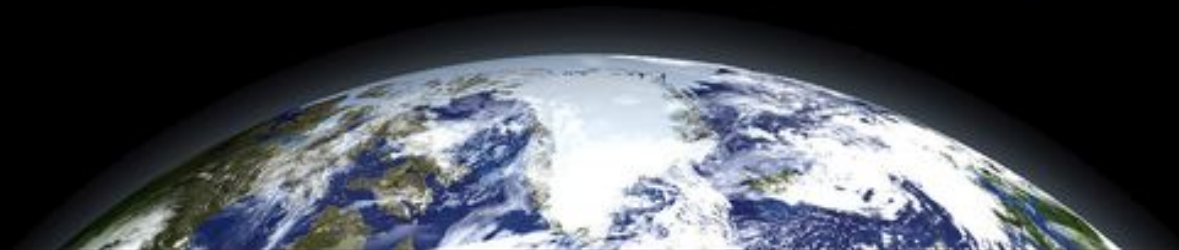
Орк



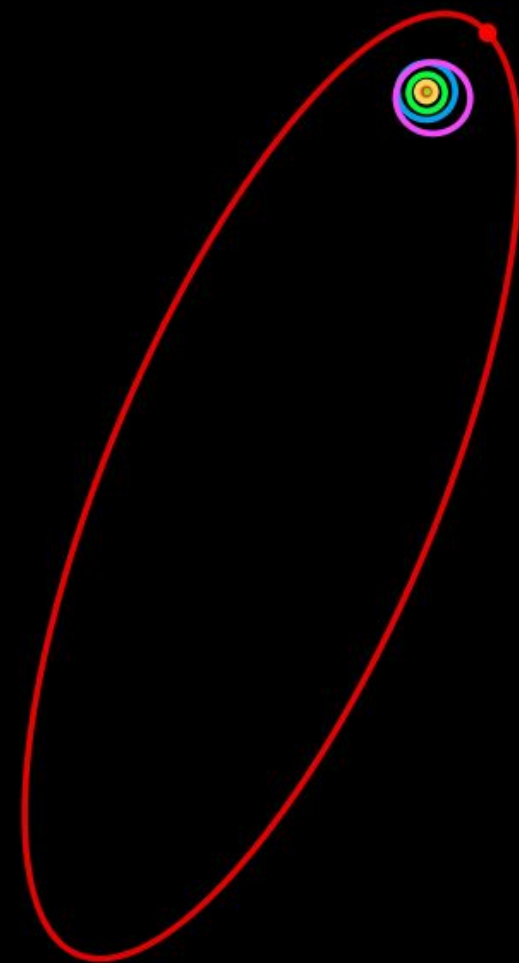
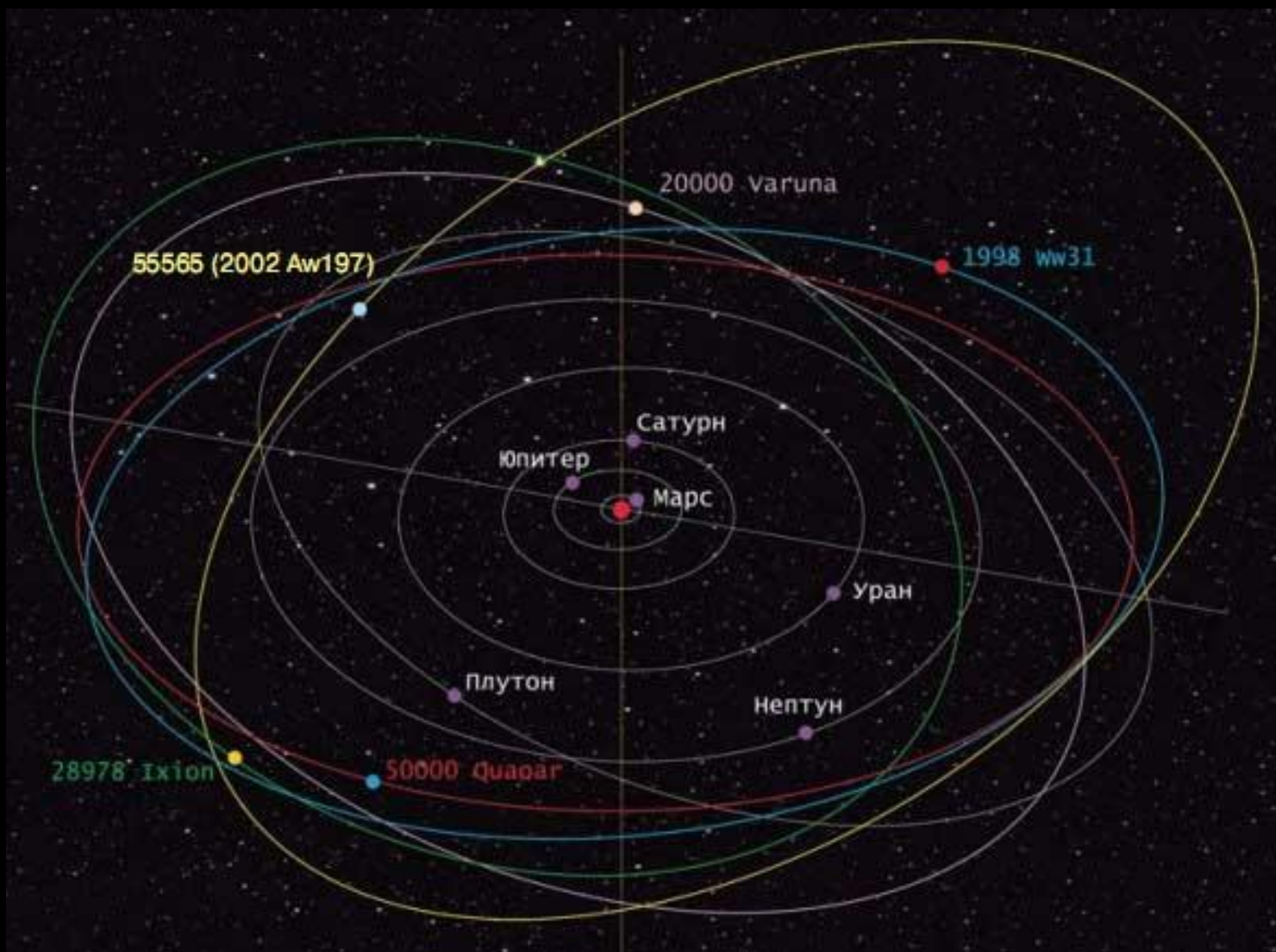
2007 OR₁₀



