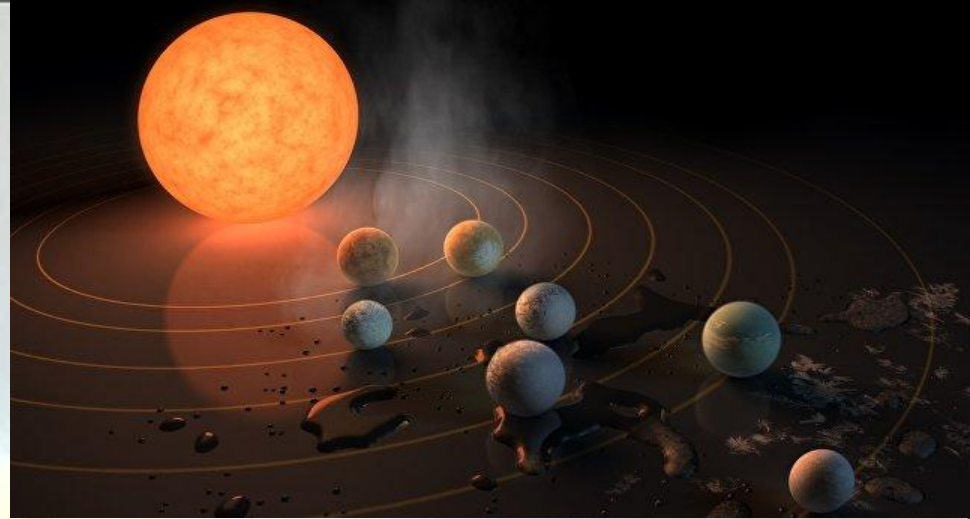




Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

В.И. Шематович

Институт астрономии РАН



Солнечная система: *содержание*

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.

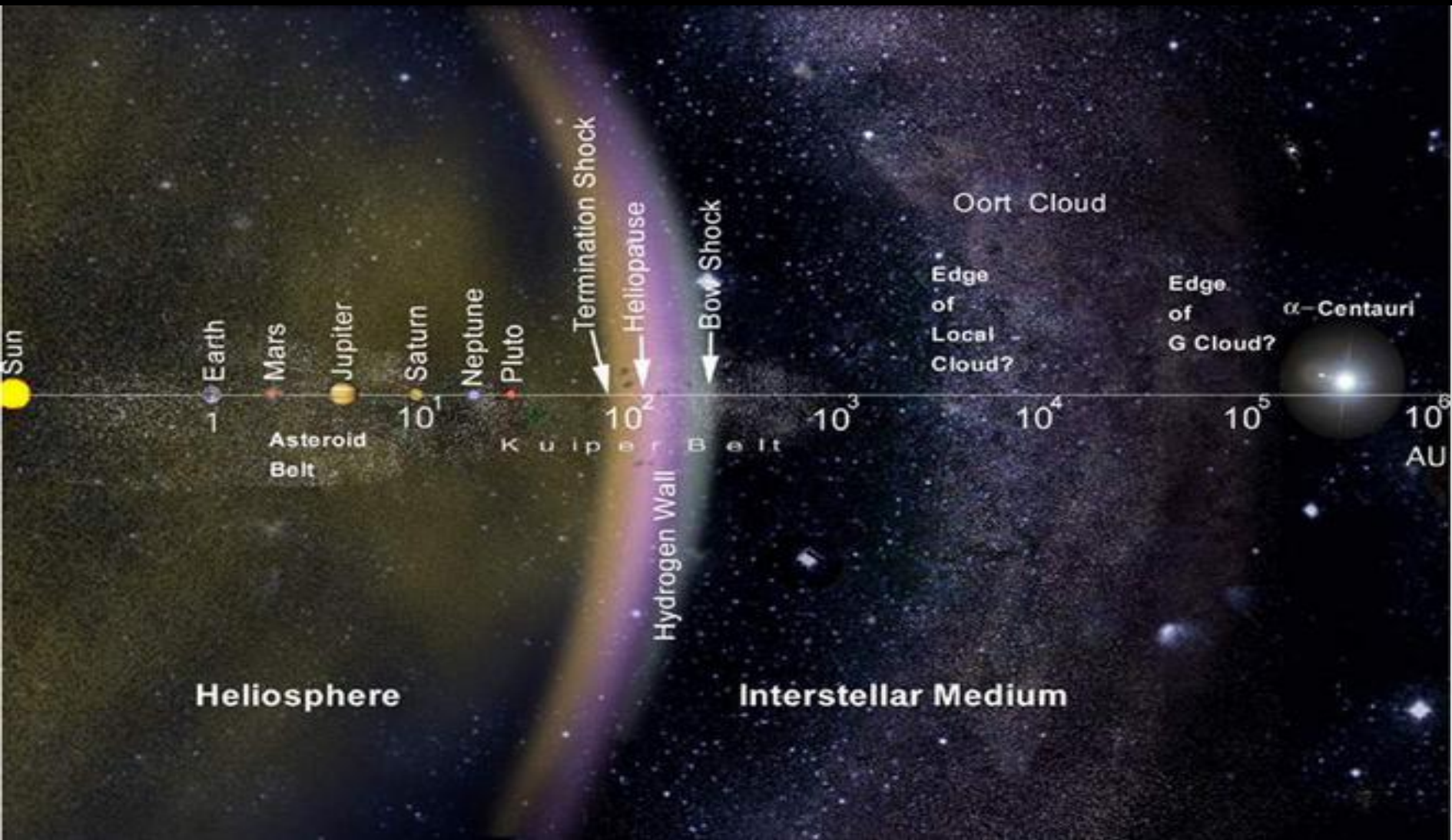
Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.

Солнечная система - лекция 2:

Основные характеристики спутников:

- Малые тела – астероиды, кометы и спутники планет**
- Размер и масса, плотность**
- Каменистые тела**
- Ледяные тела**
- Миры с океанами**

Солнечная система: границы



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

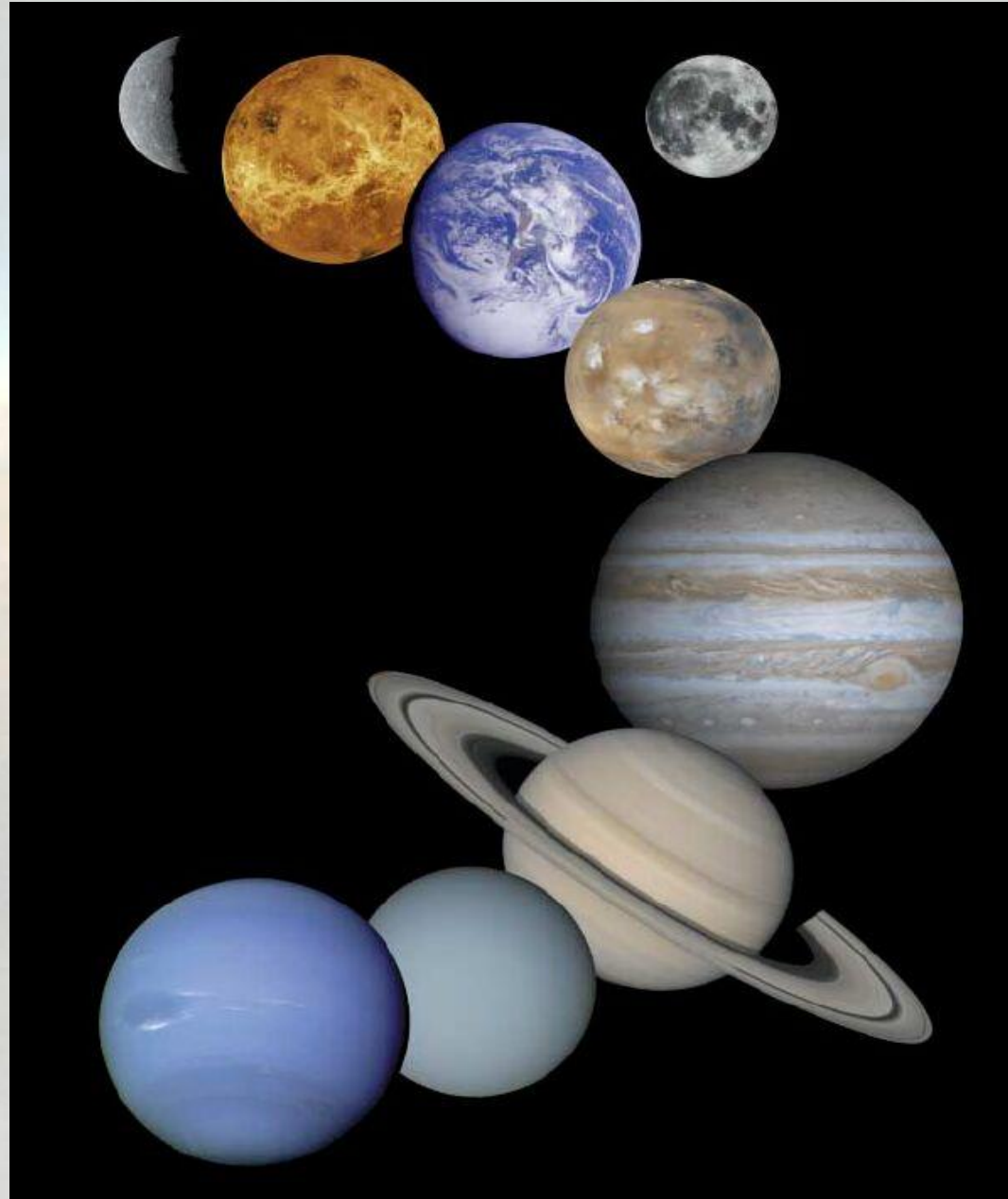
Солнечная система: и ее зона обитаемости



Состоит из восьми планет – 4 внешних газовых гигантов, 4 внутренних каменных планет. Зона обитаемости выделена голубым цветом.

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



Луны в Солнечной системе

Ио

Европа

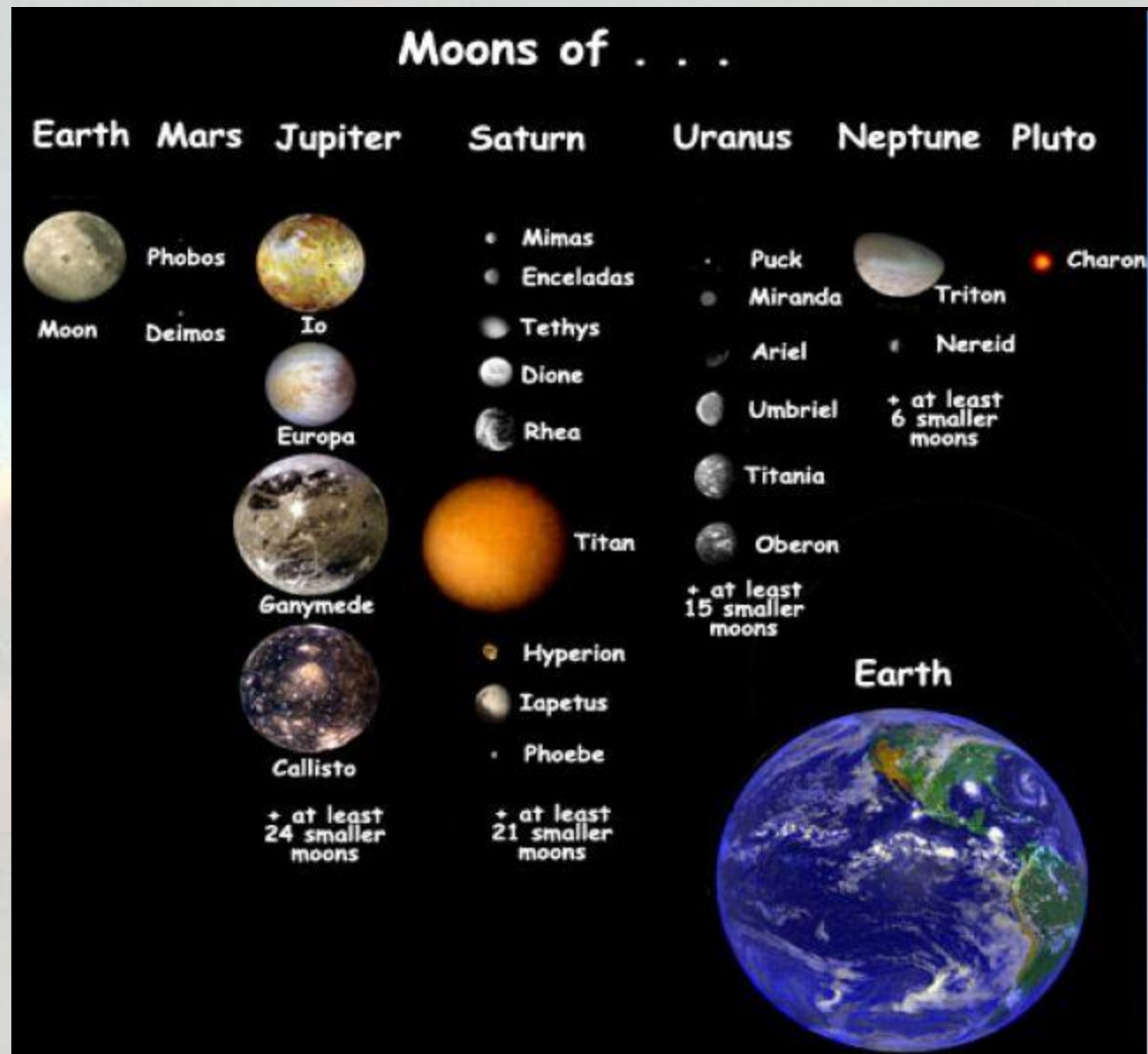
Ганимед

Энцелад

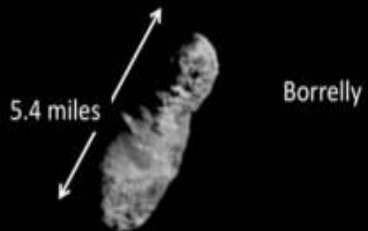
Титан

Харон

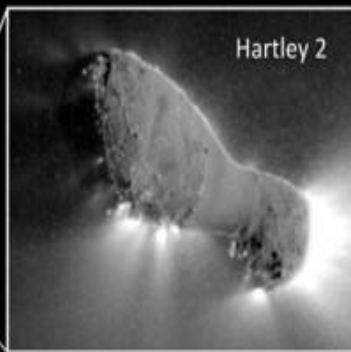
...



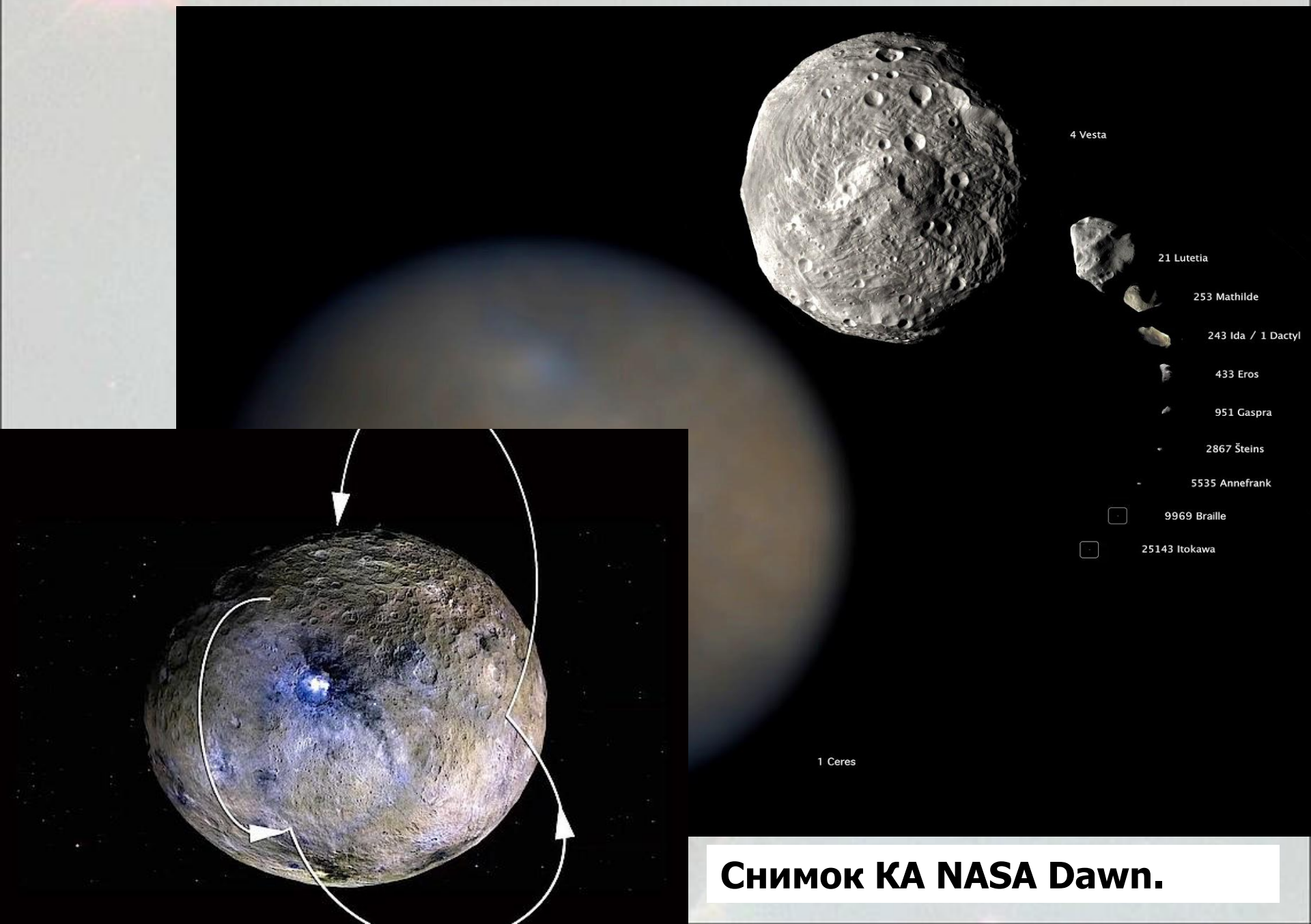
Малые тела в Солнечной системе: кометы и астероиды



