



# Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

**В.И. Шематович**

*Институт астрономии РАН*



# **Солнечная система: *содержание темы 1***

**Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.**

**Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.**

**Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды. Космические миссии к малым телам.**

**Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.**

**Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.**

**Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.**

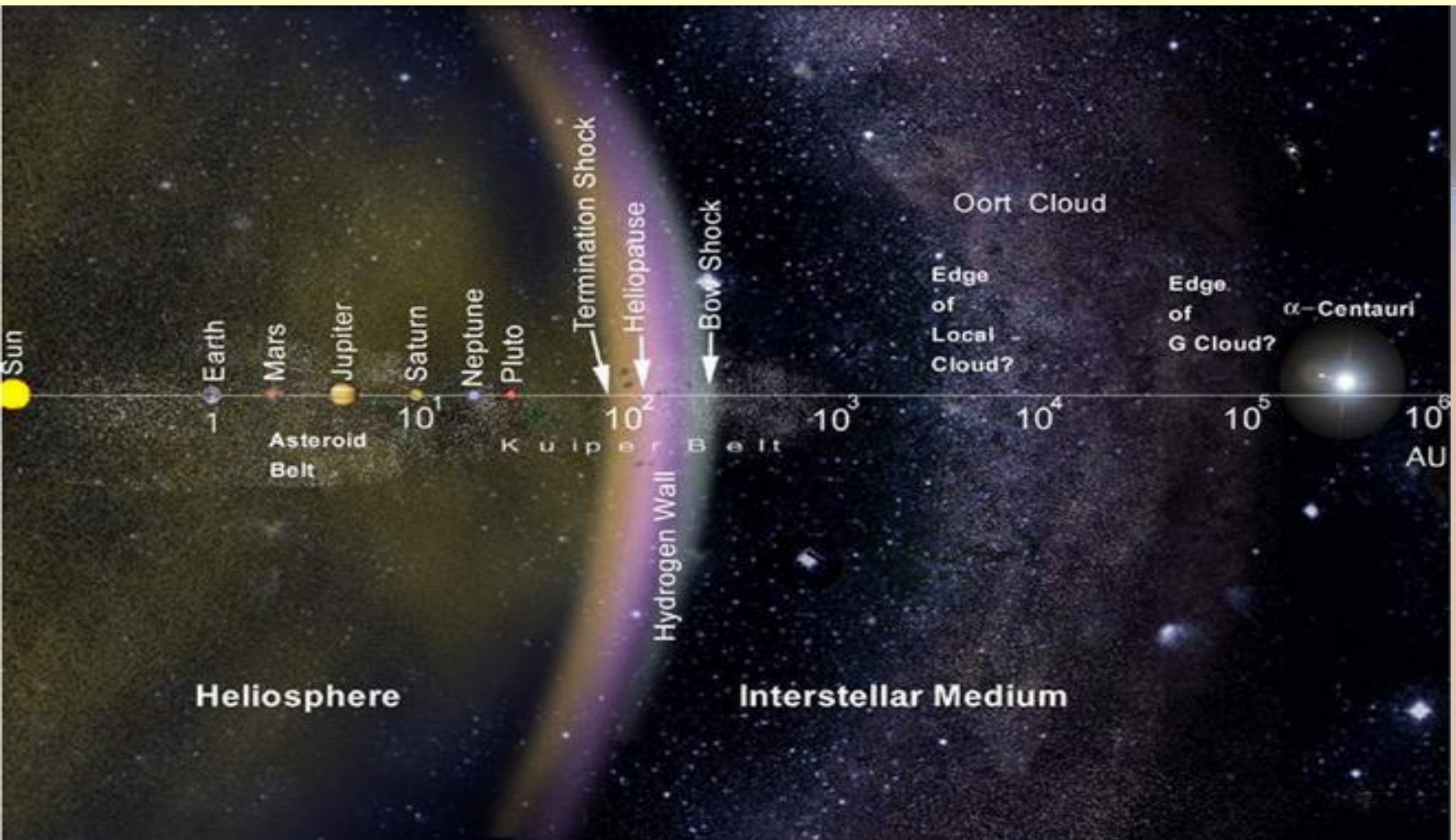
# **Солнечная система - лекция 1: *содержание***

**Лекция 1(2 часа):**

**Основные характеристики планет:**

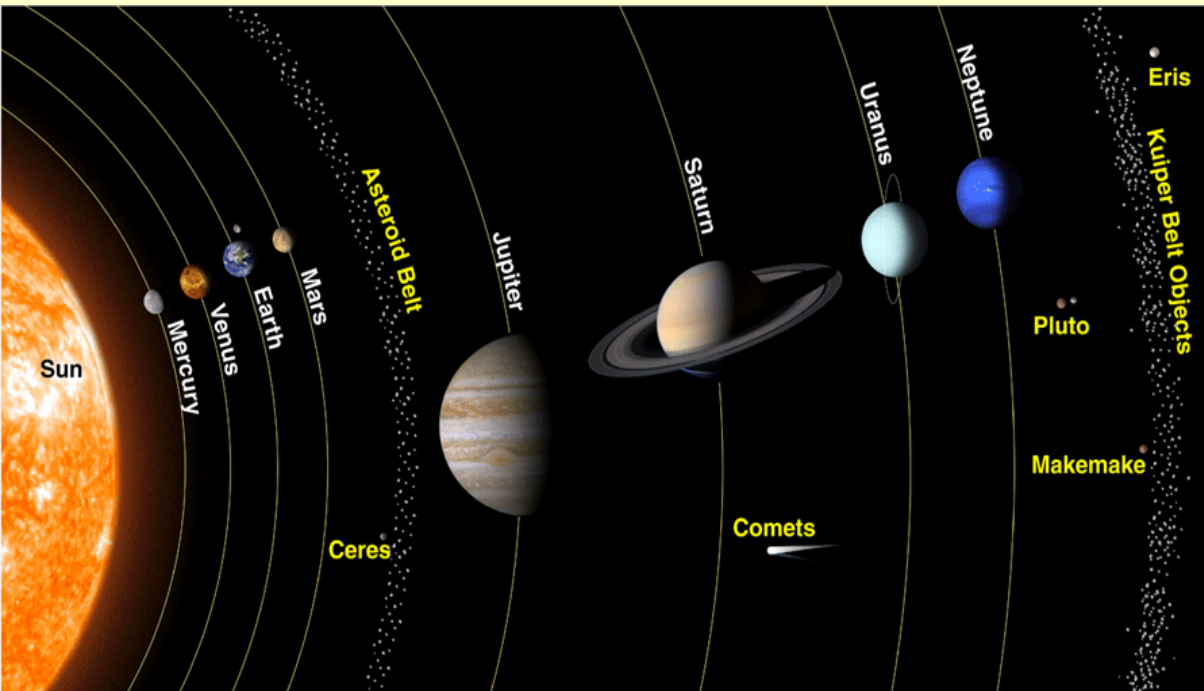
- Планеты земной группы и планеты-гиганты**
- Размер, масса, и плотность**
- Характер вращения**
- Свойства атмосферы**
- Магнитные поля**
- Условия на поверхности.**

# Солнечная система: границы



Состоит из восьми планет – 4 внешних газовых гигантов, 4 внутренних каменных планет.

# Солнечная система: и ее зона обитаемости



## Состав Солнечной системы:

- Солнце: **99.85%**
- Планеты: **0.135%**
- Кометы и астероиды: **0.01%**
- ?
- Луны планет: **0.00005%**
- Карликовые планеты: **0.0000002% ?**
- Метеороиды: **0.0000001% ?**
- Межпланетная среда: **0.0000001% ?**

## Текущая структура Солнечной системы:

Звезда в центре: Солнце

- содержит **99 %** общей массы Солнечной системы

- **8** планет, из них:

- **4** внутренние каменные планеты- Меркурий, Венера, Земля/Луна, и Марс, которые состоят из металлов и силикатов

- **4** внешние планеты газовые и ледяные гиганты – Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, которые преимущественно состоят из H и He

Орбиты всех планет расположены в экваториальной плоскости Солнца

# Протосолнечная туманность: *линия снега*

## The new normal

Astronomers thought they knew how planets form by studying one system: our own (top). But in the past 20 years, they have discovered seemingly impossible exoplanets (bottom), turning theories on their heads.

### Snowline

Outside this boundary, water ice helps solid cores form quickly.

### Ice giants

Move slowly and form slowly, ending up smaller.

### Gas giants

Form a solid core quickly, pulling in a thick gas envelope.

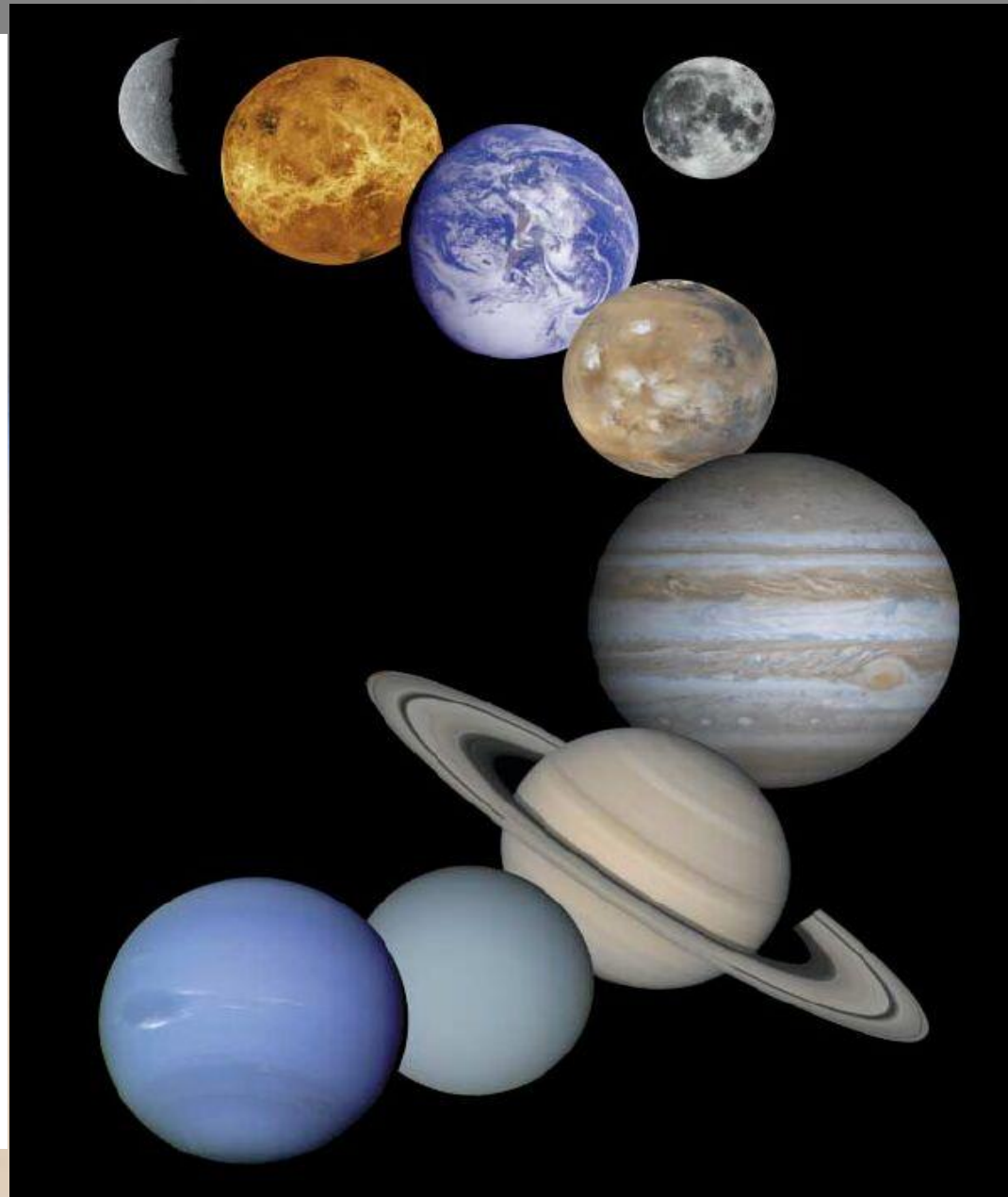
### Rocky planets

Form slowly and remain small, missing out on a thick atmosphere.