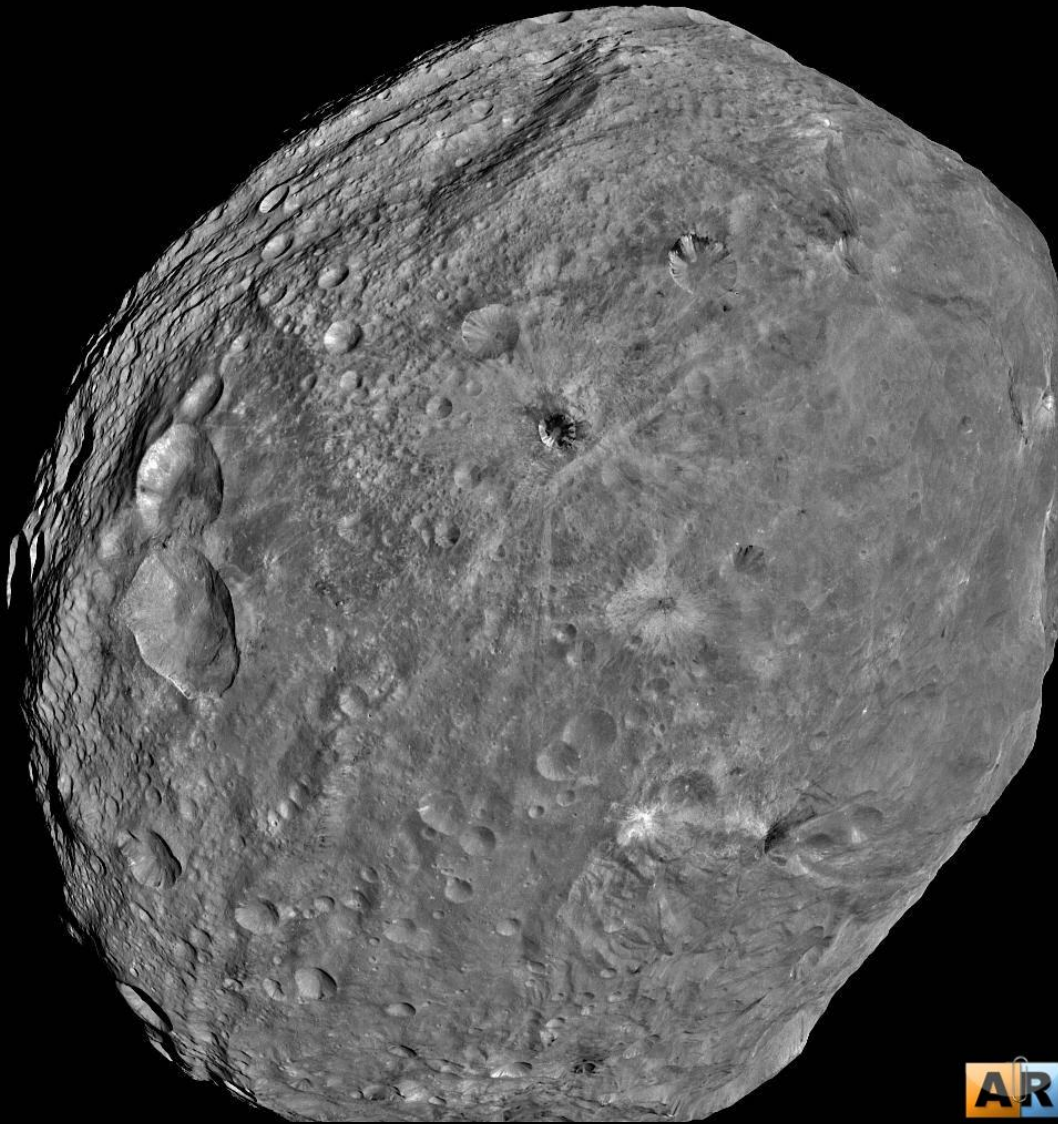
Квавар



ОРБИТЫ ОБЪЕКТОВ ПОЯСА КОЙПЕРА



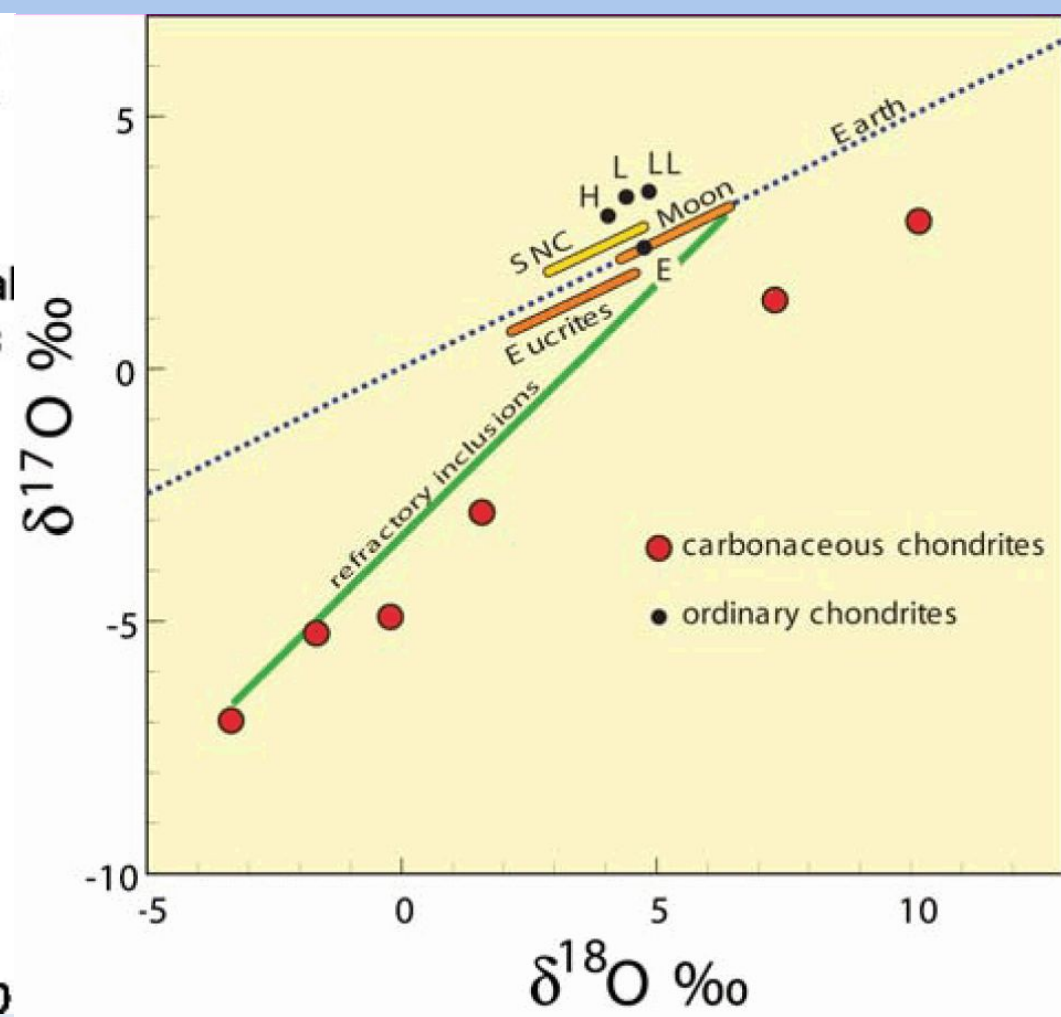
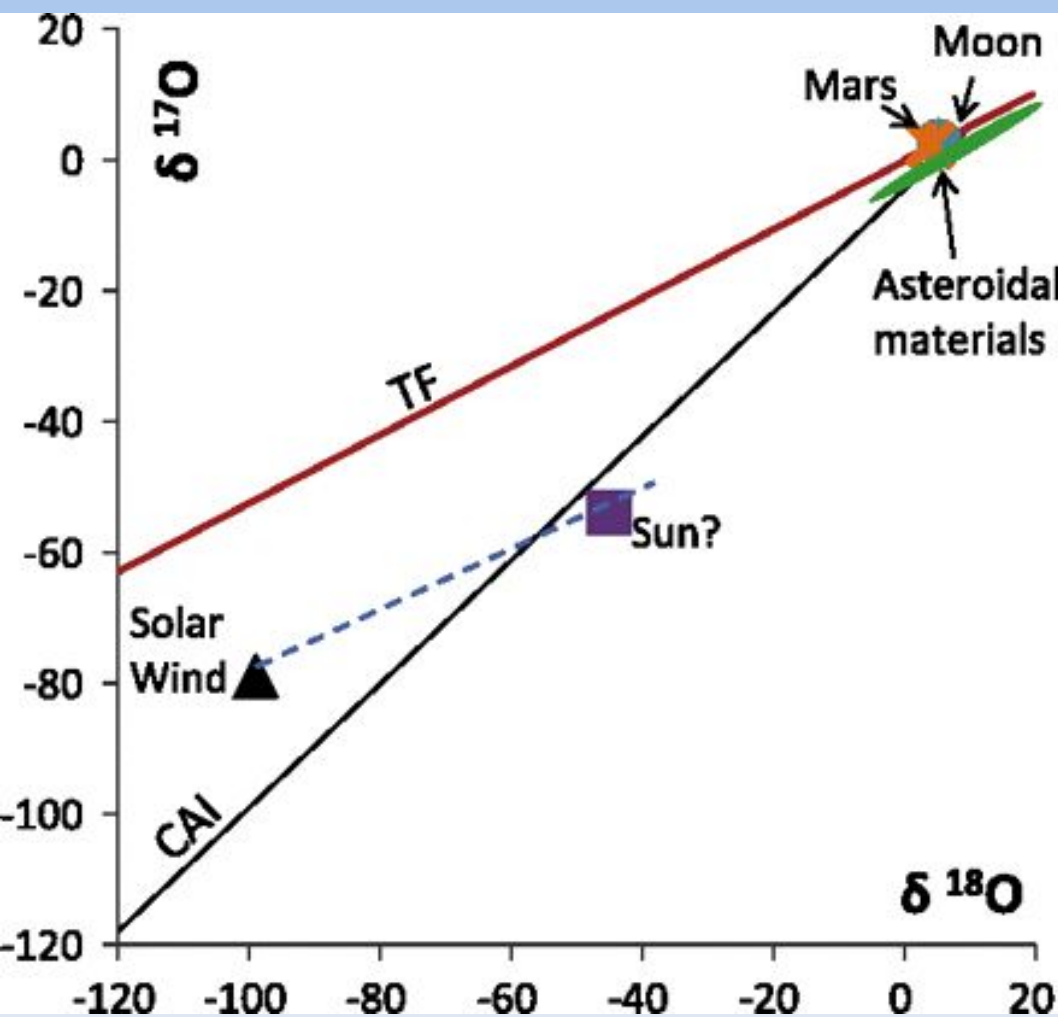
КРУПНЕЙШИЕ АСТЕРОИДЫ: ЦЕРЕРА И ВЕСТА