1.25 miles

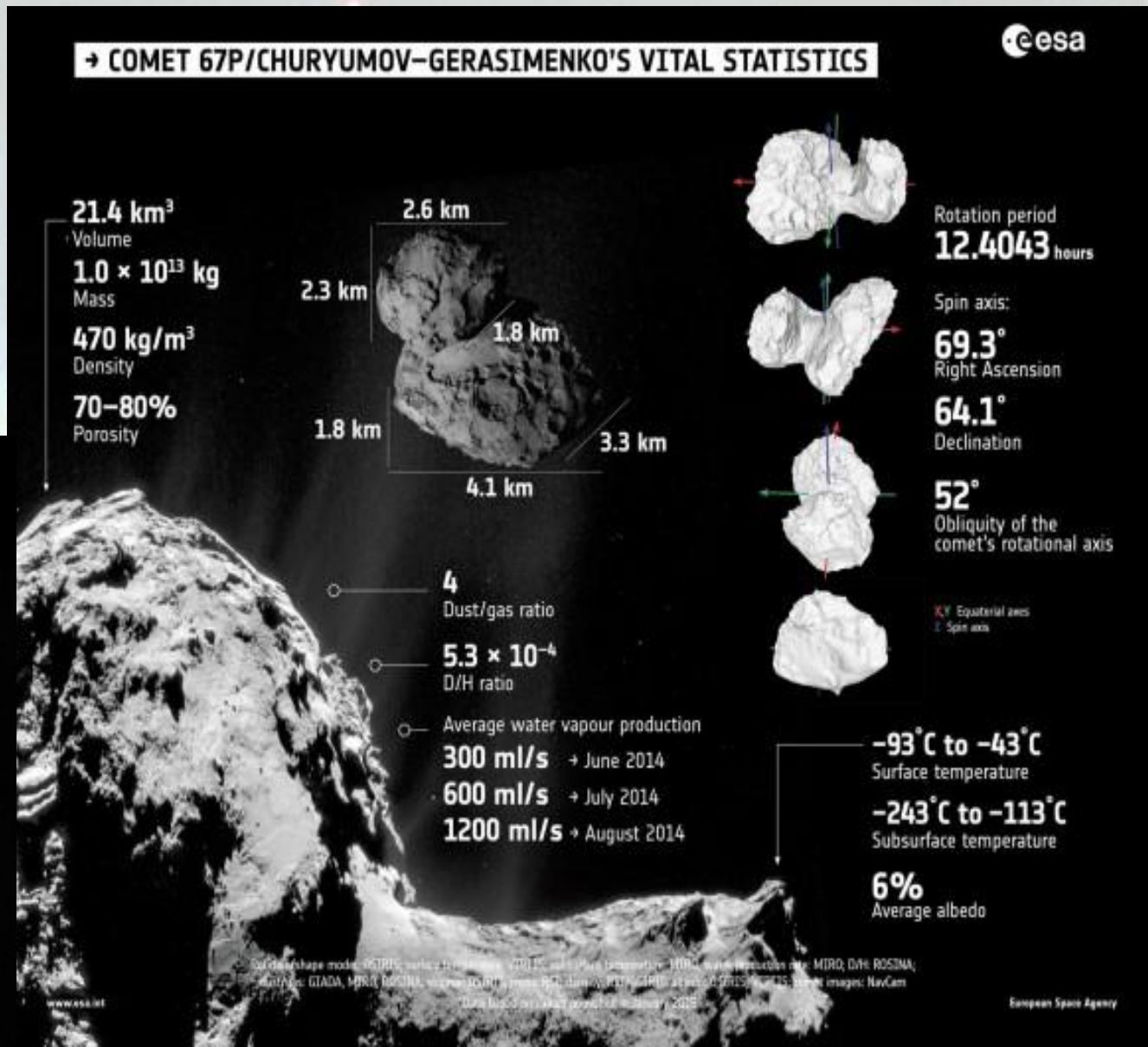


Малые планеты и астероиды, исследованные КА

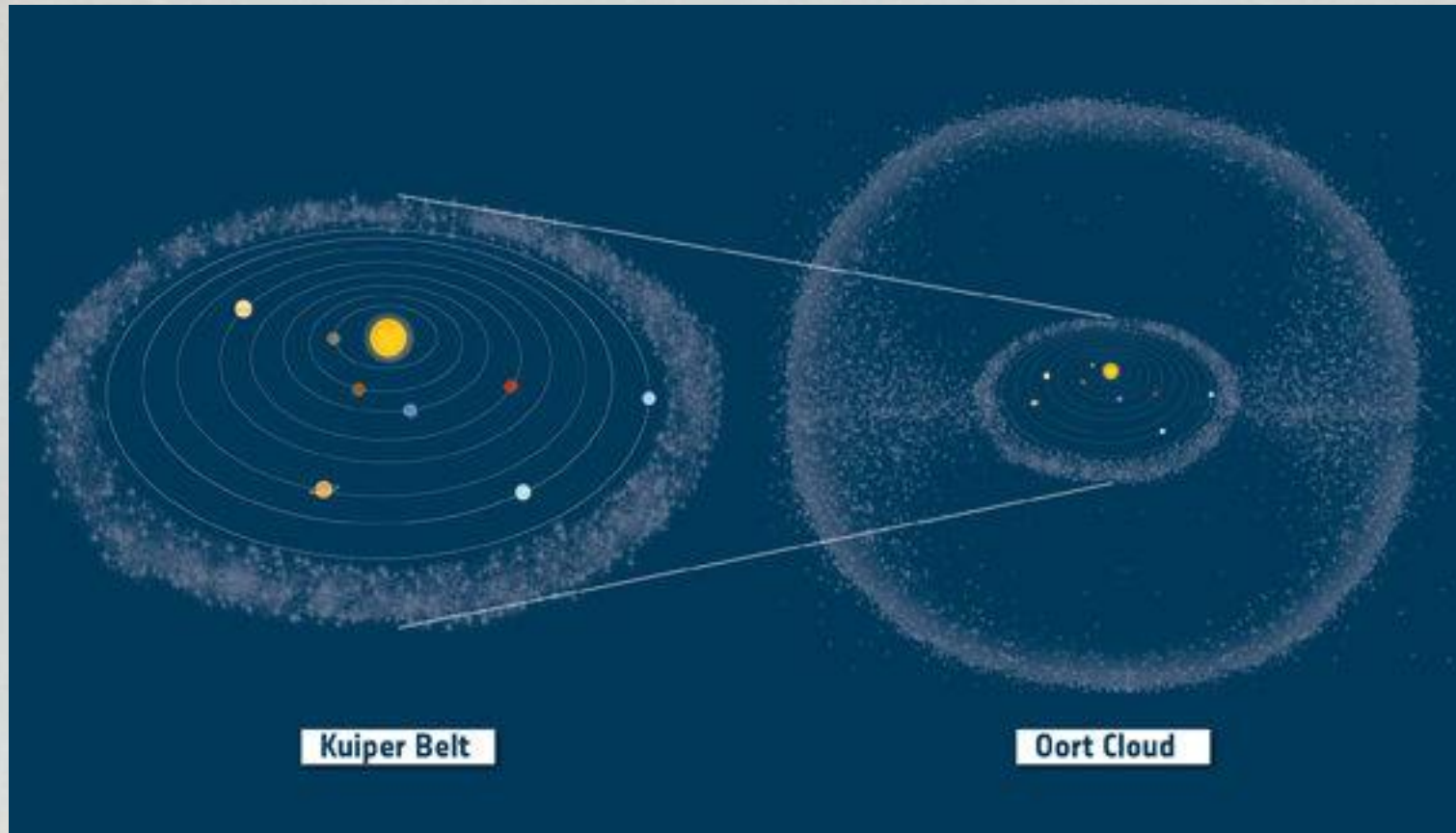


Снимок КА NASA Dawn.

Сводка свойств ядра кометы 67P/C-G по данным инструментов КА Rosetta за первые месяцы ее полета с кометой.

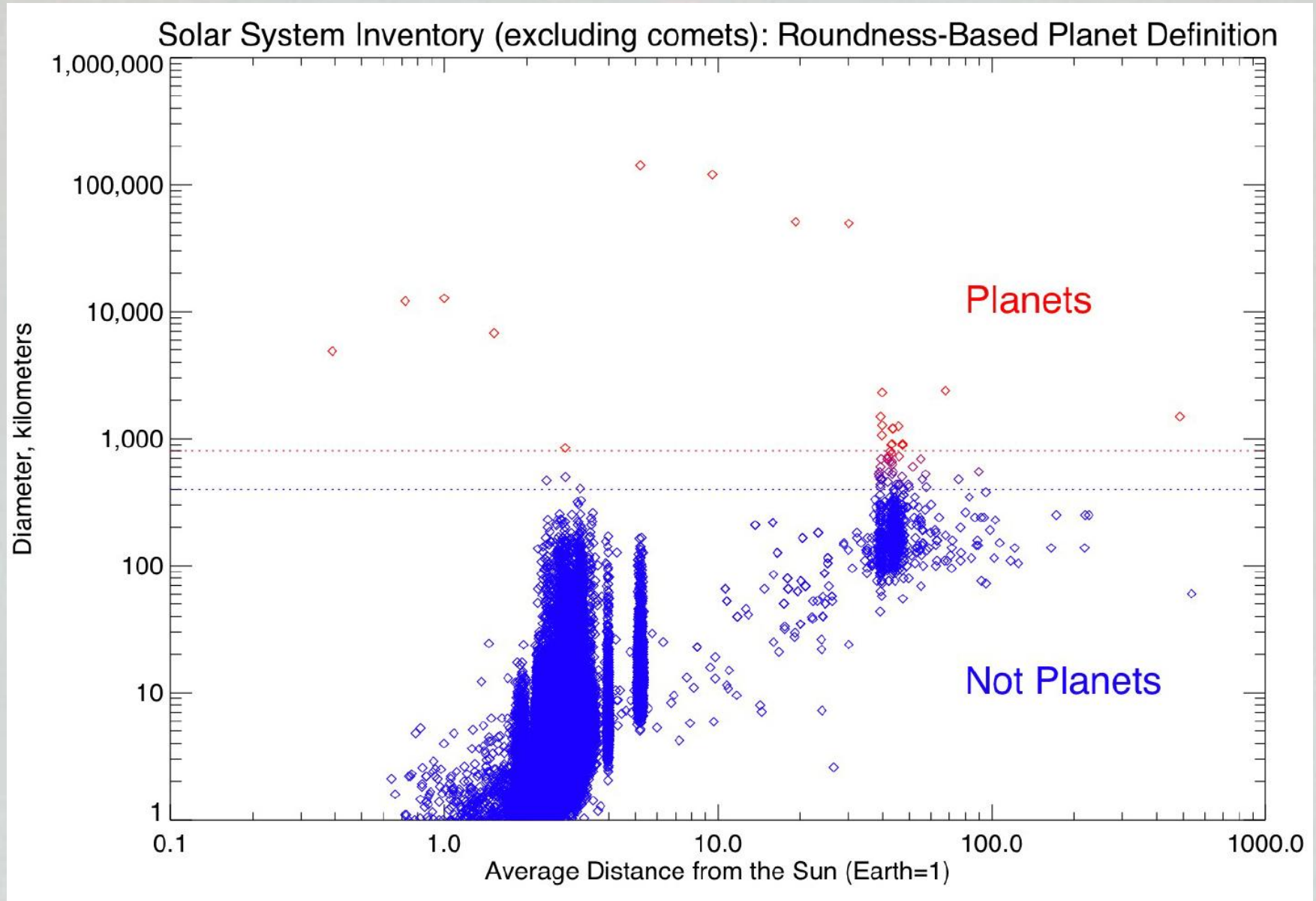


Области образования комет



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.

Малые небесные тела в Солнечной системе



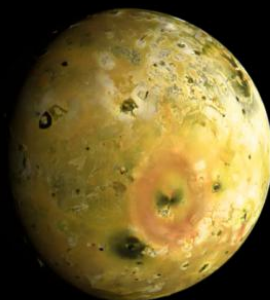
Миры с океанами

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 тоже 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:



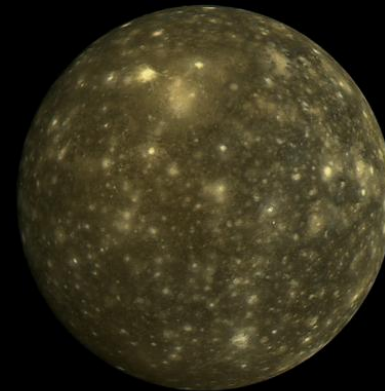
Io



Europa



Ganymede



Callisto

Saturn satellites:

Mimas



Enceladus



Tethys



Dione



Rhea



Titan



Iapetus

Neptune satellites:

Proteus



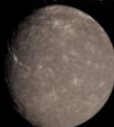
Triton

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.

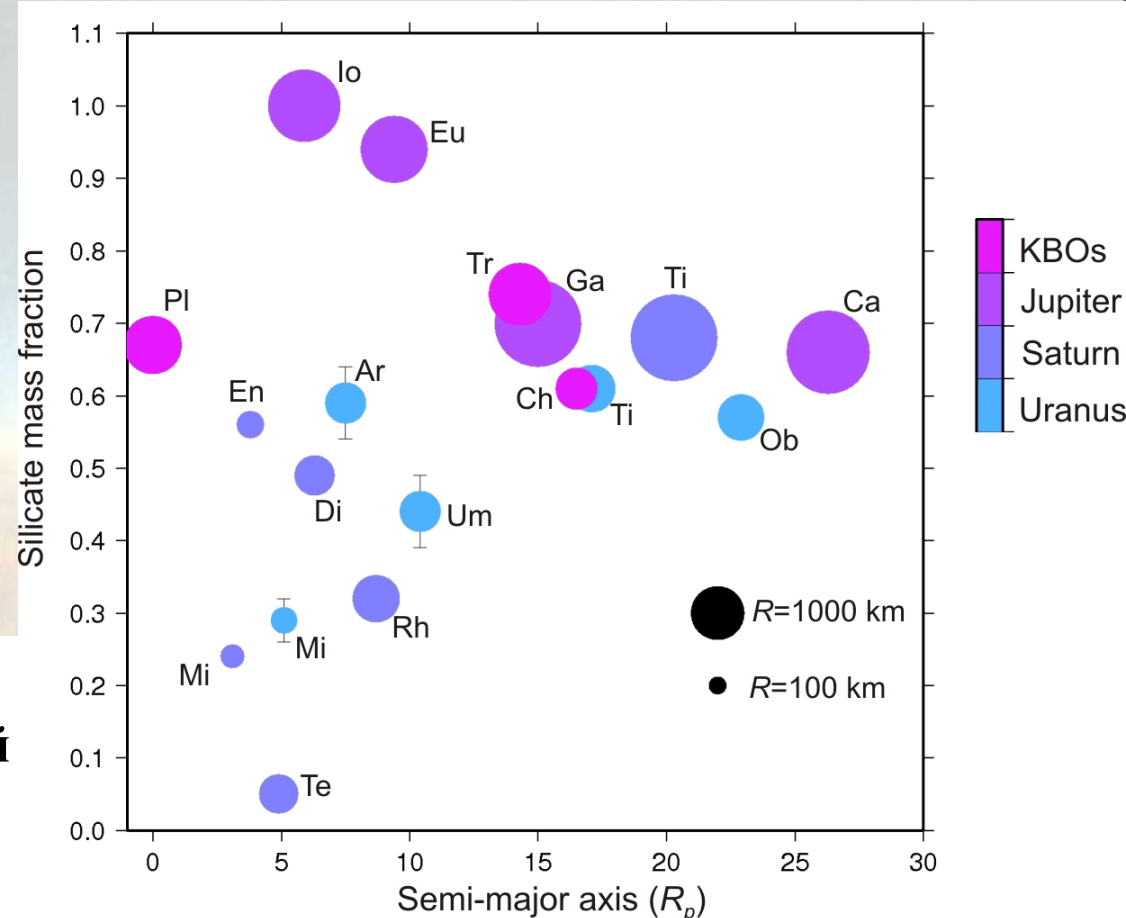
Name	Relic	Extant 2	Extant 1	Theory
Mars	✓			
Ceres	✓			
Europa		✓		
Ganymede			✓	
Callisto			✓	
Mimas			✓	
Enceladus		✓		
Dione			✓	
Titan		✓		
Triton				✓
Pluto				✓
Charon				(✓)

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

Массовая доля твердой фракции относительно большой полуоси для внешних тел Солнечной системы. Большая полуось задается в радиусах планеты, а массовая доля вычисляется по измеренной плотности в пределах между плотностями камня и льда 3.5 гсм-3 и 0.95 гсм-3, соответственно. Следующие аббревиатуры использованы: Ar(iel), Ca(l listo), Ch(aron), Di(one), En(celadus), Eu(ropa), Ga(nymede), Mi(randa) [Uranus], Mi(mas) [Saturn], Ob(eron), Pl(uto), Rh(ea), Te(thys), Ti(tan) [Saturn], Ti(titania) [Uranus], Tr(iton), Um(briel).