# *Планеты в Солнечной системе*

**Меркурий – ВеріColombo,  
MPO;**  
**Венера – VEX;**  
**Марс – MEX, MRO,  
MAVEN, ЭкзоМарс;**  
**Система Юпитера – JUNO,  
JUICE, Clipper,...;**  
**Система Сатурна –  
CASSINI;**  
**Плутон-Харон и  
объекты пояса Койпера –  
New Horizons;**  
**Кометы – Rosetta**  
**Астероиды – Dawn,  
Hayabusa-1,2; OSIRIS-Rex**



# Луны в Солнечной системе

Ио

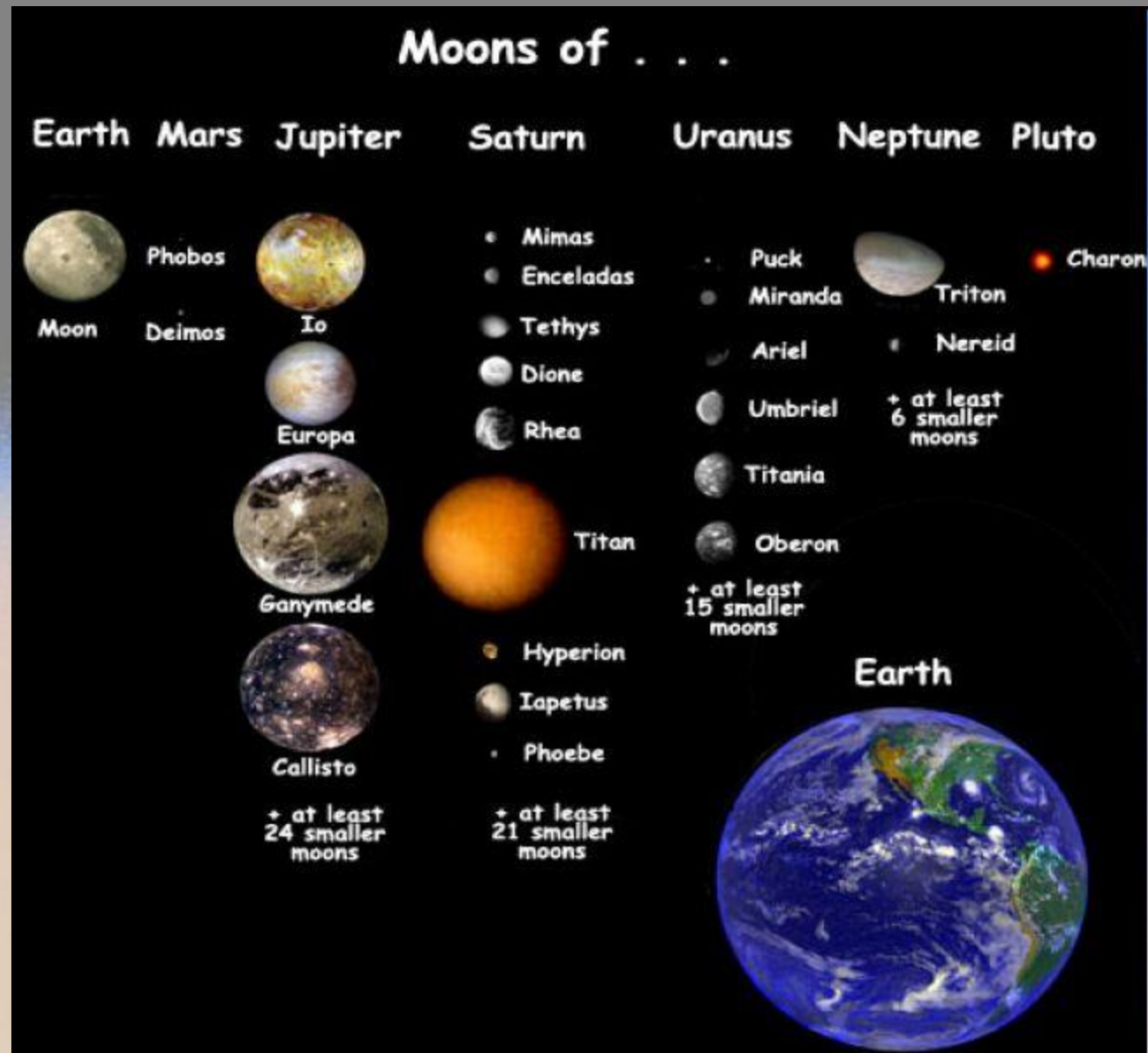
Европа

Ганимед

Энцелад

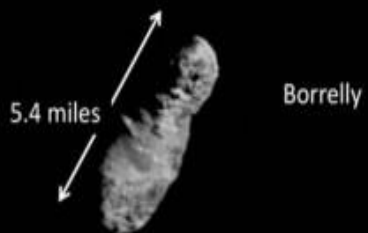
Титан

Харон

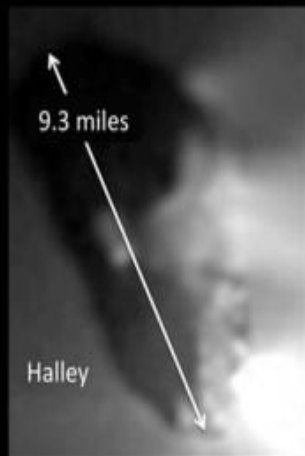
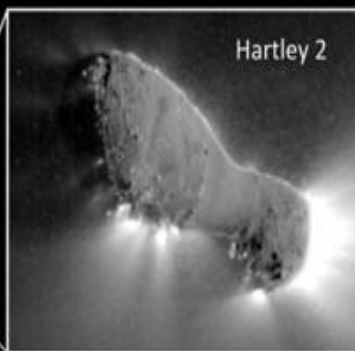




# Малые тела в Солнечной системе



1.25 miles



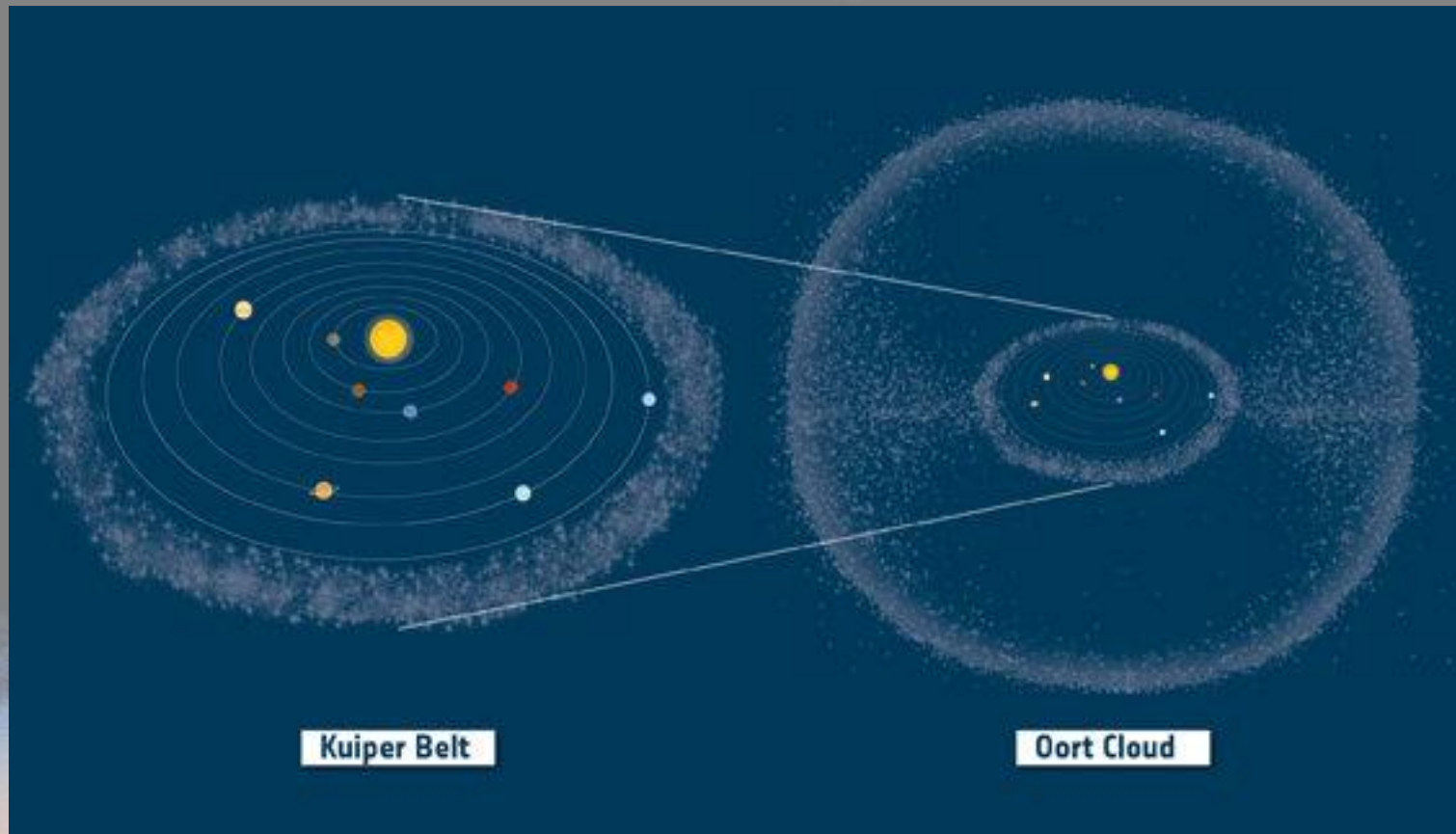
# Малые планеты и астероиды, исследованные КА



**Снимок КА NASA Dawn.**

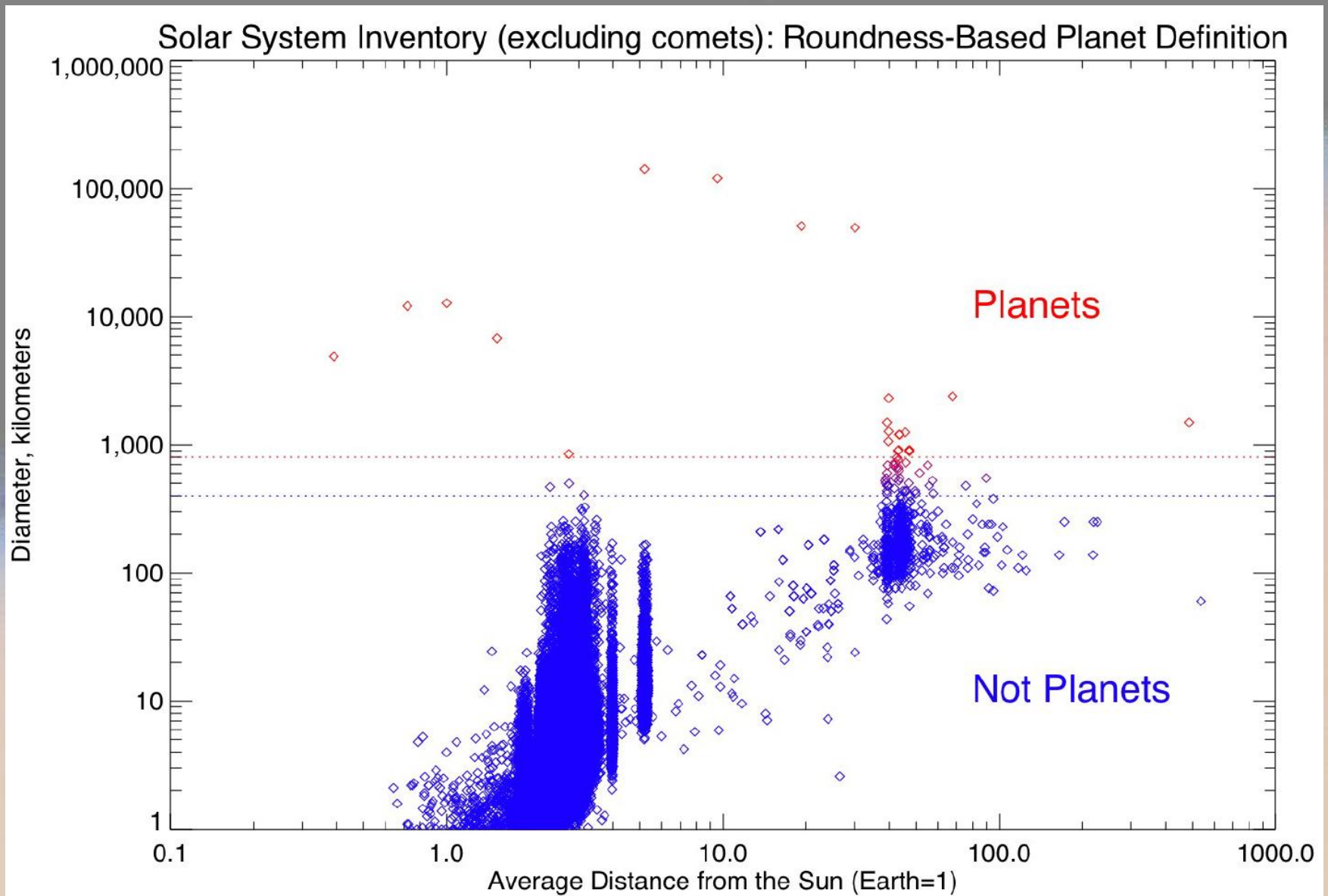


# Области образования комет



**Резервуары кометных ядер – периферийные области: облако Оорта (> 50 000 а.е.), пояс Койпера (30 – 50 а.е.). Комета 1P (Галлея) прибыла вероятно из облака Оорта, а комета 67P (Чурюмова-Герасименко) – из пояса Койпера.**