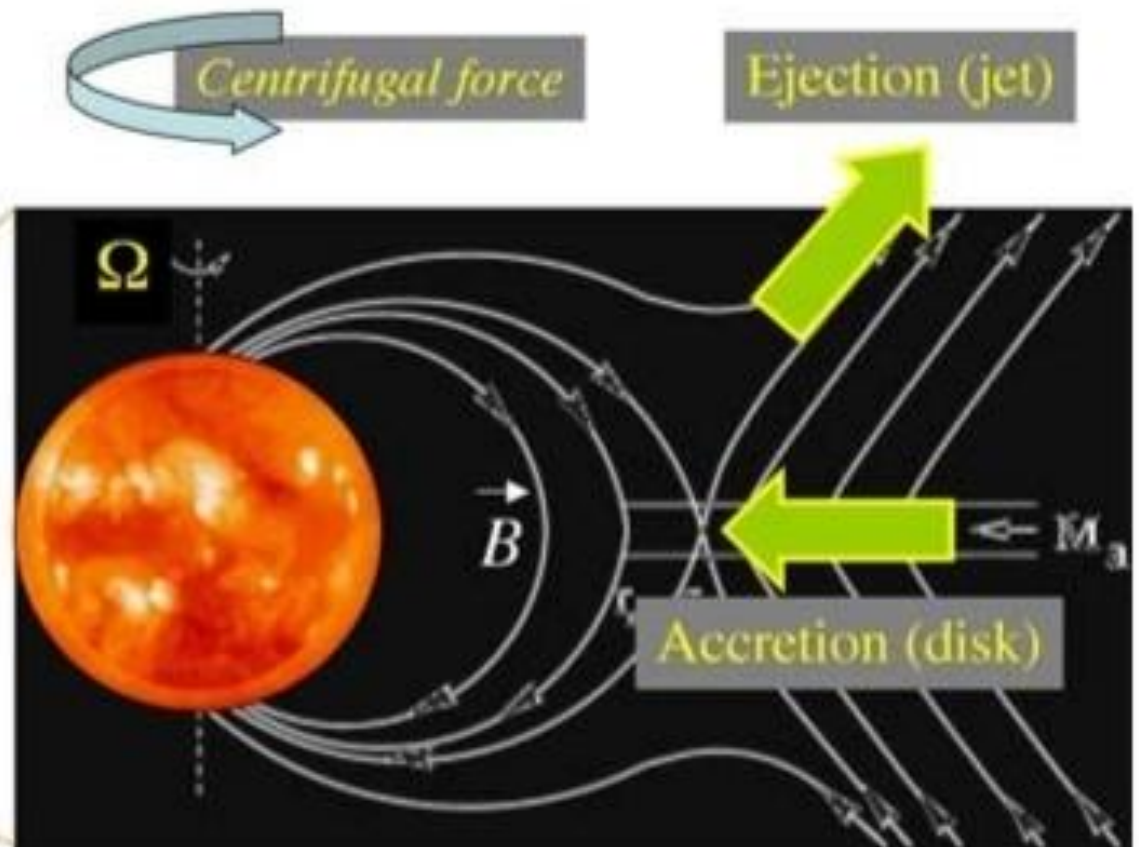
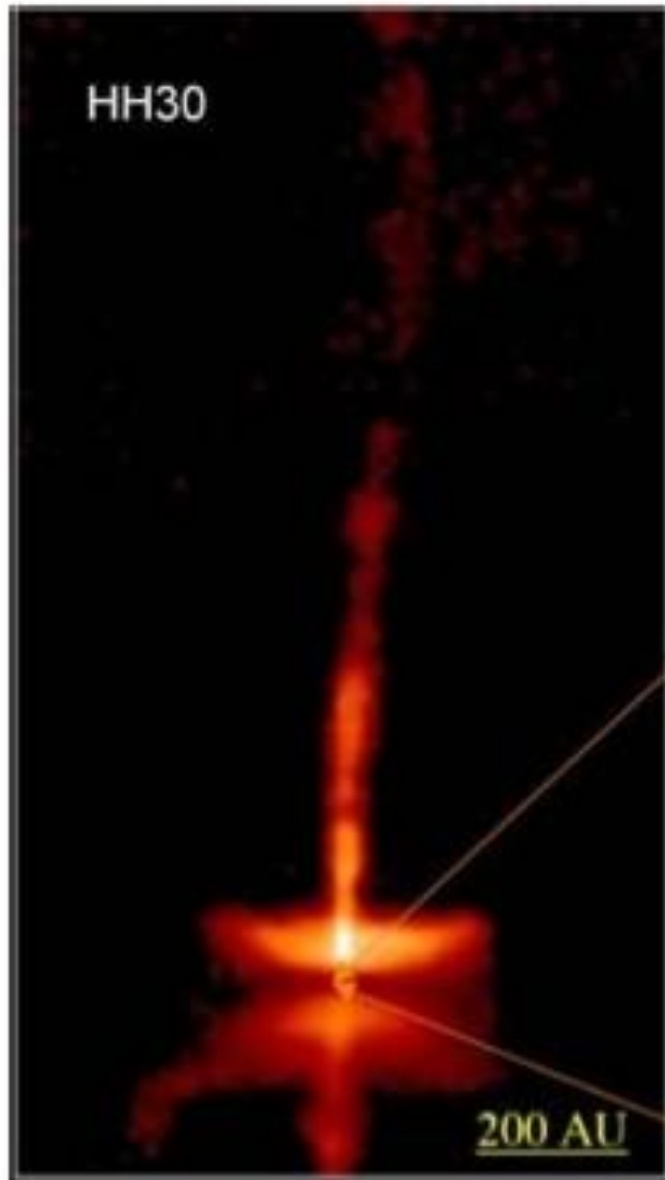
ПРОТОПЛАНЕТНЫЕ ДИСКИ



СООТНОШЕНИЯ ИЗОТОПОВ КИСЛОРОДА В ТЕЛАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ



МЕТЕОРИТЫ

Железный



Каменный хондритный



Каменный
ахондритный



ХРОНОЛОГИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

0,5-2 млн. лет до начала	Вспышка сверхновой, загрязнившая протозвездное облако радионуклидами ^{26}Al и ^{60}Fe
0,2-0,3 млн. лет до начала	Центр молекулярного облака начинает сгущаться в прото-Солнце
0	Образование кальций-алюминиевых включений. Прото-Солнце набрало большую часть массы и высветило большую часть гравитационной энергии.
От 0 до 2 млн. лет	Образование хондров
0,2-2,5 млн. лет	Образование планетезималей размерами до 10 км
1-3 млн. лет	Олигархический рост планетарных зародышей размером до 7000 км (во внутренней Солнечной системе) и до 15000 км (в зоне планет-гигантов)
3-10 млн. лет	Образование Юпитера и Сатурна. Первый этап обеднения пояса астероидов
3-100 млн. лет	Столкновения планетарных зародышей и слияние их в планеты земной группы
60-100 млн. лет	Образование Луны после столкновения Тейи с Землей
600-650 млн. лет	Период нестабильности во внешней Солнечной системе. Разрушение первичного пояса Койпера. Поздняя тяжелая бомбардировка во внутренней Солнечной системе. Второй период обеднения пояса астероидов.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛУНЫ

Старые теории:

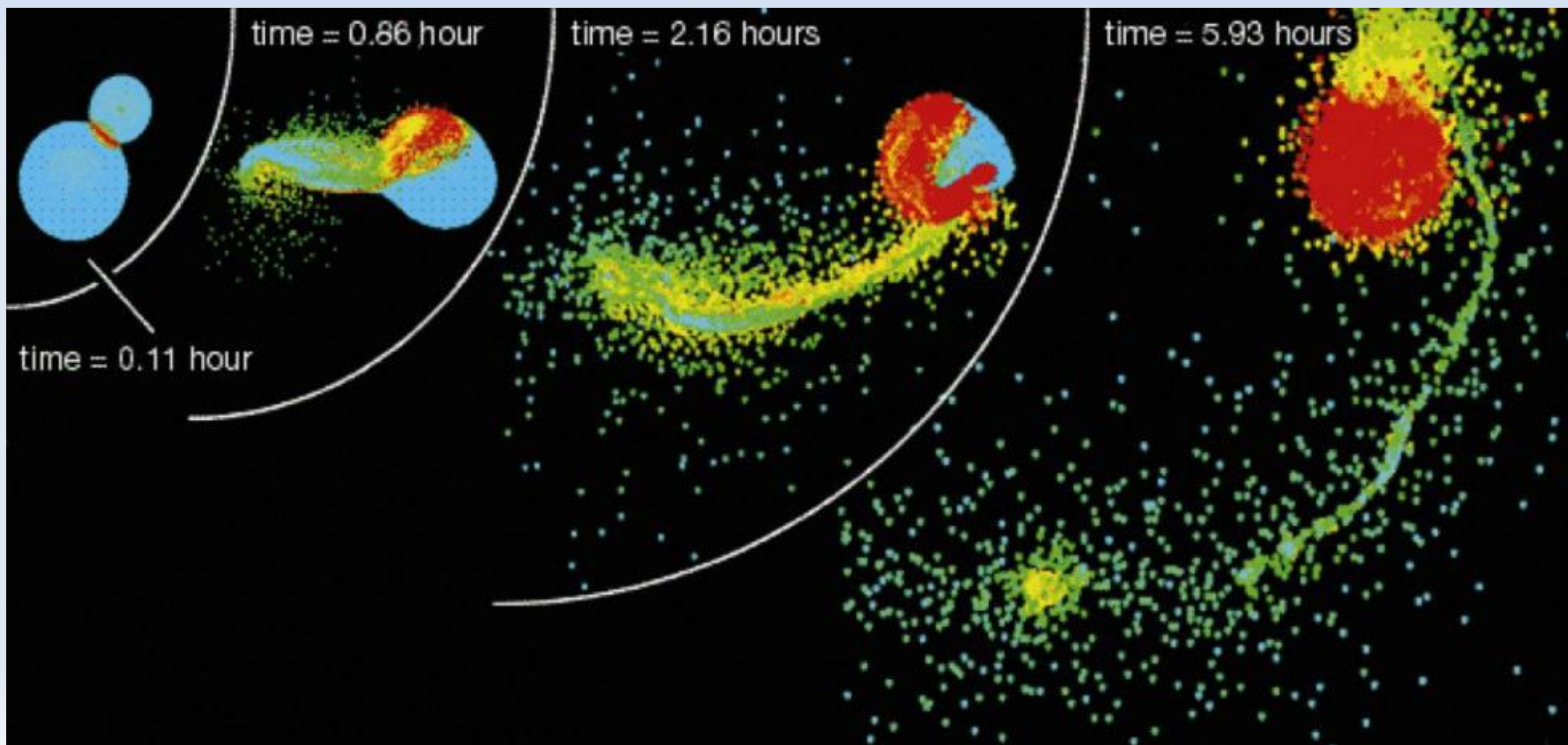
- **Захват Луны, сформированной в другом месте («Луна-сирота»)**
- **Совместное формирование Луны и Земли из пыли («Луна-сестра»)**
- **Отделение Луны от быстро вращающейся Земли центробежной силой («Луна-дочь»)**

Анализ лунного грунта:

- **Изотопный состав O, Si, Ti и других элементов совпадает с земным**
- **Химический состав похож на земную мантию, за вычетом летучих веществ**

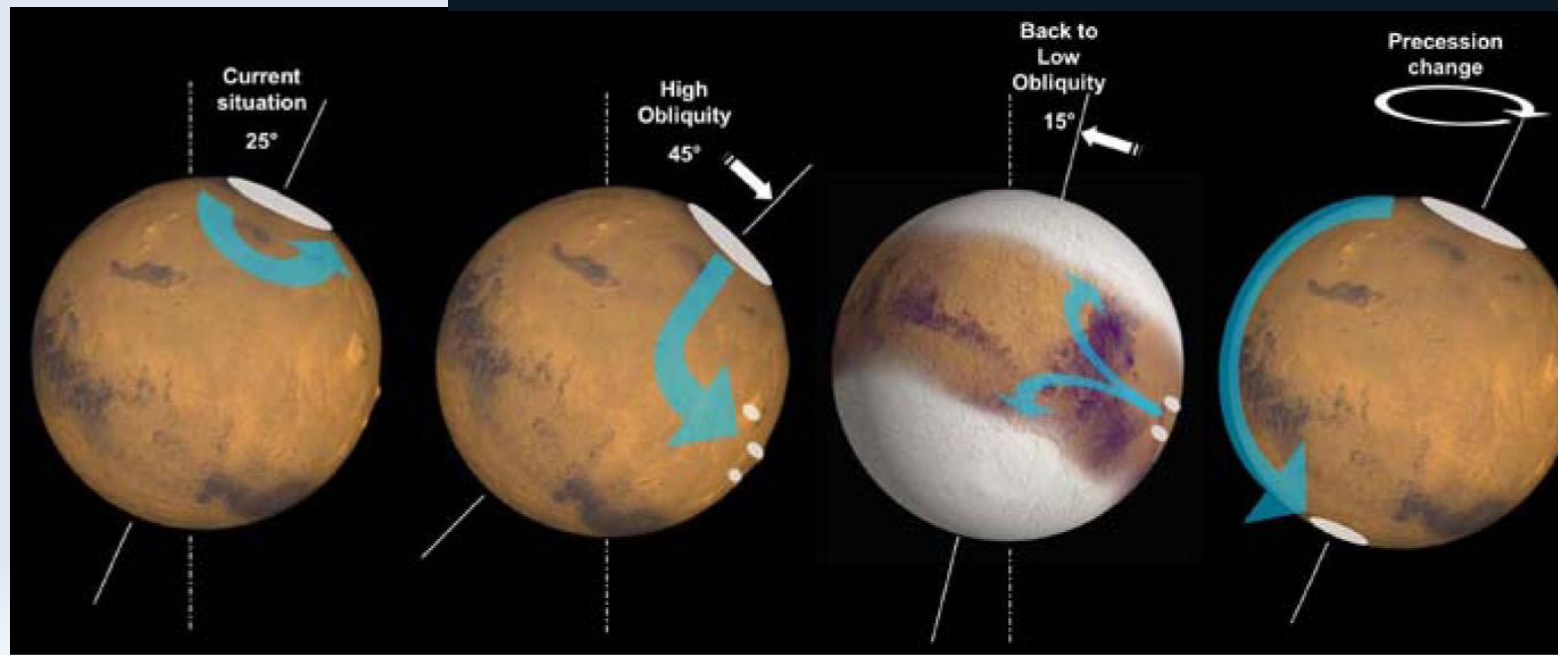
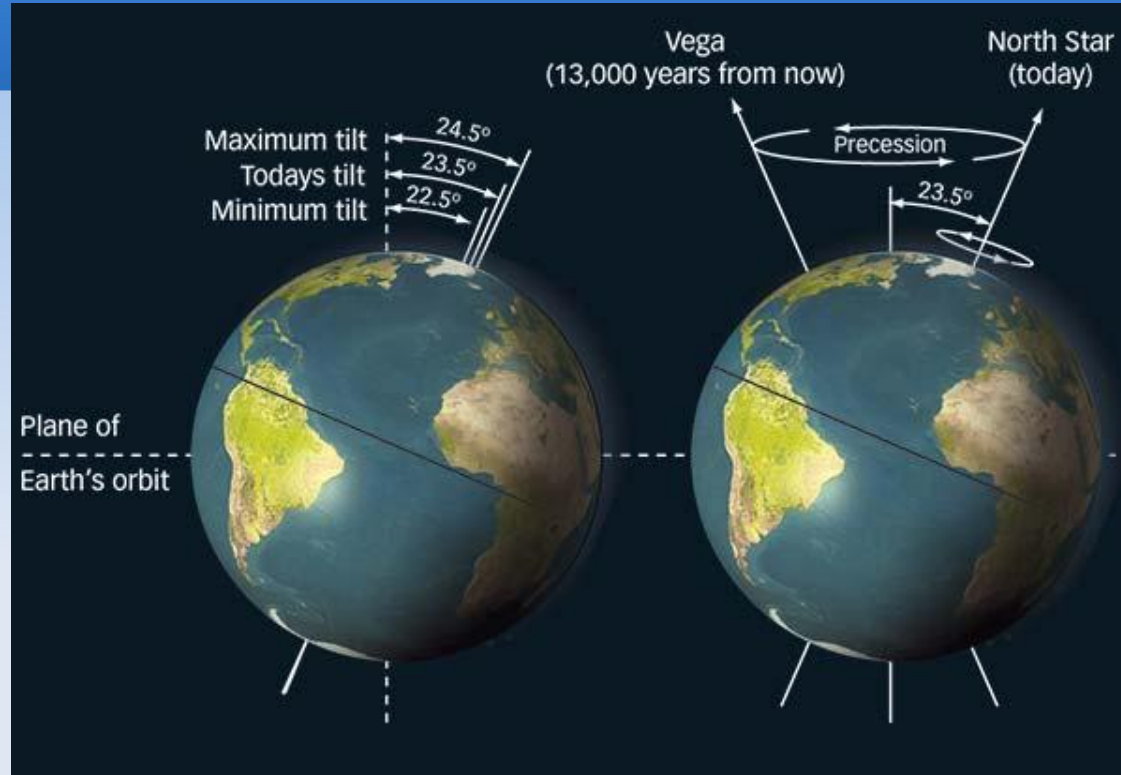
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛУНЫ

- Столкновение Земли с меньшей протопланетой (“Тейя”) образует диск из обломков
- Масса Луны и вращательный момент системы воспроизводятся в моделях с массой Тейи $\sim 0,1$ М Земли и скользящим ударом под углом ~ 45 градусов



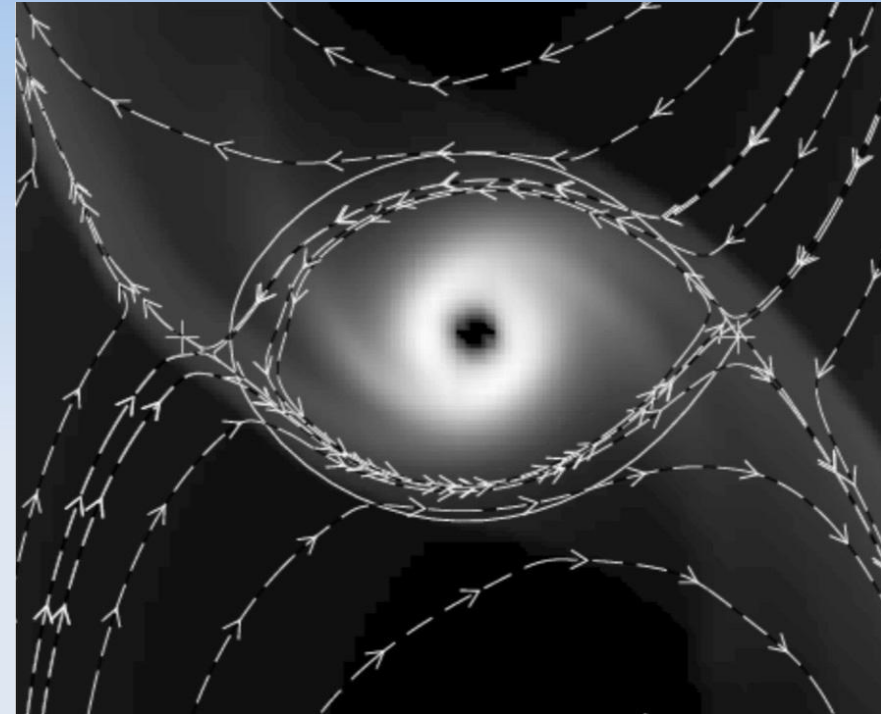
ОСЕВОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

- Притяжение других планет приводит к колебаниям оси вращения на миллионах лет
- Ось Земли стабилизирована Луной
- Ось Марса колеблется сейчас
- Оси Венеры и Меркурия колебались в прошлом

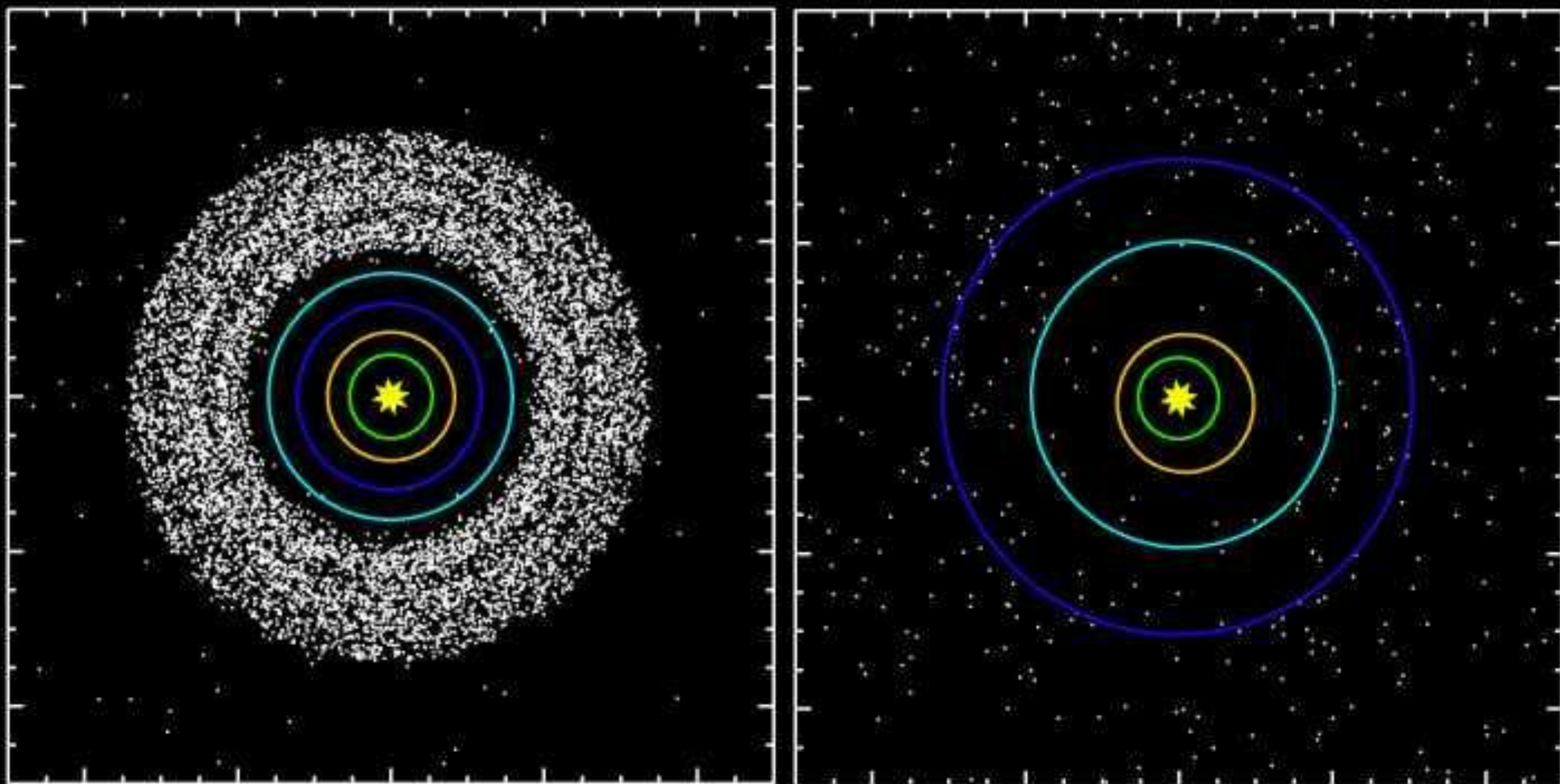


ПРОИСХОЖДЕНИЕ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

- Для всех планет-гигантов масса системы спутников $\sim 0,02\%$ массы планеты
- Спутники росли в вихре вокруг планеты
- Спутник массой $> 0,01\%$ массы планеты порождает волны в диске, тормозится и падает в планету
- За время роста Юпитера у него могло родиться и погибнуть до 10 поколений спутников