Миры с океанами

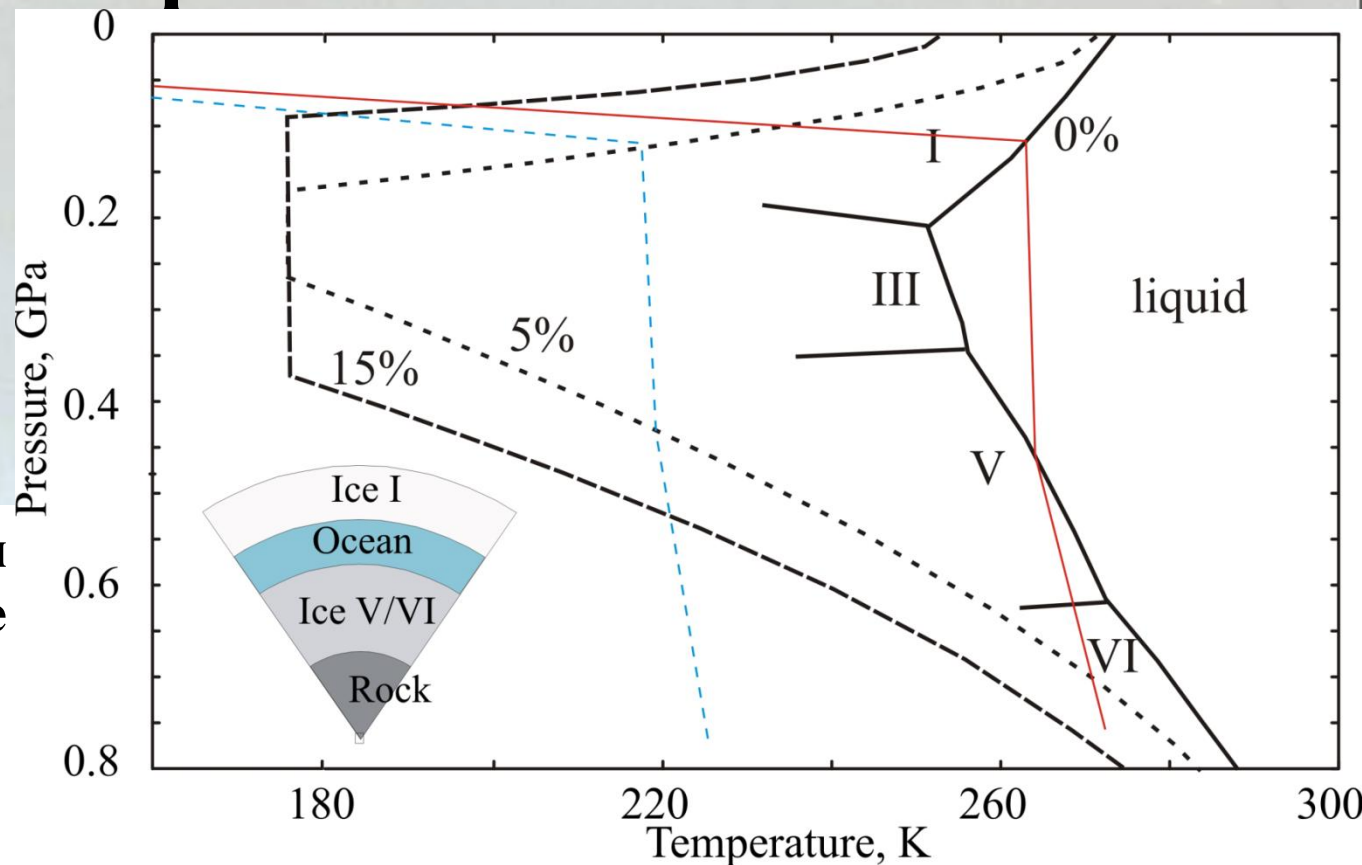
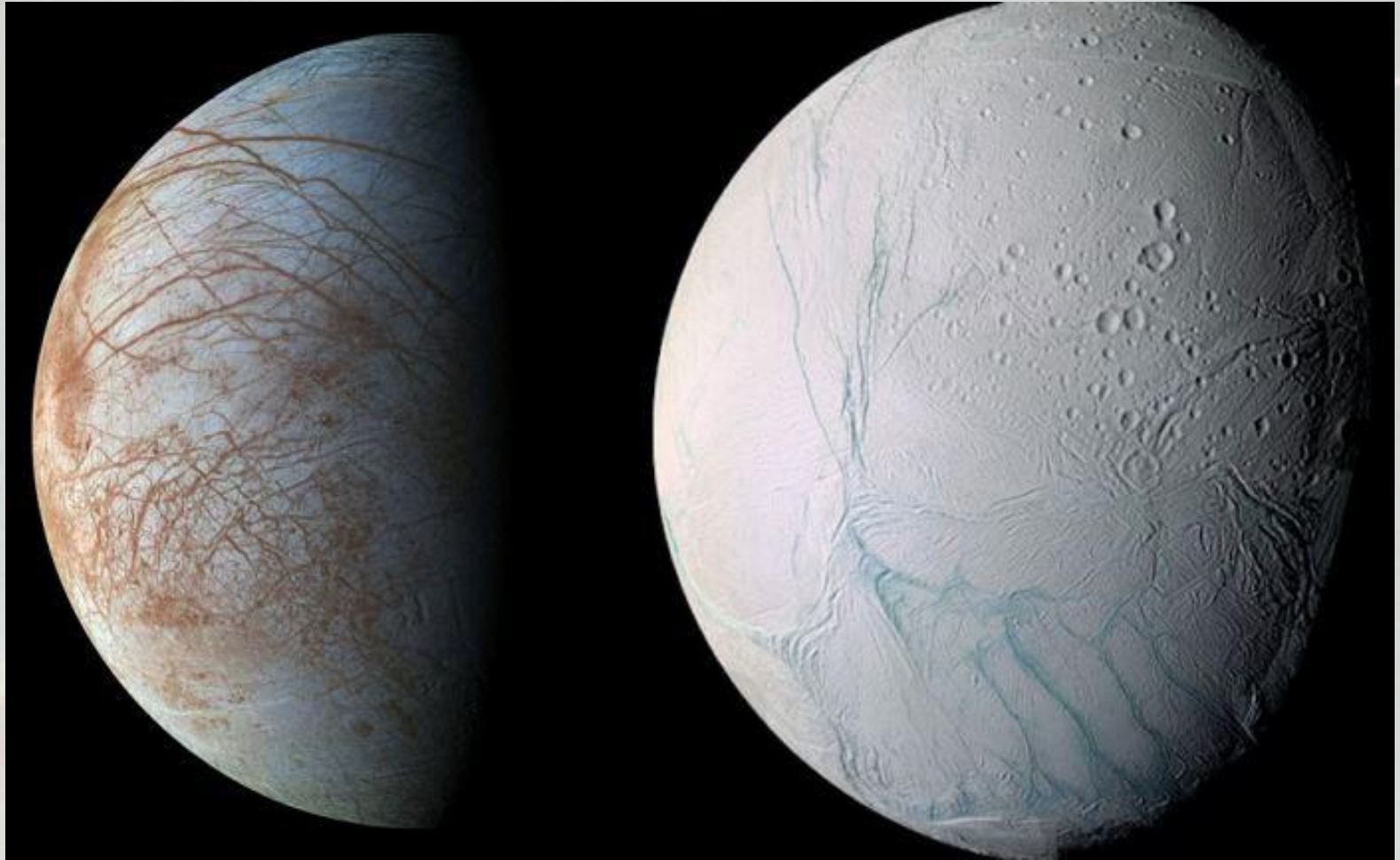


Диаграмма плавления и возможные фазовые состояния водяного льда (Hussmann et al., 2015). Сплошные линии представляют

фазовую диаграмму чистого льда H₂O с разными фазами, отмеченными римскими цифрами. Пунктирные линии представляют кривые плавления льда H₂O с добавками 5% или 15% аммиака. Тонкие сплошные красные и синие пунктирные линии показывают гипотетические тепловые профили, иллюстрирующие, как жидкий слой может образовываться между слоями с низким и высоким давлением твердых фаз. На вставке показана общая структура большого ледяного спутника, такого как Ганимед.

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

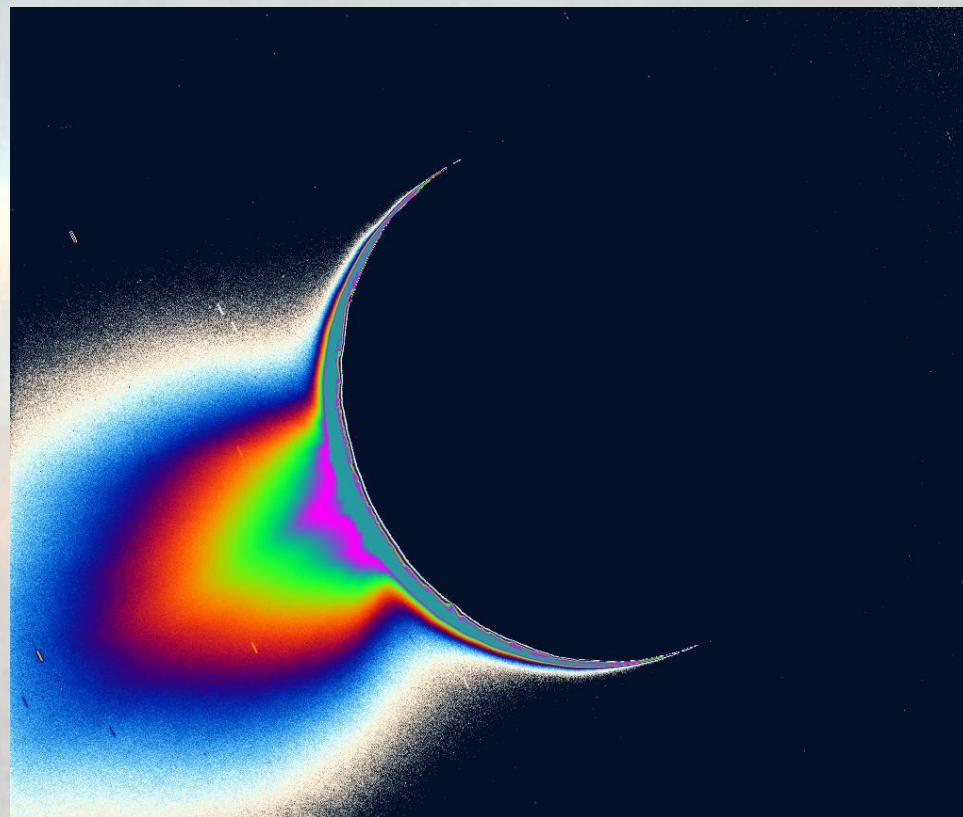
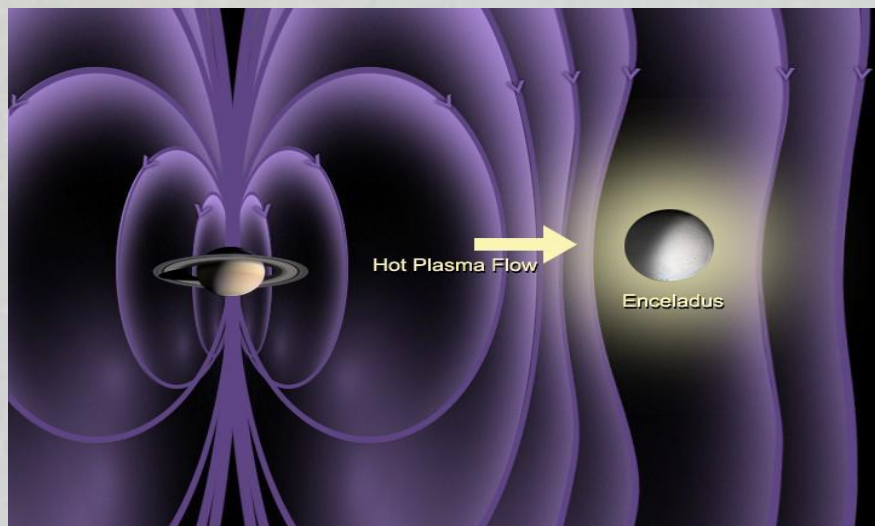
DISTANCE FROM SUN

ACTIVE

Dynamic ocean,
could support life

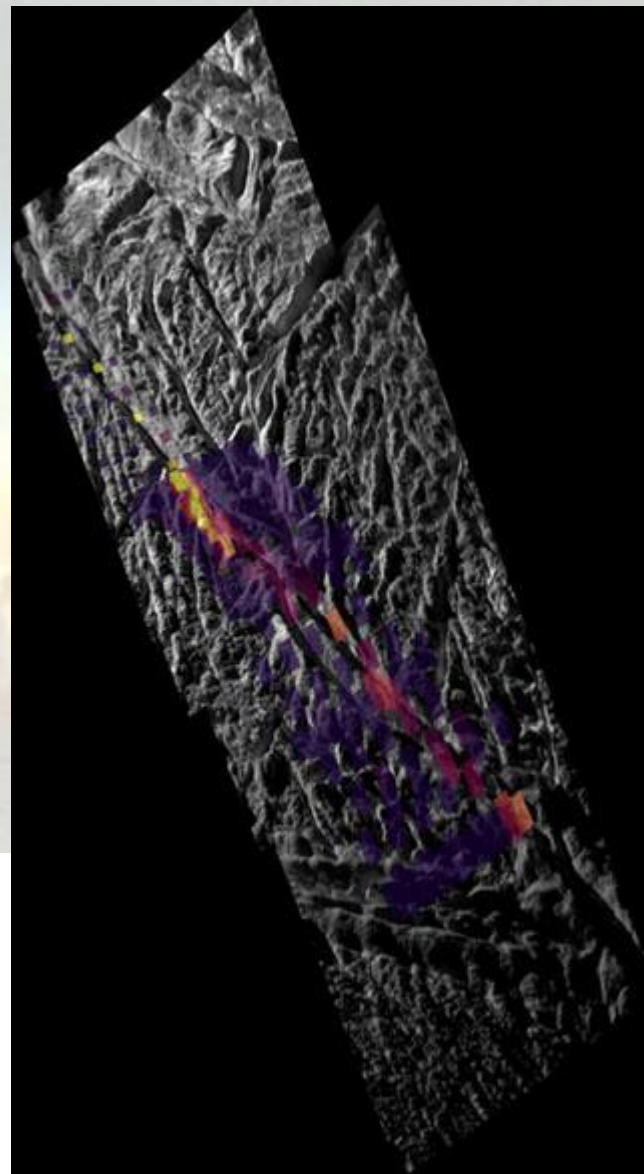
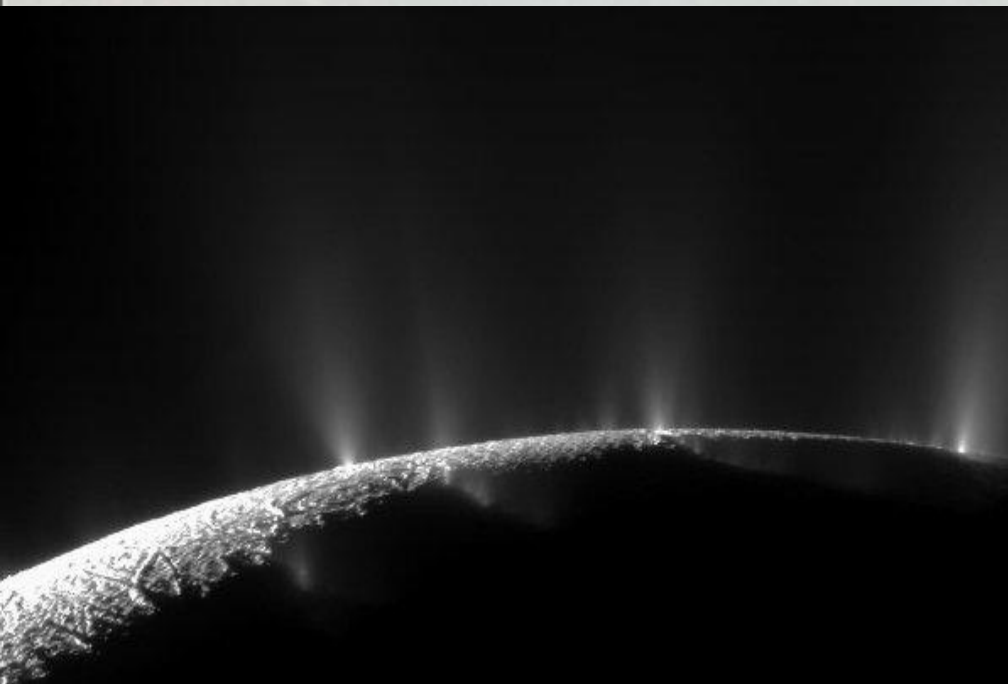
OCEAN WORLD STATUS

Миры с океанами: Энцелад



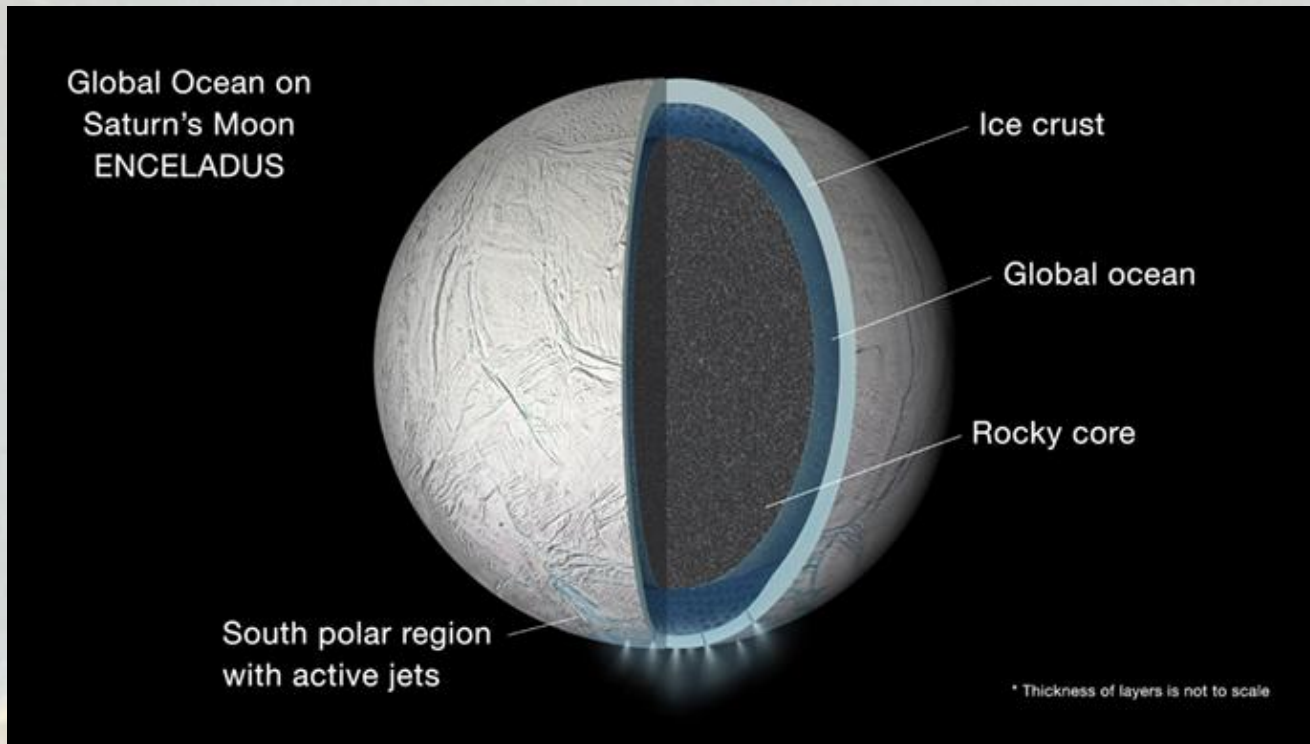
Слева: атмосфера Энцелада. Справа: Недавние снимки КА Cassini спутника Сатурна Энцелад, на которых видны подсвеченные сзади Солнцем выбросы (шлейфы) газа и ледяных и пылевых частиц, источниками которых являются гейзеры на южном полюсе спутника.