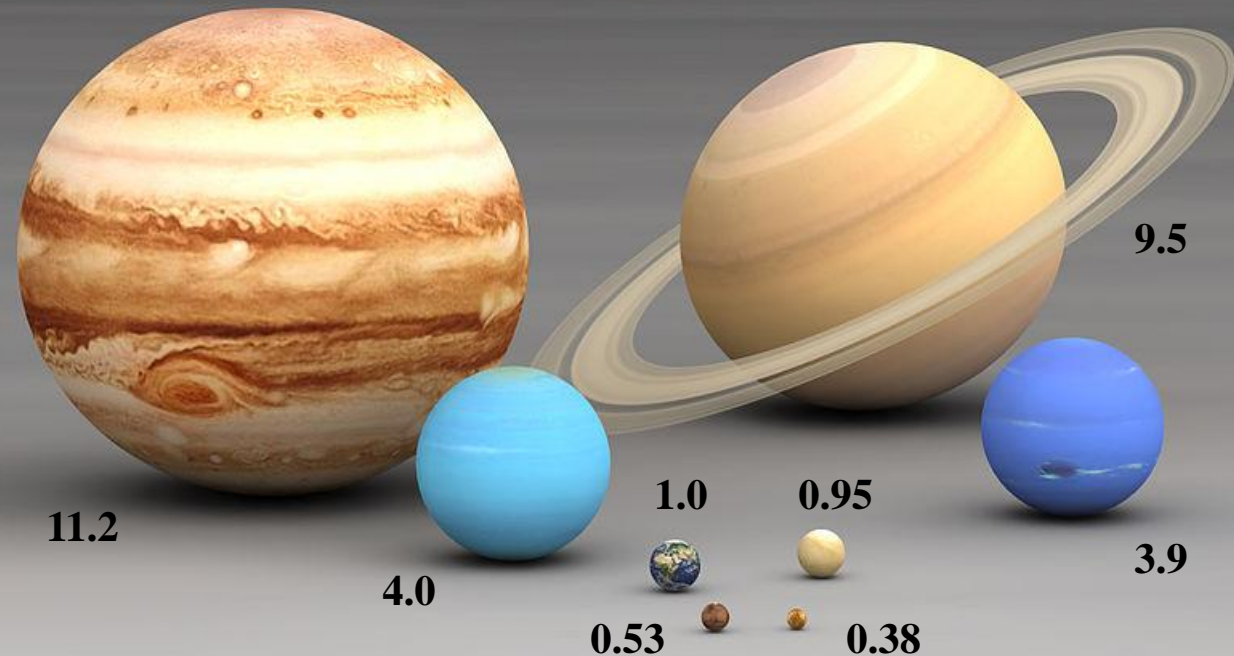
# Небесные тела в Солнечной системе



# Солнечная система: *характеристики планет*

Все наши знания об объектах Солнечной системы получены из астрономических наблюдений и прямых (*in situ*) измерений при помощи межпланетных космических аппаратов.

1. Орбита
2. Масса, распределение массы
3. Размер
4. Скорость вращения и направление
5. Форма
6. Температура
7. Магнитное поле
8. Состав поверхности
9. Геологическая структура поверхности
10. Структура и состав атмосферы

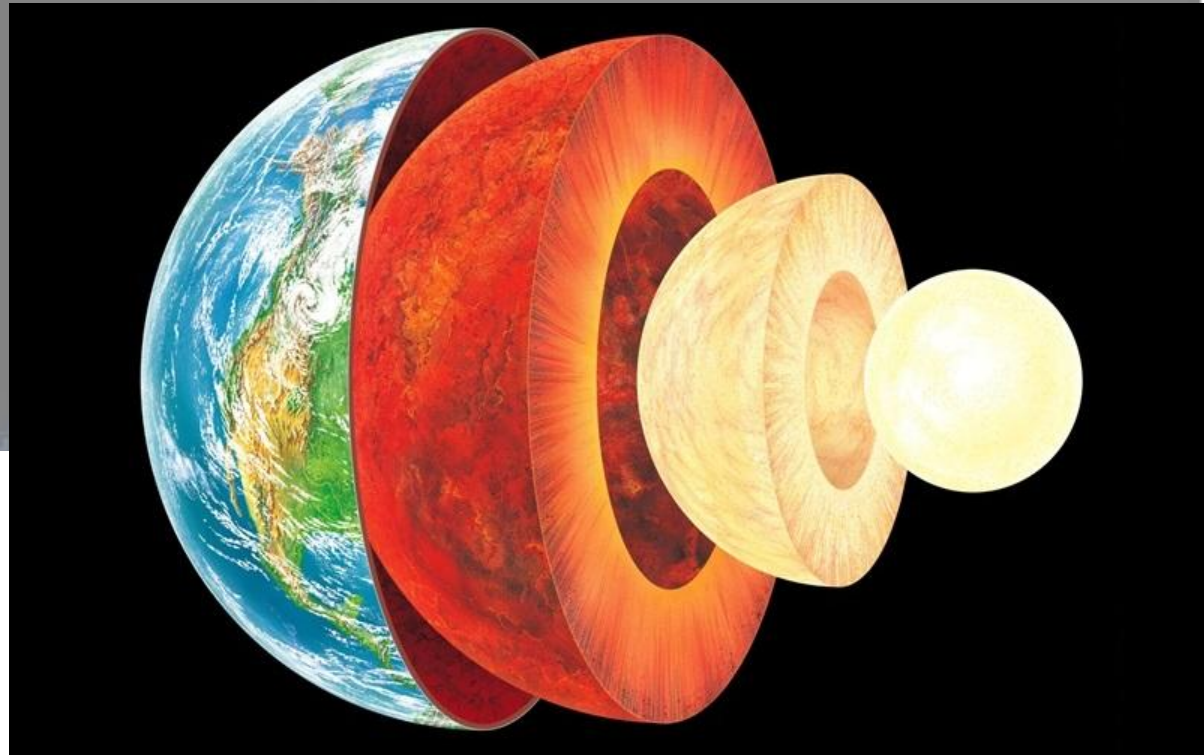


# Солнечная система: *каменистые планеты*



	<b>Земля</b>	<b>Марс</b>
<b>Средний Радиус (км):</b>	<b>6371</b>	<b>3396</b>
<b>Масса (<math>10^{23}</math> кг):</b>	<b>59.7</b>	<b>6.42</b>
<b>Объем (<math>10^{11}</math> км<sup>3</sup>):</b>	<b>10.8</b>	<b>1.63</b>
<b>Большая полуось(а.е.):</b>	<b>0.98 – 1.02</b>	<b>1.38 – 1.67</b>
<b>Воздушное давление (кПа):</b>	<b>101.45</b>	<b>0.4 – 0.87</b>
<b>Свободное падение (м/с<sup>2</sup>):</b>	<b>9.8</b>	<b>3.71</b>
<b>Средняя температура (°C):</b>	<b>14°</b>	<b>-46 °</b>
<b>Изменения температуры:</b>	<b>±160 °</b>	<b>±178 °</b>
<b>Наклон оси:</b>	<b>23°</b>	<b>25.19°</b>
<b>Длина дня (часы):</b>	<b>24</b>	<b>24.4</b>
<b>Длина года (дни):</b>	<b>365.25</b>	<b>686.97</b>
<b>Вода и полярные льды:</b>	<b>Много, да</b>	<b>Кратковременные осадки, да</b>
<b>Магнитное поле:</b>	<b>Да</b>	<b>Остаточная намагниченность коры</b>

# Солнечная система: *Земля*



**Обитаемая часть представляет собой крошечную часть всей планеты Земля!!!!**

**Атмосфера = 0.0000051**

**Океаны = 0.0014**

**Кора = 0.026**

**Мантия = 4.043**

**Внешнее ядро = 1.835**

**Внутреннее ядро = 0.09675 (в  $10^{24}$  кг)**

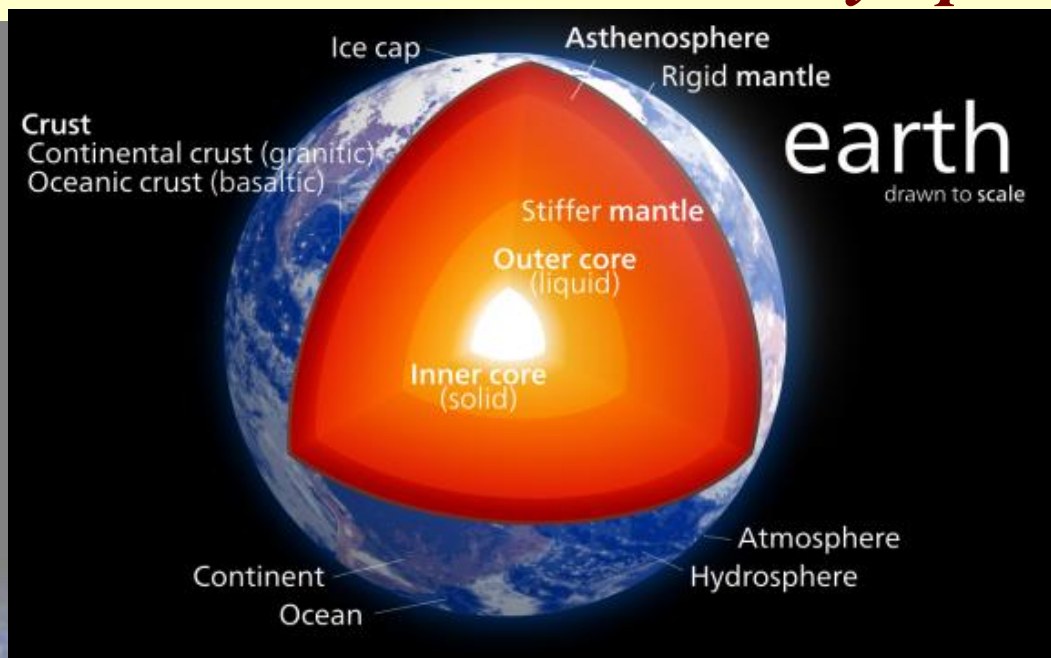
**Ядро вероятно состоит главным образом из Fe (или Ni/Fe), возможно присутствуют также легкие элементы**