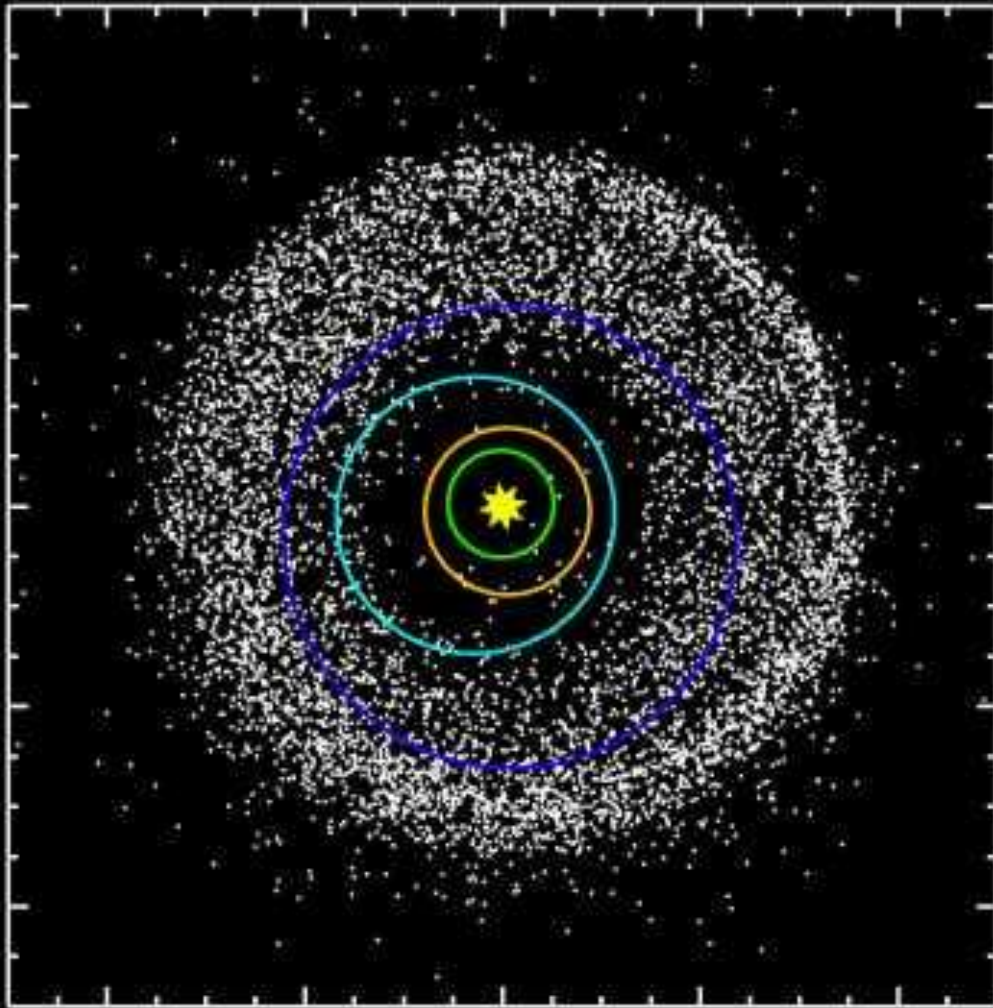
ОРБИТЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ ДО И ПОСЛЕ ПОЗДНЕЙ БОМБАРДИРОВКИ



Миграция газовых гигантов останавливается орбитальным резонансом 3:2 между Юпитером и Сатурном

Во всех устойчивых конфигурациях гиганты ближе друг к другу, чем сейчас

ОРБИТЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ ВО ВРЕМЯ ПОЗДНЕЙ БОМБАРДИРОВКИ



Нептун рассеивает планетезимали пояса Койпера внутрь системы и сдвигается наружу

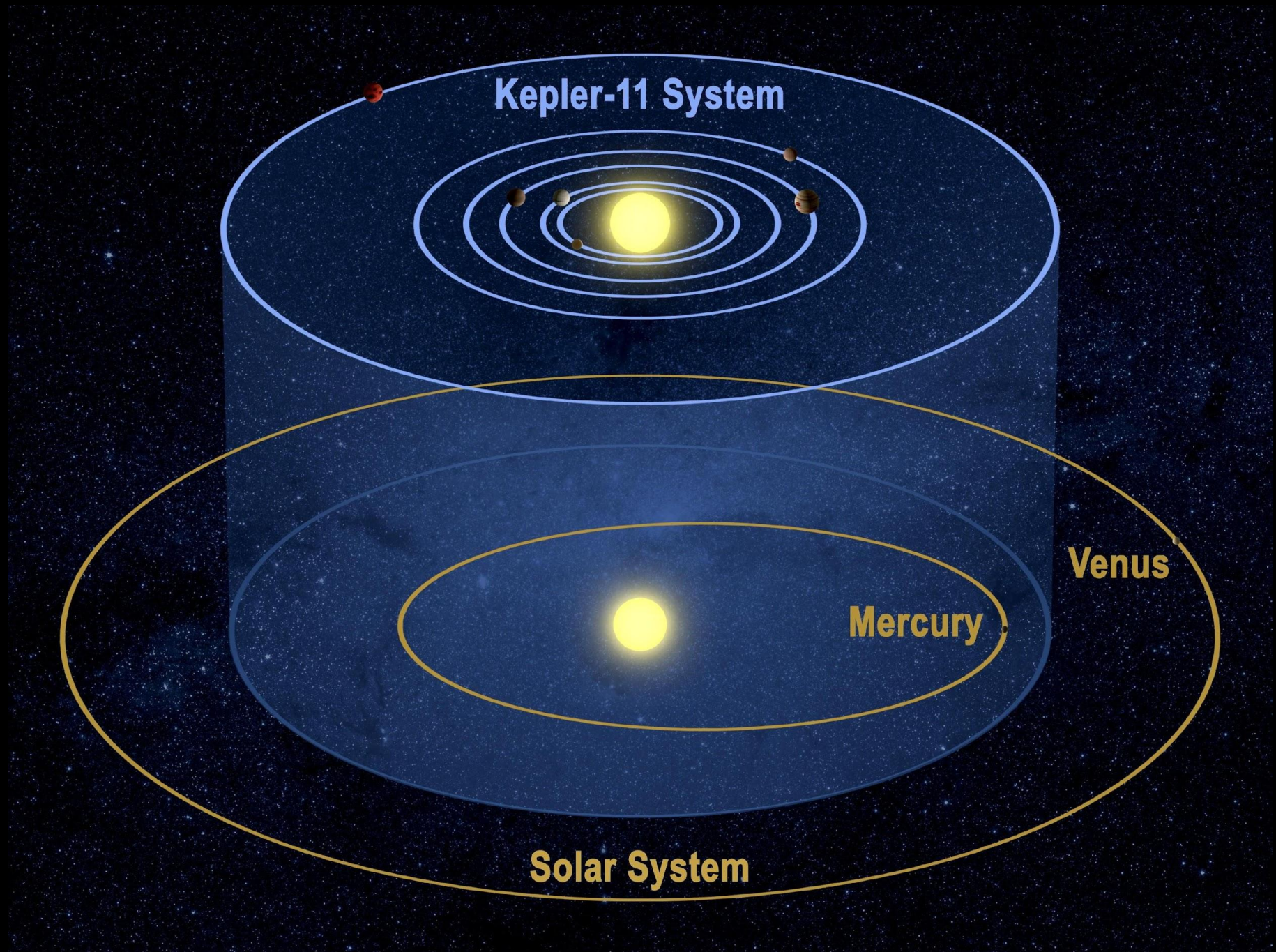
Сатурн тоже сдвигается наружу, а Юпитер выбрасывает планетезимали из системы и сдвигается внутрь

