

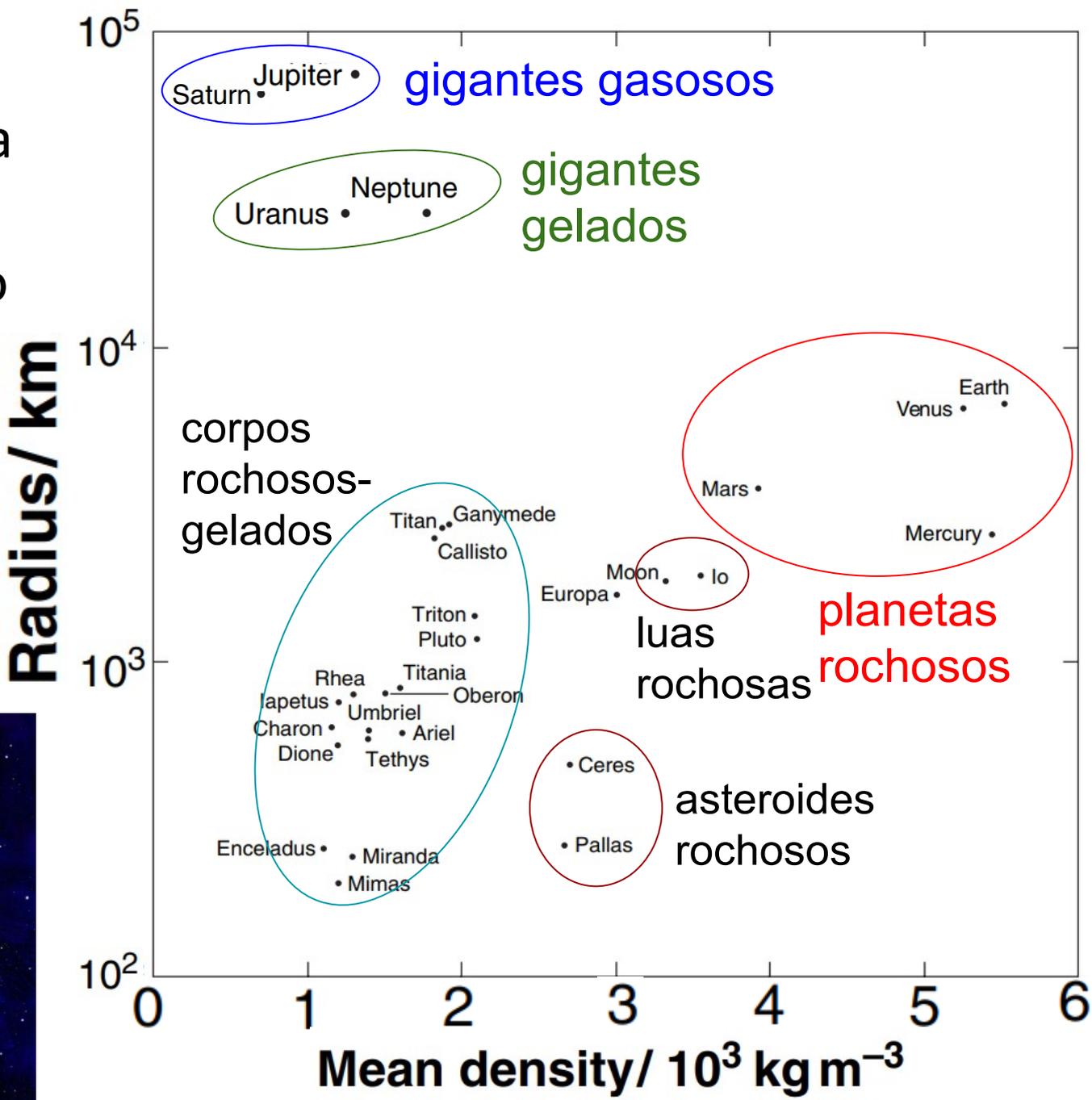
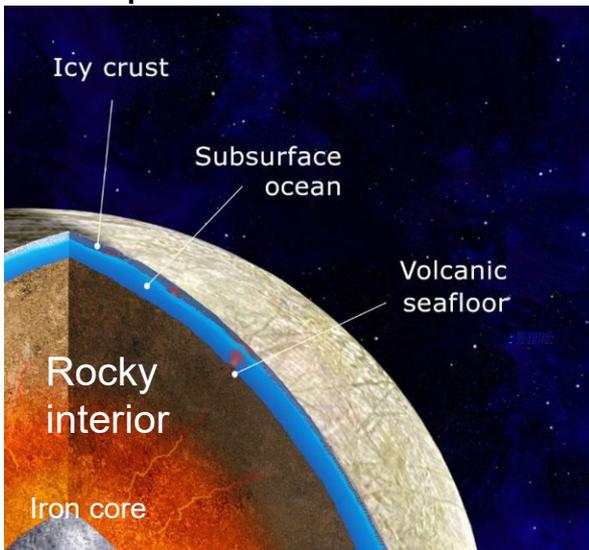
7. Satélites Planetários

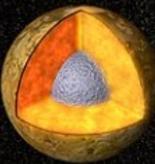
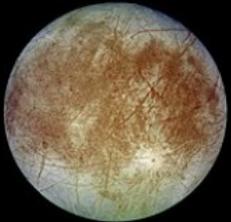
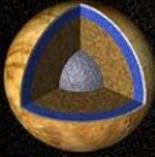
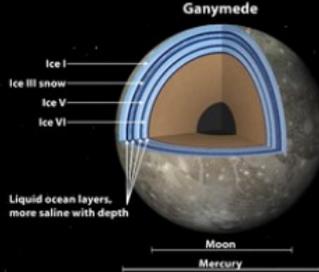


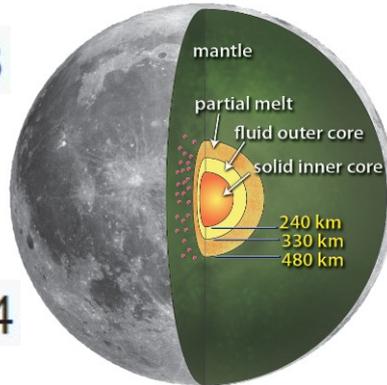
Raio vs.
densidade média
de planetas e
outros corpos do
sistema solar.

Lua Europa:
interior rochoso
e crosta gelada

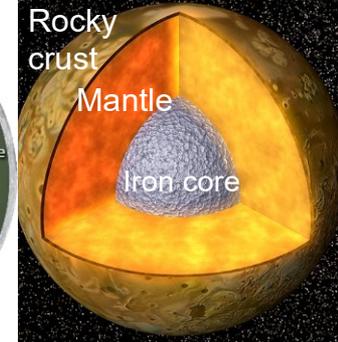
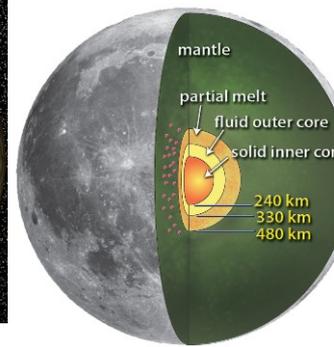
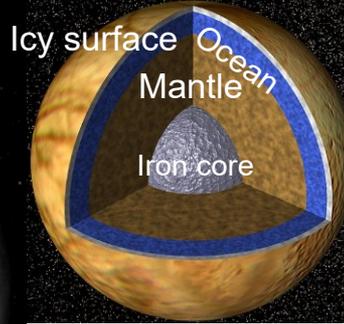
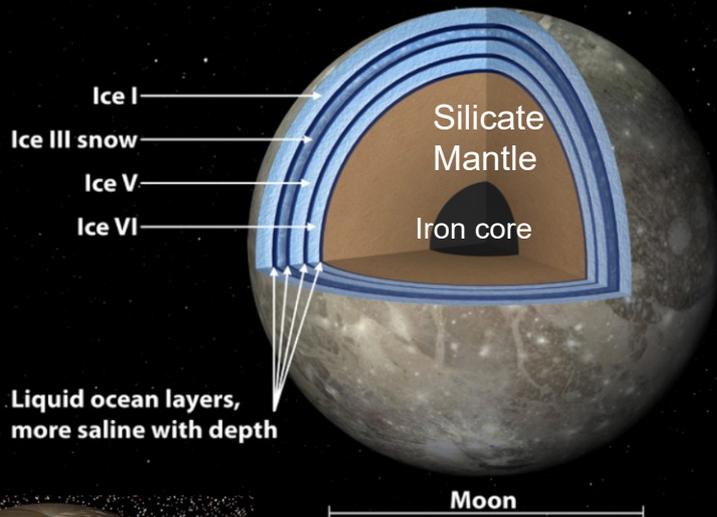
Europa



Nome	Imagem	Modelo de interior	Diâmetro (km)	Massa (kg)	Densidade (g/cm ³)
Lua			3475	7,3510 ²²	3,34
Io <i>Jupiter I</i>			3 660.0 × 3 637.4 × 3 630.6	8.93 × 10 ²²	3.528
Europa <i>Jupiter II</i>			3 121.6	4.8 × 10 ²²	3.014
Ganímedes <i>Jupiter III</i>			5 268.2	1.48 × 10 ²³	1.942
Calisto <i>Jupiter IV</i>			4 820.6	1.08 × 10 ²³	1.834



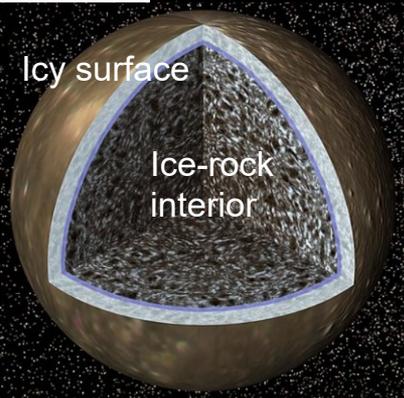
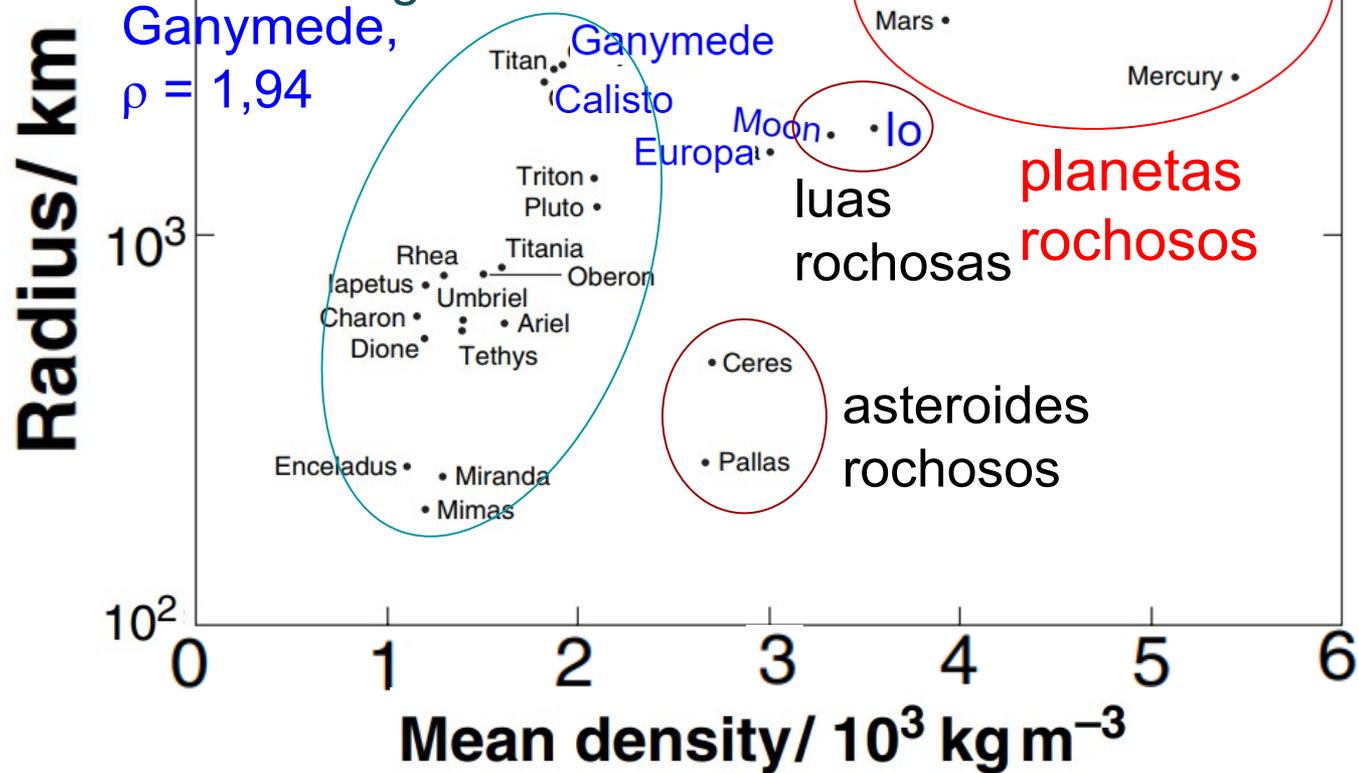
Ganymede