Миры с океанами: Энцелад



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

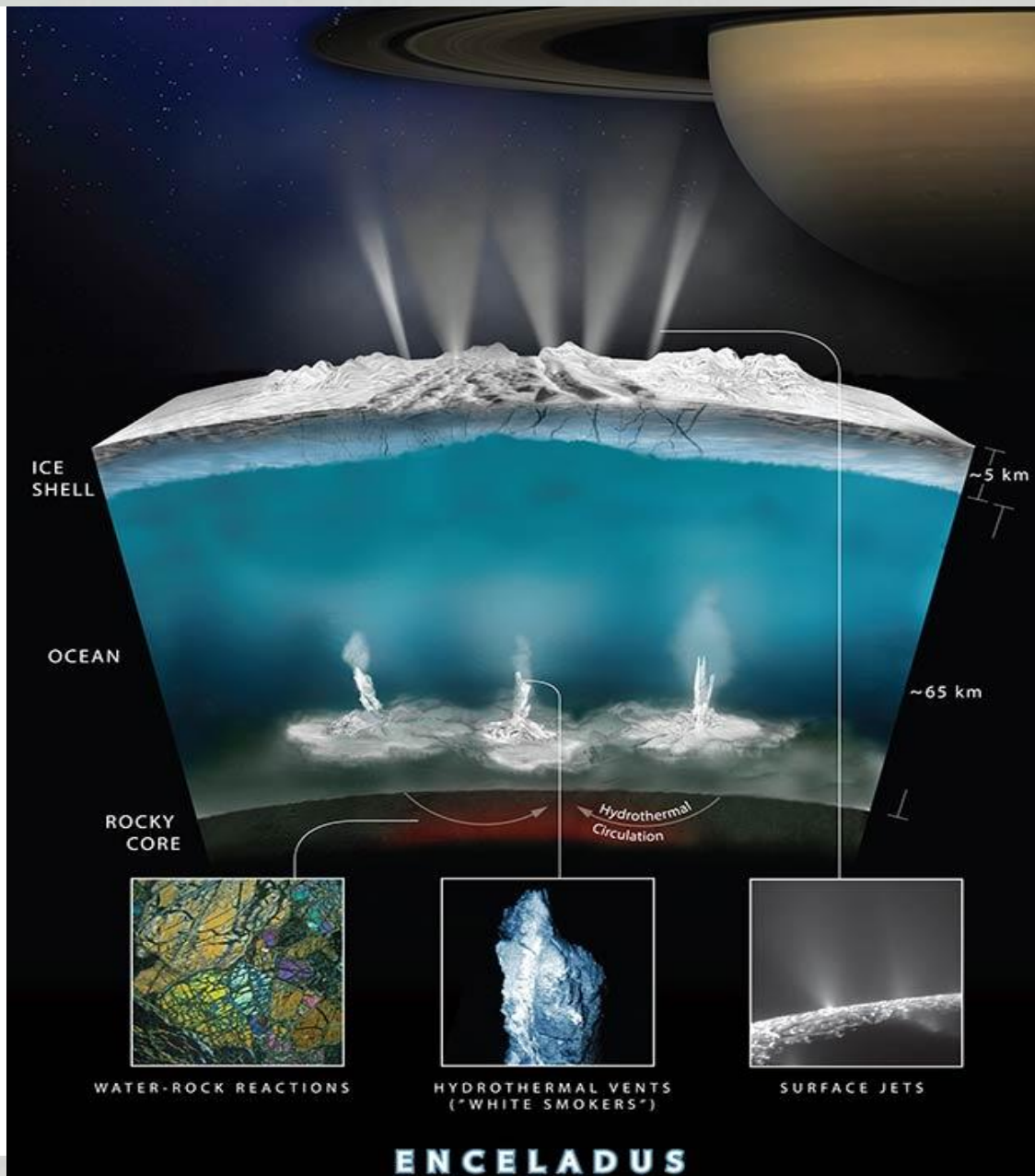
Миры с океанами: Энцелад



Глобальный океан находится под ледяной коркой геологически активного спутника Сатурна Энцелад по данным миссии НАСА Кассини. Исследования показали, что форма и размер спутника испытывают очень незначительные колебания вдоль его орбиты вокруг Сатурна. Эти колебания могут быть учтены лишь в случае, если его внешняя ледяная оболочка полностью не замерзла, то есть внутри спутника должен присутствовать глобальный океан.

Миры с океанами: Энцелад

КА Cassini открыл присутствие молекул водорода в шлейфе газа и ледяных частиц, выбрасываемых гейзерами на южном полюсе Энцелада, во время своего последнего и самого глубокого пролета через шлейф 28 октября 2015 г. КА Cassini также удалось определить состав шлейфа во время пролета в начале миссии. Из этих наблюдений определено, что почти 98 % газа в шлейфе – молекулы воды, около 1% - это водород, а остальные - смесь других молекул, в том числе содержащих углерод.



Вода, вода, везде вода



SIZE COMPARISON

5.2 AU

DISTANCE FROM SUN

ACTIVE

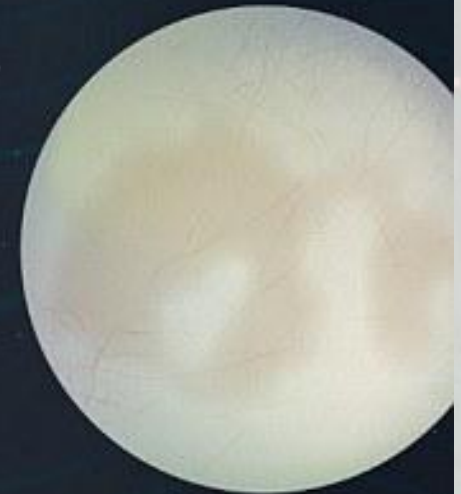
Dynamic ocean,
could support life

OCEAN WORLD STATUS

MOON OF JUPITER

EUROPA

Scientists strongly suspect that a subsurface salty ocean lies beneath Europa's icy crust. Tidal heating from its parent planet, Jupiter, maintains this ocean's liquid state and could also create partially melted pockets, or lakes, throughout the moon's outer shell.



MOON OF JUPITER

GANYMEDE

Ganymede is the largest moon in our solar system, and the only moon with its own magnetic field. Recent studies indicate a large, underground saltwater ocean is present at the Jovian moon. Ganymede could in fact have several layers of ice and water sandwiched between its crust and core.



SIZE COMPARISON

5.2 AU

DISTANCE FROM SUN

LOCKED

Trapped ocean,
unlikely to support life

OCEAN WORLD STATUS



Миры с океанами: Европа

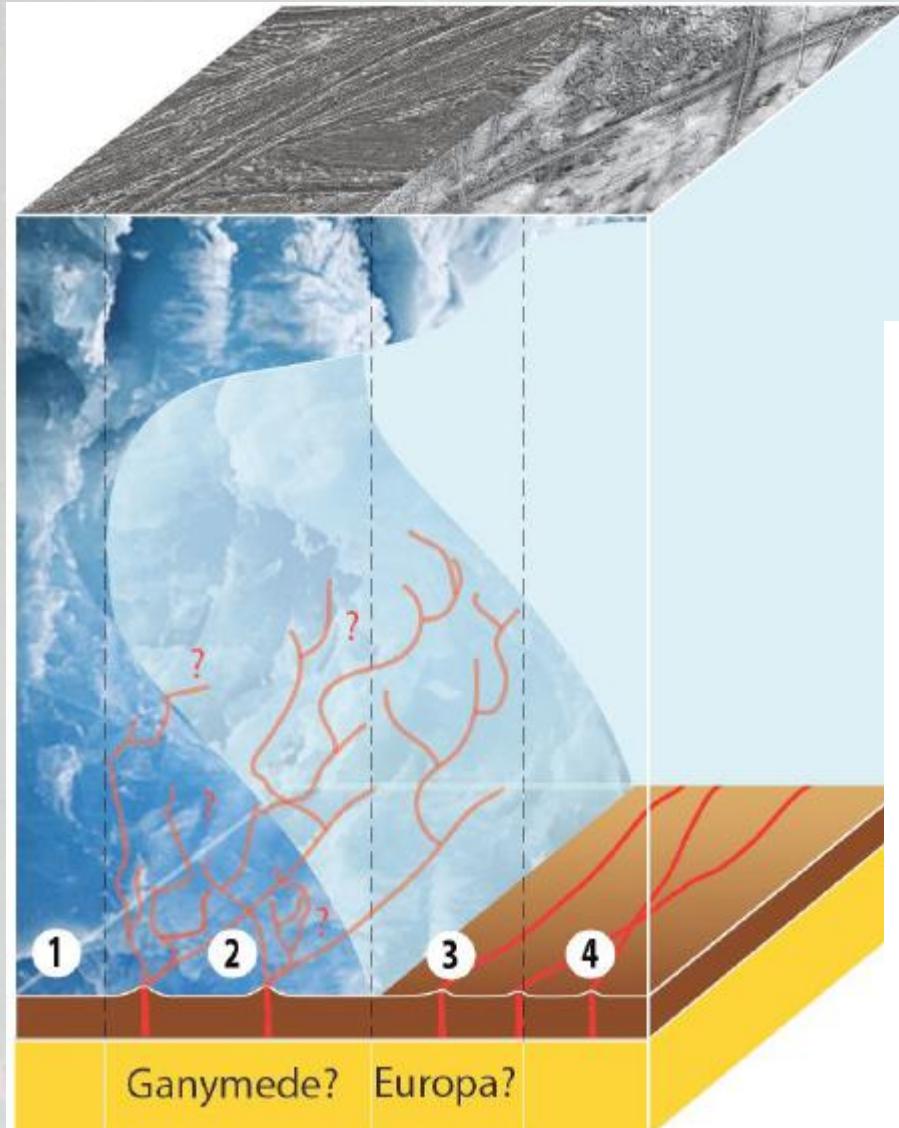
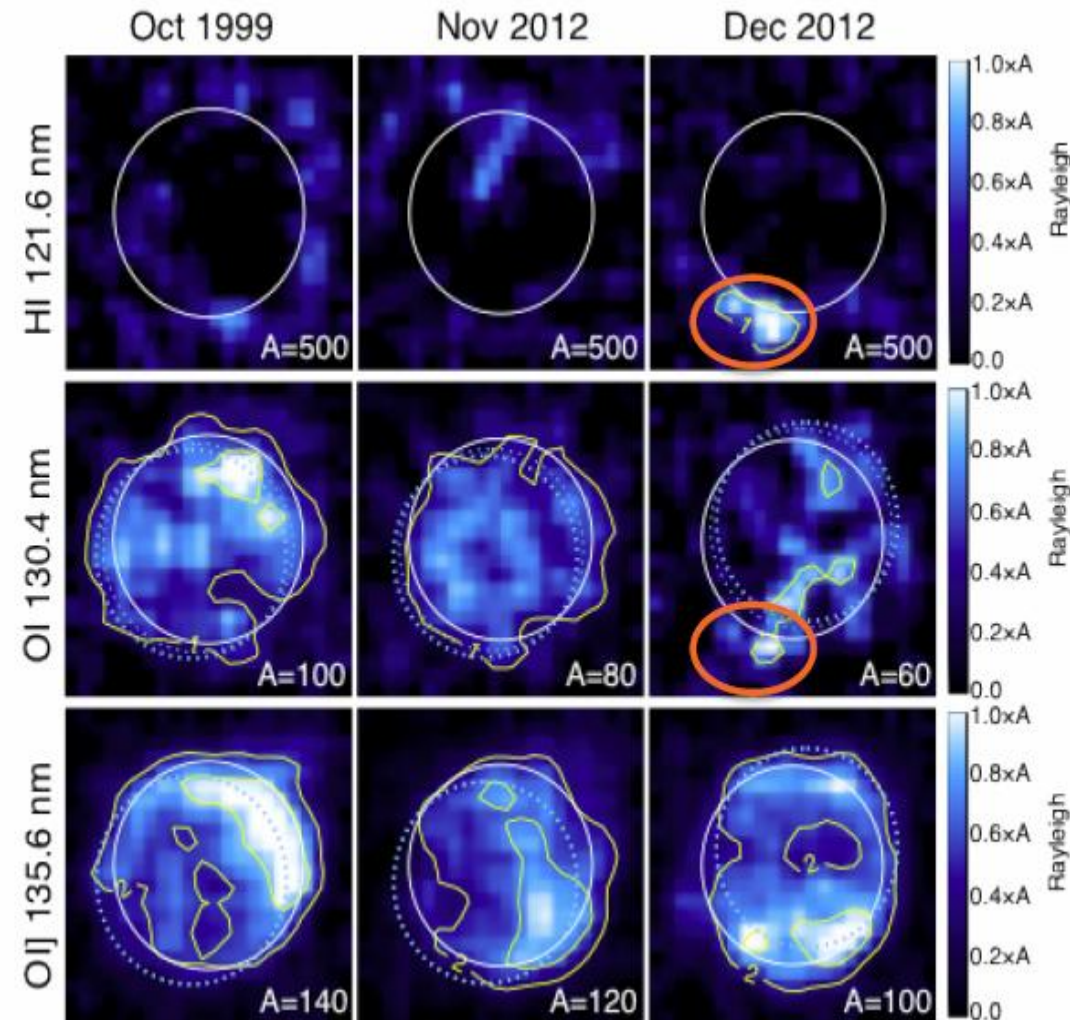


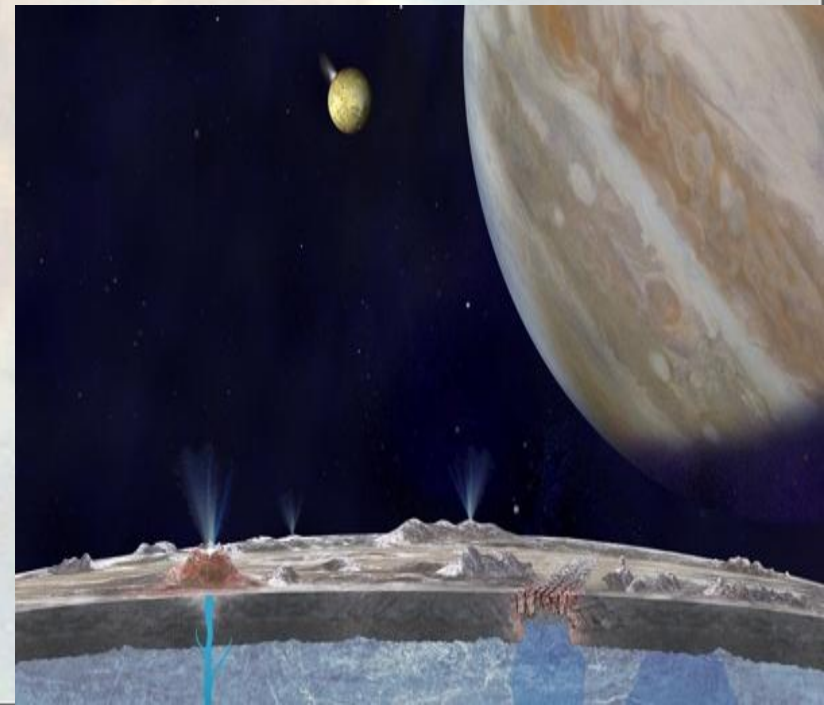
Figure 3-2: Possible locations of liquid layers in the icy moons of Jupiter are shown here as a function of depth: 1) completely frozen; 2) three-layered structures impeding any contact between the liquid layer and the silicate floor; 3) thick upper icy layer (>10 km) and a deep ocean; 4) very thin upper icy layer (3-4 km). Cases 3 and 4 are the most probable for Europa. Case 2 is expected for Ganymede and Callisto.

**JUICE, ESA/SRE(2011)18,
2011**

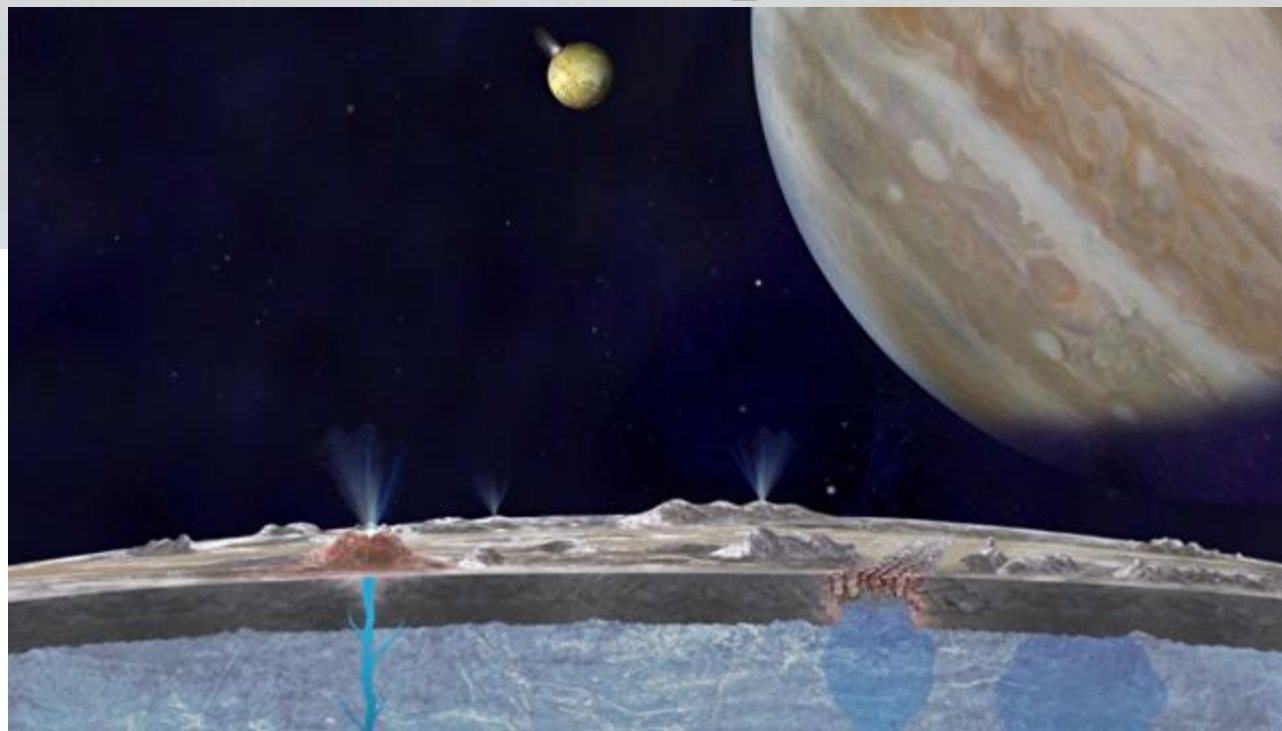
Миры с океанами: Европа



**Water plumes at south pole
(Roth et al., 2013).
Target object for NASA
Clipper and ESA JUICE
missions.**



Миры с океанами: Европа



Под поверхностью Европы, спутника Юпитера, находится соленый океан, химический состав которого сходен с океанами Земли.