Когда Юпитер и Сатурн приходят к резонансу 2:1, начинается период хаоса: орбиты становятся эллиптическими, Нептун входит в густонаселенную часть пояса Койпера

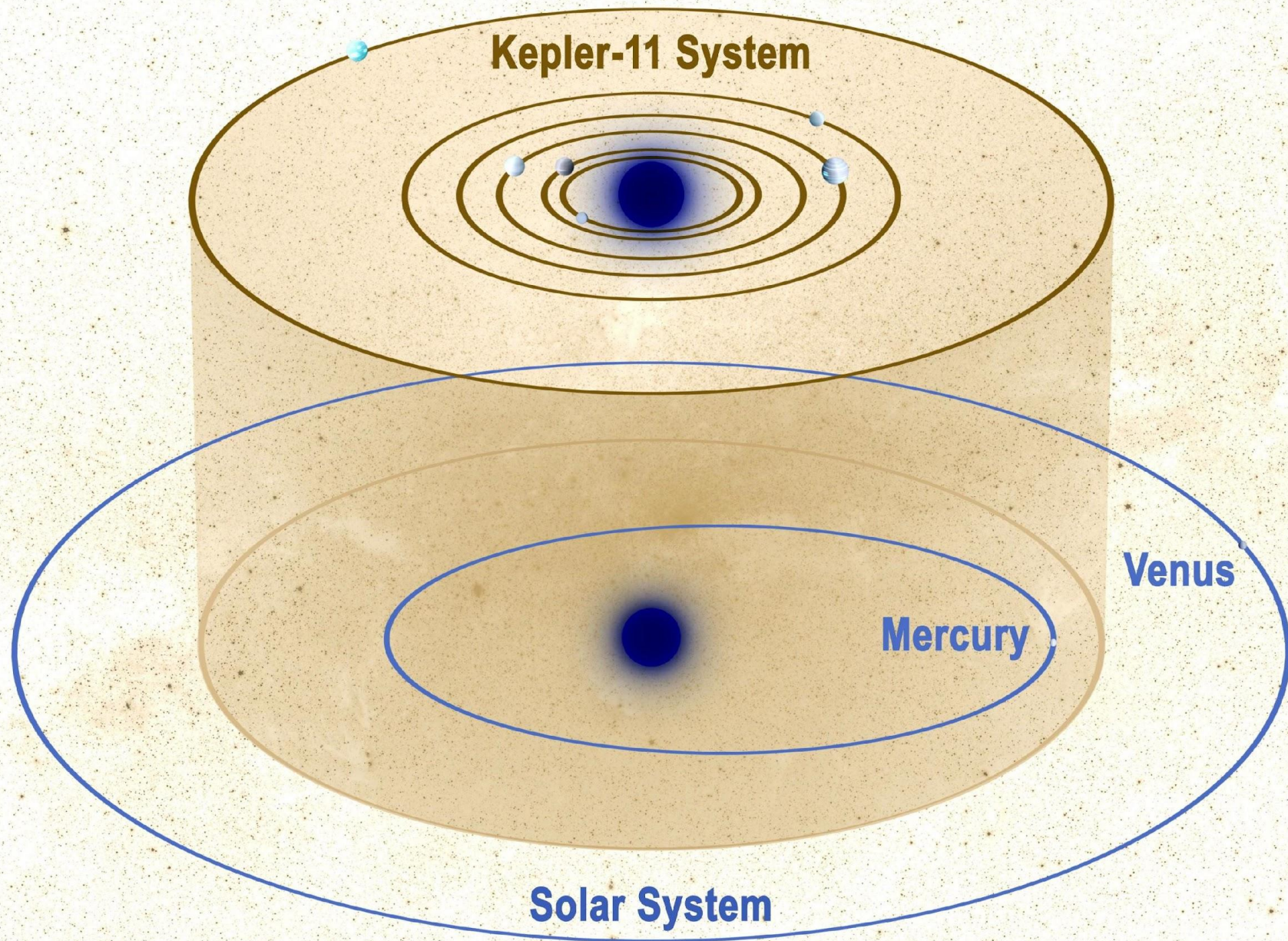
Планетезимали, отброшенные ближе к Солнцу, врезаются в планеты земной группы (поздняя метеоритная бомбардировка)

При близких встречах планет-гигантов они захватывают планетезимали на орбиты нерегулярных спутников