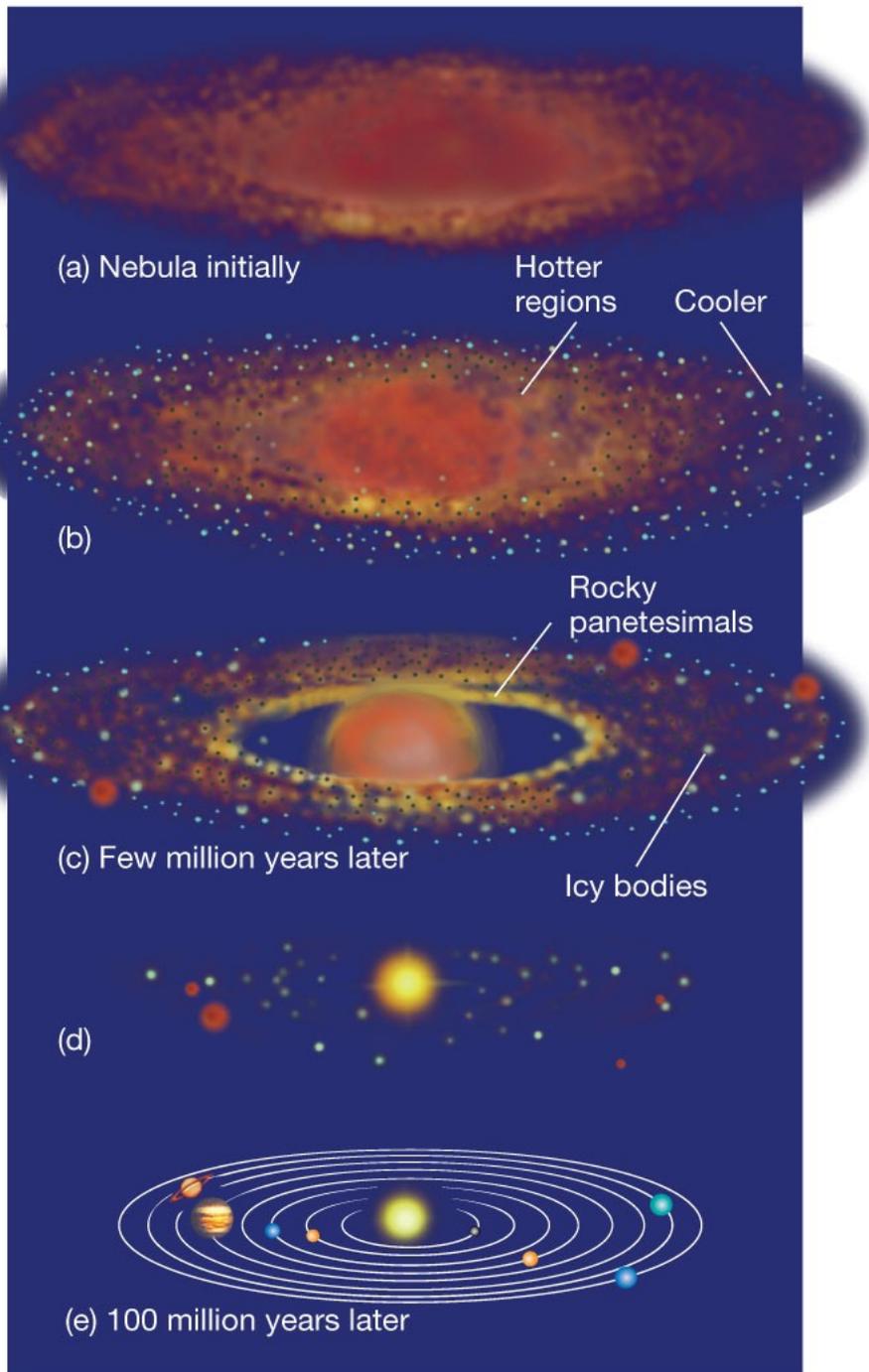
Europa, $\rho = 3,01$

Moon, $\rho = 3,34$ Io, $\rho = 3,53$

corpos rochosos-gelados



Calisto, $\rho = 1,83$



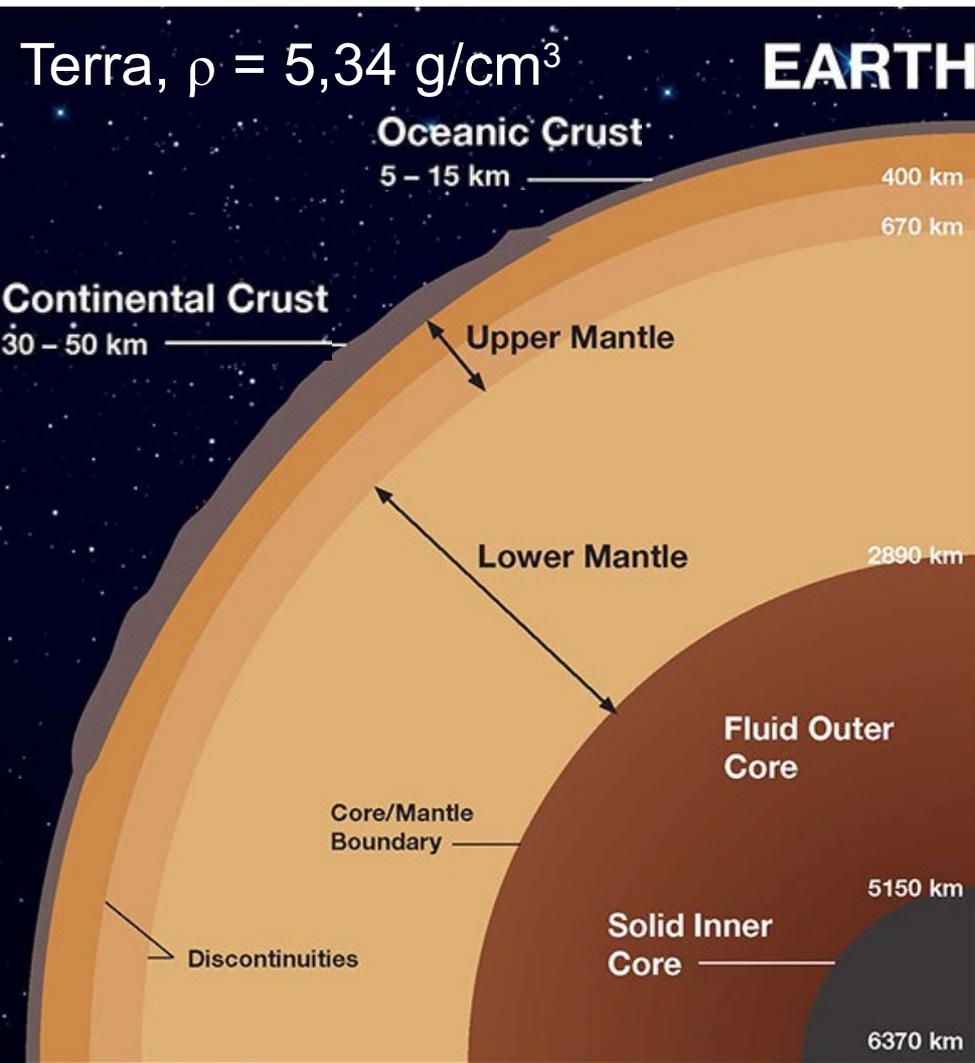
- (a) Colapso da nebulosa e formação de disco
- (b) Condensação em grãos de poeira. Região mais próxima à estrela é mais quente (material rochoso). Região mais afastada é mais fria (rochoso + gelos).
- (c) Colisões \Rightarrow corpos maiores. Região interna: planetesimais rochosos. Região externa: rochosos + gelos
- (d) Protoplanetas rochosos na região interna. Externa: planetas gasosos ou gelados
- (e) Sistema Solar final

Satélites da Terra: Lua



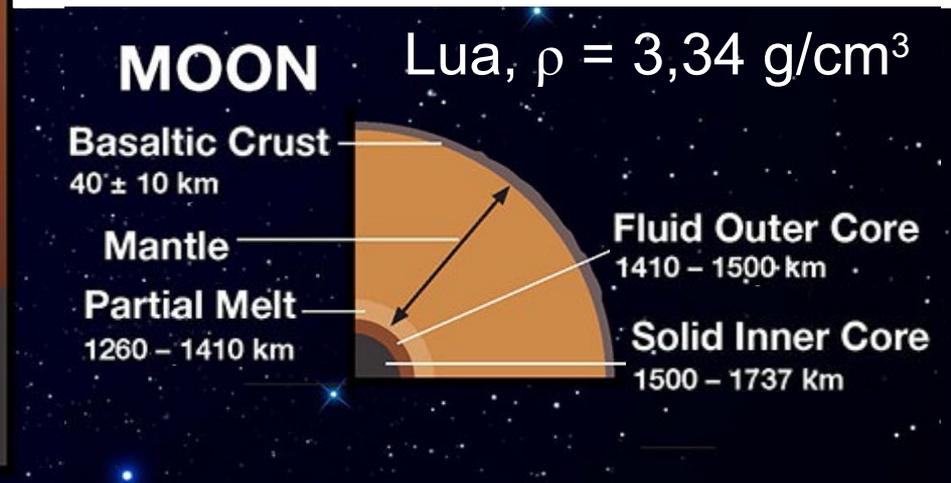
A Terra e a Lua observadas pela sonda espacial Galileo em 1992. Imagens separadas de ambos foram combinadas para gerar essa bela visão.

Comparação da estrutura interna da Terra e a Lua



O núcleo de ferro da Lua é menor (proporcionalmente) ao núcleo da Terra.

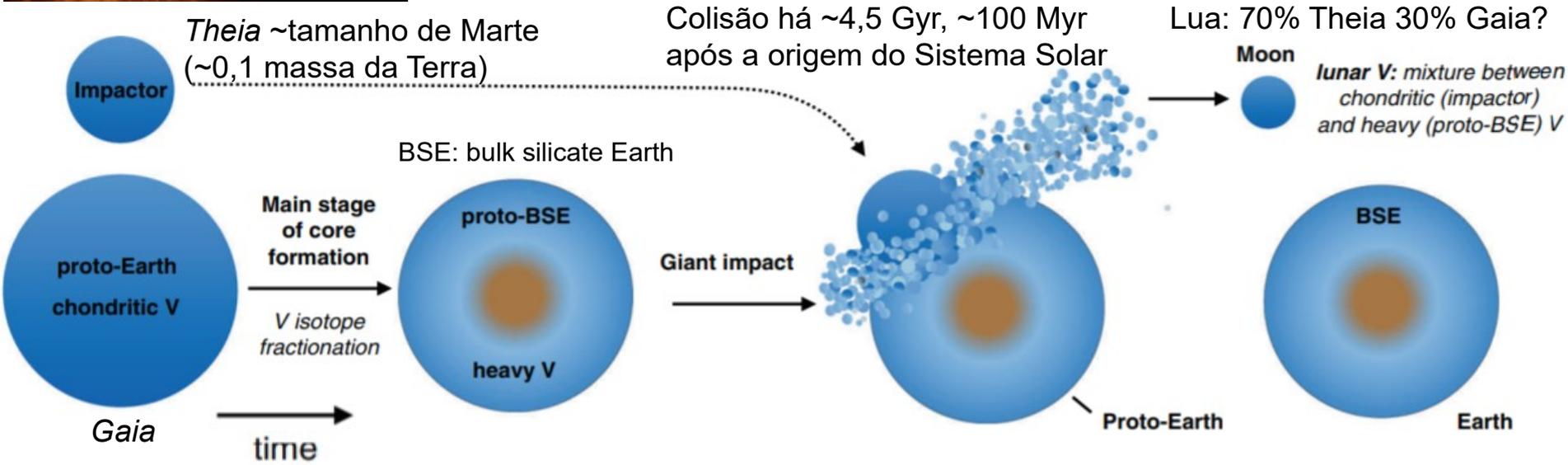
Isso é refletido na menor densidade média da Lua.



Origem da Lua: grande impacto

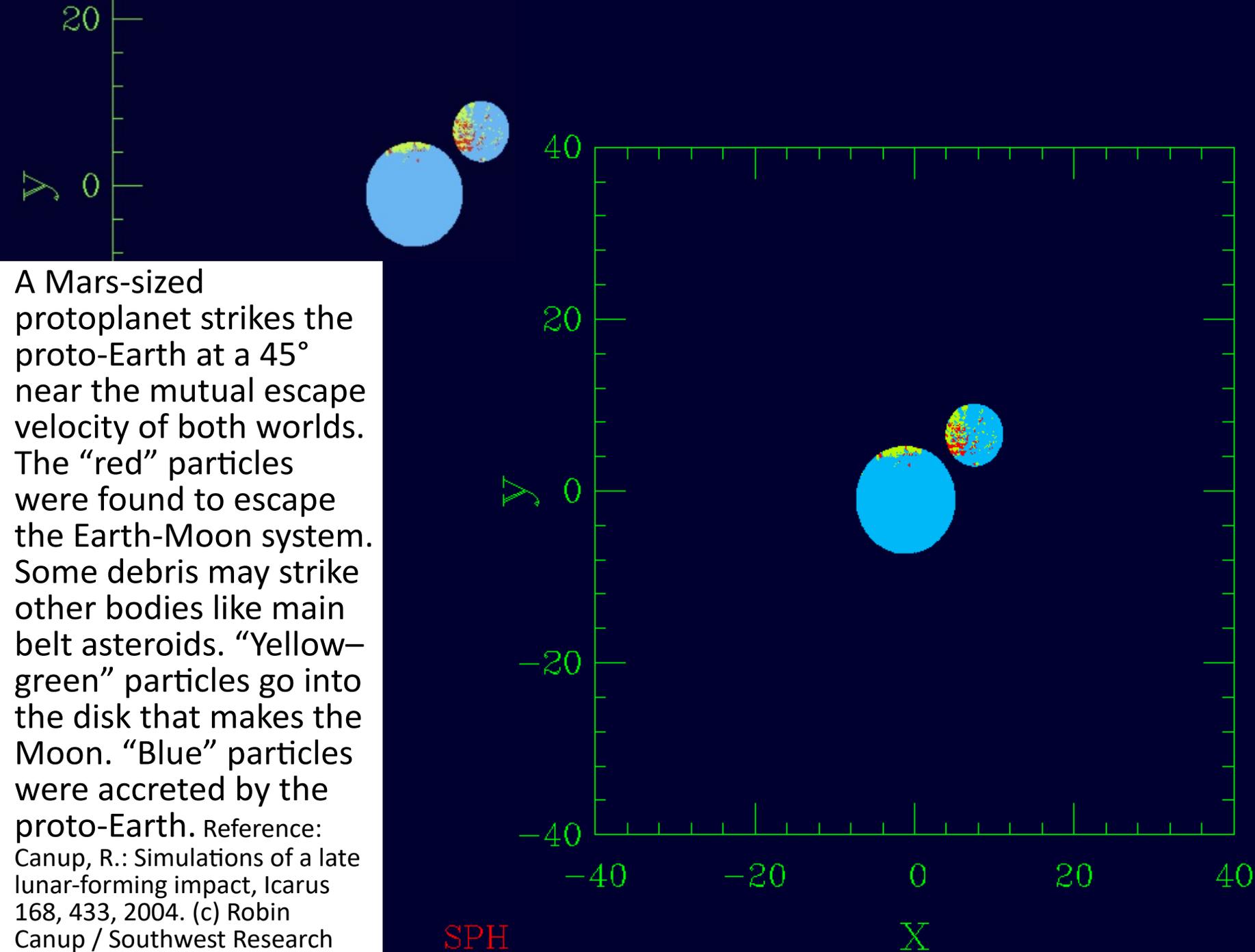


- Lua tem pouco ferro, pois no impacto apenas a crosta e manto terrestre foram ejetados. Tb, parte do ferro de *Theia* derreteu e imergiu para o núcleo da Terra
- Terra e Lua têm semelhante composição isotópica (e.g., O, Ti, Cr)
- Pela similaridade → ambos originados de uma região similar no sistema solar interno