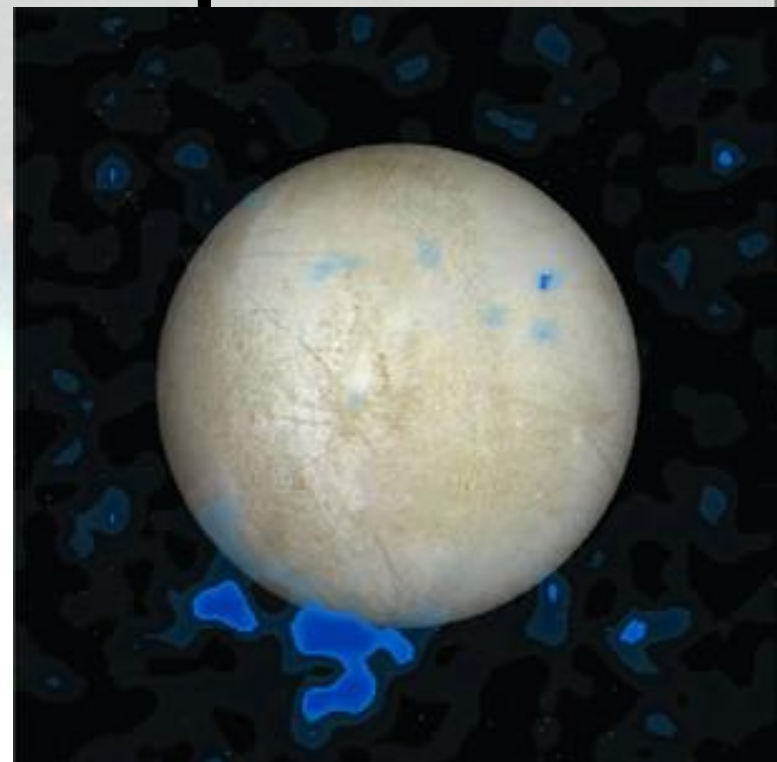
Астрономы получили новое подтверждение этого факта.

На основе данных, полученных из обсерватории Кека (Гавайи, США), астрономы Майк Браун и Кевин Хэнд, получили самые веские к настоящему моменту подтверждения, что под замерзшей поверхностью спутника Юпитера, Европы, находится жидкий океан, вода которого, насыщенная минеральными солями, просачивается на его поверхность.

Спектроскопические наблюдения Европы позволяют утверждать, что между поверхностью спутника и океаном происходит химический обмен, повышающий концентрацию минеральных солей в последнем.

Миры с океанами: Европа

Изображение, полученное телескопом HST. Как и Энцелад, Европа, благодаря так называемому приливному захвату, всегда повернута к своей планете одной стороной. Как и на Энцеладе, фонтаны бьют на южном полюсе Европы и в тот момент, когда спутник максимально удаляется от планеты. И там и там струи не были замечены в любой другой момент времени. Однако между гейзерами на Энцеладе и фонтанами пара на Европе есть и существенные отличия. Если на Энцеладе в состав струй входят частички льда и пыли, то из Европы вырывается исключительно водяной пар. Пока ученые не могут определенно сказать, являются ли источником европейских гейзеров глубокие подледные океаны или же пар возникает в приповерхностных слоях, где из-за приливов в некоторых местах плавится лед.



Миры с океанами: Европа

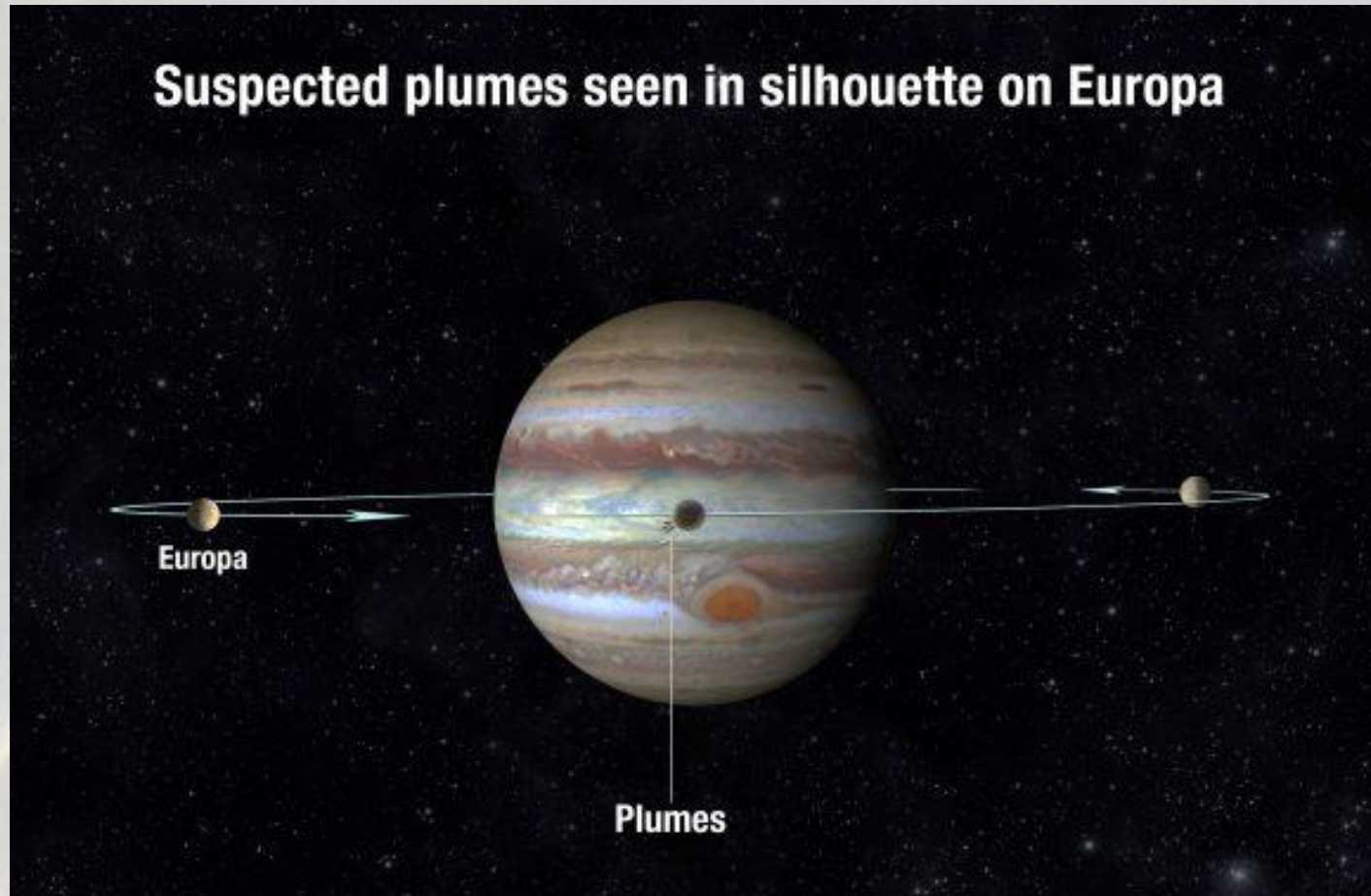
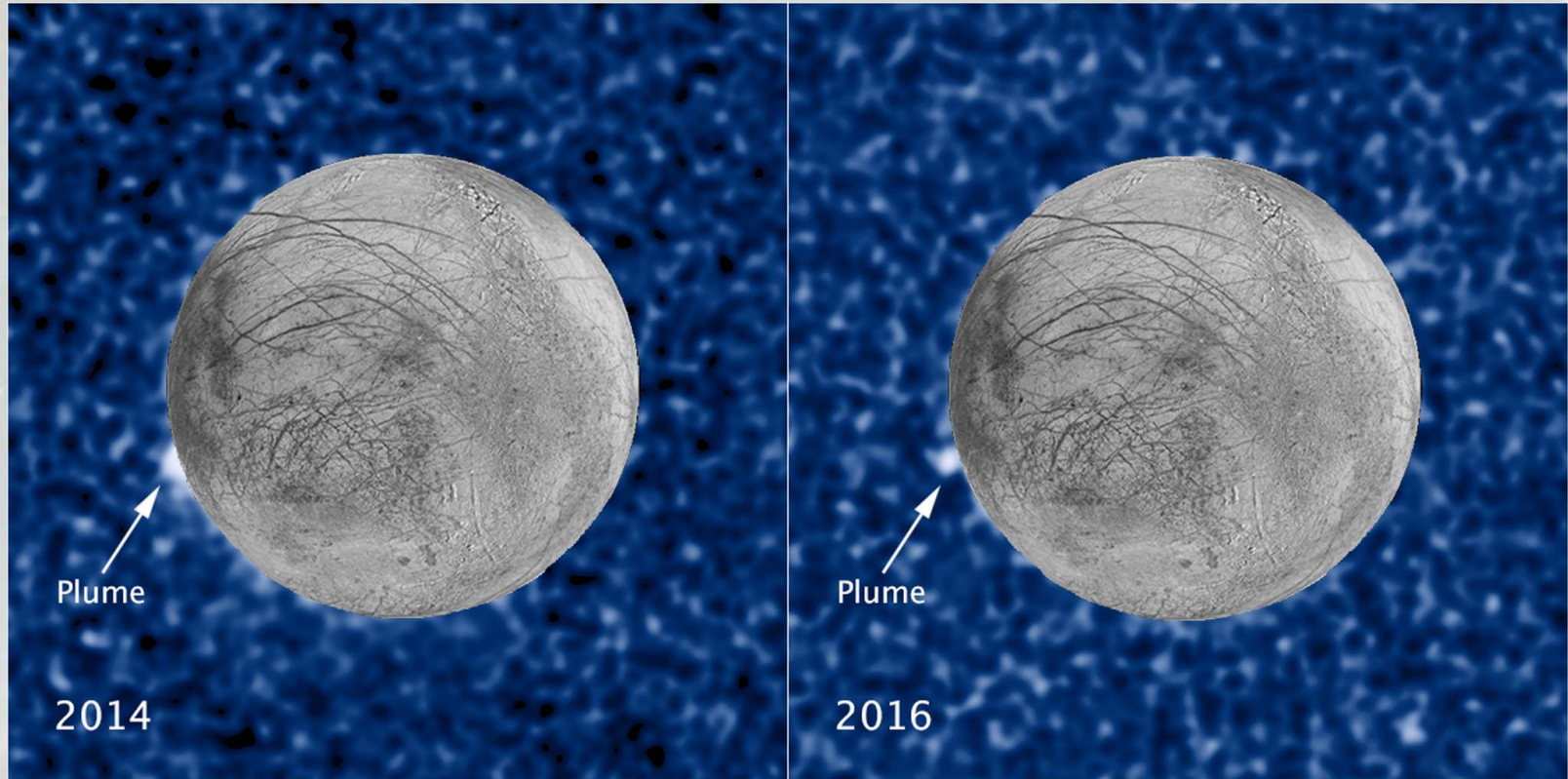


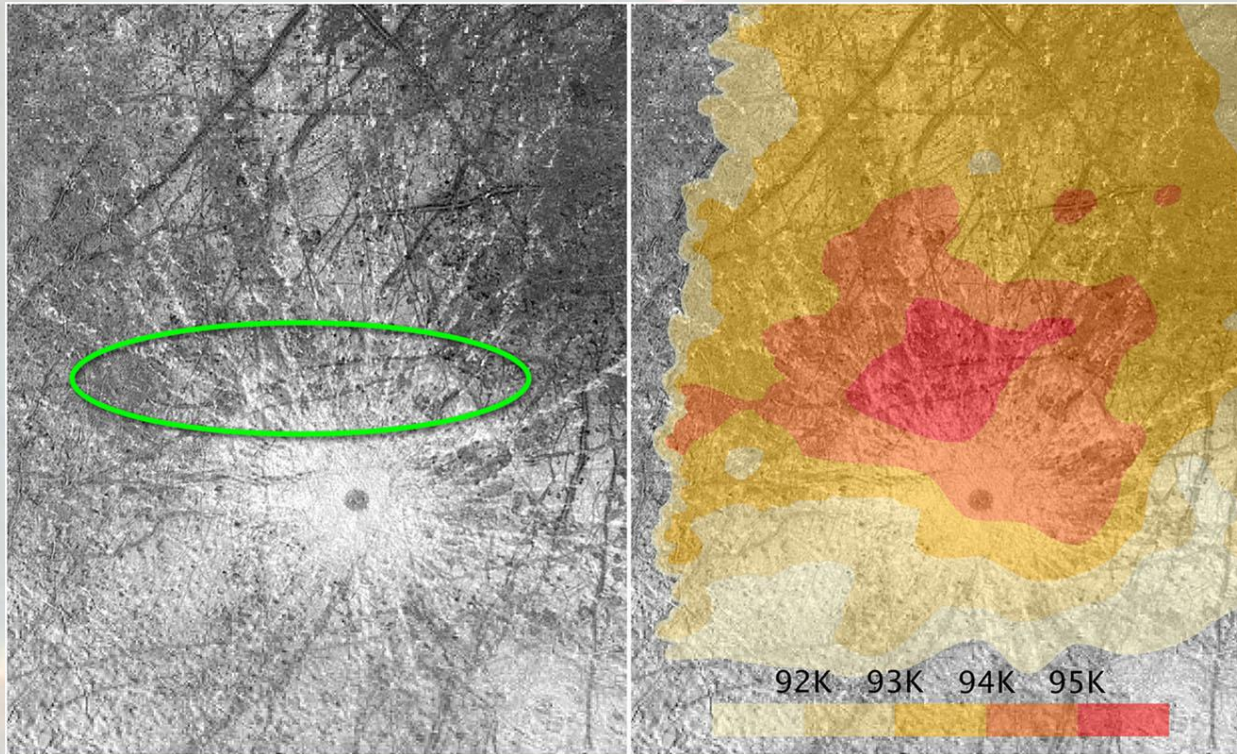
Иллюстрация транзита Европы. Орбита Европы вокруг Юпитера занимает 3 с половиной дня, и на каждой орбите она проходит перед Юпитером, повышая вероятность обнаружения шлейфов паров воды как силуэтов поглощения фонового света Юпитера. Credits: A. Field (STScI).

Миры с океанами: Европа



Эти композитные снимки HST показывают, что ожидаемый шлейф паров воды извергается в промежутке в два года из того же места на ледяном спутнике Юпитера Европа. Image Credit: NASA/ESA/W. Sparks (STScI)/USGS Astrogeology Science Center.

Миры с океанами: Европа



Слева, овалом отмечен источник происхождения для шлейфов паров воды, открытых в наблюдениях HST в 2014 и 2016 году; справа, тепловая карта этой области по данным миссии НАСА Галилео. Image Credit: NASA/ESA/W. Sparks (STScI)/USGS Astrogeology Science Center.

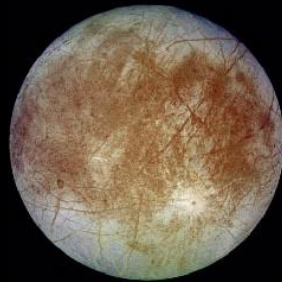
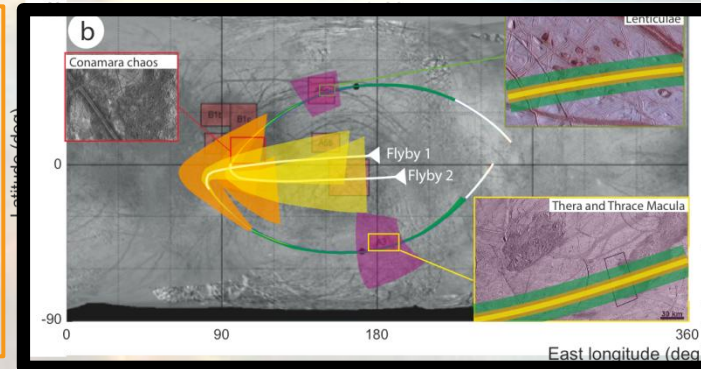
WHY EUROPA ?

- Attractive moon to study the habitability in the solar system
- Possesses a «salty» ocean in contact with the rocky mantle
- May be an active world

TO BE REMEMBERED

New investigations as compared to Galileo
One flyby is already enough - Second provides a back-up
One year of remote observations in addition to the 2 flybys

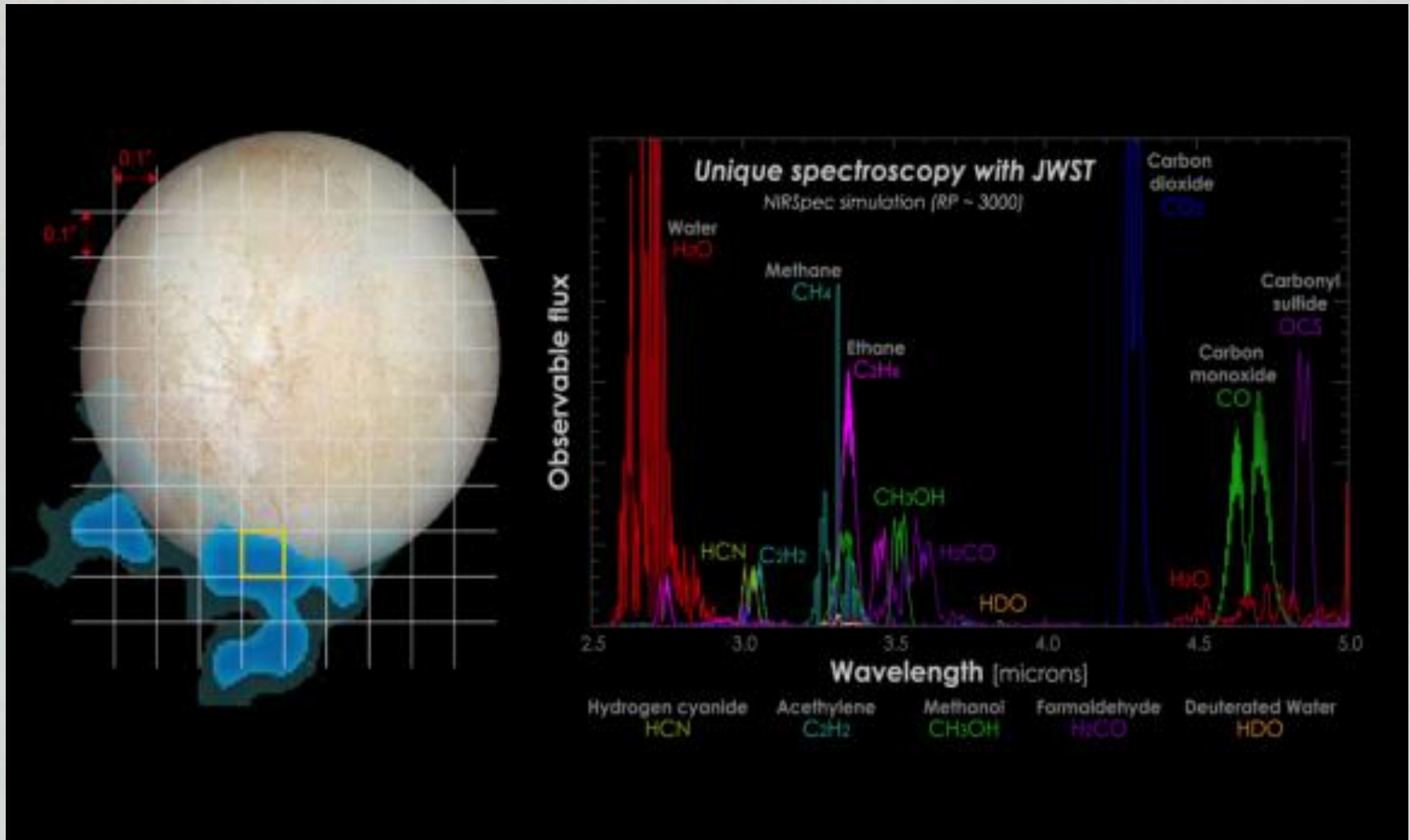
- **JUICE will tell us:**
- If the liquid composition is comparable to our oceans
- How thick is the crust in chaos regions
- If liquid reservoirs exist
- If the moon is still active