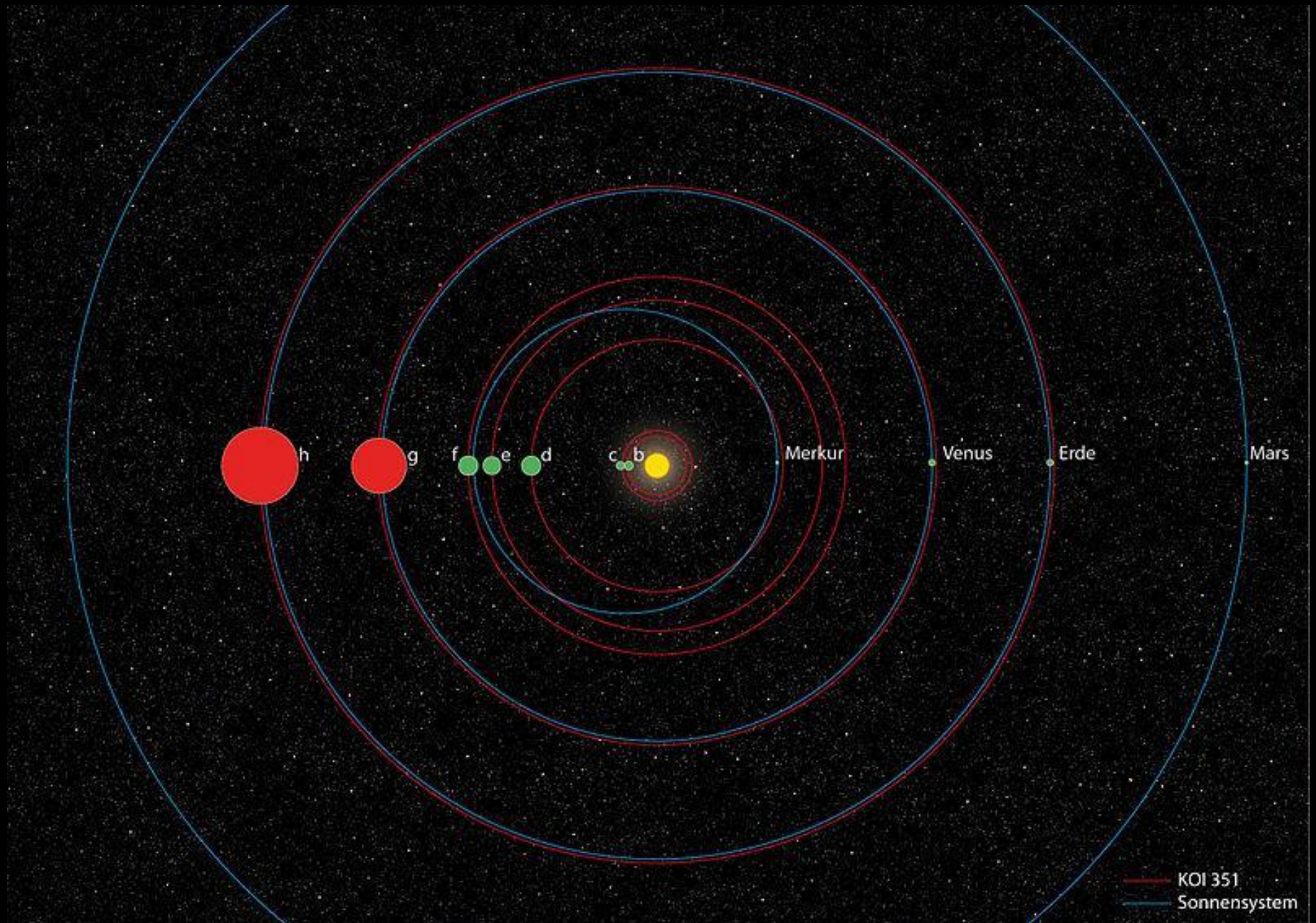
СИСТЕМА KEPLER-11



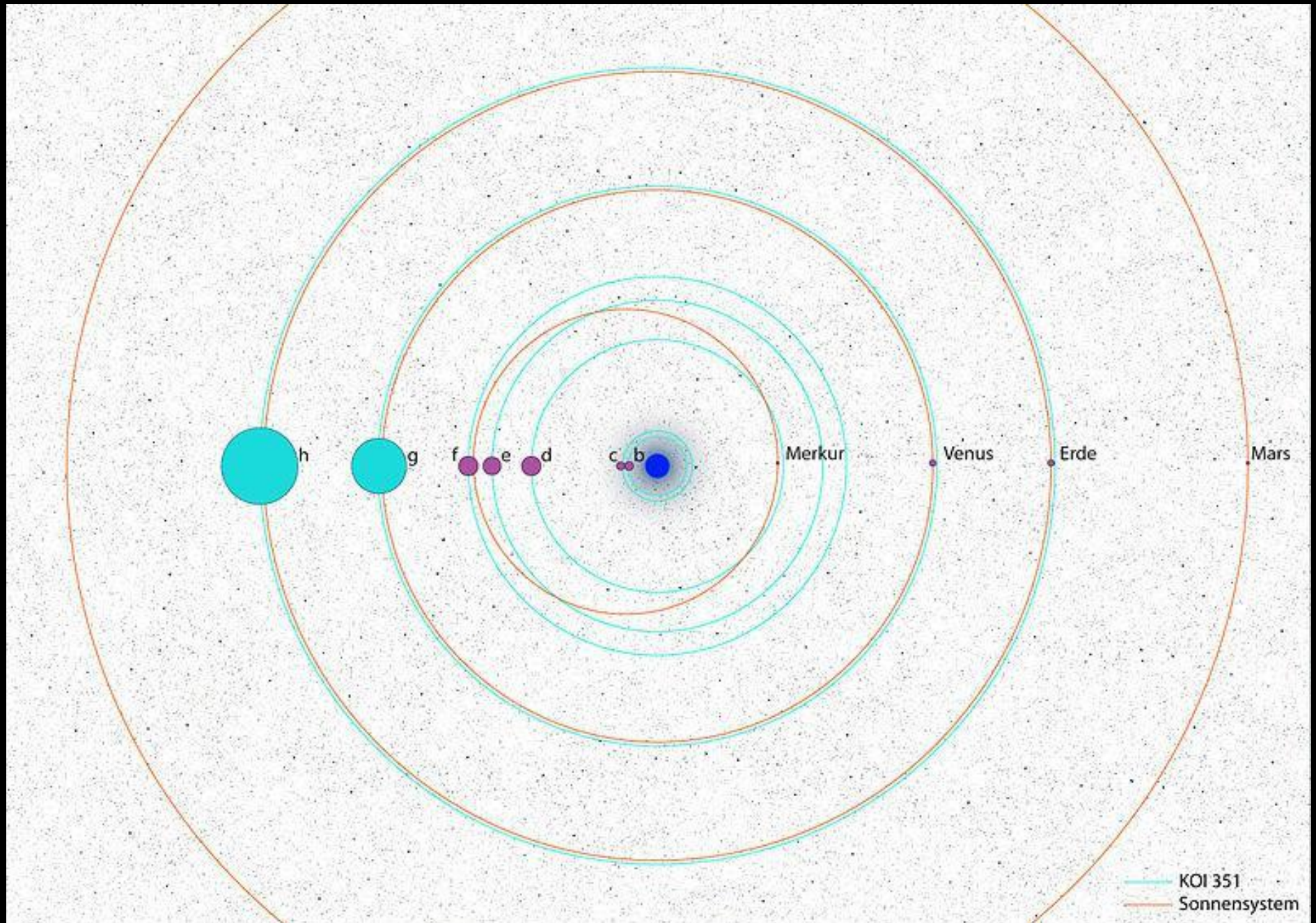
СИСТЕМА KEPLER-11



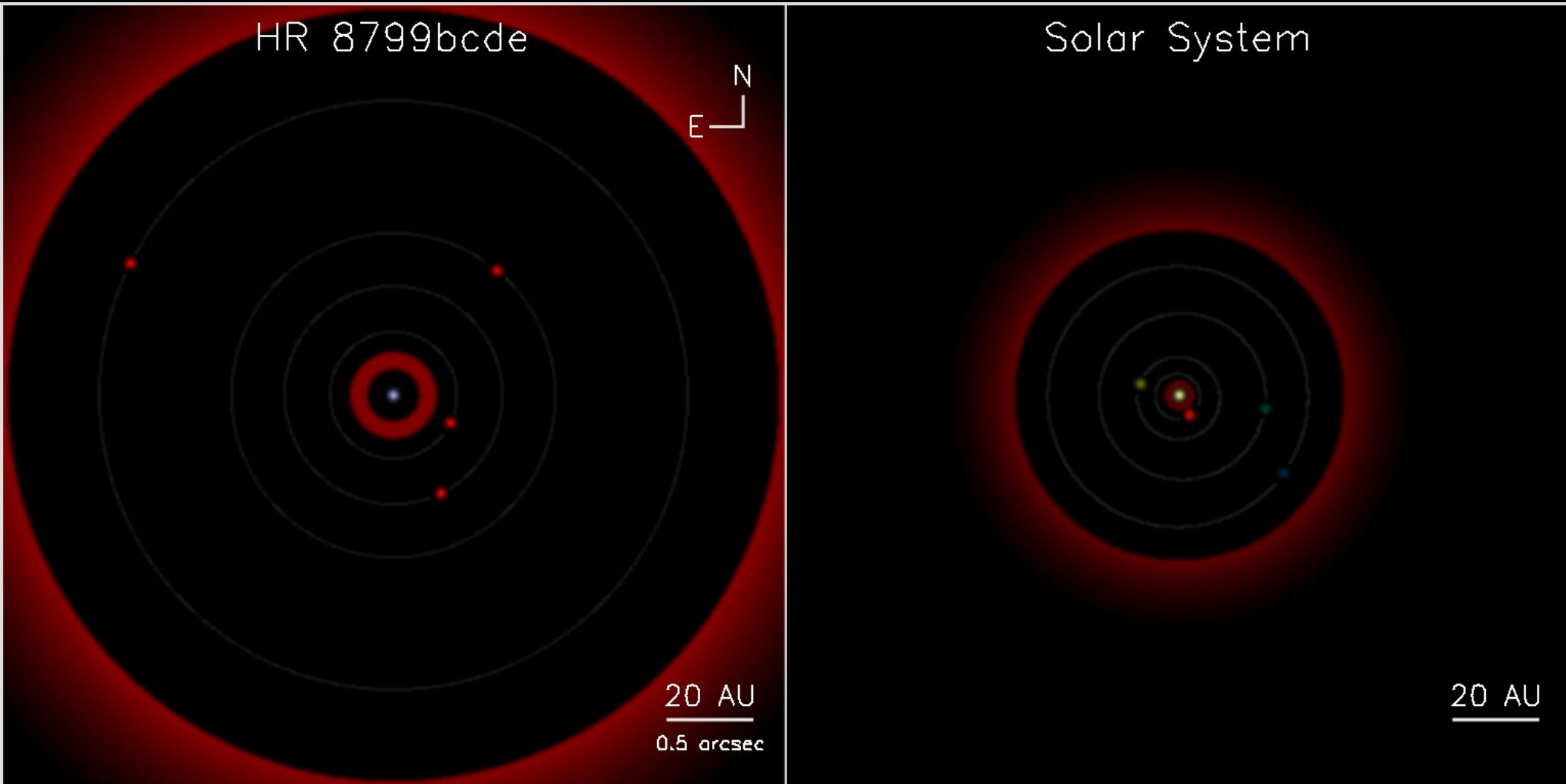
СИСТЕМА KEPLER-90



СИСТЕМА KEPLER-90



СИСТЕМА HR 8799



СИСТЕМА HR 8799