Isotopic evidence for the formation of the Moon in a canonical giant impact

Sune G. Nielsen^{1,2}, David V. Bekaert¹ & Maureen Auro¹



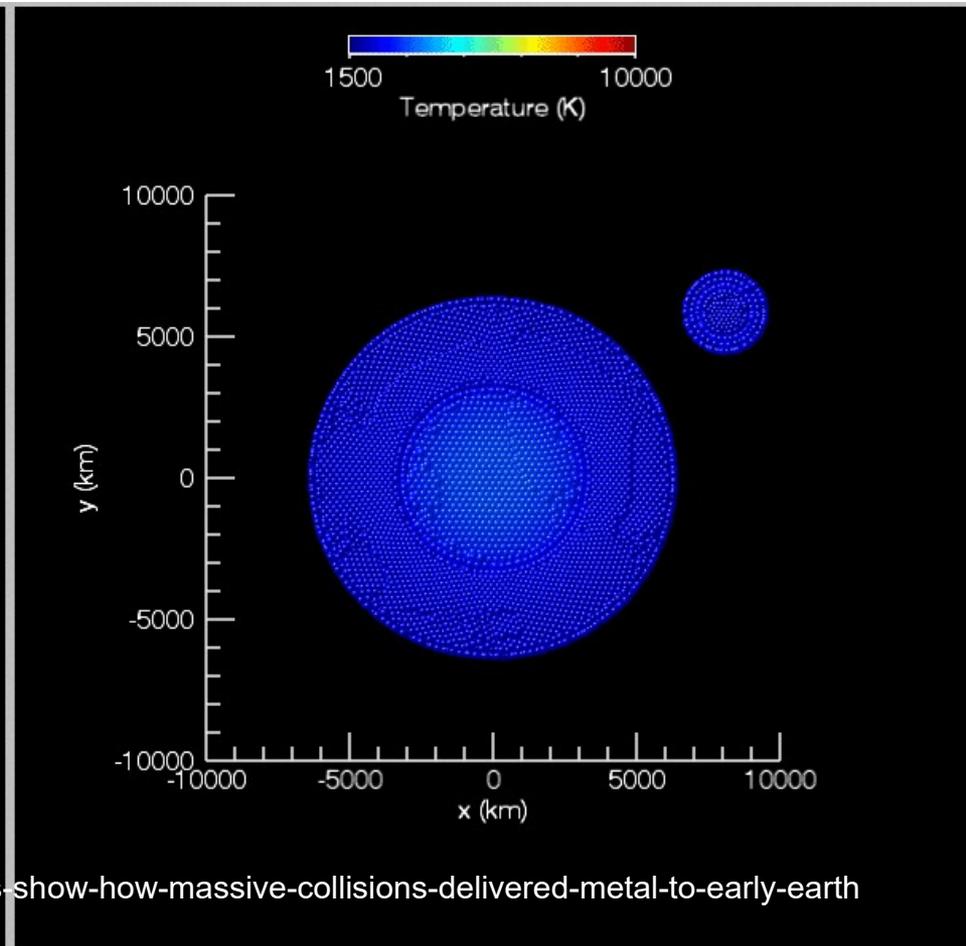
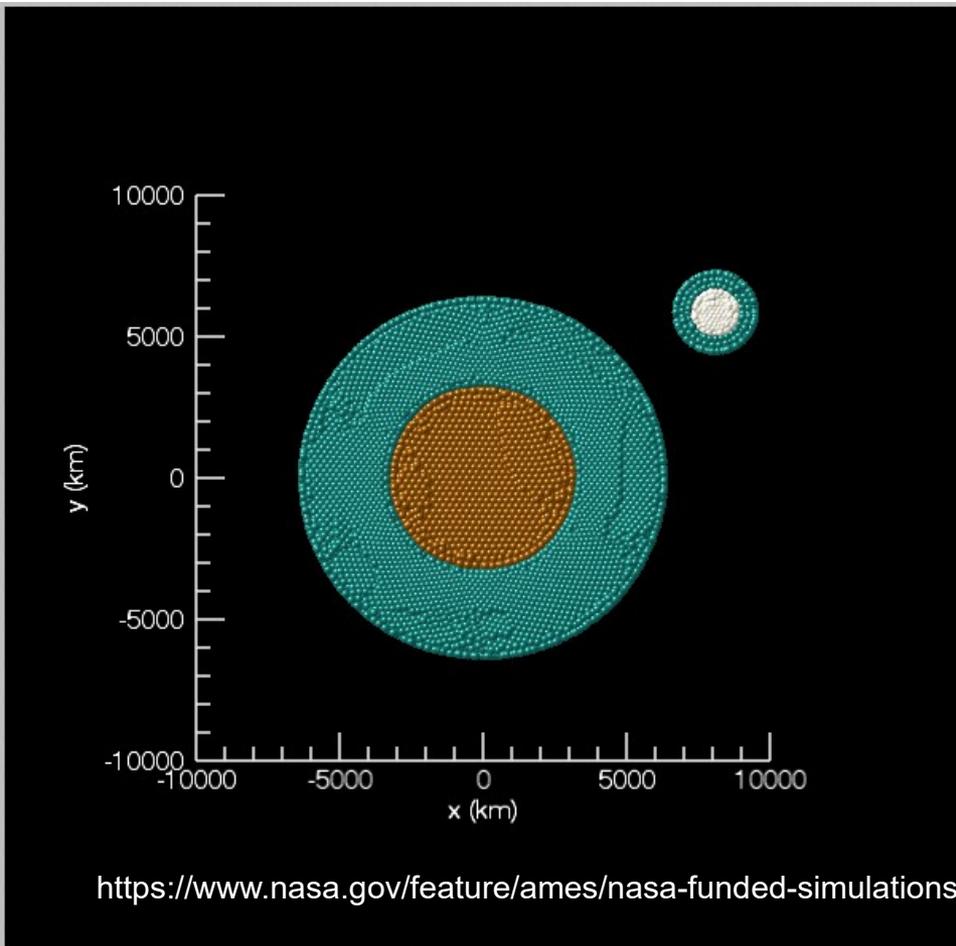
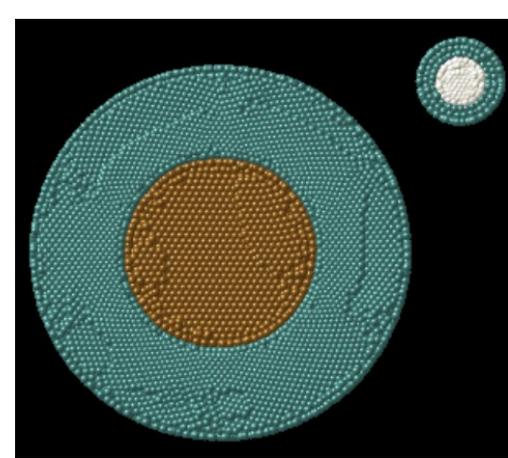
A Mars-sized protoplanet strikes the proto-Earth at a 45° near the mutual escape velocity of both worlds. The “red” particles were found to escape the Earth-Moon system. Some debris may strike other bodies like main belt asteroids. “Yellow-green” particles go into the disk that makes the Moon. “Blue” particles were accreted by the proto-Earth. Reference: Canup, R.: Simulations of a late lunar-forming impact, *Icarus* 168, 433, 2004. (c) Robin Canup / Southwest Research Institute.

SPH

X

SwRI
xpl

A collision between a projectile of 3000 km in diameter with the early Earth, at a speed of 19 km/s. Left: Interaction of projectile and terrestrial materials. Green indicates silicate particles (from the Earth's mantle and projectile), white indicates metallic particles from the projectile's core. Light brown indicates particles from the Earth's core. Right: Colors reflect the temperature. Credit: SwRI/Marchi.



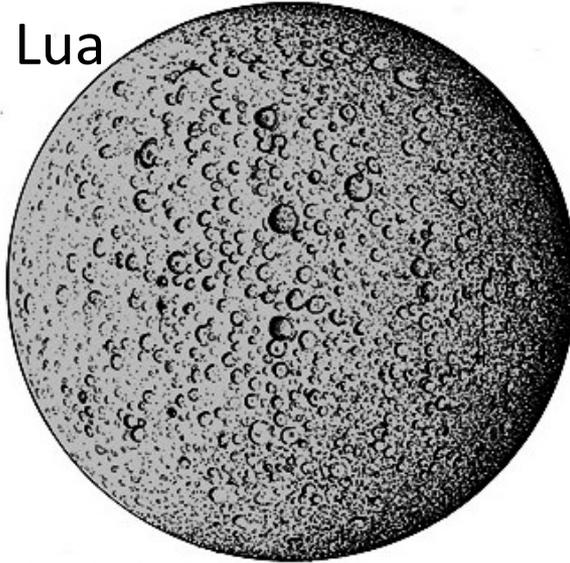
Em quanto tempo a Lua se formou após o impacto?

- Estudos anteriores: meses ou anos
- Segundo uma simulação recente (10/2022) a Lua pode ter se formado algumas horas após o impacto

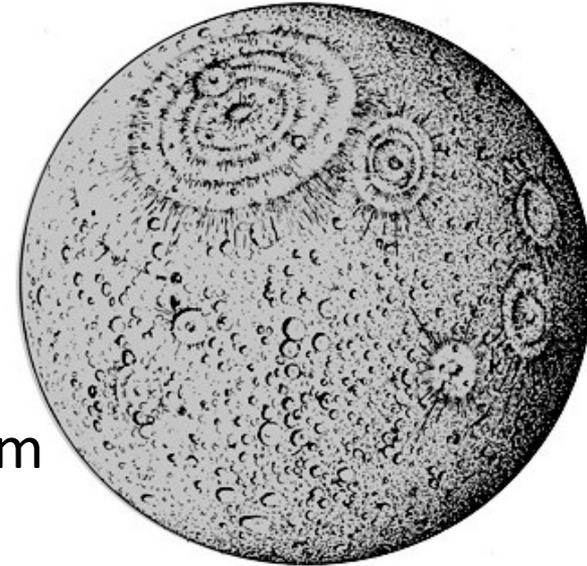


Evolução da Lua

Formação da Lua
há ~4,5 Gyr.
Superfície
inicialmente
muito
craterada



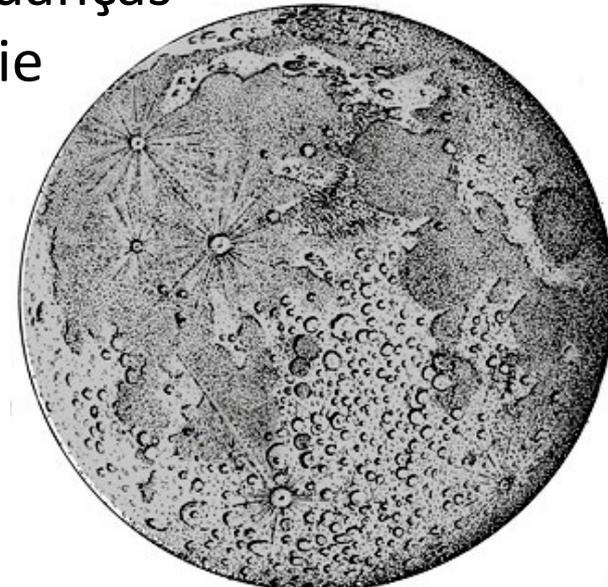
Grandes
impactos há
~4,5 - 3,9 Gyr.
Pelo menos
40 bacias
com $d > 300$ km



Erupção de lava
há ~3,9 - 3,2 Gyr,
cobrindo
parte da
superfície
da Lua



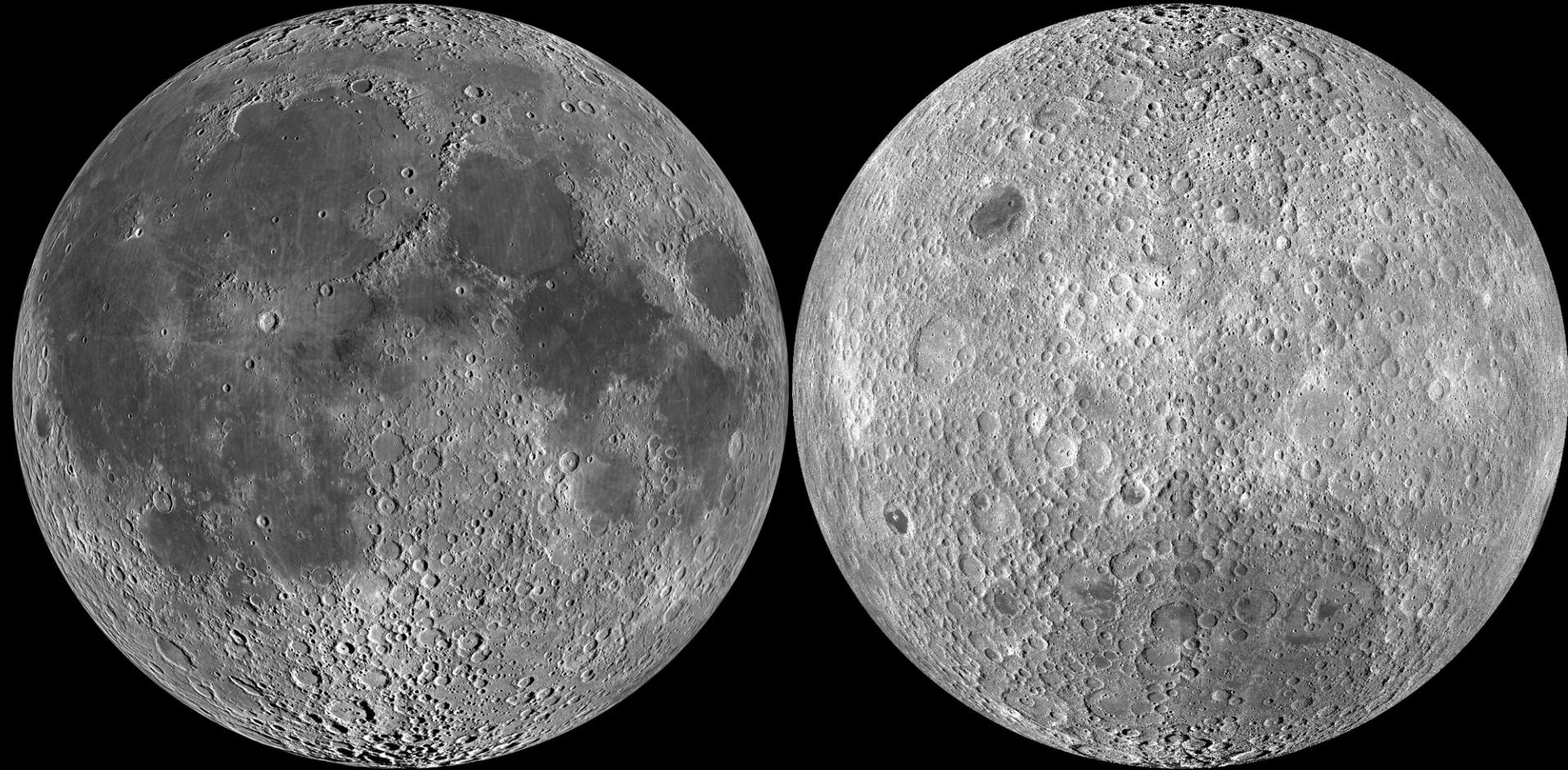
Poucas mudanças
na superfície
da Lua nos
últimos
~3,2 Gyr



Lua

Face voltada para a Terra

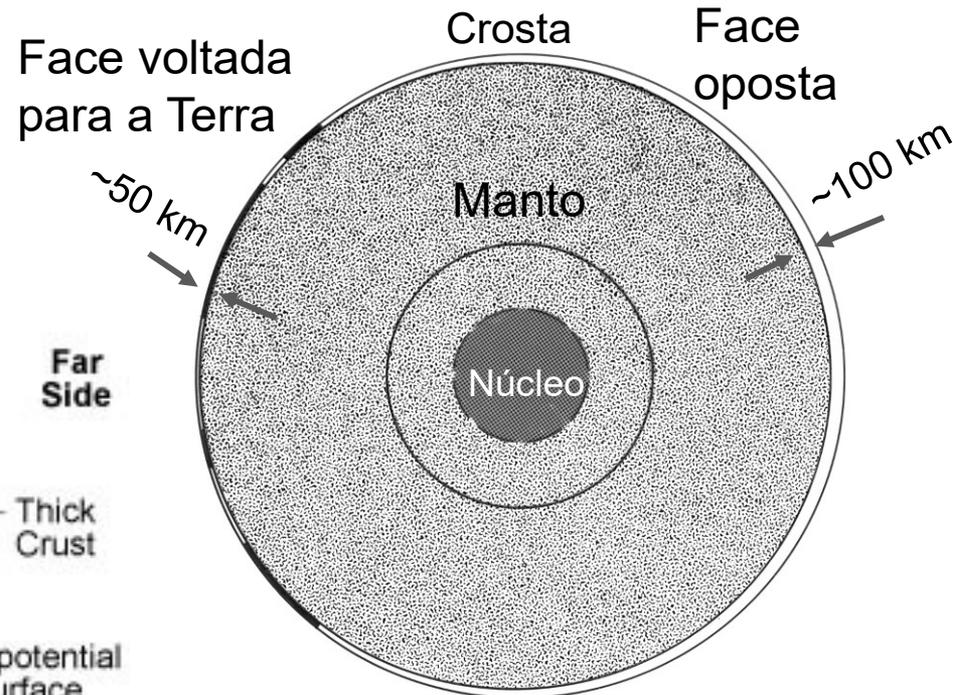
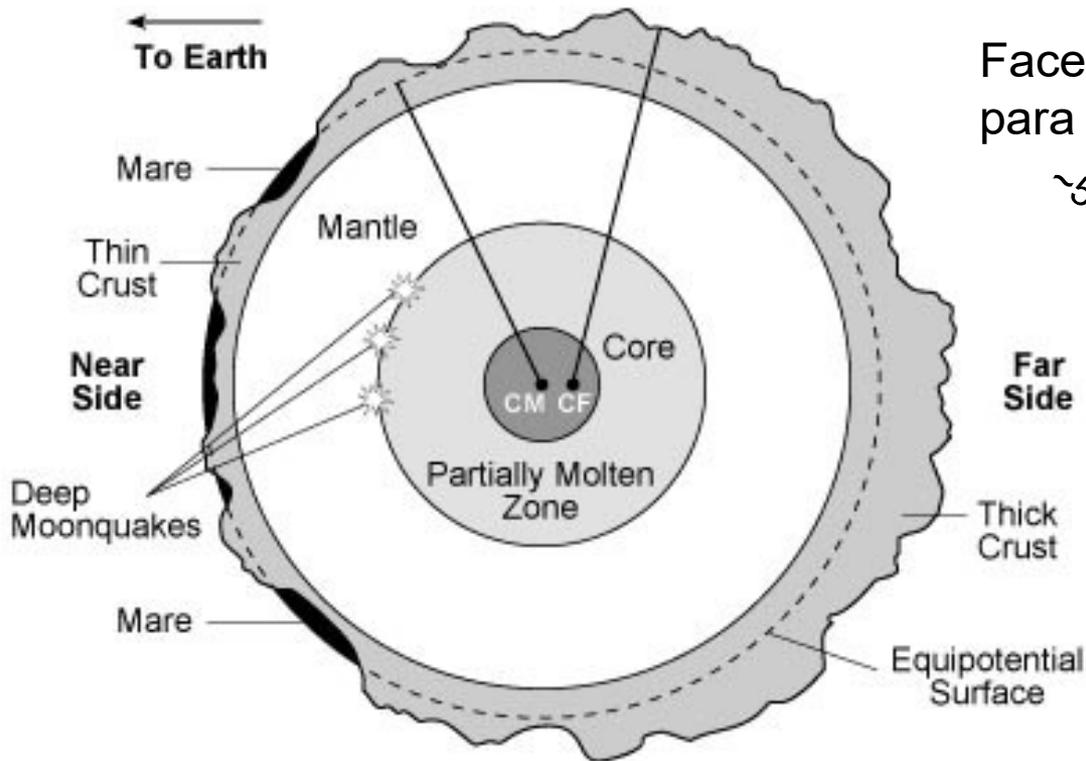
Face oposta



(c) NASA / GSFC / Arizona State Univ. / Lunar Reconnaissance Orbiter, 2009 - 2011

Além de crateras, a face voltada para a Terra é coberta por planícies escuras chamadas de mares. A crosta do lado oposto é mais espessa, tornando mais difícil para a lava do interior fluir para a superfície e formar mares.