JUICE OBJECTIVES

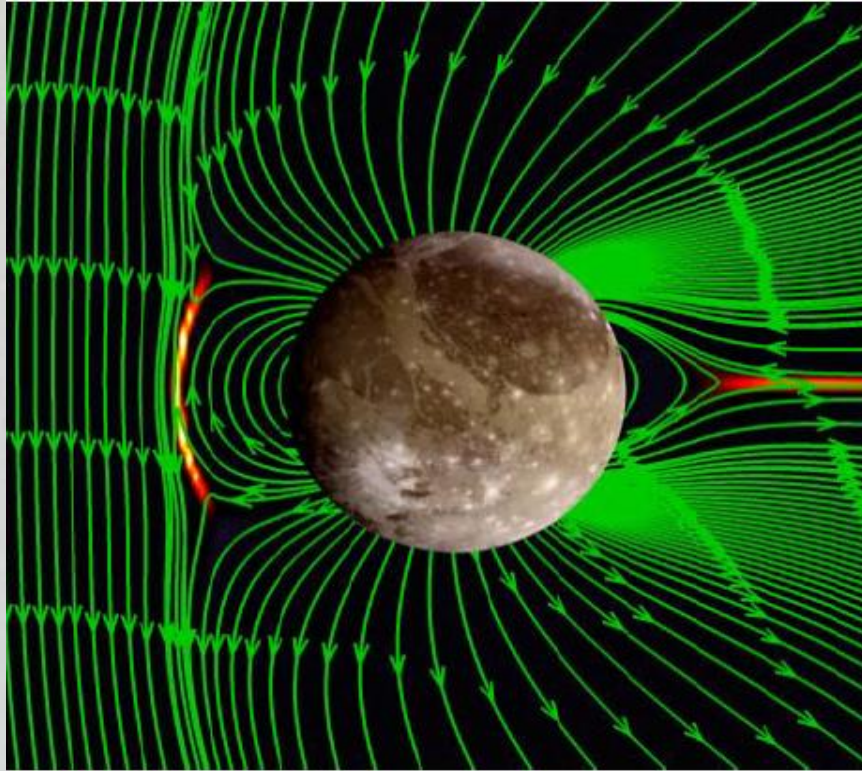
- Determine the composition of the non-ice material, especially as related to habitability
- Look for liquid water under the most active sites
- Study the recently active processes

Миры с океанами: Европа



Возможные результаты спектроскопии одного из шлейфов паров воды с южного полюса Европы. Это пример ожидаемых данных космического телескопа им. Вебба в ближайшие годы.

Миры с океанами: Ганимед



Observations indicate that Ganymede has a significant O₂ atmosphere, probably a subsurface ocean, and is the only satellite with its own magnetosphere.

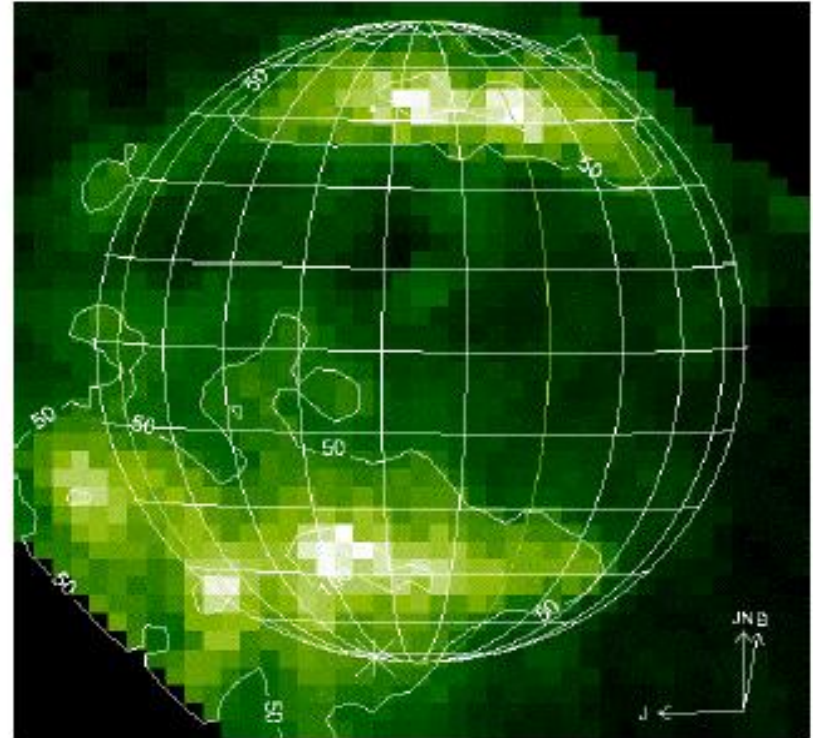
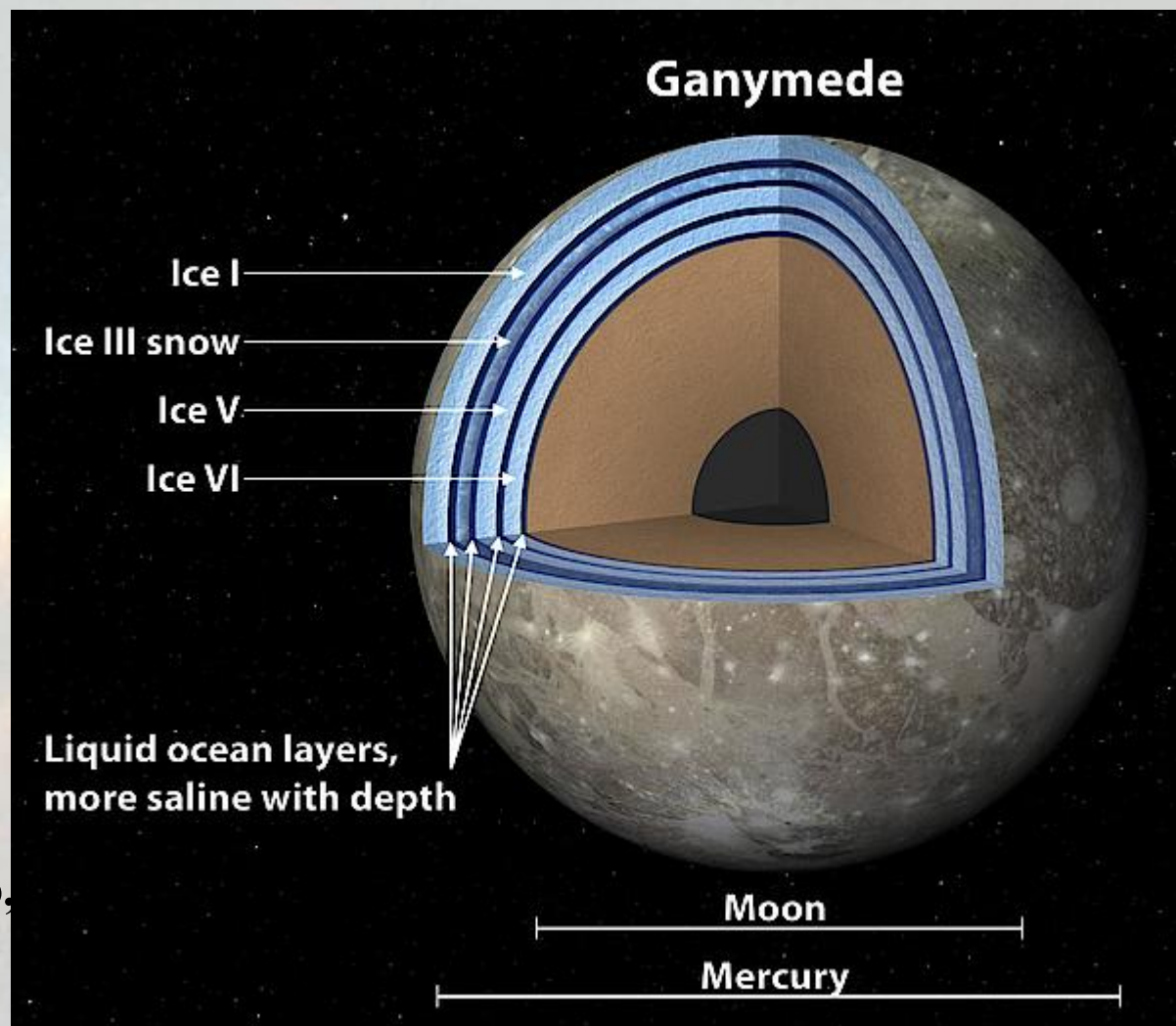


Figure 19.12. Ganymede auroral emission from oxygen (OI 1356 Å) observed with HST.

Images of Ganymede's OI 135.6 nm emission for HST orbits on 1998 October 30 (*Feldman et al., 2000*).

Миры с океанами: Ганимед

**Target object of the
ESA JUICE mission
(2022)**



**Наблюдения на КТ HST
недавно предоставили
веские доказательства того,
что спутник Юпитера
Ганимед имеет под**

**поверхностью океан с соленой водой, скорее всего зажатый между
слоями льда. Вода образуется, поскольку спутник качается и вытягивается
при движении по орбите вокруг газового гиганта Юпитер.**

Вода, вода, везде вода

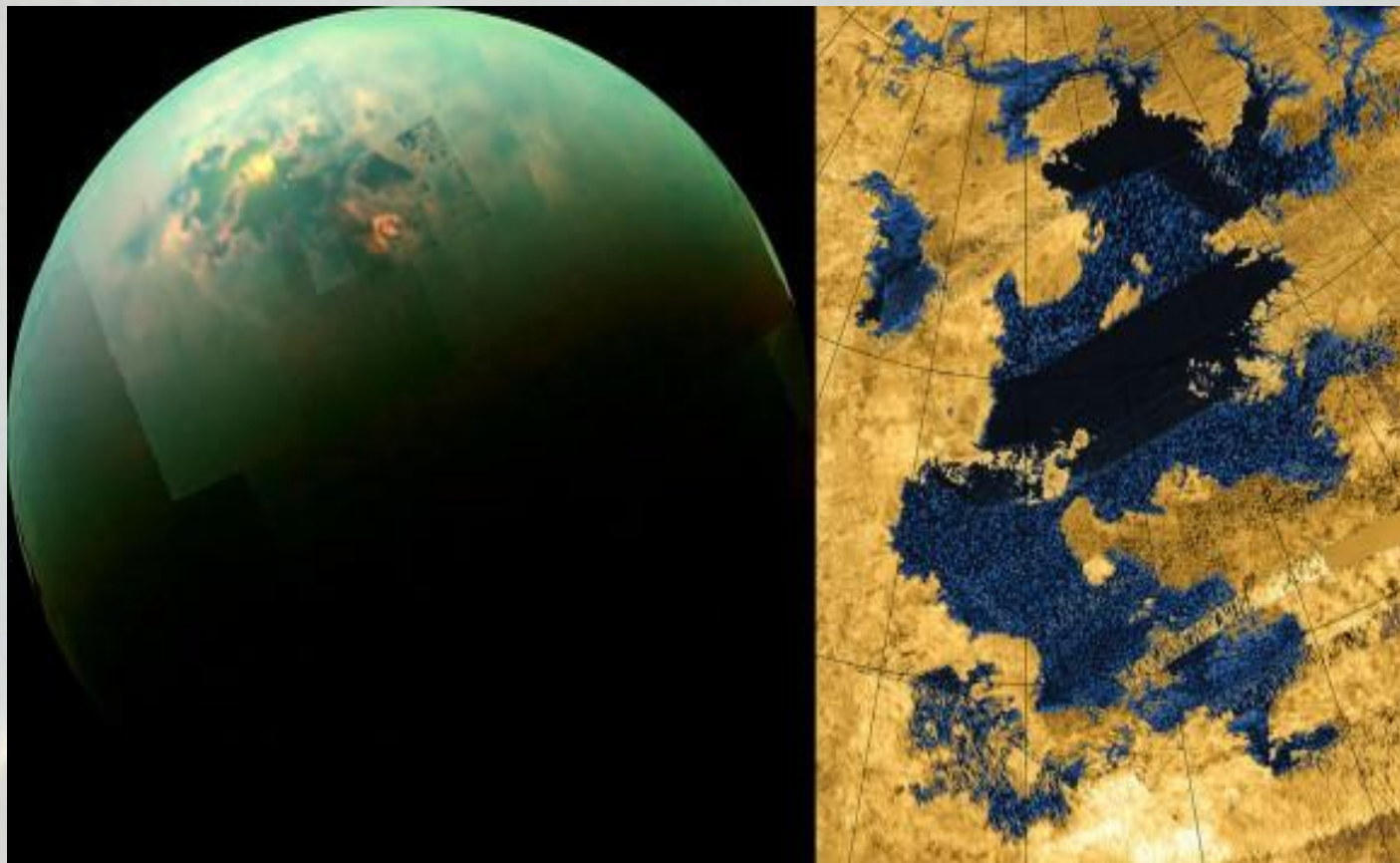


Миры с океанами: Титан



Ореол света окружает спутник Сатурна Титан на этой картине с подсветкой, показывая свою атмосферу. Credit: NASA/JPL/Space Science Institute

Миры с океанами: Титан



Слева: показана мозаика изображений Титана, сделанных КА Cassini в ближнем инфракрасном свете. Видны озера (моря) на северном полюсе Титана за счет бликов солнечного света от них. Справа: радиолокационное изображение Кракена. Credit: NASA Jet Propulsion Laboratory.

Миры с океанами: Титан

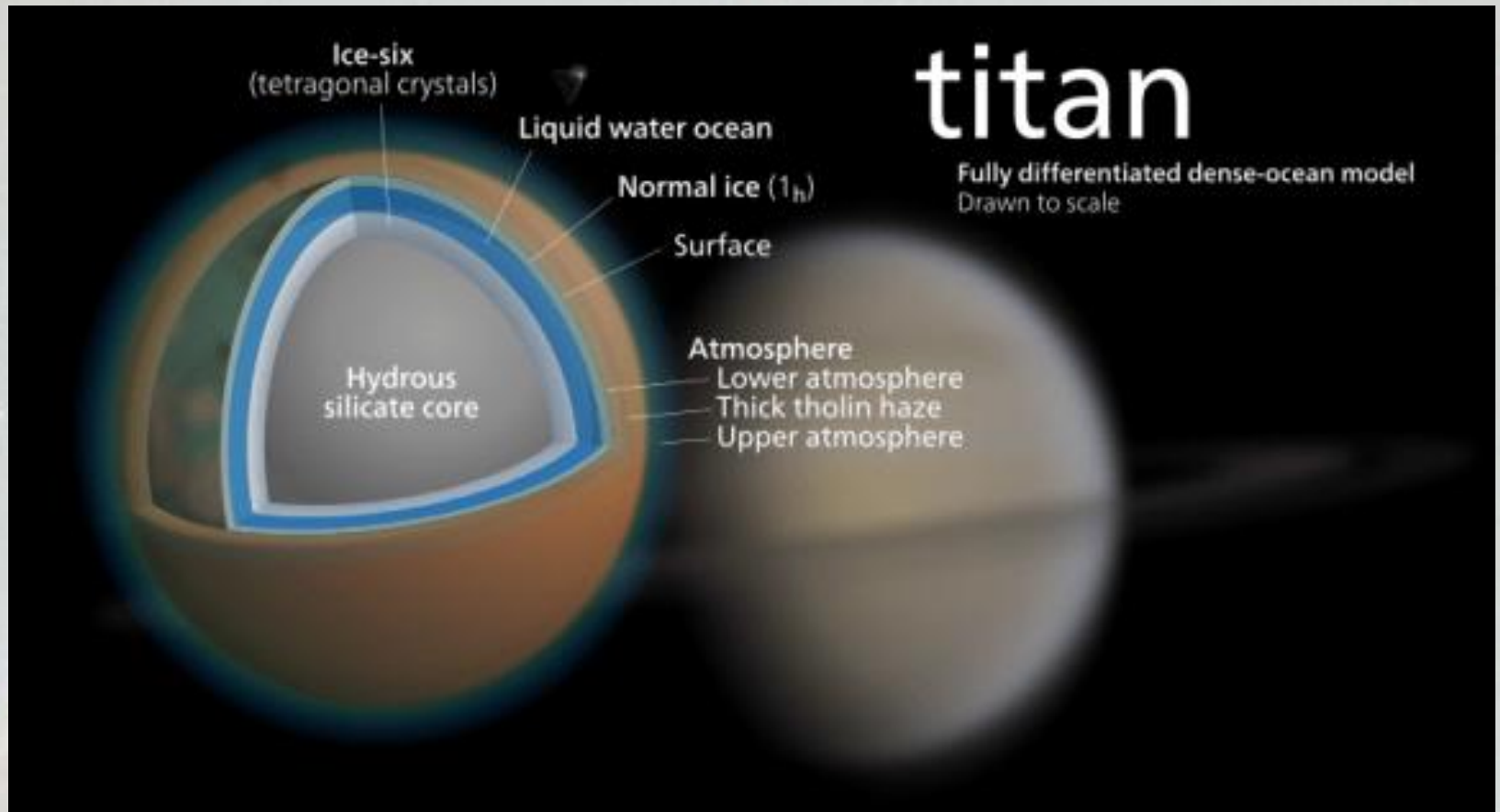


Диаграмма внутреннего строения Титана в соответствии с «fully differentiated dense-ocean model». Credit: Wikipedia Commons/Kelvinsong

Вода, вода, везде вода



The infographic features a dark blue background with a large, textured sphere of Ceres on the left. To its right, the text 'DWARF PLANET' is in small yellow capital letters, and 'CERES' is in large white capital letters. Below this, a paragraph of white text describes the composition of Ceres. On the right side, a teal-colored box contains a size comparison diagram, the distance from the sun, and the ocean world status.