**Температура в центре ядра: 7500 К**

**На расстоянии в 1200 км от центра планеты давление побеждает над температурой и железо замерзает в твердое ядро.**



# Солнечная система: Земля – внутренняя структура

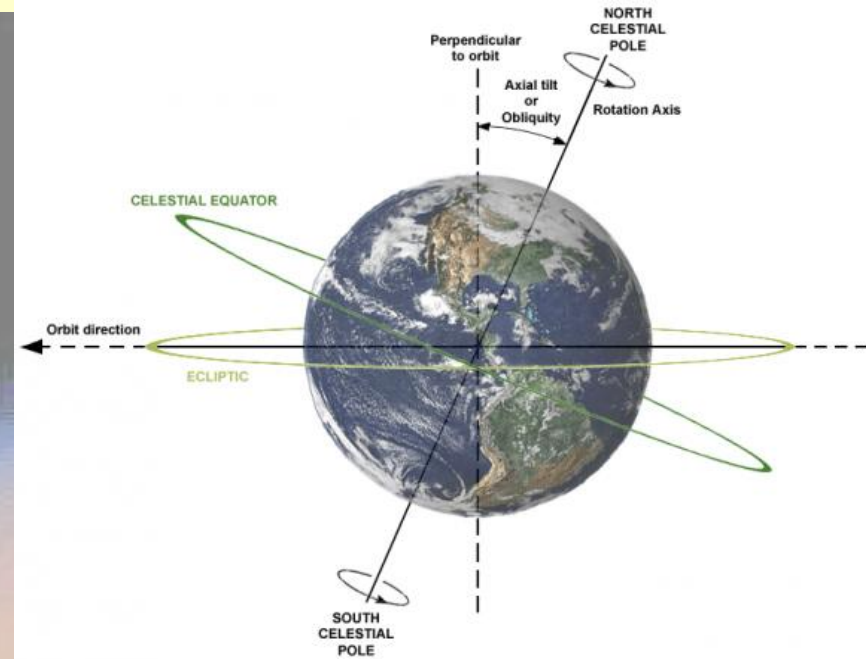
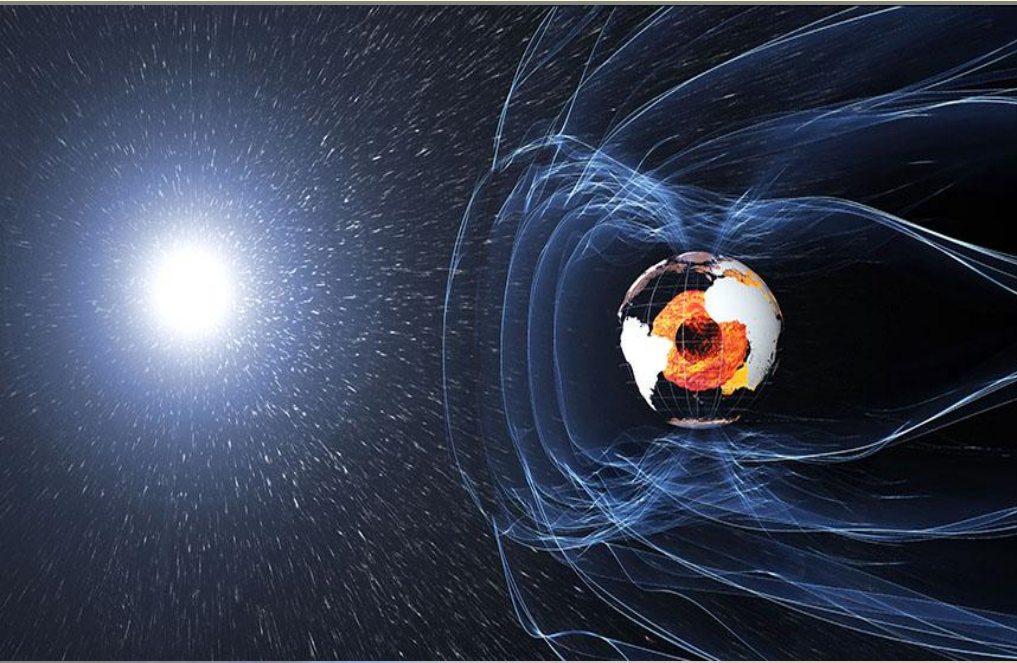


Как и все другие каменные планеты (Меркурий, Венера и Марс) Земля состоит из многих слоев как результат планетарной дифференциации, когда плотные материалы опускаются к центру, чтобы сформировать ядро, а легкие материалы поднимаются вверх. Ядро состоит в основном из железа и никеля, а верхний слой Земли состоит из силикатных пород и минералов. Этот слой известен как мантия (~ 3000 км), и составляет подавляющую часть (85%) объема Земли.

Мантия состоит из 44,8% кислорода, 21,5% кремния, и 22,8% магния. Есть также железо, алюминий, кальций, натрий и калий. Все эти элементы связаны друг с другом в виде силикатных пород и имеют форму оксидов (наиболее часто встречаются диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) на 48% и оксид магния ( $\text{MgO}$ ) на 37,8%).

Примеры минералов внутри мантии: оливин, пироксены, шпинель.

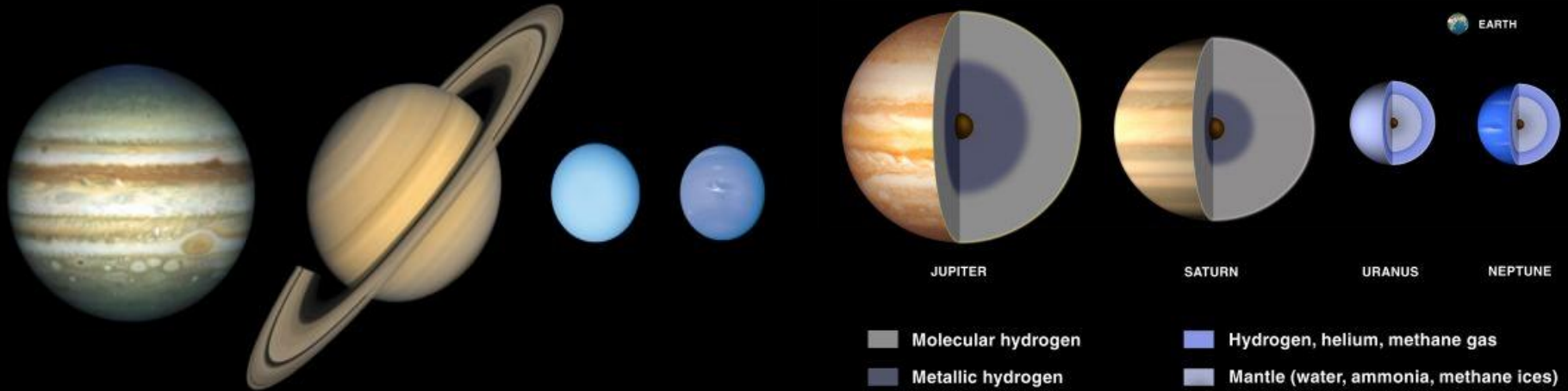
# Солнечная система: *Земля – магнитное поле*



**Магнитное поле, как полагают, генерируется океаном расплавленного жидкого железа, который составляет внешнее ядро нашей планеты в 3000 км под нашими ногами. Жидкое вещество во внешнем ядре генерирует электрические токи и постоянно меняющиеся электромагнитные поля. Считается, что изменения магнитного поля нашей планеты связаны со скоростью и направлением потока жидкого железа и никеля во внешнее ядро.**

**Магнитное поле и электрические токи на Земле и вокруг нее порождают сложные силы, оказывающие неизмеримое воздействие на повседневную жизнь. Поле можно рассматривать как огромный пузырь, который защищает нас от космической радиации и заряженных частиц солнечного ветра.**

# Солнечная система: планеты-газовые гиганты



## Юпитер:

Расстояние от Солнца

Экваториальный радиус

Масса и плотность

Свободное падение

Скорость убегания (на экваторе)

Период сидерического вращения

Сидерический орбитальный период

Средняя орбитальная скорость

Эксцентриситет орбиты

Наклонение орбиты к эклиптике

Наклон экватора к орбите

Средняя температура на поверхности

Температура атмосферы (уровень=1 бар)

5.2 а.е.

71492 км (11.2 З)