A crosta do lado oposto da Lua é mais espessa, dificultando a erupção de lava para a formação de mares na superfície



© <http://explanet.info/Chapter04.htm>

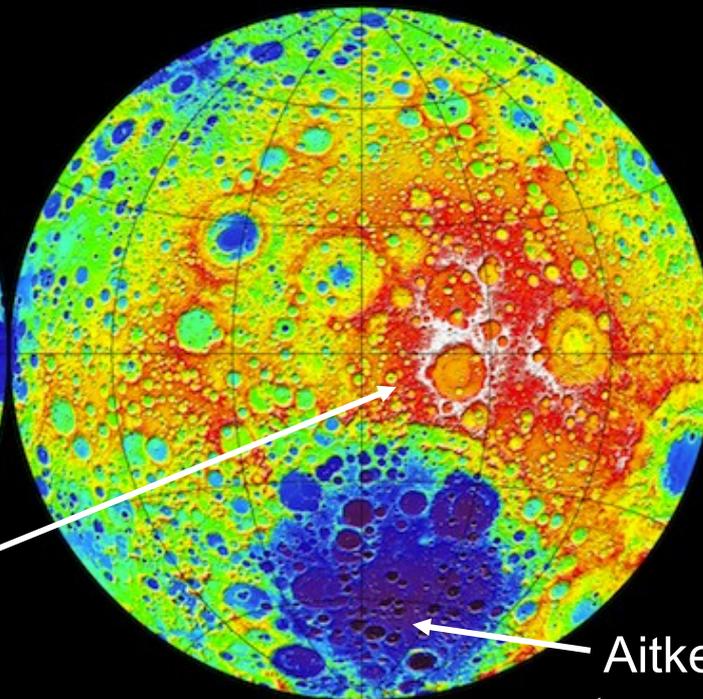
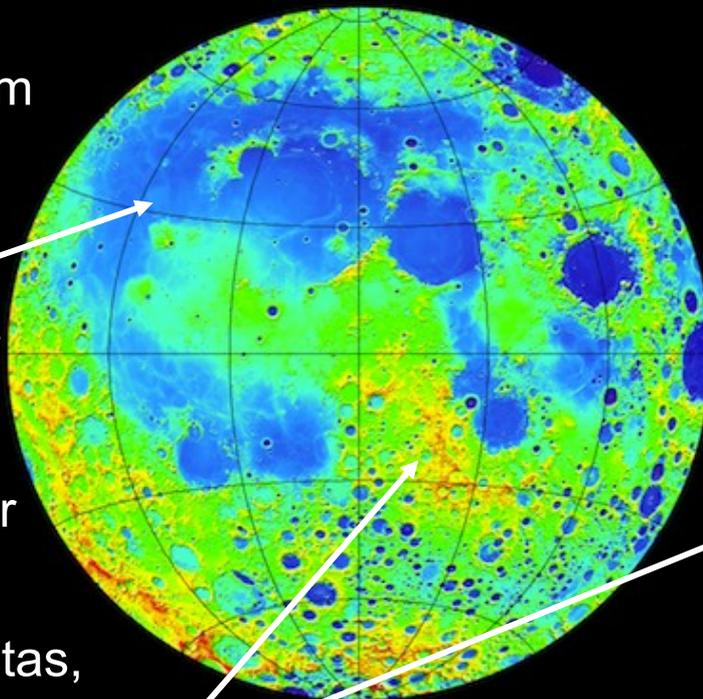
Adaptado por Jorge Meléndez (IAG-USP)

Lado próximo Near side

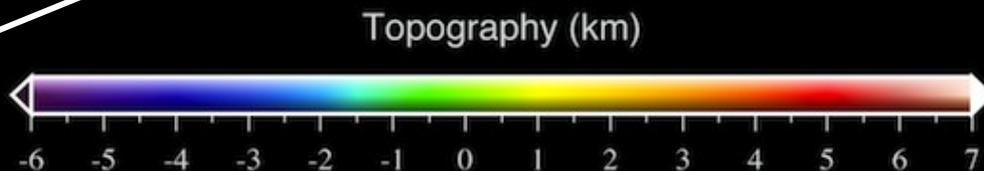
Far side Lado distante

Mares em terras planas e baixas, cobertas de lava. Idade 3 a 4 Gyr

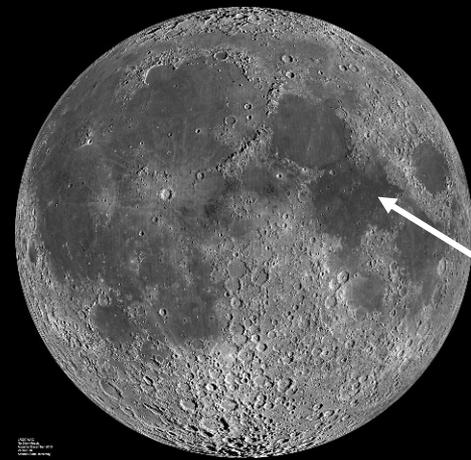
Terras altas, regiões crateradas. Idade 4 a 4,5 Gyr



Bacia do Polo Sul - Aitken, a maior cratera de impacto do Sistema Solar (2500 km)

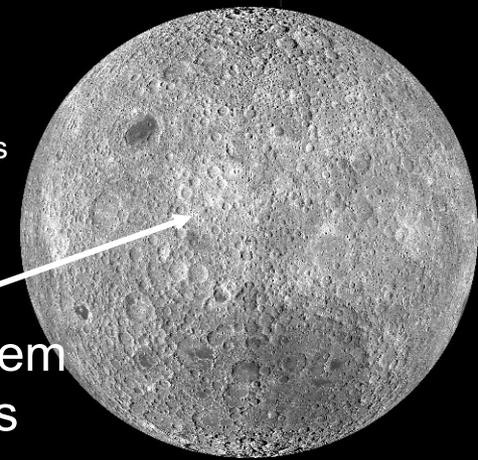


(c) Mark A. Wieczorek. The topography of the Moon referenced to a sphere with a radius of 1737.4 kilometers. Data were obtained from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) that was flown on the mission Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). https://en.wikipedia.org/wiki/Topography_of_the_Moon#/media/File:MoonTopoLOLA.png



Mares em regiões escuras, cobertas de lava

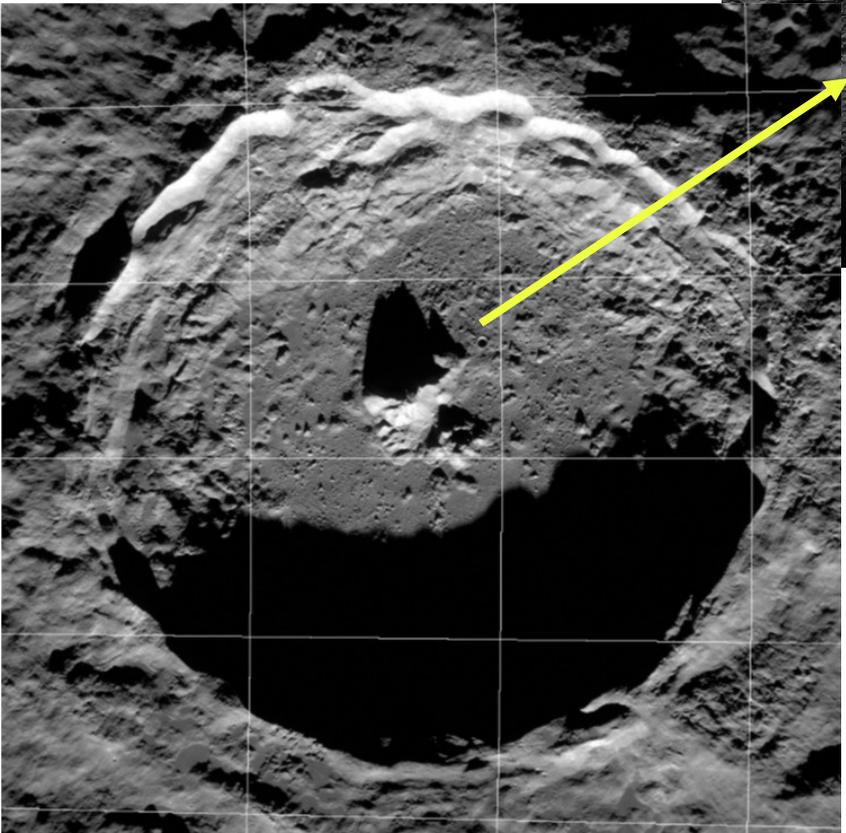
Terreno craterado em regiões mais claras



Tycho Crater's Central Peak on the Moon

© NASA Goddard/Arizona State University

<https://solarsystem.nasa.gov/resources/2265/tycho-craters-central-peak-on-the-moon/>

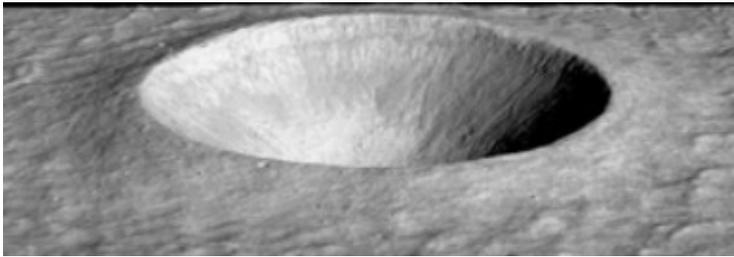


Cratera Tycho

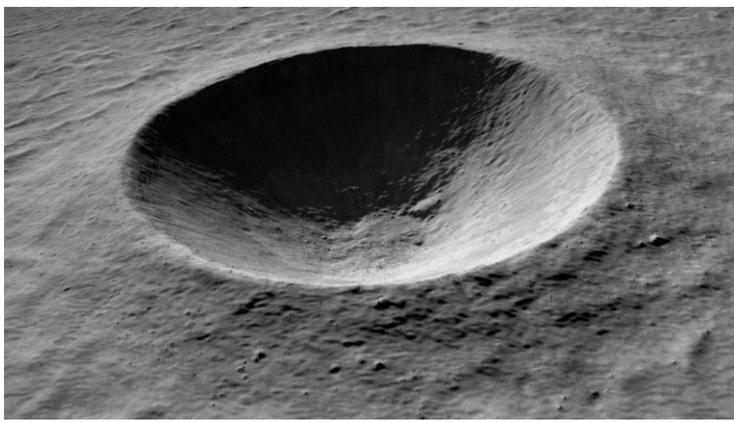
(d = 85 km, profundidade = 5 km,
pico = 2km).

Pequenas crateras ($d \lesssim 10$ a 20 km) são simples, como 'tigelas'. Crateras grandes ($\gtrsim 10$ a 20 km) são complexas, com pico central. Crateras com $d > 200$ a 300 km são chamadas bacias. As maiores crateras geralmente são mais antigas.

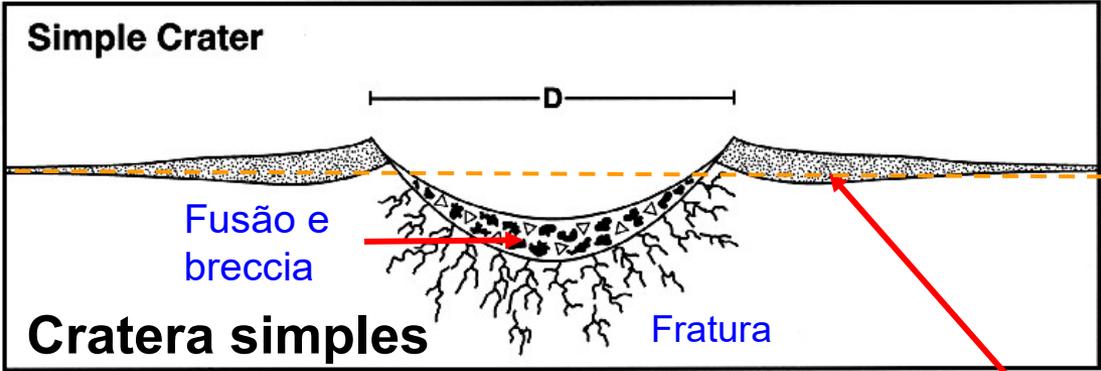
Linné (d = 2,5 km, prof = 0,6 km).