DWARF PLANET

CERES

Scientists estimate that Ceres consists of about 25% water ice, of which a fraction could be in the liquid state. However, Ceres may or may not have a liquid layer or subsurface ocean. Data from NASA's Dawn mission could provide an answer.

SIZE COMPARISON



4 AU

DISTANCE FROM SUN

POSSIBLE

Evidence of an ocean, biological potential unknown

OCEAN WORLD STATUS

© NASA

Миры с океанами: Церера



Выбросы водяного пара на Церере были открыты в наблюдениях ST Herschel (2013).

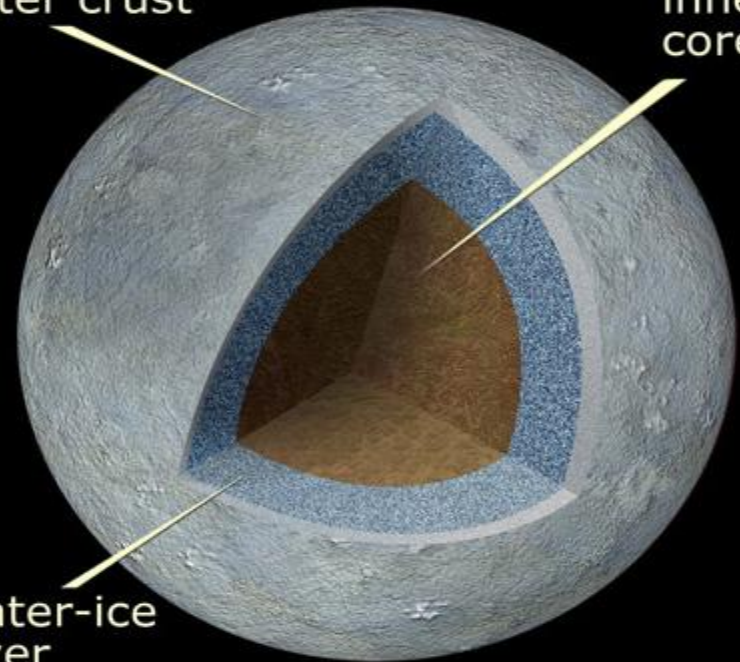
Целевой объект миссии NASA Dawn (2015).

Ceres' layers

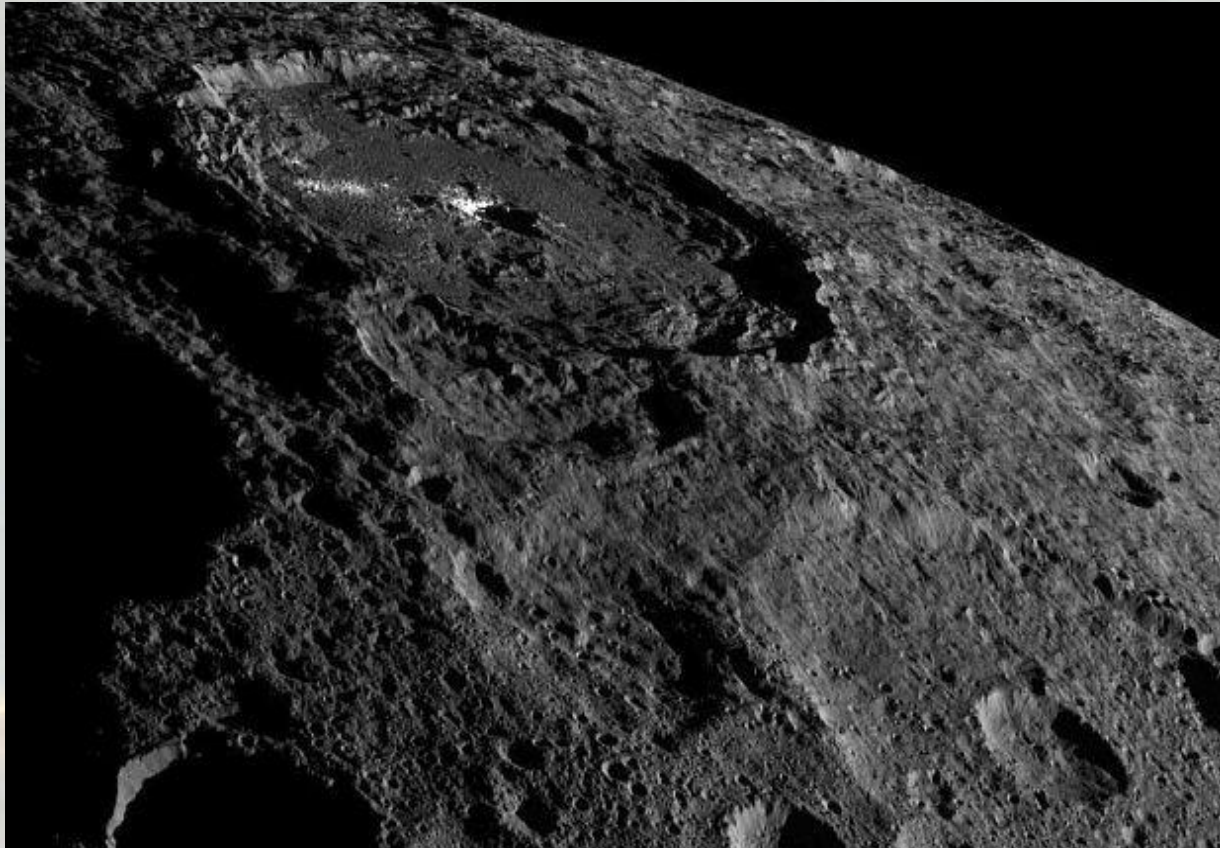
Thin, dusty
outer crust

Rocky
inner
core

Water-ice
layer

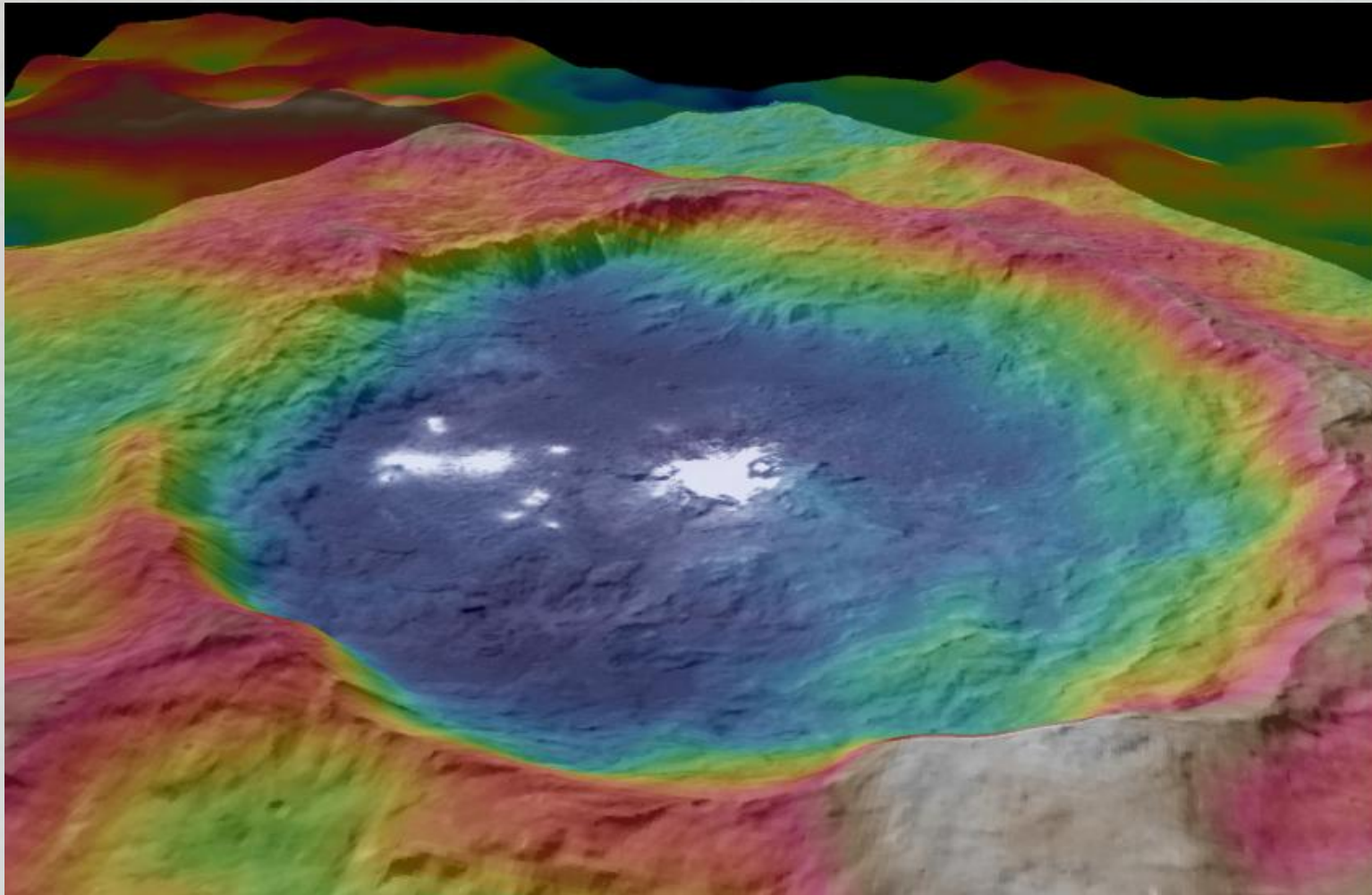


Миры с океанами: Церера



Сегодня вода на Церере присутствует в твердом и газообразном состоянии: лед заполняет трещины в глинистой почве, а водяной пар и ледяное крошево иногда вырываются из жерл ледяных вулканов. Но миллиарды лет назад, когда остаточное тепло образования Солнечной системы еще грело Цереру изнутри, на ней плескались воды огромного океана, считают планетологи. Взаимодействие жидкой воды и камня породило современную затейливую стратиграфию Цереры: слои камня на ней чередуются со слоями льда.

Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn

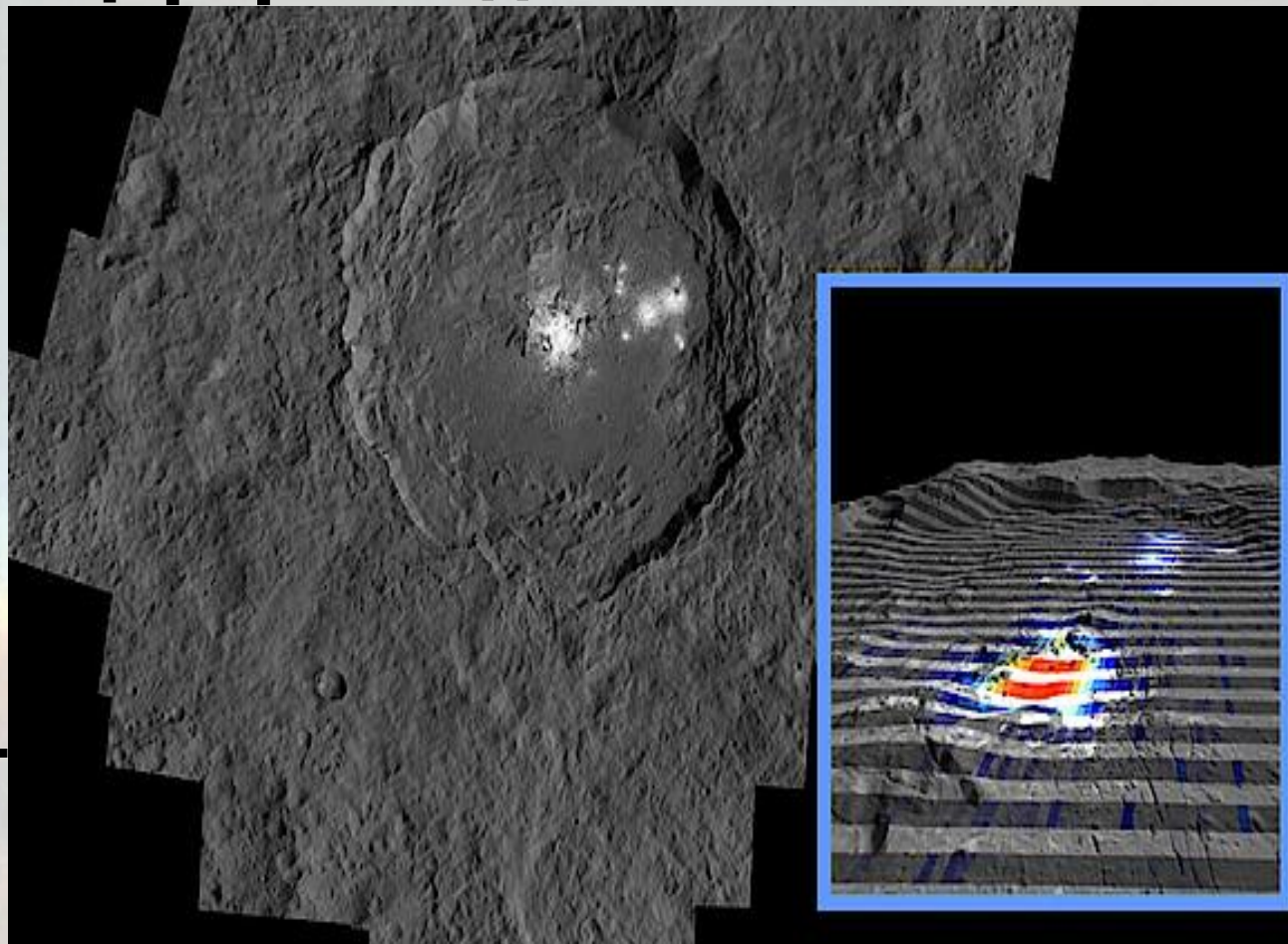


Цветная топографическая карта кратера Оккатор на Церере. Синий-самая низкая высота, коричневый-самая высокая. Оккатор занимает около 90 км в ширину. Credits: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

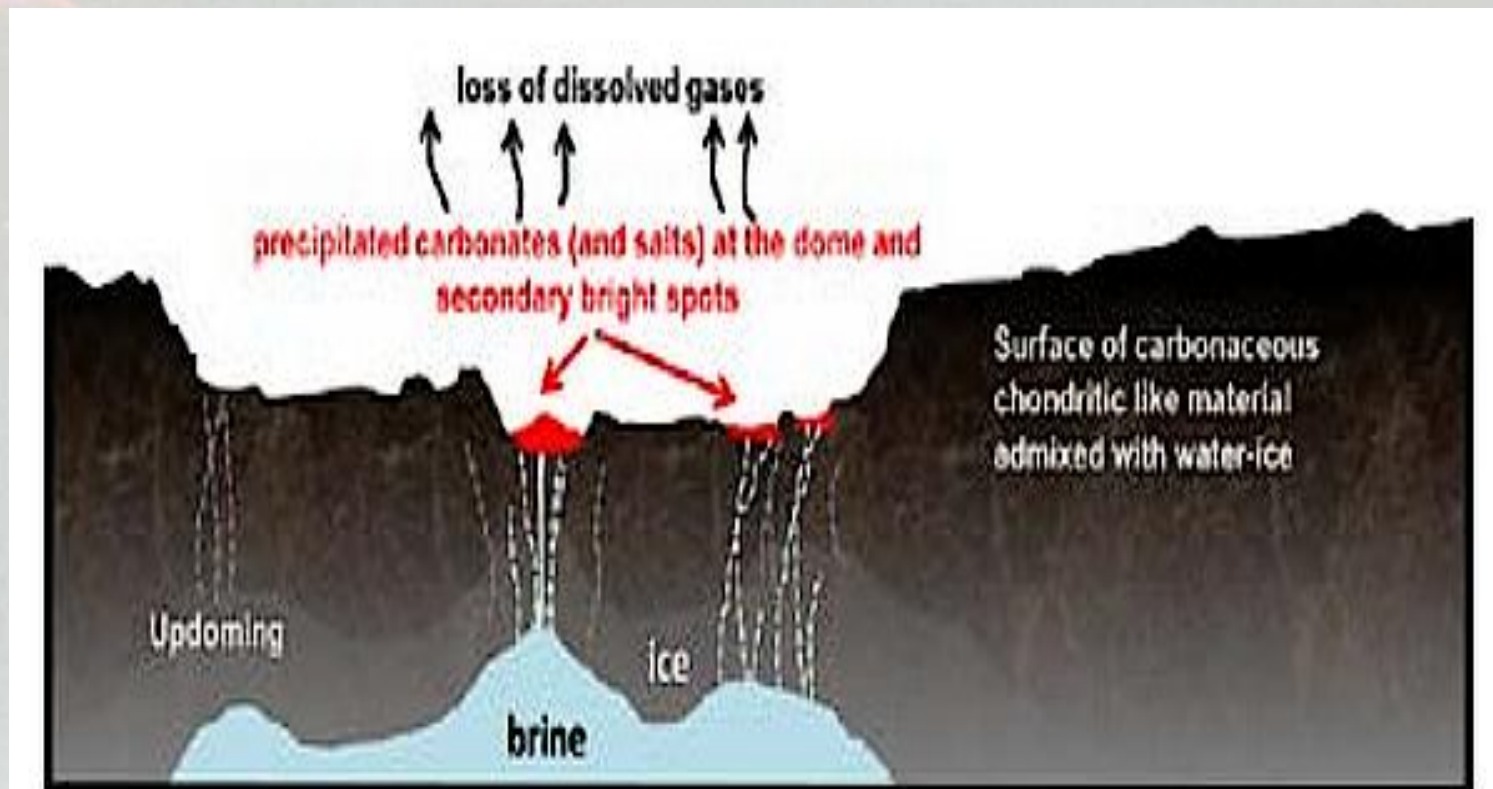
Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn

Соляной купол Оккатора сложен не сульфатом магния, как предполагалось ранее, а карбонатами. К образованию соляного купола привела внутренняя

активность Цереры, индуцированная падением астероида. Поднятие к поверхности грунтовых вод, насыщенных содой, с их последующим испарением и отложением солей говорит о том, что температуры в недрах Цереры выше, чем считалось ранее. Возможно, жидкая вода существовала под поверхностью Цереры относительно недавно по геологическим меркам. Обнаруженные в Оккаторе отложения солей могут быть следами озера в ранние эпохи.