$1898.7 \times 10^{27}$  г и 1.33 г/см<sup>3</sup>

2312 см/с<sup>2</sup>

59.54 км/с

0.41354 день

11.862615 сидерических лет

13.0697 км/с

0.04839266

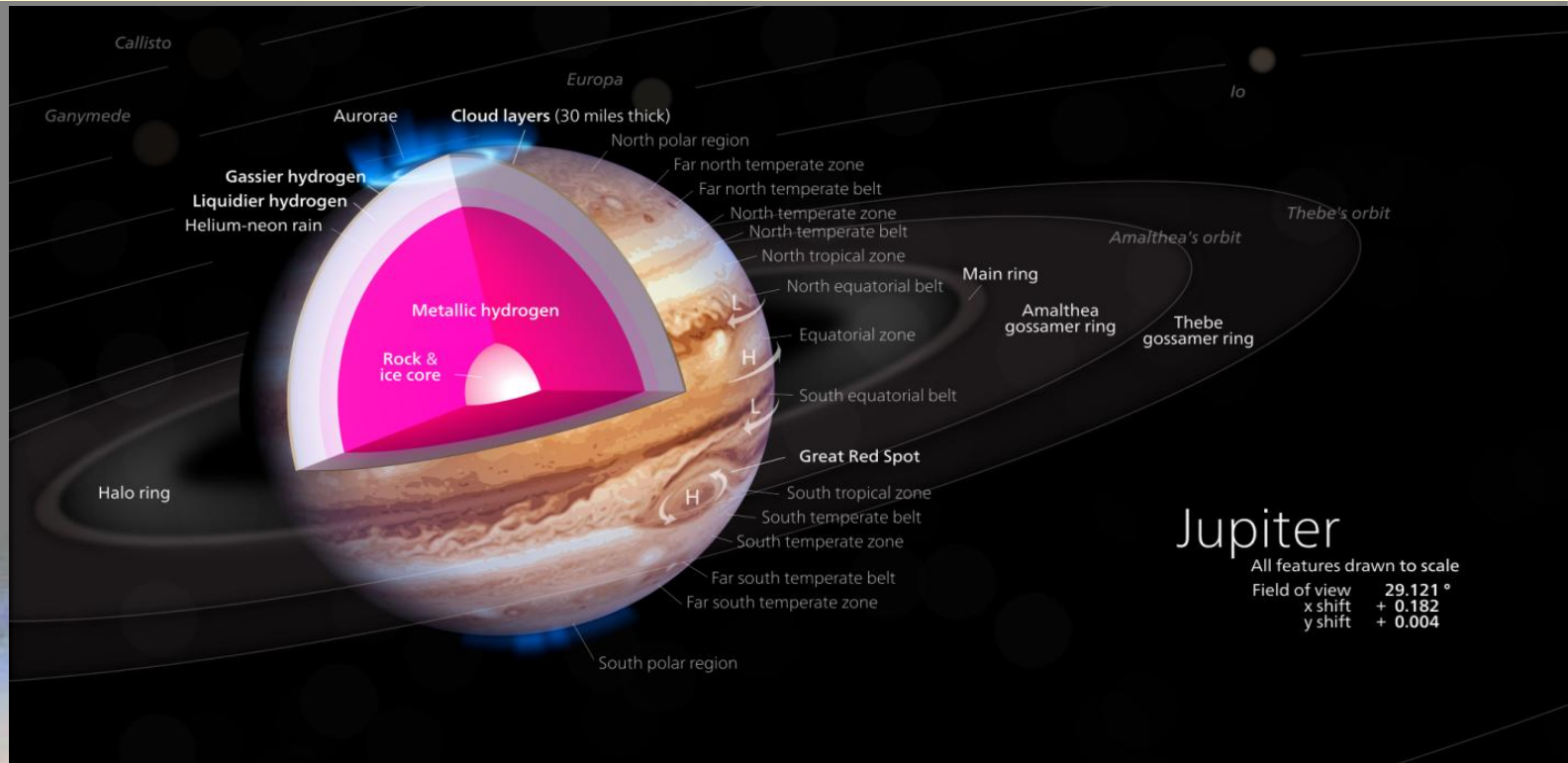
1.30530 градусов

3.12 градуса

288 до 293 К

165 К

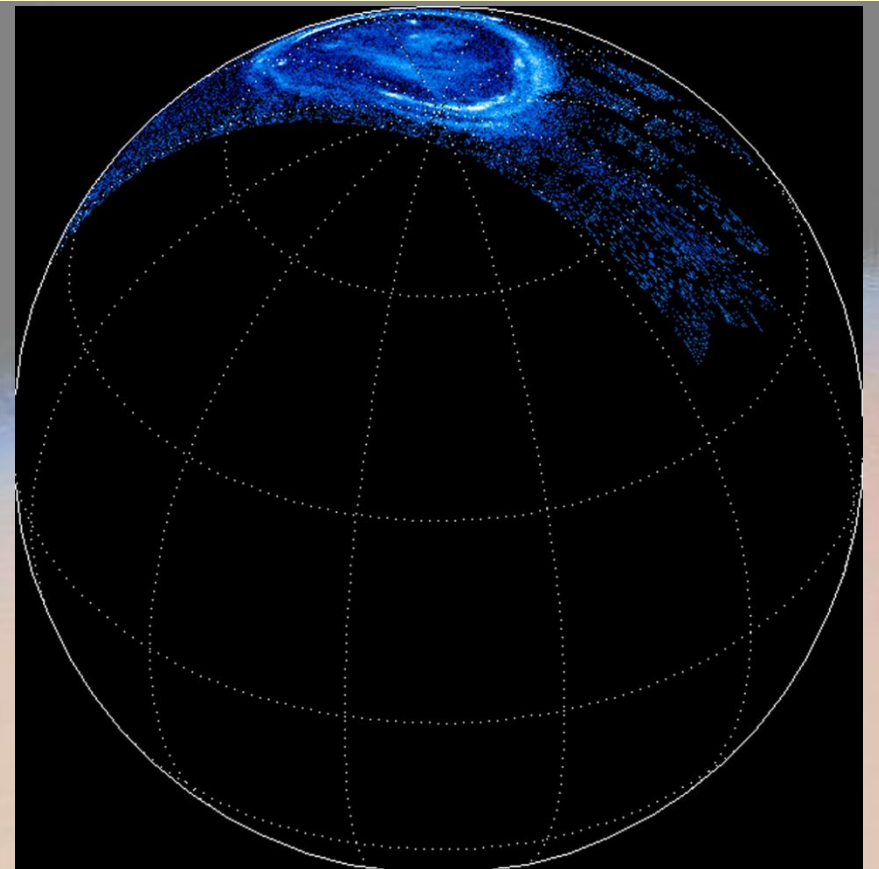
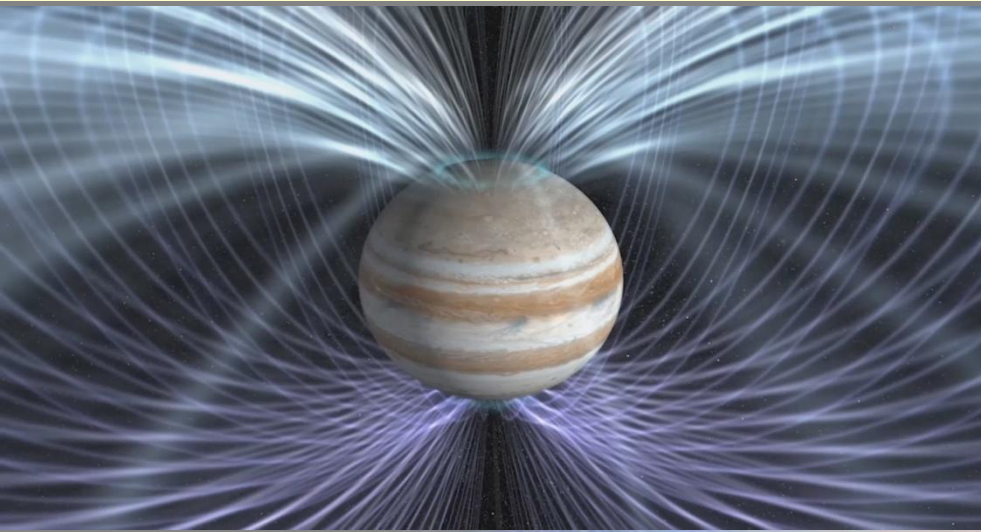
# Солнечная система: *Юпитер*



**Юпитер состоит в основном из газообразного и жидкого вещества, которое разделено между газовой внешней атмосферой и плотным интерьером. Верхняя атмосфера состоит из около 88-92% водорода и 8-12% гелия по объему молекул газа, и ок. 75% водорода и 24% гелия по массе, при этом оставшийся один процент состоит из других элементов.**

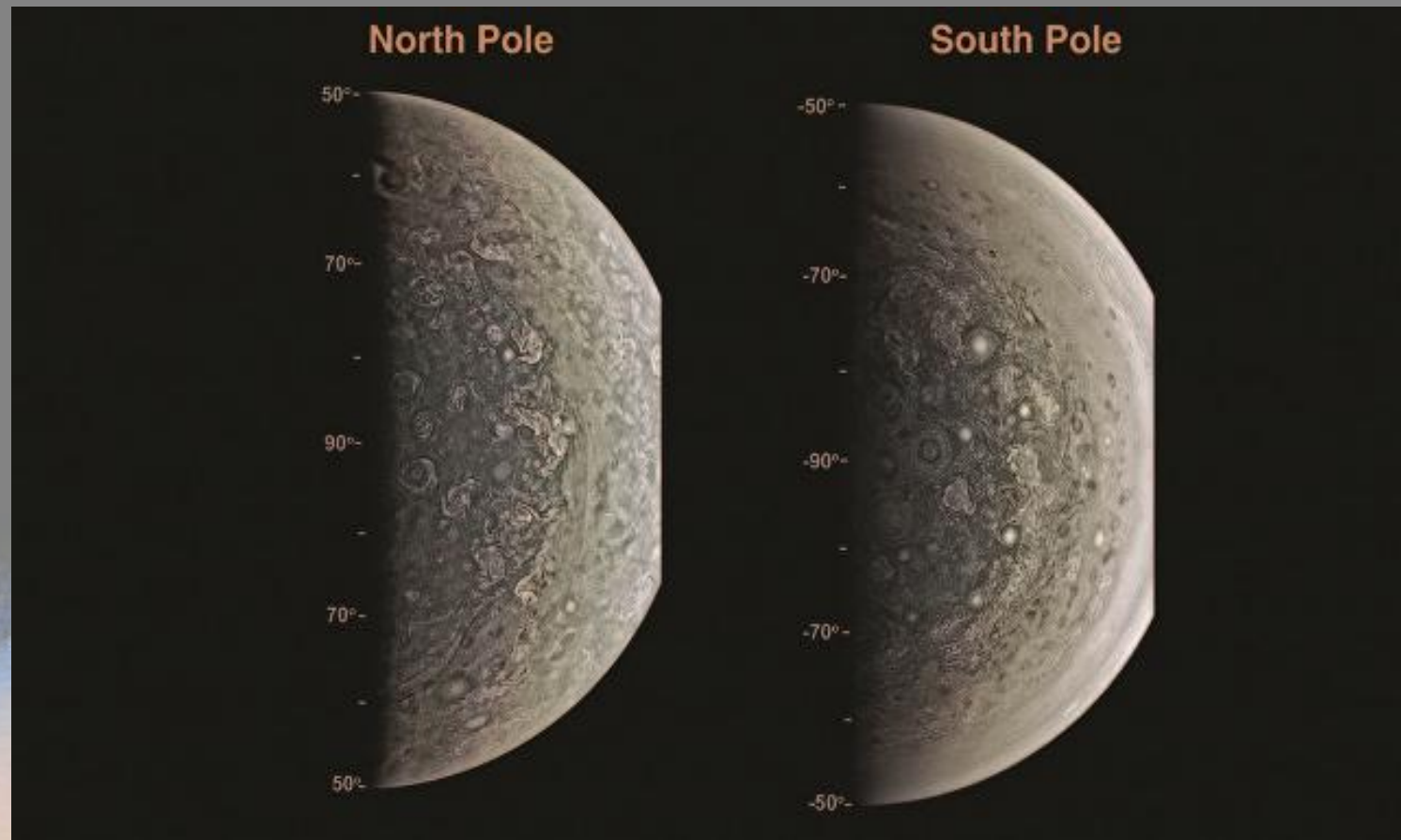
**Плотный интерьер состоит из примерно 71% водорода, 24% гелия и 5% других элементов по массе. Считается, что ядро Юпитера представляет собой плотную смесь из элементов – окружающий ядро слой жидкого металлического водорода с гелием, а наружный слой преимущественно из молекулярного водорода. Ядро также считается**

# Солнечная система: *Юпитер – магнитное поле*



**Это реконструированный вид полярного сияния на Юпитере, снятого спектрографом JUVIS/Juno 11 ноября 2016 года, когда космический аппарат Juno приблизился к Юпитеру и его орбита прошла через полюсы планеты. Image Credit: NASA/JPL-Caltech/Bertrand Bonfond**

# Солнечная система: *Юпитер – магнитное поле*



**Первые данные с КА Juno показали, что магнитное поле Юпитера оказалось неожиданно мощным, примерно в 10 раз более сильным, чем магнитный щит Земли, а также раскрыли необычные торнадо размером с Луну и Землю на полюсах планеты-гиганта.**

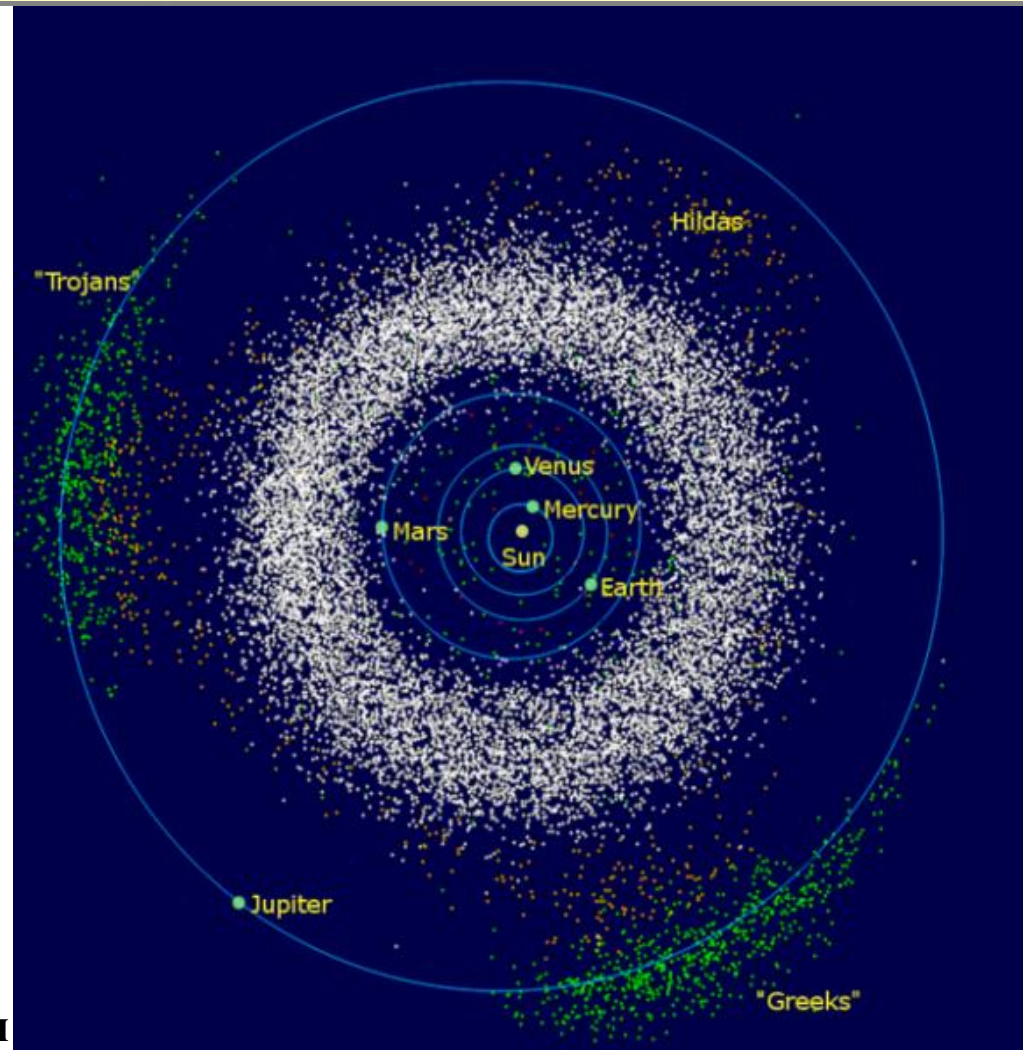
# Солнечная система: *главный пояс астероидов*

Известно более 200 астероидов с размером больше 100 км, и обзоры в ИК диапазоне показали, что в поясе астероидов присутствует от 0.7 до 1.7 миллиона астероидов диаметром 1 км и более.

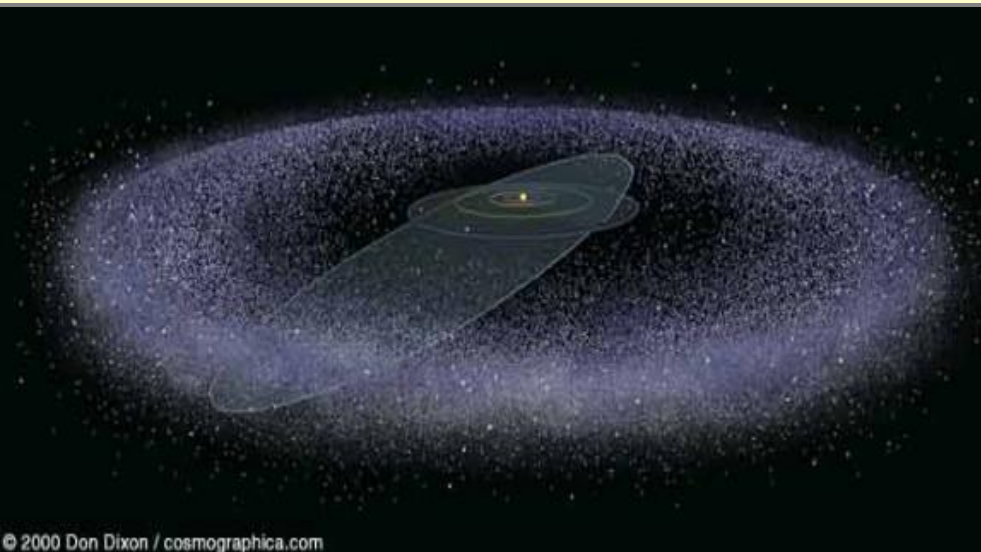
Главный пояс расположен между Марсом и Юпитером, и занимает диапазон орбит от 2.2 до 3.2 а. е., т.е., ширина пояса равна 1 а.е. Общая масса астероидов главного пояса оценивается в  $(2.8—3.2) \times 10^{21}$  кг, что эквивалентно примерно 4% от массы Луны.