© NASA

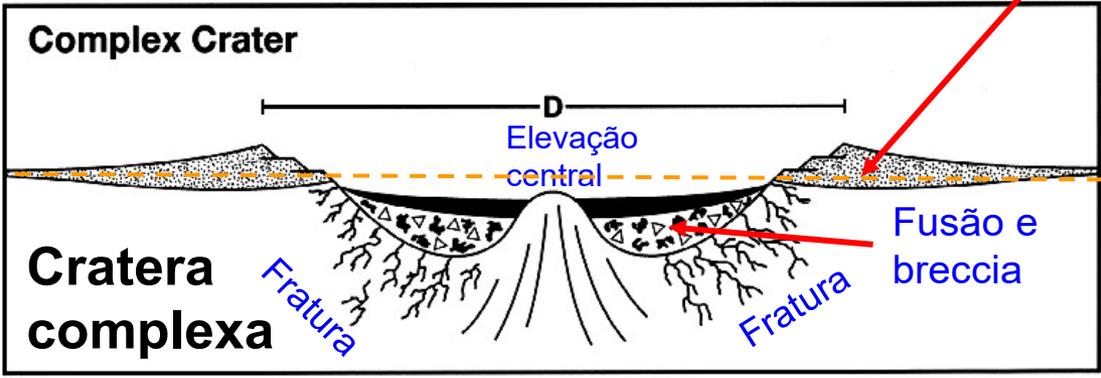


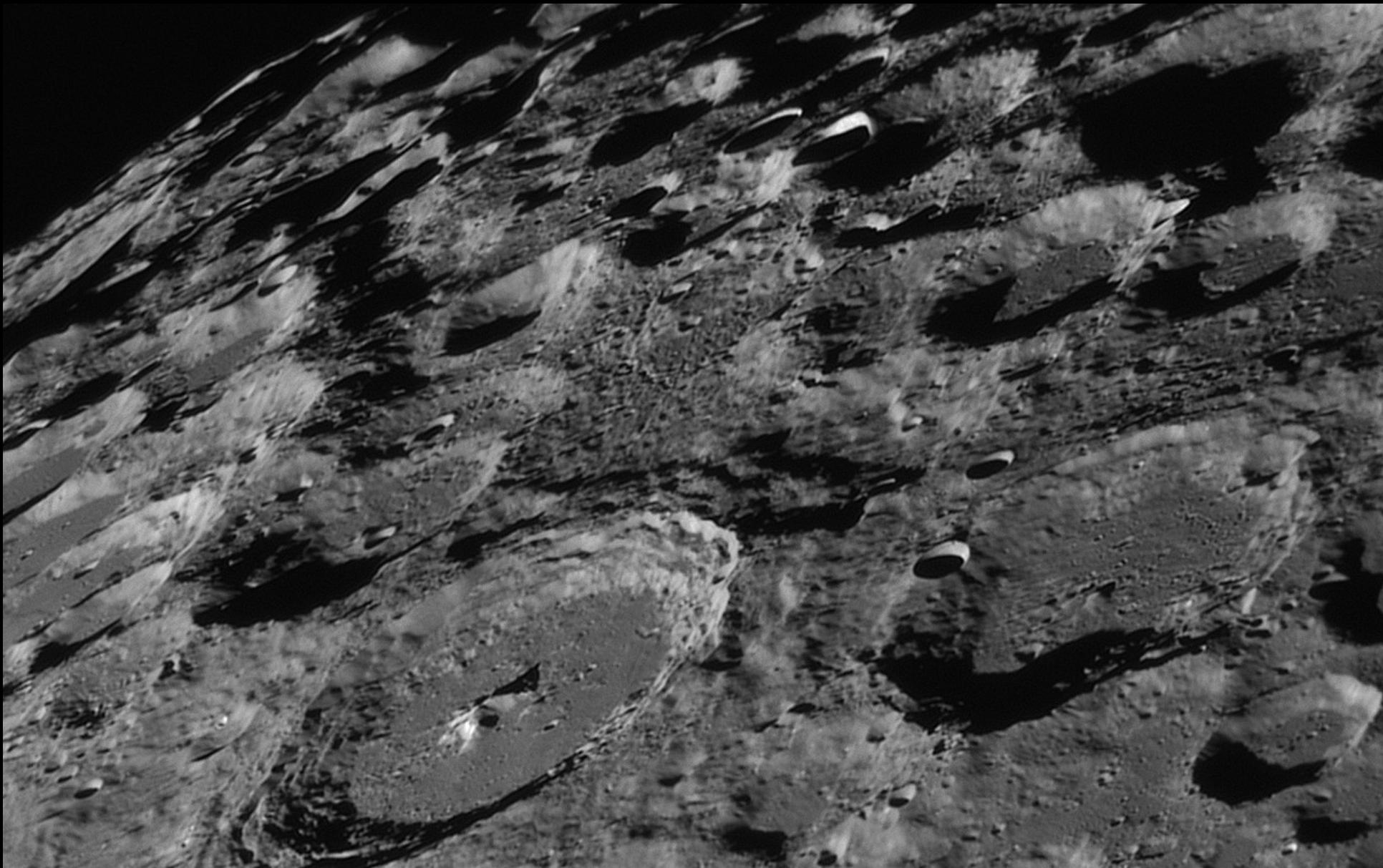
Tycho (d = 85 km, prof = 5 km). © NASA



- Δ Breccia
- \blacksquare Impact melt
- \square Impact ejecta
- Fractured bedrock
- Central peak uplift

Ejeta do impacto



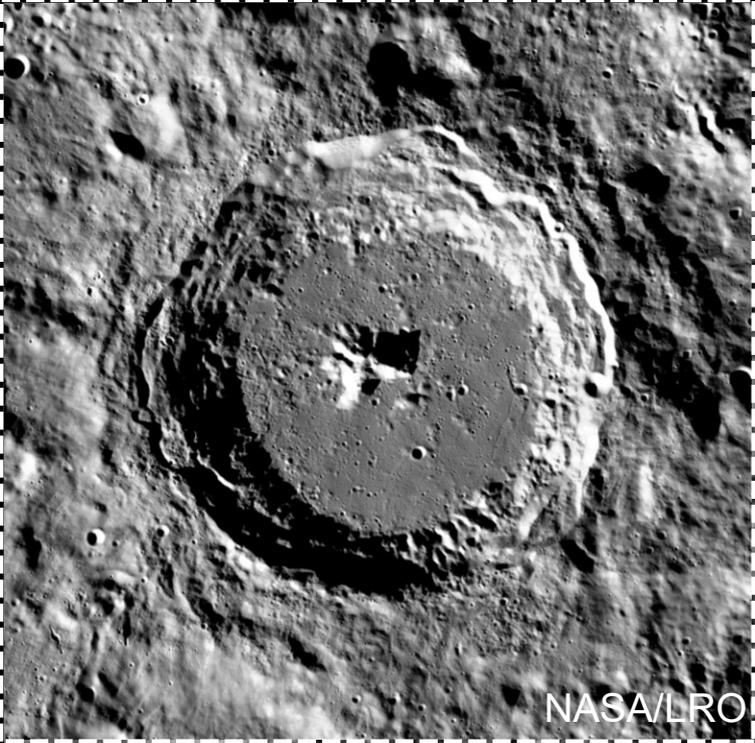


Grandes crateras no Sul da Lua. Qual é a mais antiga?
Moretus (esquerda, d=114 km) ou Curtius (direita, d=95 km)?.

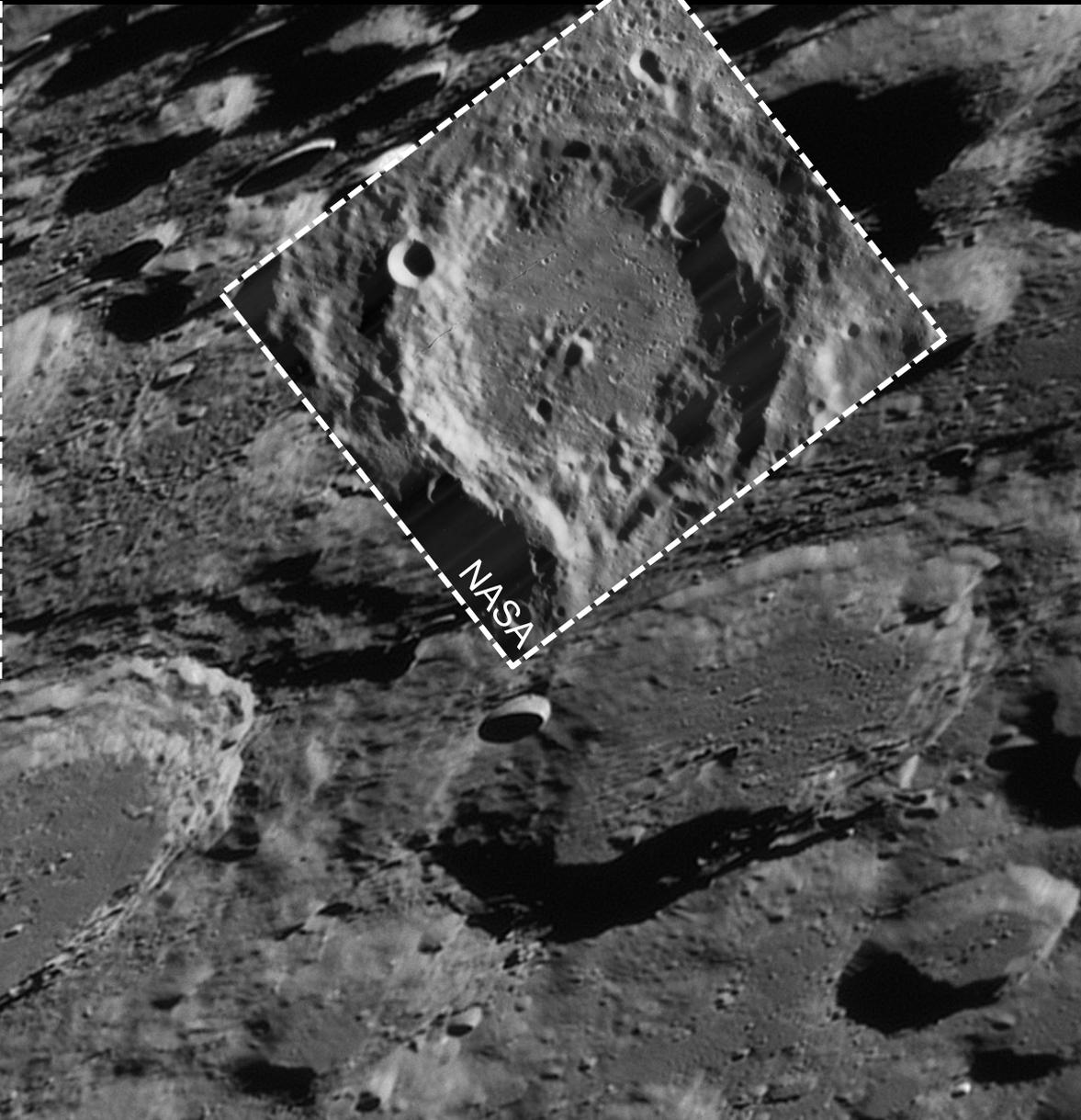
Imagem com telescópio de 18"

(c) Wes Higgins, 3/Aug/2007, Tecumseh, Oklahoma, EUA

<http://higginsandsons.com/astro/>



NASA/LRO

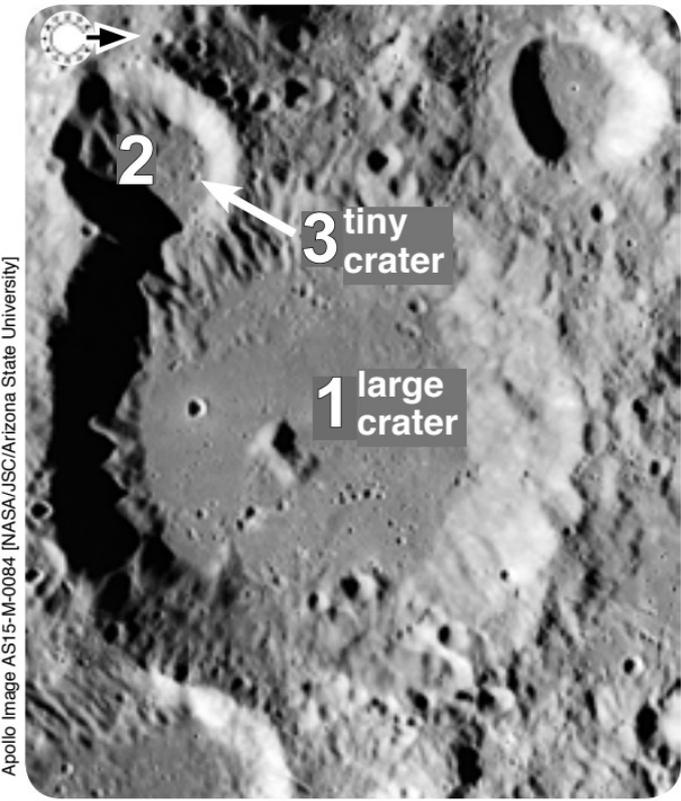


NASA

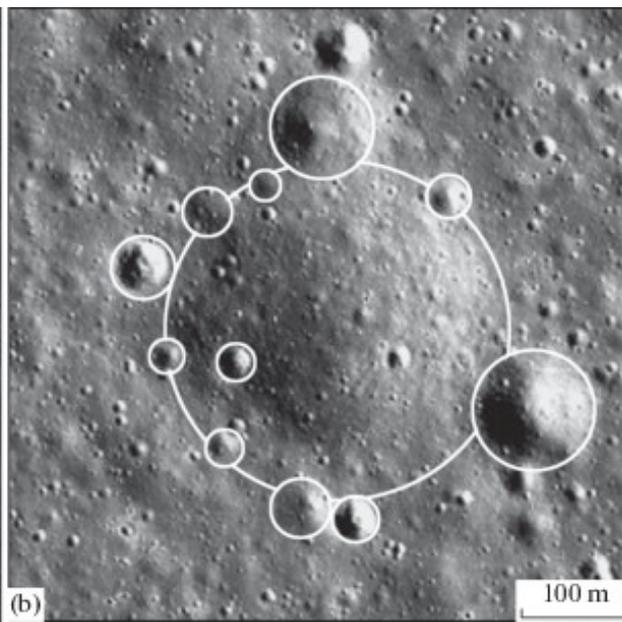
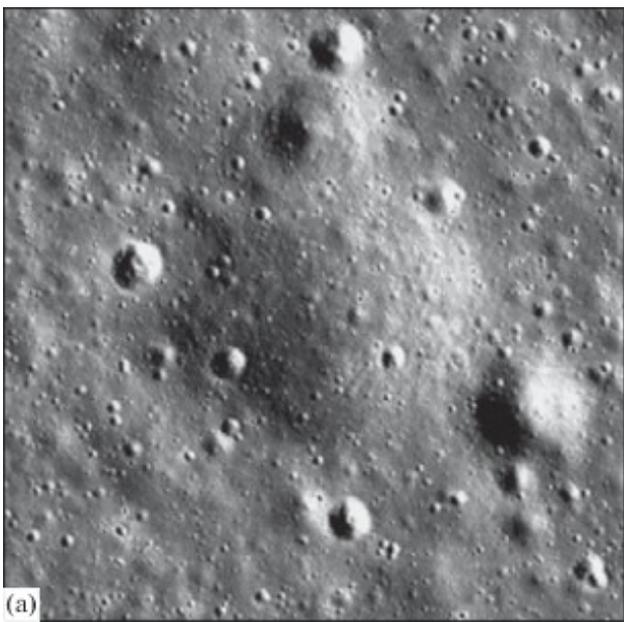
Grandes crateras no Sul da Lua. Qual é a mais antiga?
Moretus (esquerda, $d=114$ km) ou Curtius (direita, $d=95$ km)?
Imagem com telescópio de 18"