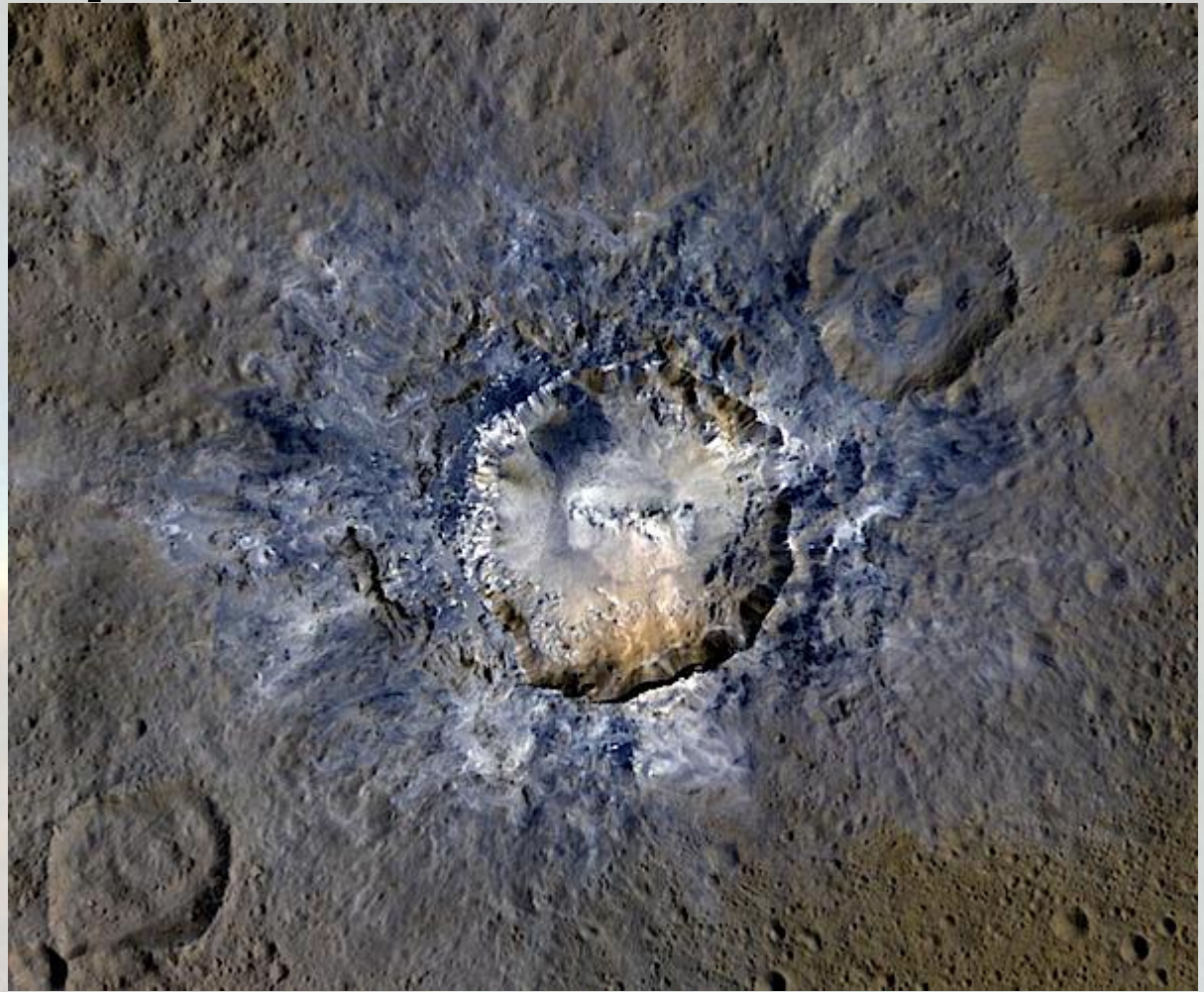


Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn



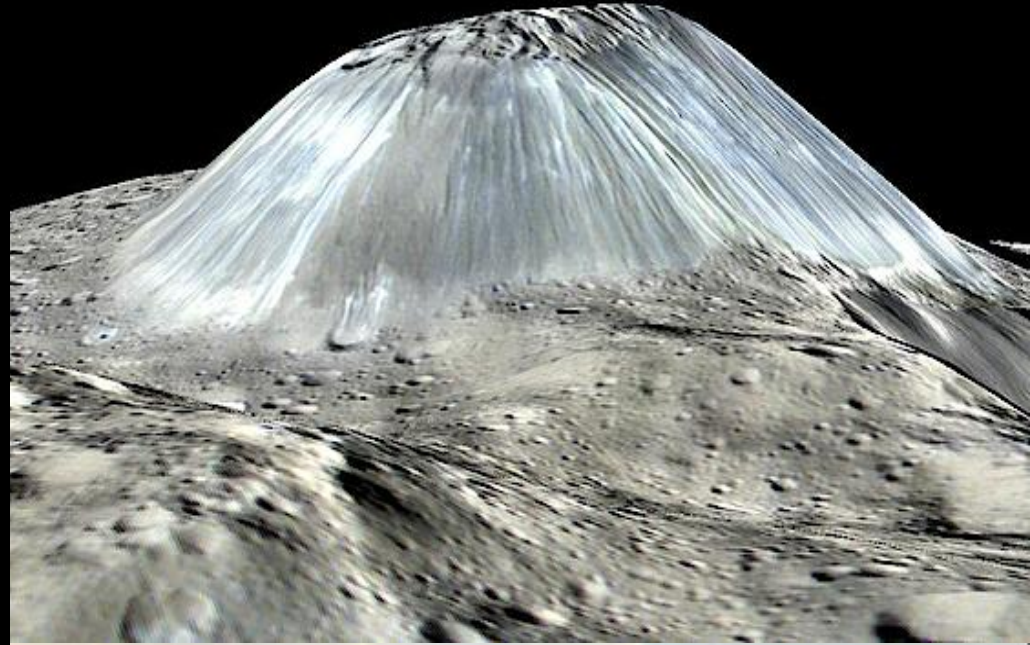
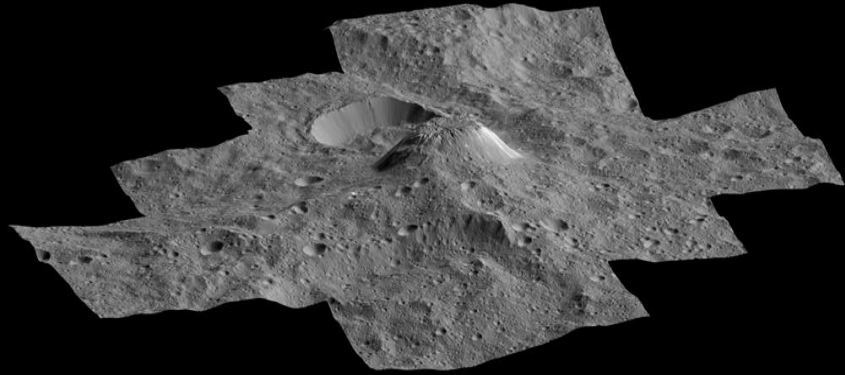
Как формировались яркие пятна кратера Оккатор. Поверхность Цереры состоит из вещества, подобного веществу углистых хондритов, смешанному с водяным льдом. Астероидный удар привел к образованию глубоких трещин и уменьшению вязкости подповерхностного льда. Глубинный рассол с растворенными газами начал по трещинам поступать наверх. После излияния на поверхность газы улетучивались, вода испарялась, соли из глубинного рассола образовали купол.

Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn



10-километровый кратер Ошу – второе по яркости светлое пятно на поверхности Цереры (ярче его только соляной купол в кратере Оккатор). Инфракрасные спектры Ошу говорят о наличии в нем водяного льда, также этот кратер интересен наличием обширного провала на юго-западном крае, где поверхностный материал обрушился во внутреннюю полость.

Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn



Среди многочисленных ударных кратеров на поверхности Цереры наблюдается уникальная топографическая особенность – конусообразная гора Ахуна. Высота Ахуны достигает 5 км. Данные КА NASA Dawn показали, что эта гора, скорее всего, является криовулканом, извергающим не силикатную лаву, а соленую грязь. Вулканизм такого рода является уникальным в Солнечной системе. Вулканы извергают или силикатную лаву, как на планетах земной группы, или лед и водяной пар, как на Энцеладе. Церера состоит из смеси солей, силикатов и водяного льда, ее вулкан извергал соленую грязь.

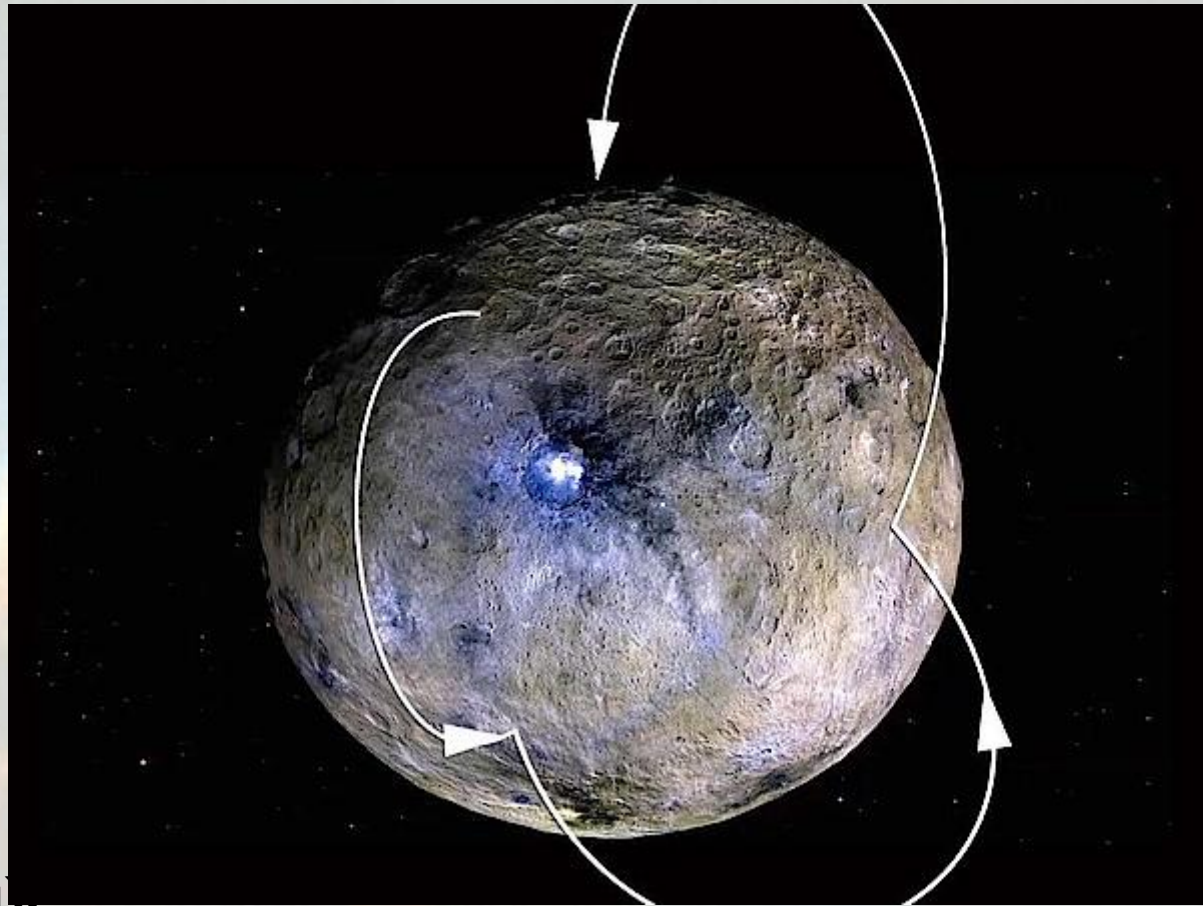
Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn

- 1) Еще одним сюрпризом Цереры стало образование временной атмосферы. Из данных, полученных детектором нейтронов и гамма лучей GRaND, установлено, что иногда Церера ускоряет электроны солнечного ветра до очень высоких энергий. Обычно такое ускорение происходит в результате взаимодействия солнечного ветра с ионосферой небесного тела. Возникновение временной ионосферы согласуется с наблюдениями космического ИК-телескопа им. Гершеля.**
- 2) В среднем поверхность Цереры сухая и темная, однако кое-где встречаются обнажения водяного льда. Так, спектрометр видимого и инфракрасного диапазона (VIR) обнаружил лед в молодом кратере Ошо (Охо). Трещинами покрыто и дно многих кратеров. На дне и стенках многих кратеров встречаются обнажения (или отложения) очень яркого материала, самые известные находятся в кратере Оккатор. Совокупность данных говорит о том, что кора Цереры является смесью водяного льда и скальных пород.**
- 3) Церера покрыта глинистыми минералами (филлосиликатами), богатыми магнием и включающими в свою кристаллическую решетку аммоний. По всей видимости, поверхность Цереры была преобразована некими процессами с участием воды. Неоднородное распределение кратеров и различия в минеральном составе от места к месту говорят о том, что кора Цереры не однородна, и что Церера прошла сложную геологическую эволюцию.**

Малая планета Церера по данным КА NASA Dawn

4) Церера пополнила собой список безатмосферных тел Солнечной системы, на полюсах которых в «холодных ловушках» сохраняются запасы водяного льда (также были обнаружены на полюсах Меркурия и Луны).

Но если на Луну и Меркурий лед приносят кометы и содержащие воду астероиды (например, углистые хондриты), то происхождение льда в холодных ловушках Цереры менее очевидно. Возможно, водяной пар, медленно просачиваясь из недр Цереры, испаряется с поверхности более теплых областей, а дальше частично улетучивается в космос, а частично осаждается в холодных ловушках у полюсов.



Миры с океанами:



Миры с океанами:

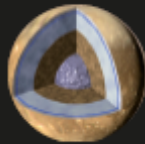
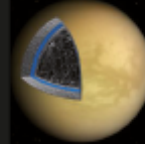
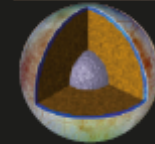
	SURFACE HABITATS		DEEP HABITATS				
	Shallow water		Trapped oceans			Top oceans	
	The Earth	Mars	Ganymede	Callisto	Titan	Europa	Enceladus
							
Liquid Water	●	●	●	●	●	●	●
Stable Environment	●	●	●	●	●	●	●
Essential elements	●	●	●	●	●	●	●
Chemical Energy	●	●	●	●	●	●	●

Figure 3-1: Present state of the existing and past habitable worlds in the Solar System. For each planet or moon, the status of the four pre-requisites for life to be sustained is ranked from red (not possible), to yellow (likely but not yet demonstrated) and to green (demonstrated or very likely).

Внесолнечные планеты: *эпоха характеристики*

Planets, planetary systems and their host stars evolve

→ Need to derive accurate planetary system age → asteroseismology

Formation in proto-planetary disk, migration

Loss of primary, atmosphere

Stellar radiation, wind and magnetic field

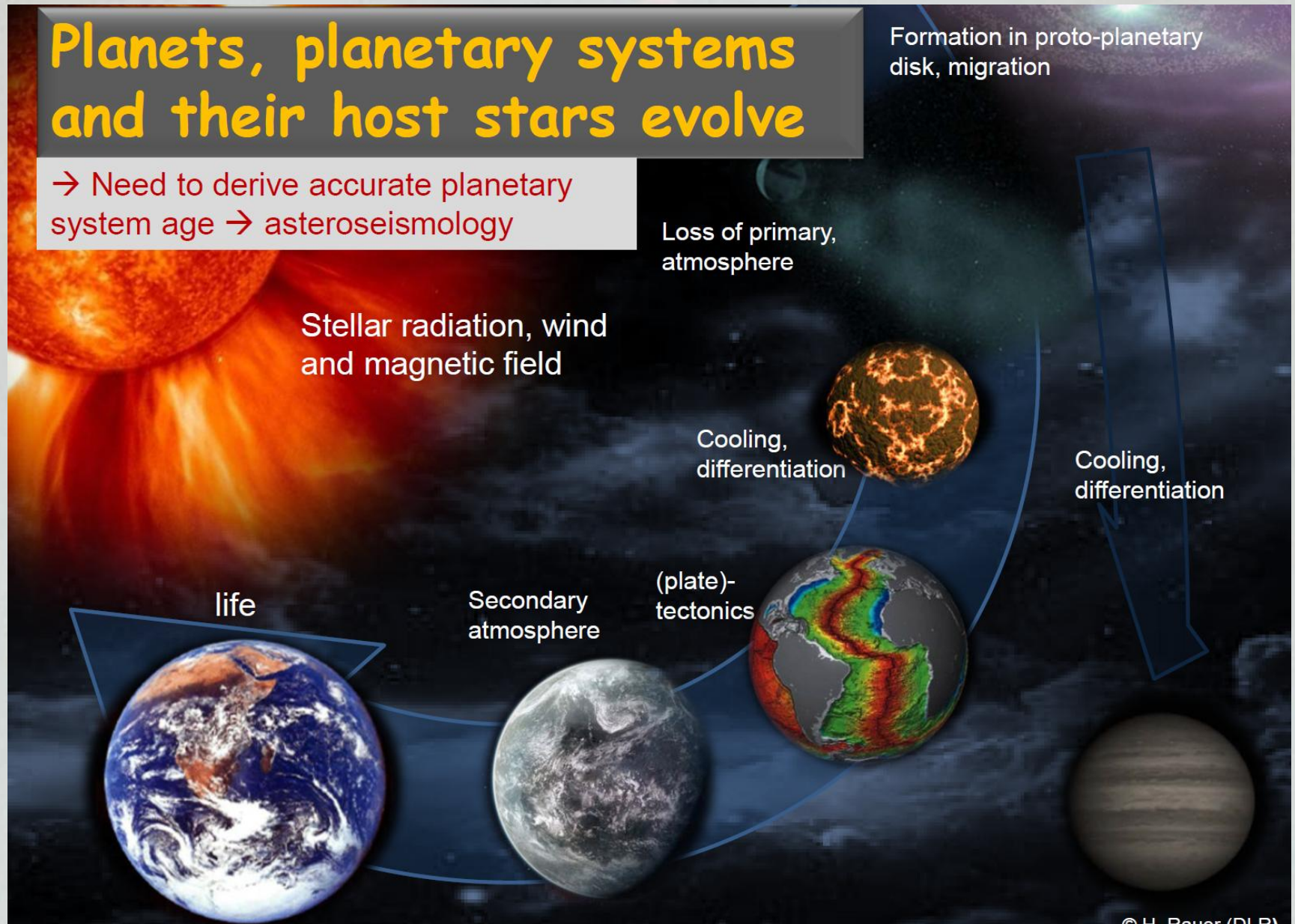
Cooling, differentiation

Cooling, differentiation

life

Secondary atmosphere

(plate)-tectonics



Заключение

Измерения космических аппаратов показали, что многие из небесных тел во внешних областях Солнечной системы 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 тоже 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.

Спасибо за внимание!