Пояс состоит в основном из трех категорий астероидов: С-типа, или углистых астероидов; S-типа, или силикатных астероидов; и М-типа, или

металлических астероидов. Углистые астероиды богаты углеродом, доминируют во внешних регионах пояса и составляют более 75% видимых астероидов. Их поверхностный состав аналогичен составу углеродных хондритных метеоритов, а их спектры соответствуют первичному составу ранней Солнечной системы.



# Солнечная система: *пояс Койпера*



© 2000 Don Dixon / cosmographica.com



## Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)

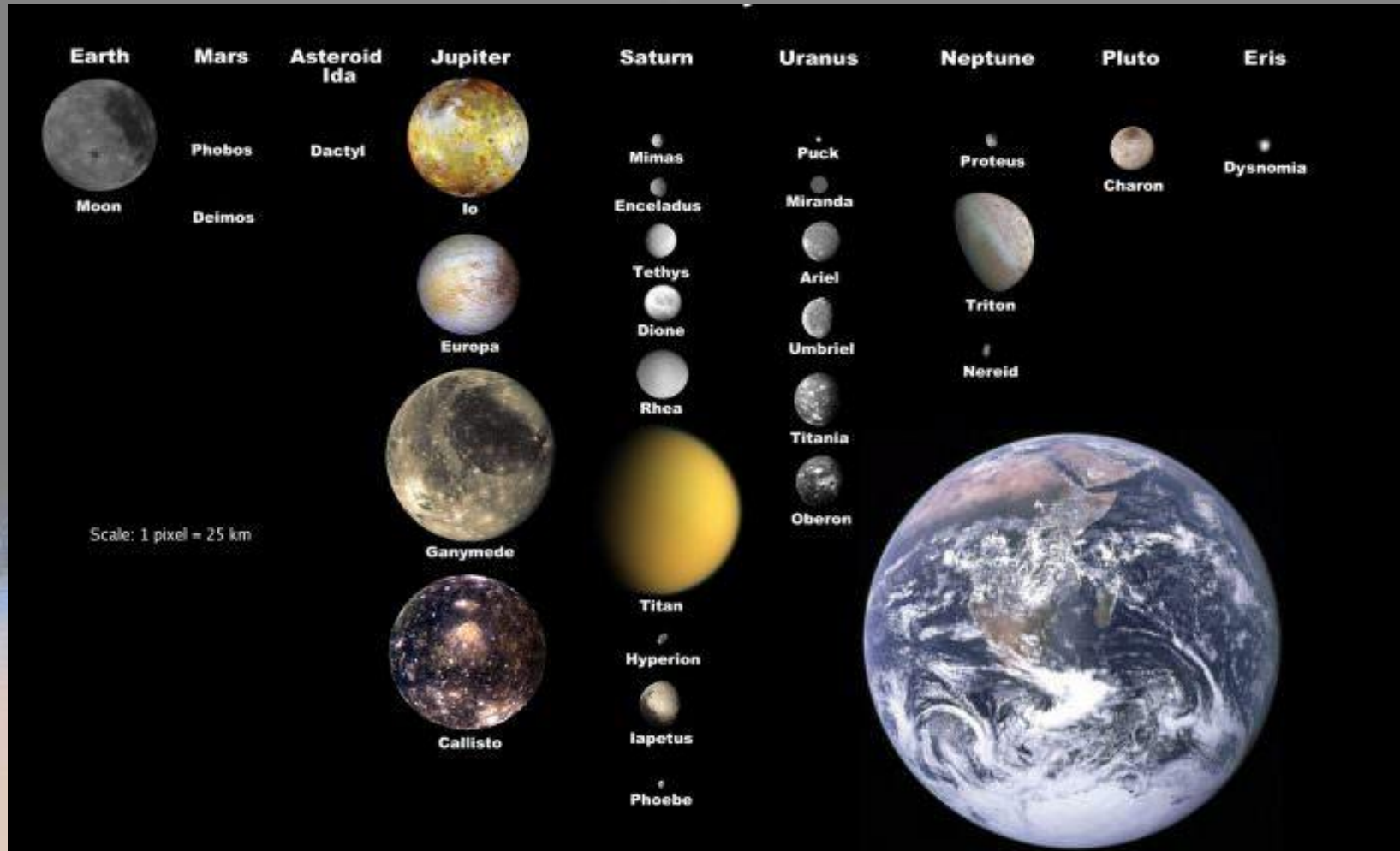


Updated to Jan 2, 2015 by  
R. L. McNish, RASC Calgary Centre

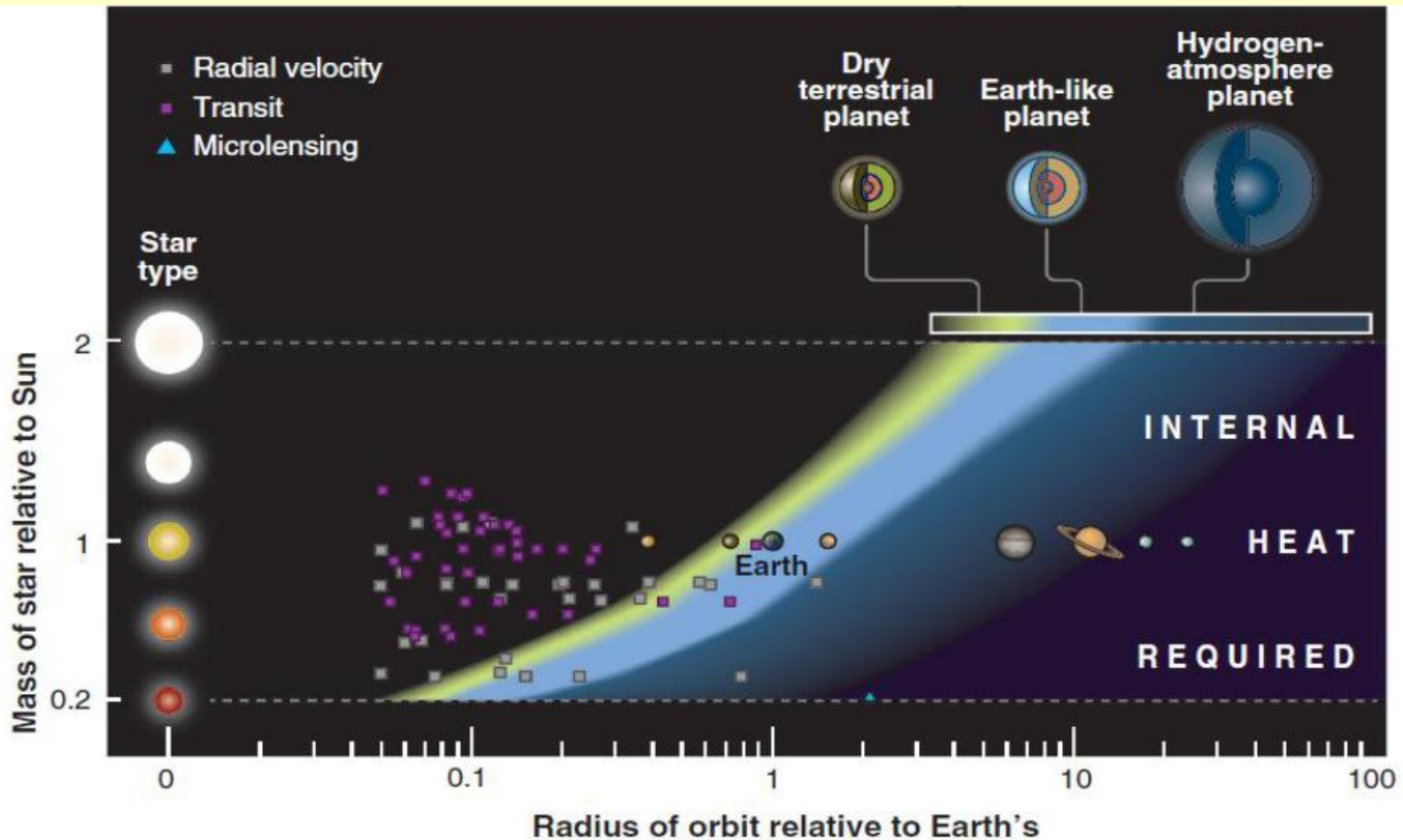
Первые объекты в транснептуновой зоне ( $> 35$  а.е.) были открыты в начале 90-х годов. Теоретические оценки: более  $10^5$  ледяных объектов размером более 100 км.



# Солнечная система: *спутники планет*



# Зоны обитаемости

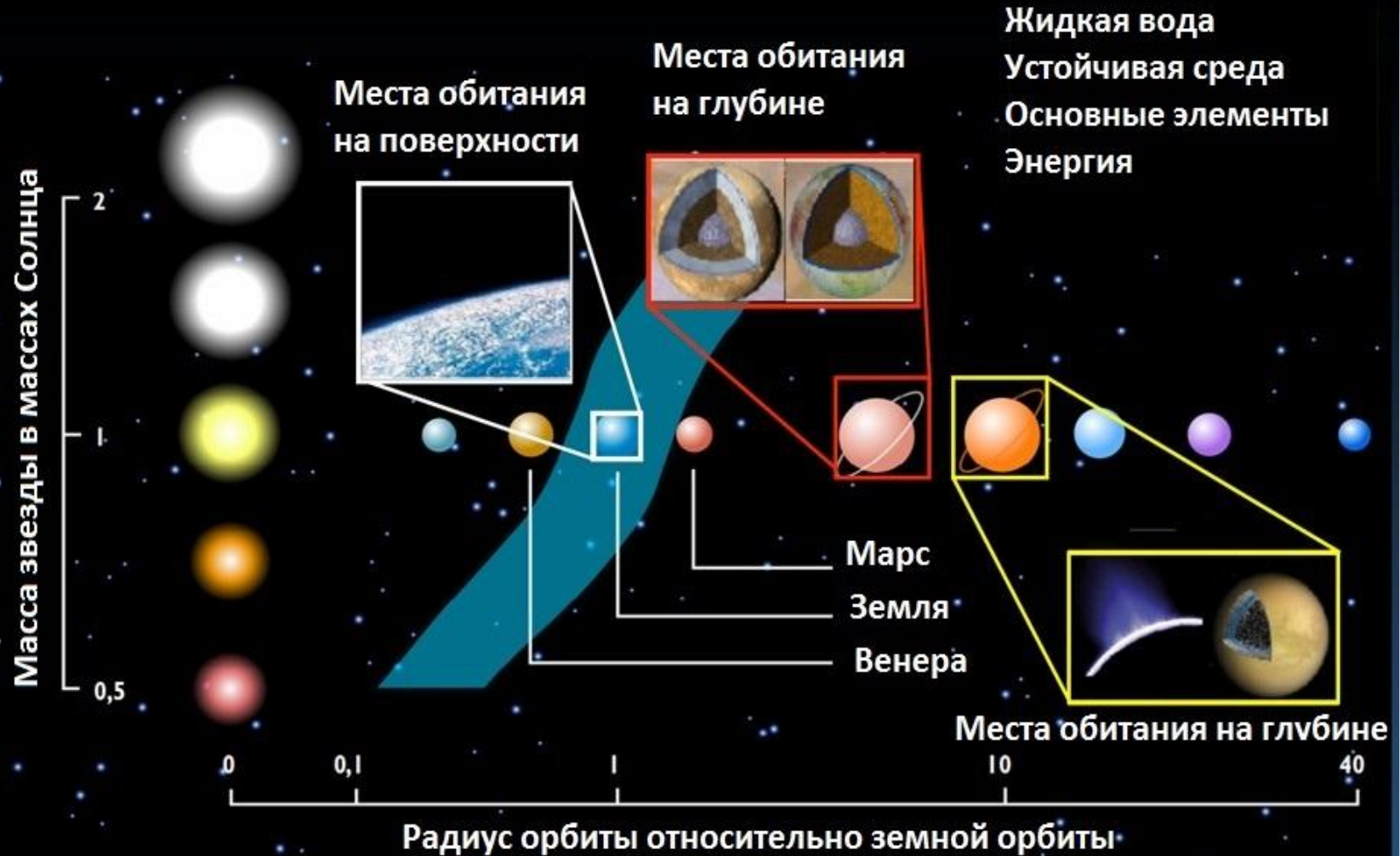


Голубым выделена стандартная зона для каменных планет с  $N_2$ - $CO_2$ - $H_2O$  атмосферами;

Темно-голубым – расширенная зона для планет в переходной области от каменных к мини-нептунам.