(c) Wes Higgins, 3/Aug/2007, Tecumseh, Oklahoma, EUA

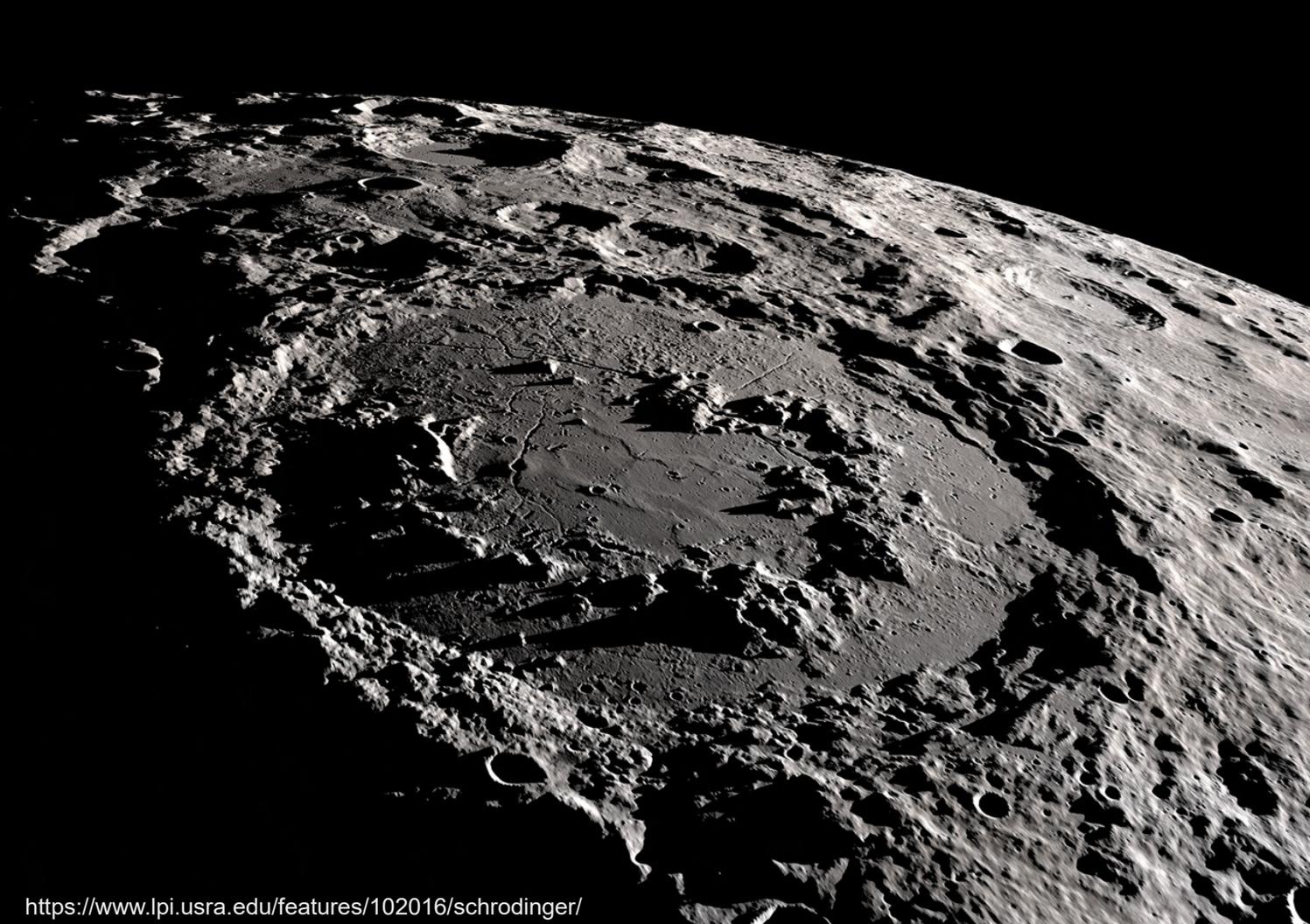
<http://higginsandsons.com/astro/>



Qual cratera é a mais antiga?
Qual a mais jovem?



The Destruction of Small Lunar Craters,
Basilevsky et al. (2020)



A bacia de Schrödinger de 320 km de diâmetro da Lua é a bacia de impacto mais bem preservada de seu tamanho. Profundidade média = 4,5 km. Idade = 3,8 Gyr.

O anel de picos de ~2,5 km de altura (máximo ~3 km) tem 150 km de diâmetro. © NASA

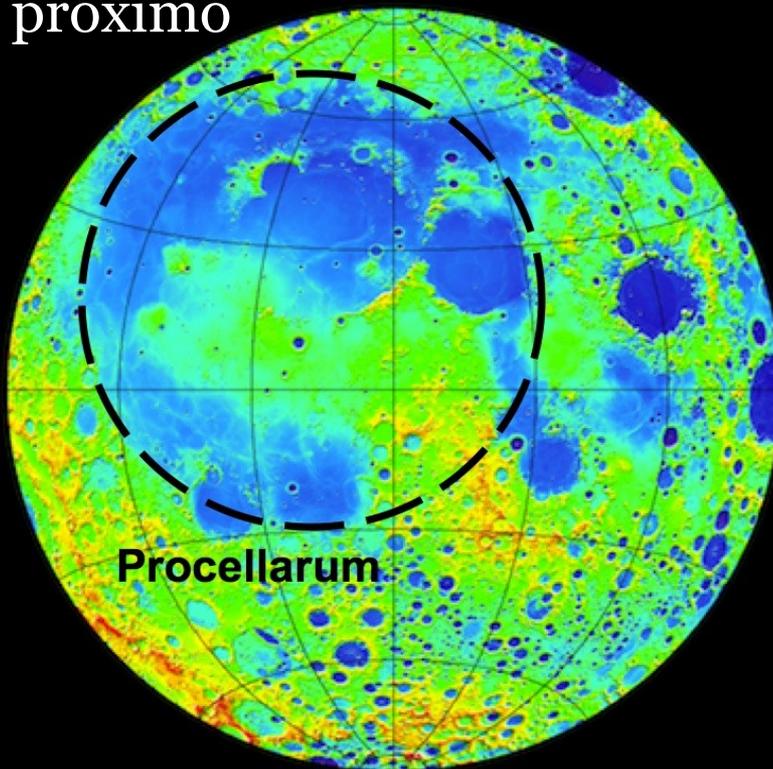
Crateras de ~200 a ~300 km são chamadas de “bacias de anel de picos”, pois ao invés de formar apenas 1 pico central, é formado um anel de picos, a meio caminho entre o centro e a borda da cratera.

Já foi proposto que Procellarum poderia ser uma gigantesca bacia de impacto, mas vários estudos descartam essa possibilidade.

A Bacia do Polo Sul - Aitken é a maior cratera de impacto do Sistema Solar
 $d = 2500$ km, profundidade = 6 a 8 km, idade = 4,25 Gyr.

Lado próximo

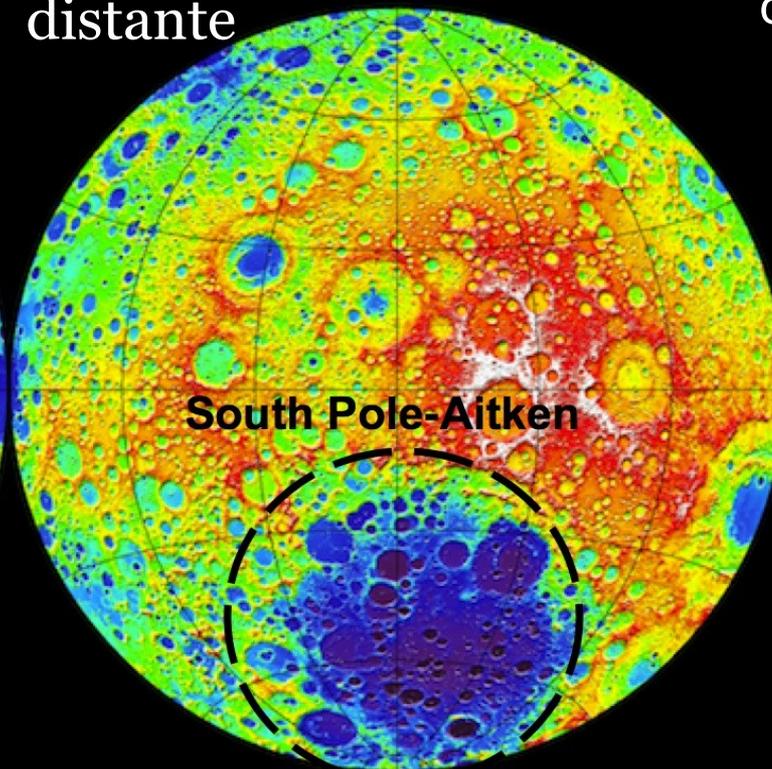
Near side



Lado distante

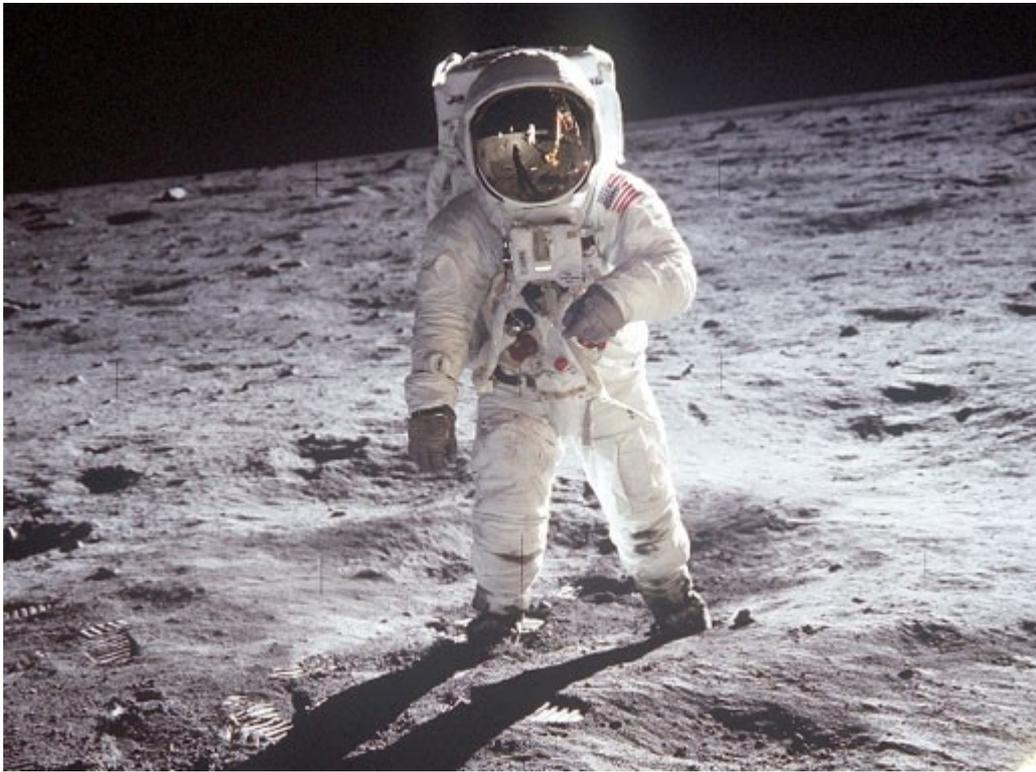
Far side

Causada por objeto de 200 km?



Topography (km)

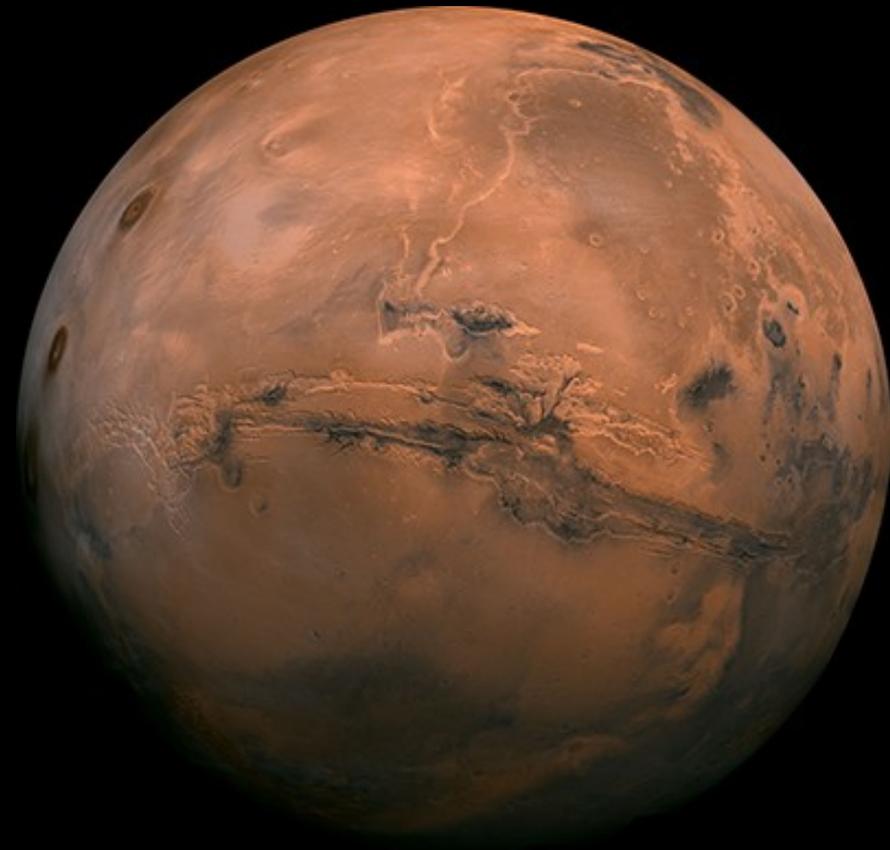




A superfície da Lua é coberta por uma camada de **regolito lunar**, que consiste de poeira formada pelo impacto repetido de meteoroides sobre a superfície da Lua. O tamanho do grão tem em média ~ 80 micrômetros.

Profundidade da camada de regolito lunar:
~5 metros nas marés e de 10-15 m nas regiões montanhosas.