# Зоны обитаемости: *расширение*

## Расширенная зона обитаемости в Солнечной системе



# Миры с океанами

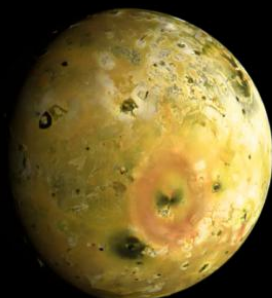
Во внешних областях Солнечной системы содержится потрясающее разнообразие небесных тел: Европа, с ее причудливыми особенностями поверхности; крошечный, геологически активный Энцелад; Титан, единственный спутник, обладающий значительной атмосферой; Плутон с его азотными ледниками; и многие другие. За последние двадцать пять лет измерения космических аппаратов показали, что многие из этих небесных тел являются “мирами с океанами”, обладая большими объемами жидкой воды, изолированной под ледяными оболочками.

Эта новая группа небесных тел - миры с океанами, является важной для исследований по нескольким причинам, но наиболее убедительной и в то же время также самой простой является следующая причина: они могут быть обитаемы. Жизнь, как мы ее знаем, требует жидкой воды, в дополнение к энергии и питательным веществам, и все три требования могут быть удовлетворены в рамках некоторых из этих небесных тел.

# Миры с океанами

Jupiter satellites:

Earth's Moon:



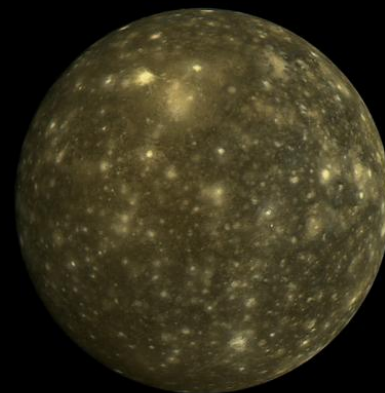
Io



Europa



Ganymede



Callisto

Saturn satellites:



Titan

Neptune satellites:



Triton

Proteus



Iapetus

Mimas



Enceladus



Tethys



Dione



Rhea

Uranus satellites:

Ariel



Titania



Umbriel



Oberon



Miranda



Pluto system:



Pluto



Charon

Монтаж ледяных миров. Для спутников, отмеченных голубым цветом, имеются геофизические измерения, указывающие на присутствие океана под ледяной поверхностью.

# Миры с океанами

**Table 1**

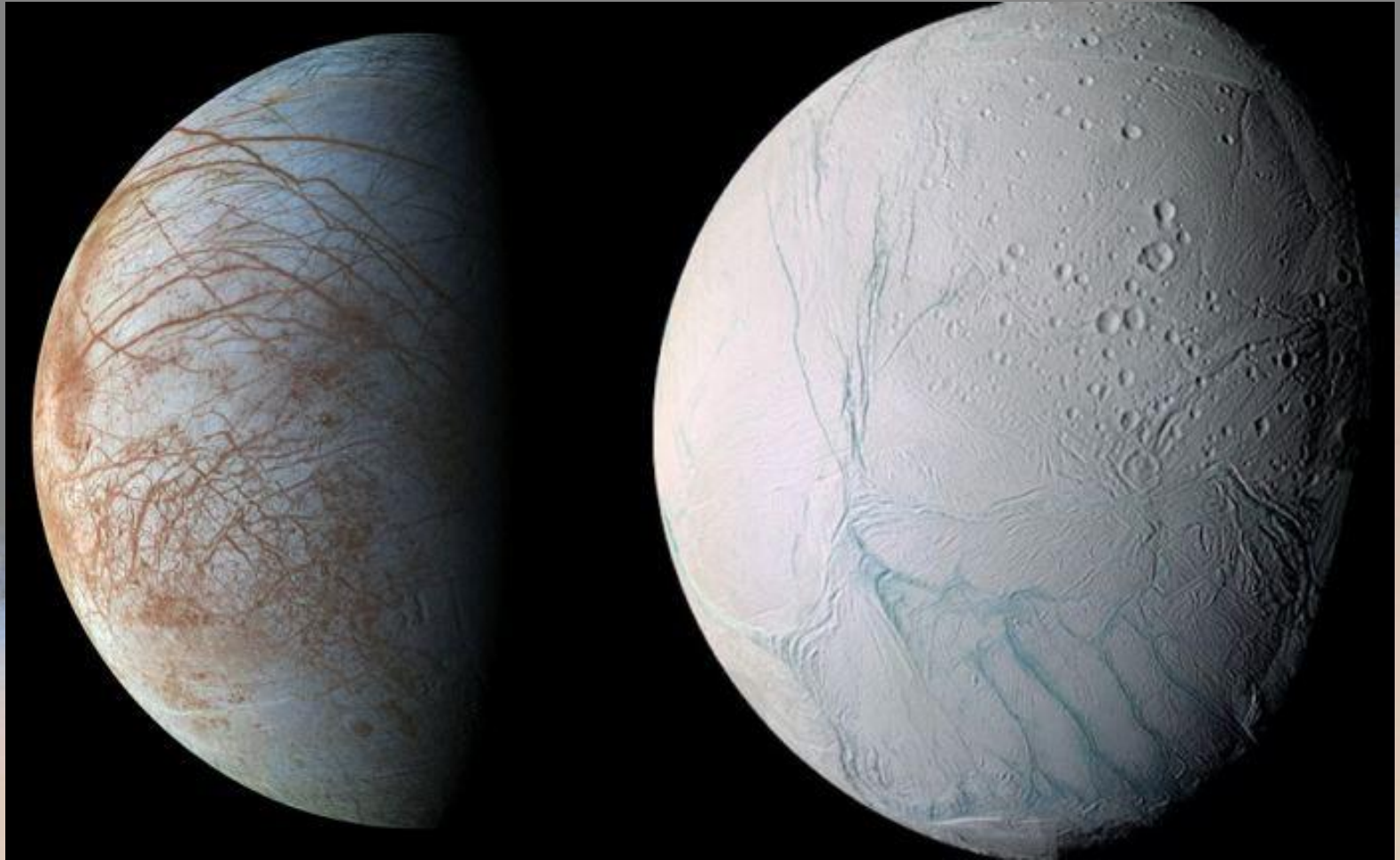
Categorization of “ocean world” solar system bodies other than the Earth, in terms of whether the ocean exists today and how many lines of evidence are present.

Name	Relic	Extant 2	Extant 1	Theory
Mars	✓			
Ceres	✓			
Europa		✓		
Ganymede			✓	
Callisto			✓	
Mimas			✓	
Enceladus		✓		
Dione			✓	
Titan		✓		
Triton				✓
Pluto				✓
Charon				(✓)

Notes: Relic means ocean was present in the past and has left evidence; extant (2,1) means exists based on (two, one) line(s) of evidence; theory means inferred primarily from theoretical studies. The possibility of an ocean within Charon is at present highly speculative.

**Пока нет официального набора объектов в Солнечной системе, которые считаются “мирами с океаном”. В таблице 1 (Lunine, 2017) перечислены объекты, многие из которых в настоящий момент включены в данную категорию: “реликтовые океаны” (Марс, Церера), спутники Юпитера (Европа, Ганимед, Каллисто), луны Сатурна (Мимас, Энцелад, Диона, Титан), и объекты пояса Койпера (Тритон, Плутон, Харон).**

# Миры с океанами



**Луны с океанами - Европа и Энцелад. Изображения получены космическими аппаратами Галилео и Кассини.**

# Вода, вода, везде вода



MOON OF SATURN

## ENCELADUS

Scientists predict that a regional reservoir about 6 miles (10 km) deep lies under a shell of ice 19 to 25 miles (30 to 40 km) thick at Enceladus' south pole. This underground ocean is thought to feed the moon's impressive jets, which spray from deep fissures (called "tiger stripes") in the moon's surface.