Satélites de Marte: Fobos e Deimos



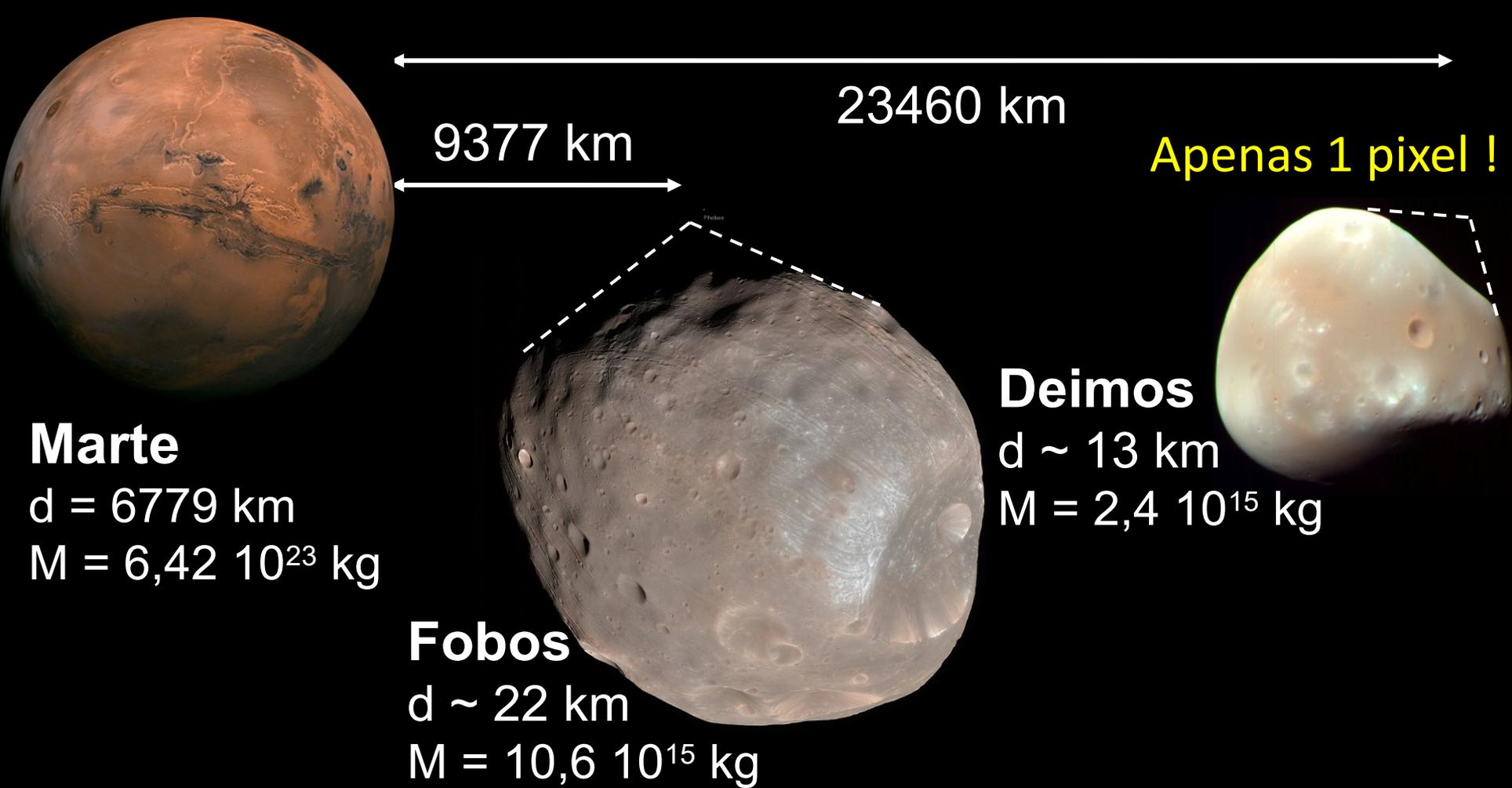
Marte,
diâmetro = 6779 km



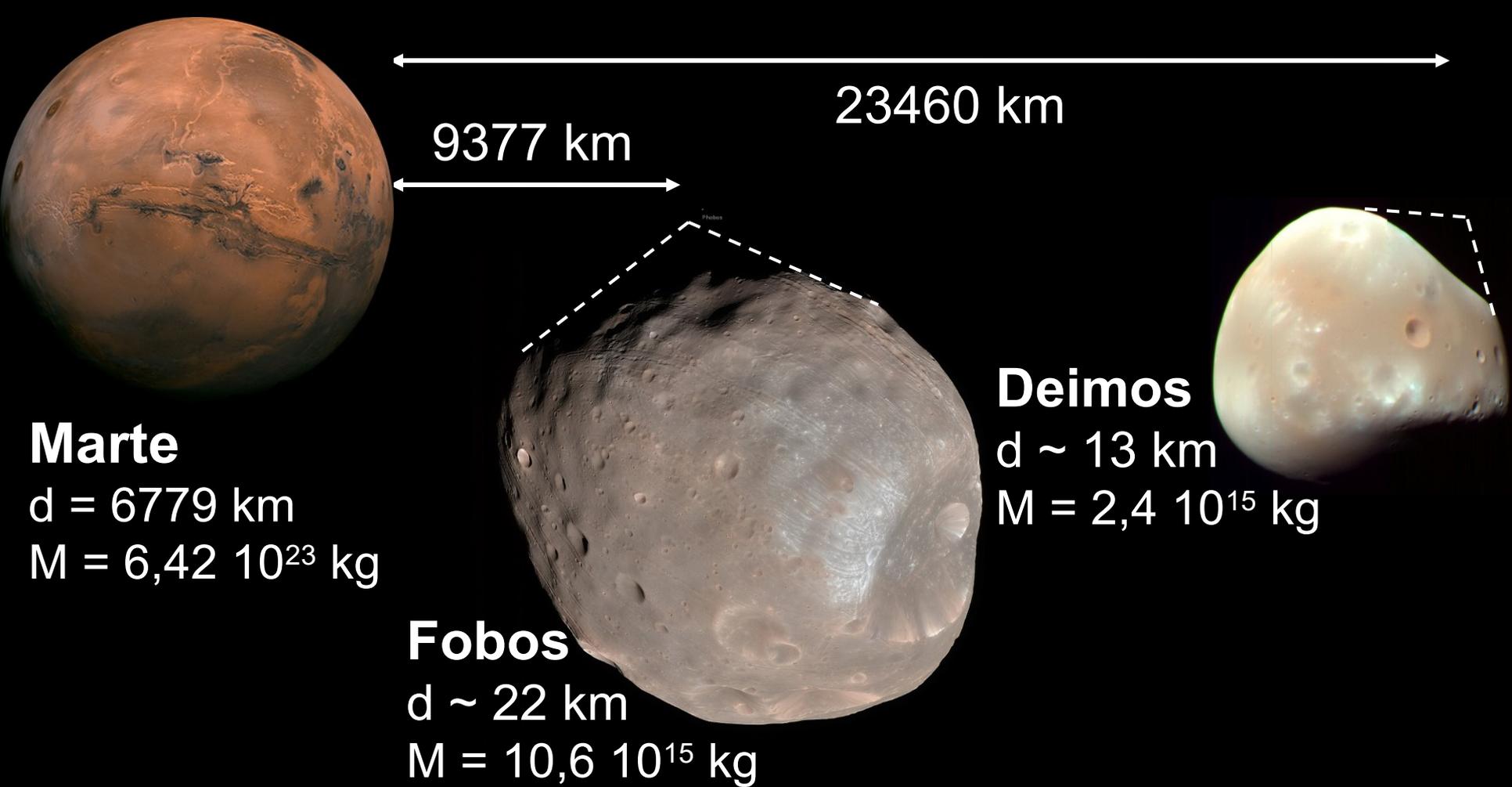
Fobos,
d ~ 22 km
(27,0x21,6x18,8 km)



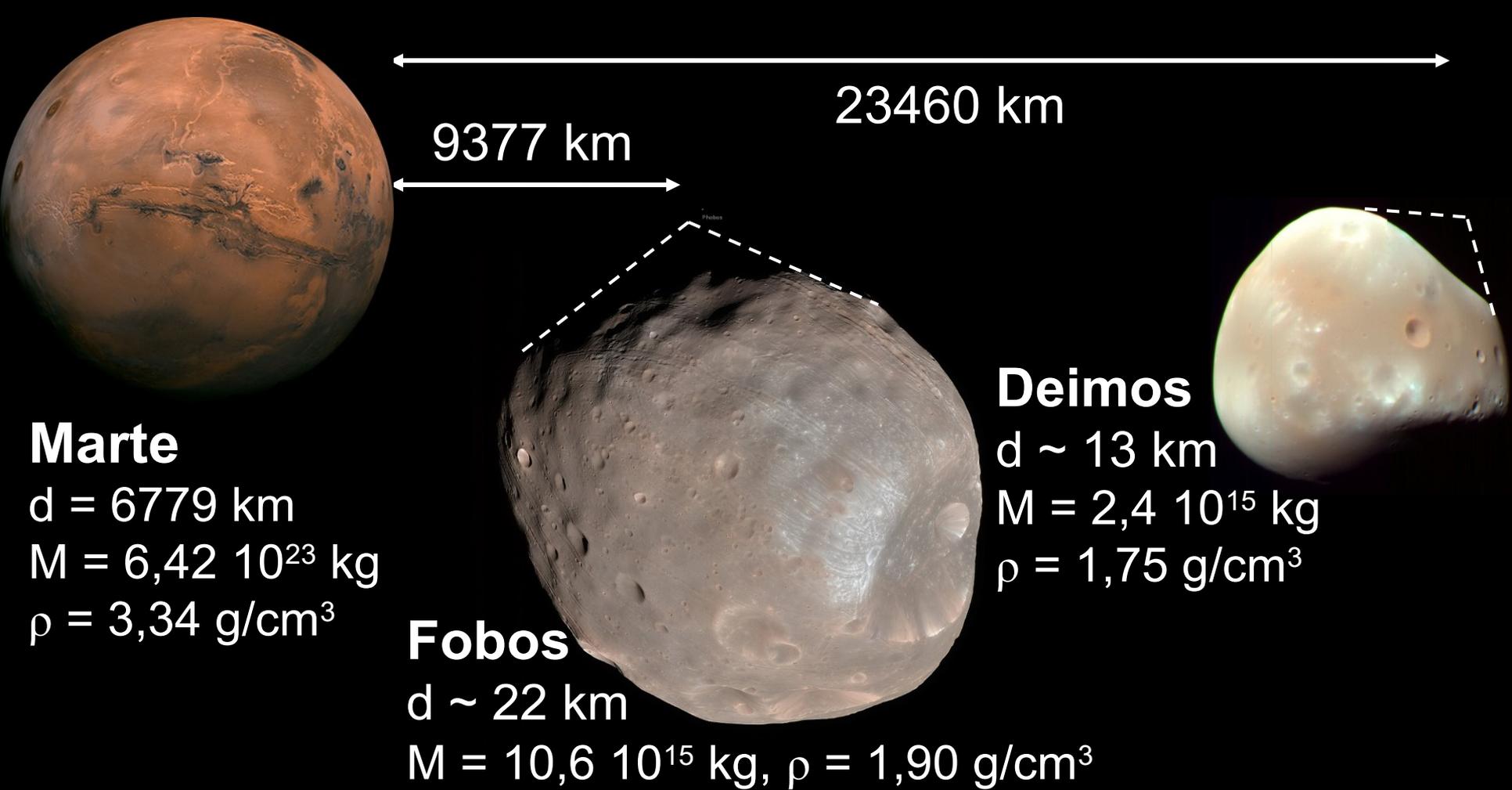
Deimos,
d ~13 km
(10x12x16km)



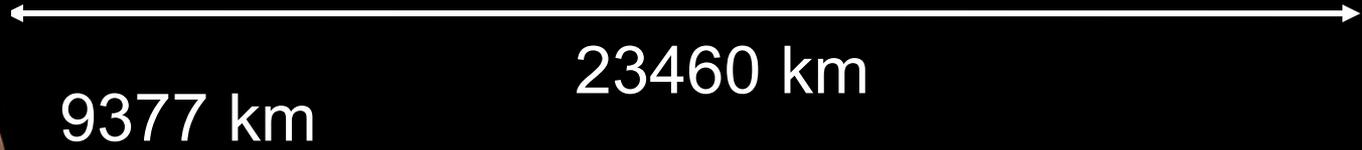
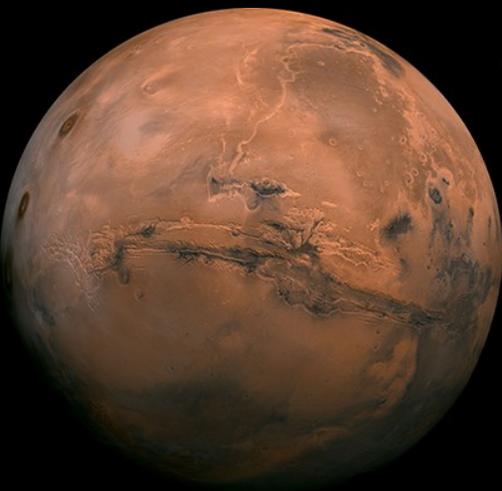
1. As luas são muito pequenas e irregulares (não são grandes o suficiente para atingir forma esférica)



2. Deimos tem poucas crateras, pois como é pequeno não consegue atrair de volta o material de impactos ($v_{\text{escape}} = 20 \text{ km/h} = 5,6 \text{ m/s}$)



3. A densidade é bem menor que a de Marte → provavelmente são asteroides capturados, talvez do Cinturão Principal de Asteroides



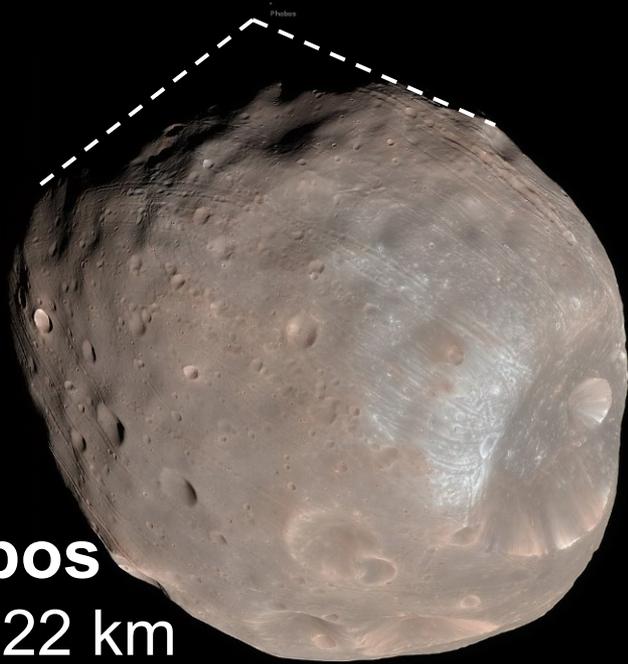
Marte

$d = 6779 \text{ km}$
 $M = 6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$
 $\rho = 3,34 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = 24\text{h } 37\text{m}$
 $P_{\text{orbital}} = 687 \text{ d}$

movimento L \rightarrow O, prógrado

Fobos

$d \sim 22 \text{ km}$
 $M = 10,6 \cdot 10^{15} \text{ kg}, \rho = 1,90 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = P_{\text{orbital}} = 7\text{h } 39\text{m}$



Deimos

$d \sim 13 \text{ km}$
 $M = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ kg}$
 $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = P_{\text{orbital}} = 30\text{h } 18\text{m}$



4. Forças de maré \rightarrow luas em ressonância spin-órbita

($P_{\text{rotação}} = P_{\text{orbital}}$).

Limite de Roche: devido às forças de maré, um satélite que chegar muito perto do seu planeta pode se romper

Distância mínima para um satélite fluido:
(Edouard **Roche** 1850)

$$d = 2,44 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R.$$

Corpos esferoidais sólidos (>40 km):
(Aggarwald e Oberbeck 1974)

$$d = 1,38 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

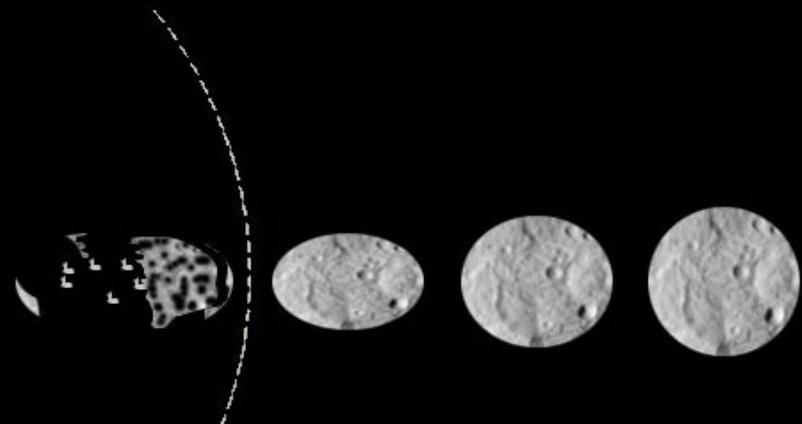
R : raio do planeta

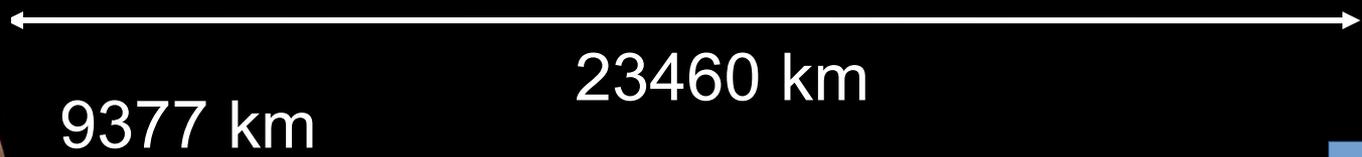
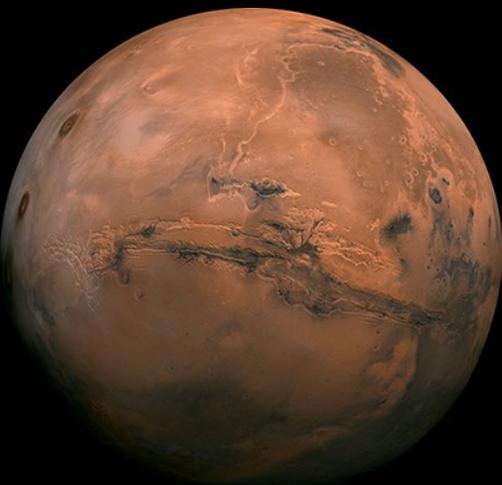
ρ_M : dens. planeta

ρ_m : dens. satélite

Roche limit

moon





Marte

$d = 6779 \text{ km}$
 $M = 6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$
 $\rho = 3,34 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = 24\text{h } 37\text{m}$
 $P_{\text{orbital}} = 687 \text{ d}$