SIZE COMPARISON

**9.5 AU**

DISTANCE FROM SUN

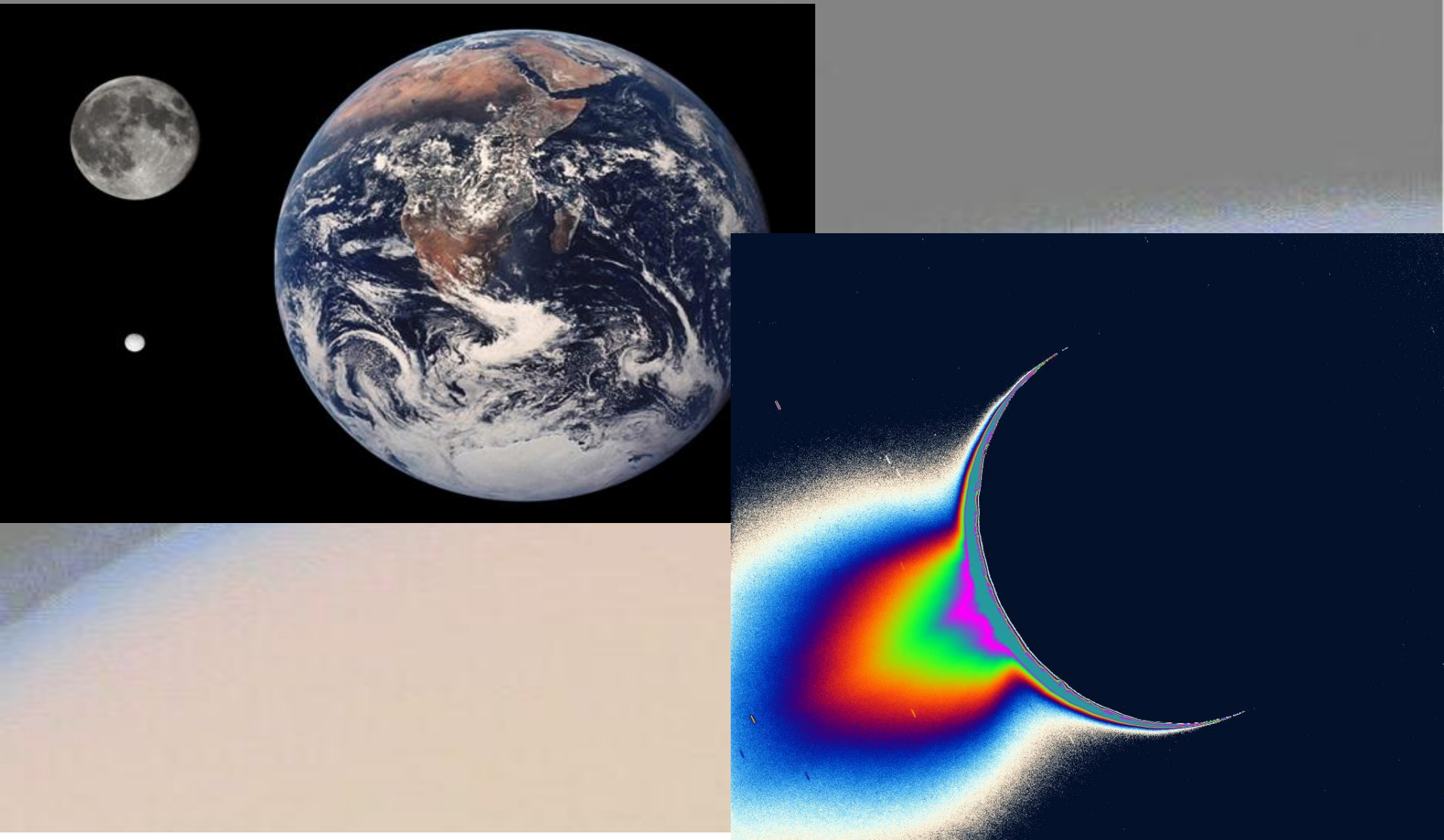
**ACTIVE**

Dynamic ocean,  
could support life

OCEAN WORLD STATUS



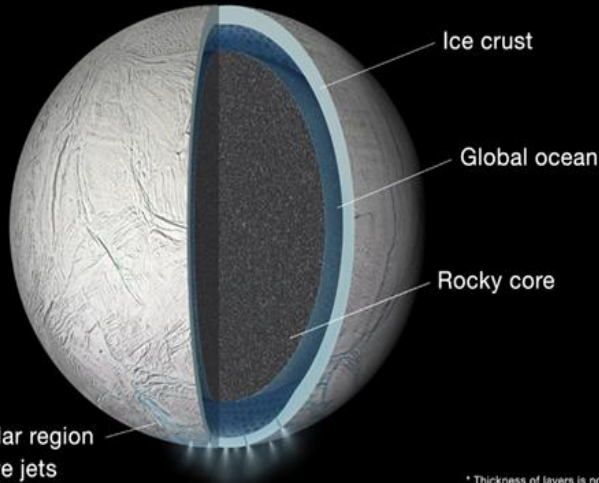
# Миры с океанами: Энцелад



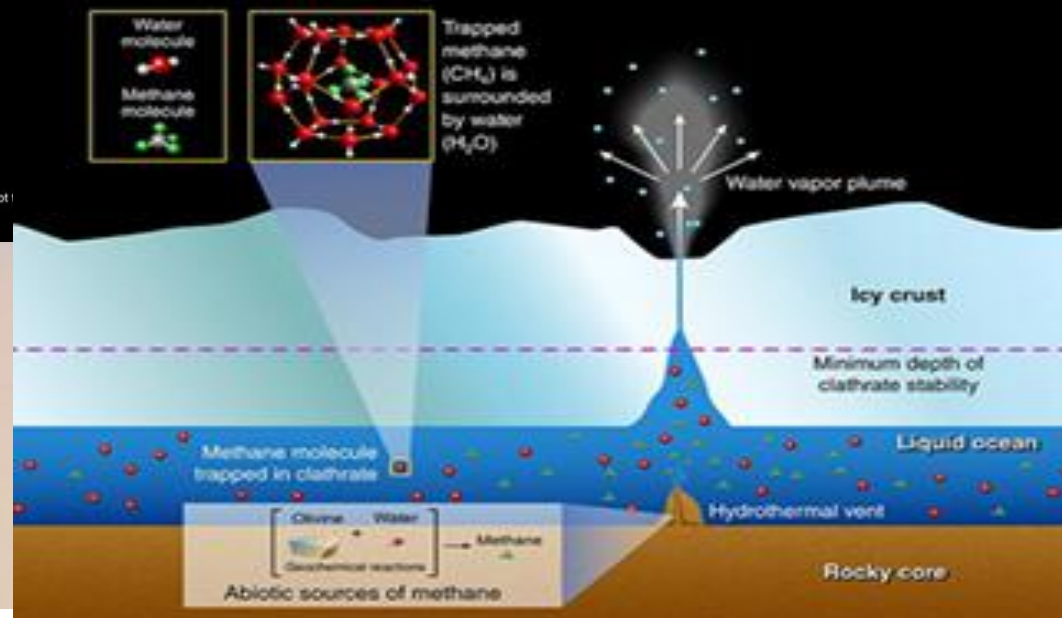
Снимки КА Cassini 2005 г. - показаны подсвеченные сзади Солнцем подобные фонтанам источники, выбрасывающие тонкие струи вещества на южном полюсе спутника Сатурна Энцелад.

# Миры с океанами: Энцелад

Global Ocean on  
Saturn's Moon  
ENCELADUS

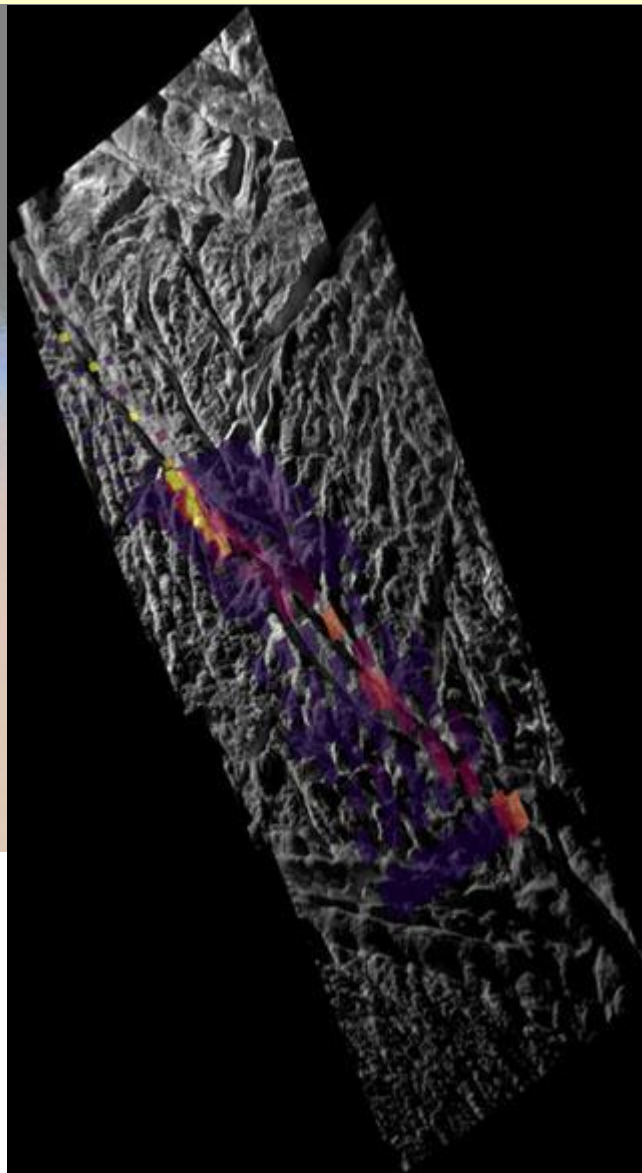
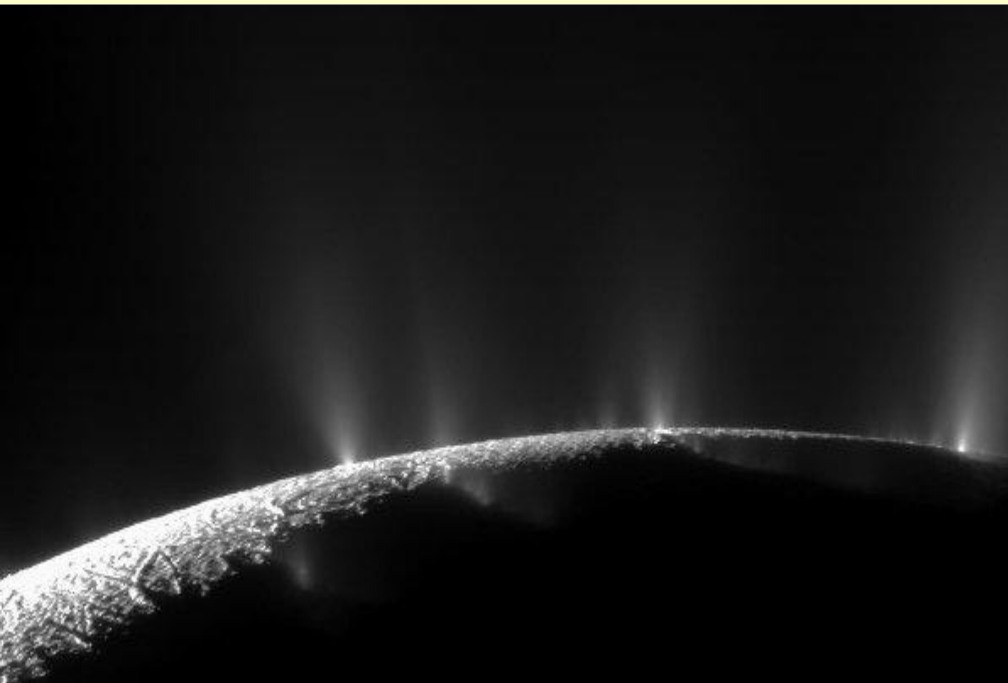


## Trapping of Methane in Enceladus' Ocean



Эта иллюстрация изображает потенциальное происхождение метана, который был обнаружен в шлейфе из газа и частиц льда, выброшенного гейзером на южном полюсе Энцелада (данные INMS Cassini). Гидротермальная активность происходит когда морская вода проникает и реагирует с каменной корой спутника и проявляется как теплый и насыщенный минералами раствор. Это естественное явление в земных океанах.

# Миры с океанами: Энцелад

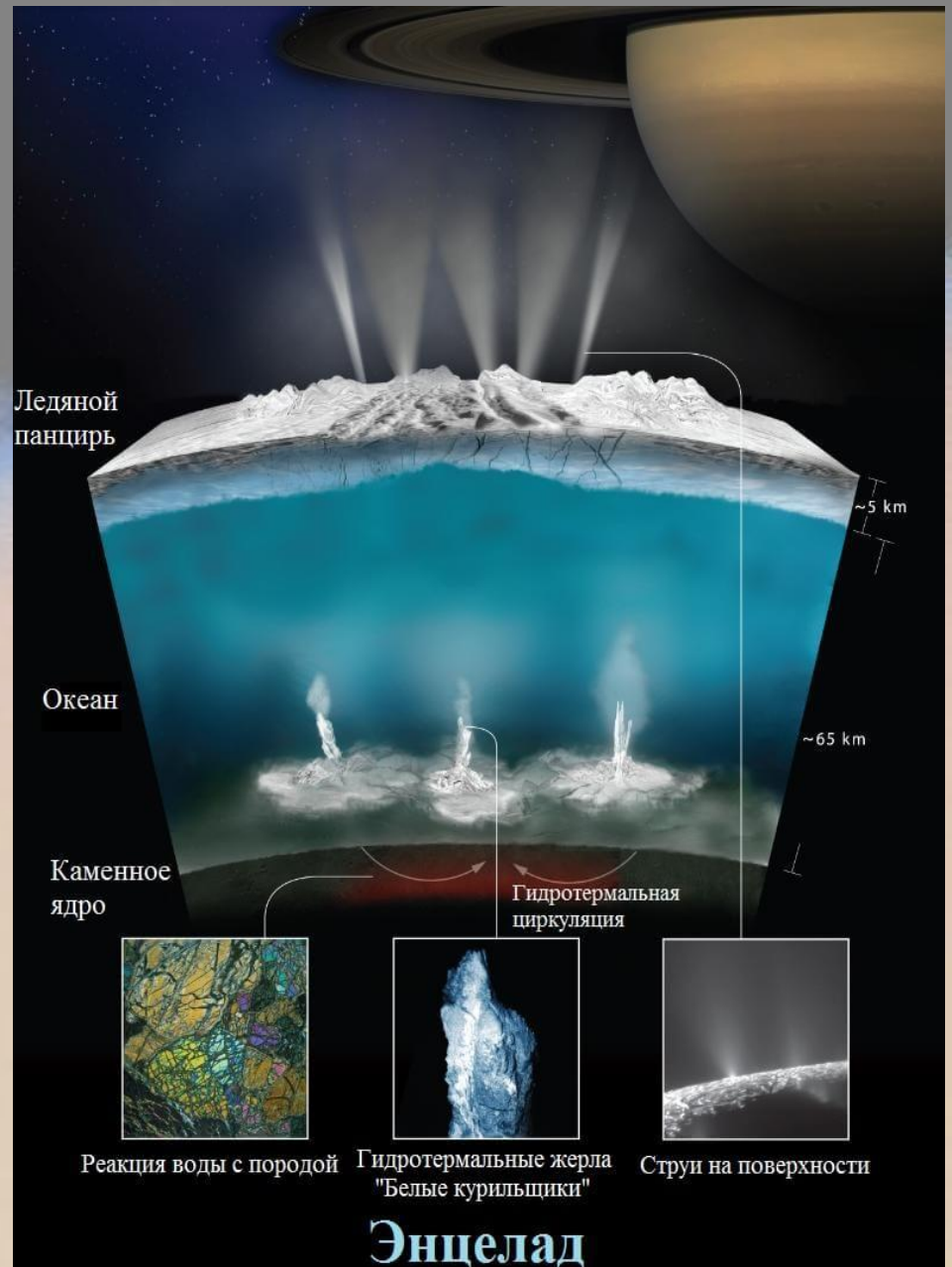


**Очаги тепла распределены вдоль одной из загадочных трещин в южной полярной области спутника Сатурна Энцелад. Данные КА Cassini.**

# Миры с океанами: Энцелад

Источники и потоки энергии в системе: силикатное ядро-глобальный океан-ледяная кора на поверхности Энцелада.

«Все указывает на то, что водород непрерывно рождается внутри ядра Энцелада. Мы просчитали разные варианты того, как водород может покидать его породы, и пришли к выводу, что самый его вероятный источник – гидротермальные реакции между водой и каменистым дном океана, содержащим в себе органику и щелочные породы» (Н. Waite et al., 2017).



# **Солнечная система: *содержание темы 1***

**Лекция 1 (2 часа): ~~Основные характеристики планет Солнечной системы.~~**

**Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.**

**Лекция 3 (2 часа): Кометы. Физическое состояние межпланетной среды. Метеорное вещество.**

**Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.**

**Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.**

**Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.**