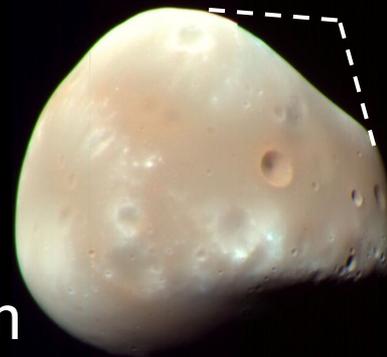
movimento L → O, prógrado

Fobos

$d \sim 22 \text{ km}$
 $M = 10,6 \cdot 10^{15} \text{ kg}, \rho = 1,90 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = P_{\text{orbital}} = 7\text{h } 39\text{m}$

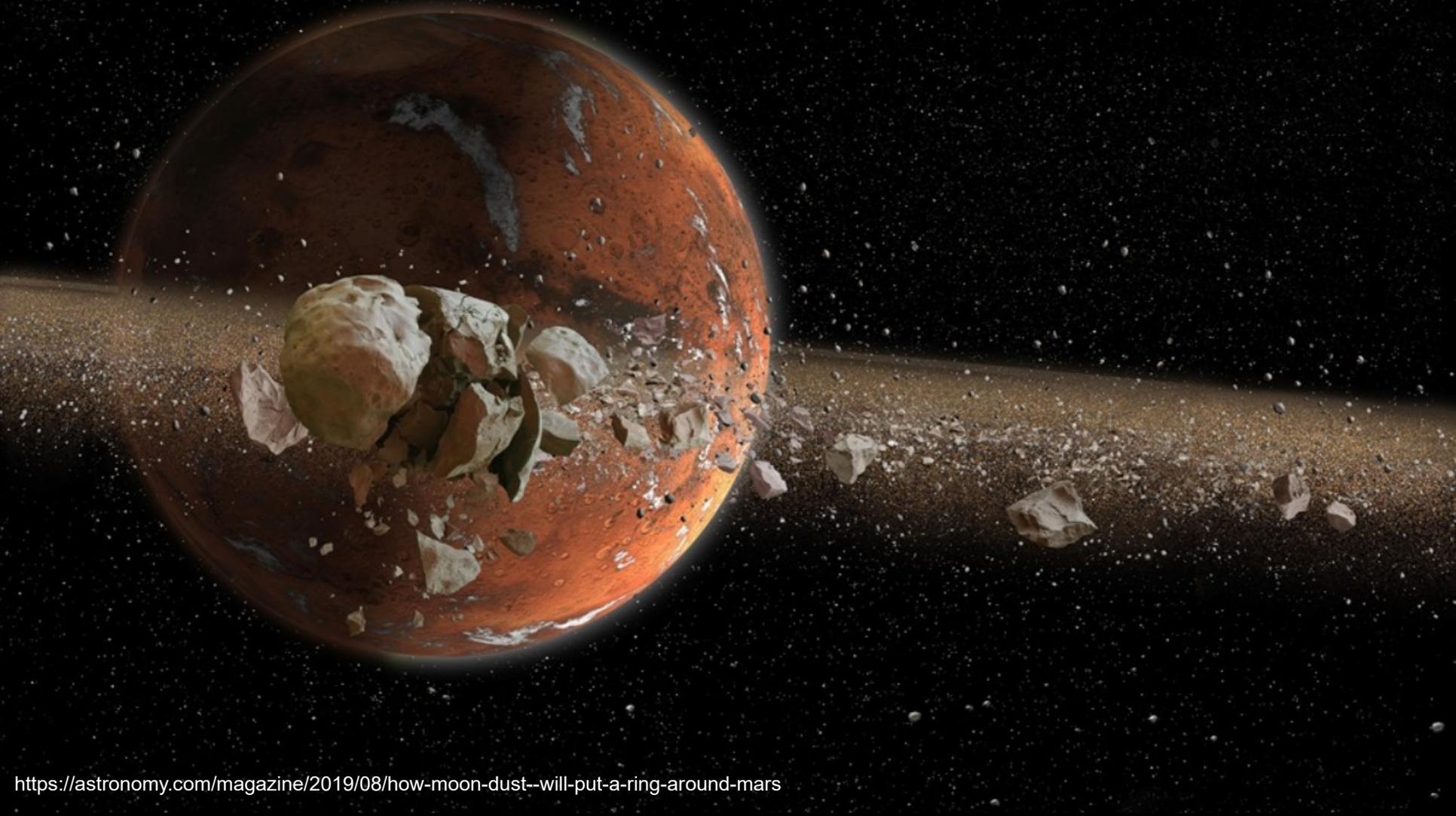
Deimos

$d \sim 13 \text{ km}$
 $M = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ kg}$
 $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$
 $P_{\text{rot}} = P_{\text{orbital}} = 30\text{h } 18\text{m}$

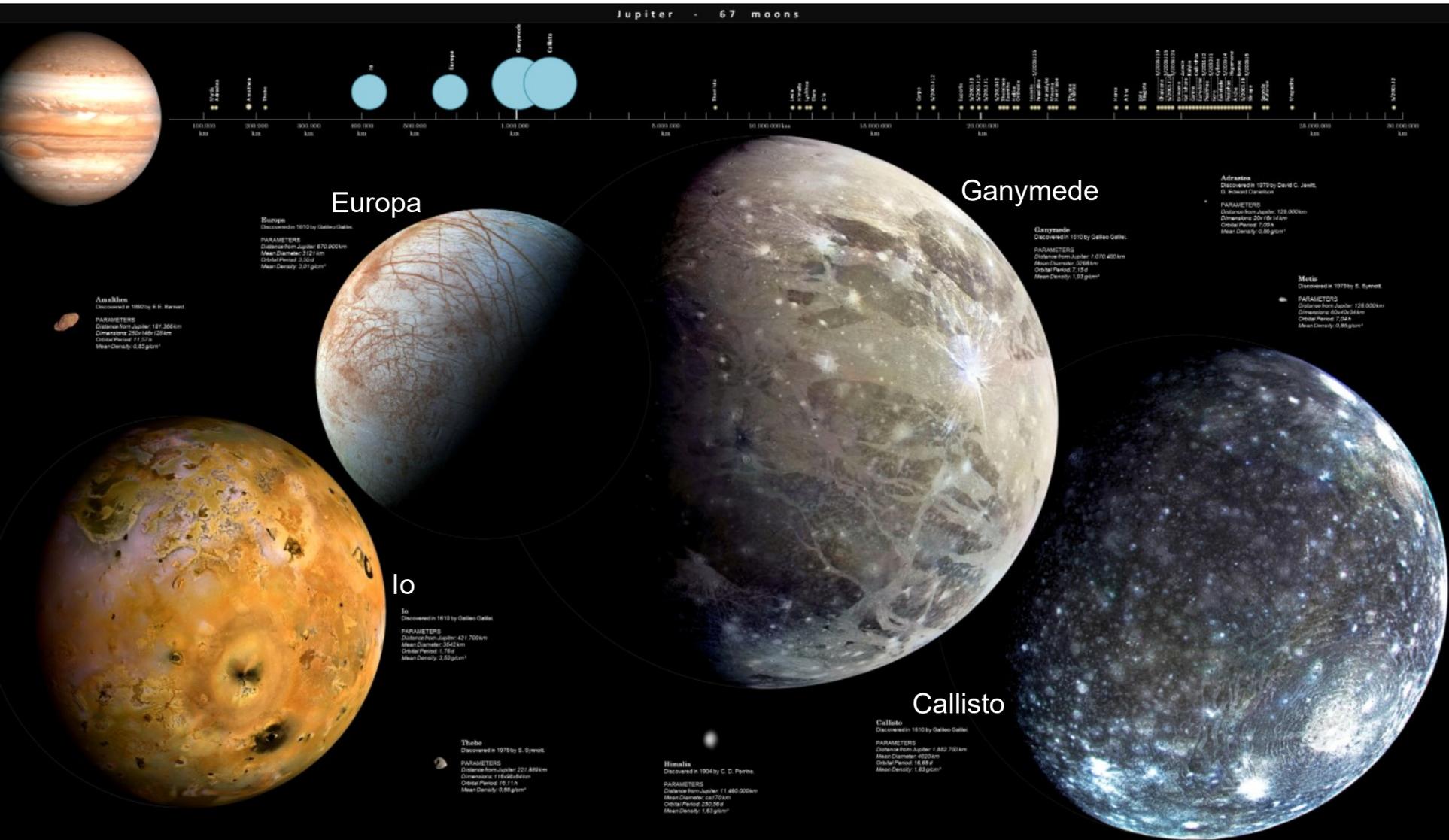


5. Limite de Roche $\sim 5600 \text{ km}$. Maré: Fobos ($P_{\text{rot}} < P_{\text{rot}}[\text{Marte}]$) desacelera e se aproxima. Deimos ganha energia e se afasta

Fobos está se aproximando de Marte (~ 2 cm/ano). Daqui a 25 a 50 Myr alcançará o limite de Roche \rightarrow rompimento da lua, espalhando restos em órbita ao redor de Marte \rightarrow anel



Satélites de Júpiter: 79 luas!



Lista das 18 luas mais internas de Júpiter

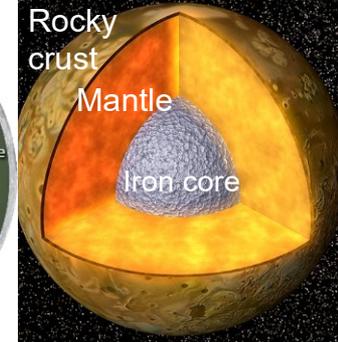
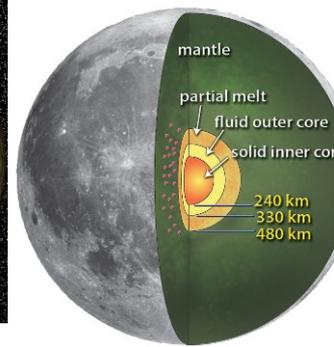
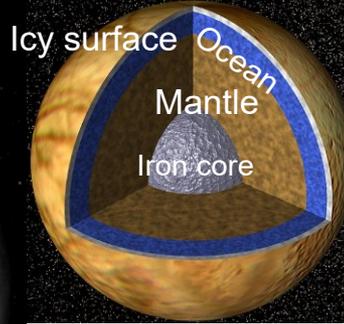
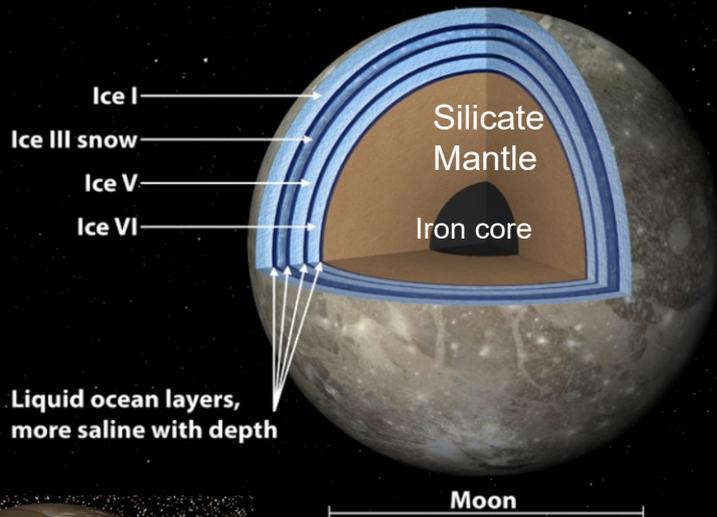
Ordem ^[nota 2]	Número ^[nota 3]	Nome	Imagem	Diâmetro (km) ^[nota 4]	Massa ($\times 10^{16}$ kg)	Eixo semi-maior (km) ^[37]	Período orbital (d) ^[37] ^[nota 5] ^[nota 6]	Inclinação (°) ^[37]	Excentricidade ^[32]	Descoberta ^[21]	Descobridor ^[21]	Grupo ^[nota 7]
1	XVI	Métis		60×40×34	~3,6	127 690	+7h 4m 29s	0,06° ^[38]	0,000 02	1979	Synnott (Voyager 1)	Amalteia
2	XV	Adrasteia		20×16×14	~0,2	128 690	+7h 9m 30s	0,03° ^[38]	0,001 5	1979	Jewitt (Voyager 2)	Amalteia
3	V	Amalteia		250×146×128	208	181 366	+11h 57m 23s	0,374° ^[38]	0,003 2	1892	Barnard	Amalteia
4	XIV	Tebe		116×98×84	~43	221 889	+16h 11m 17s	1,076° ^[38]	0,017 5	1979	Synnott (Voyager 1)	Amalteia
5	I	Io		3 660,0×3 637,4 ×3 630,6	8 900 000	421 700	+1,769 137 786	0,050° ^[38]	0,004 1	1610	Galilei	Galileu
6	II	Europa		3 121,6	4 800 000	671 034	+3,551 181 041	0,471° ^[38]	0,009 4	1610	Galilei	Galileu
7	III	Ganímedes		5 262,4	15 000 000	1 070 412	+7,154 552 96	0,204° ^[38]	0,001 1	1610	Galilei	Galileu
8	IV	Calisto		4 820,6	11 000 000	1 882 709	+16,689 018 4	0,205° ^[38]	0,007 4	1610	Galilei	Galileu
9	XVIII	Temisto		8	0,069	7 393 216	+129,87	45,762°	0,211 5	1975/2000	Kowal & Roemer/Sheppard et al.	Temisto
10	XIII	Leda		16	0,6	11 187 781	+241,75	27,562°	0,167 3	1974	Kowal ^[39]	Himalia
11	VI	Himalia		170	670	11 451 971	+250,37	30,486°	0,151 3	1904	Perrine	Himalia
12	X	Lisiteia		36	6,3	11 740 560	+259,89	27,006°	0,132 2	1938	Nicholson	Himalia
13	VII	Elara		86	87	11 778 034	+261,14	29,691°	0,194 8	1905	Perrine	Himalia
14	—	Dia		4	0,009 0	12 570 424	+287,93	27,584°	0,205 8	2001	Sheppard et al.	Himalia?
15	XLVI	Carpo		3	0,004 5	17 144 873	+458,62	56,001°	0,273 5	2003	Sheppard et al.	Carpo
16	—	S/2003 J 12		1	0,000 15	17 739 539	−482,69	142,680°	0,444 9	2003	Sheppard et al.	?
17	XXXIV	Euporia		2	0,001 5	19 088 434	−538,78	144,694°	0,096 0	2002	Sheppard et al.	Ananke
18	—	S/2003 J 3		2	0,001 5	19 621 780	−561,52	146,363°	0,250 7	2003	Sheppard et al.	Ananke

3 (as mais internas das 4) luas galileanas de Júpiter estão em ressonância orbital 1:2:4 entre si



Lua	diâm. km	massa kg	a km	período dias	razão lua/Io
Io	3660	$8,9 \times 10^{22}$	421800	1,769	1
Europa	3122	$4,8 \times 10^{22}$	671100	3,551	2
Ganímedes	5268	$1,5 \times 10^{23}$	1070400	7,151	4
Calisto	4821	$1,1 \times 10^{23}$	1882700	16,69	9,4

Ganymede



Europa, $\rho = 3,01$

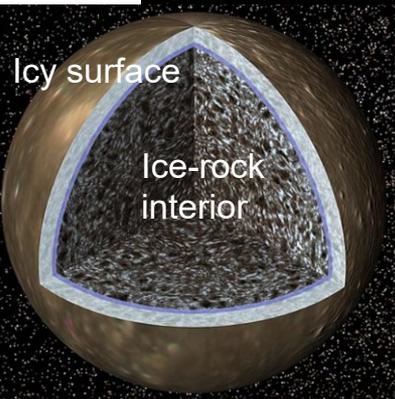
Moon, $\rho = 3,34$

Io, $\rho = 3,53$

corpos rochosos-gelados

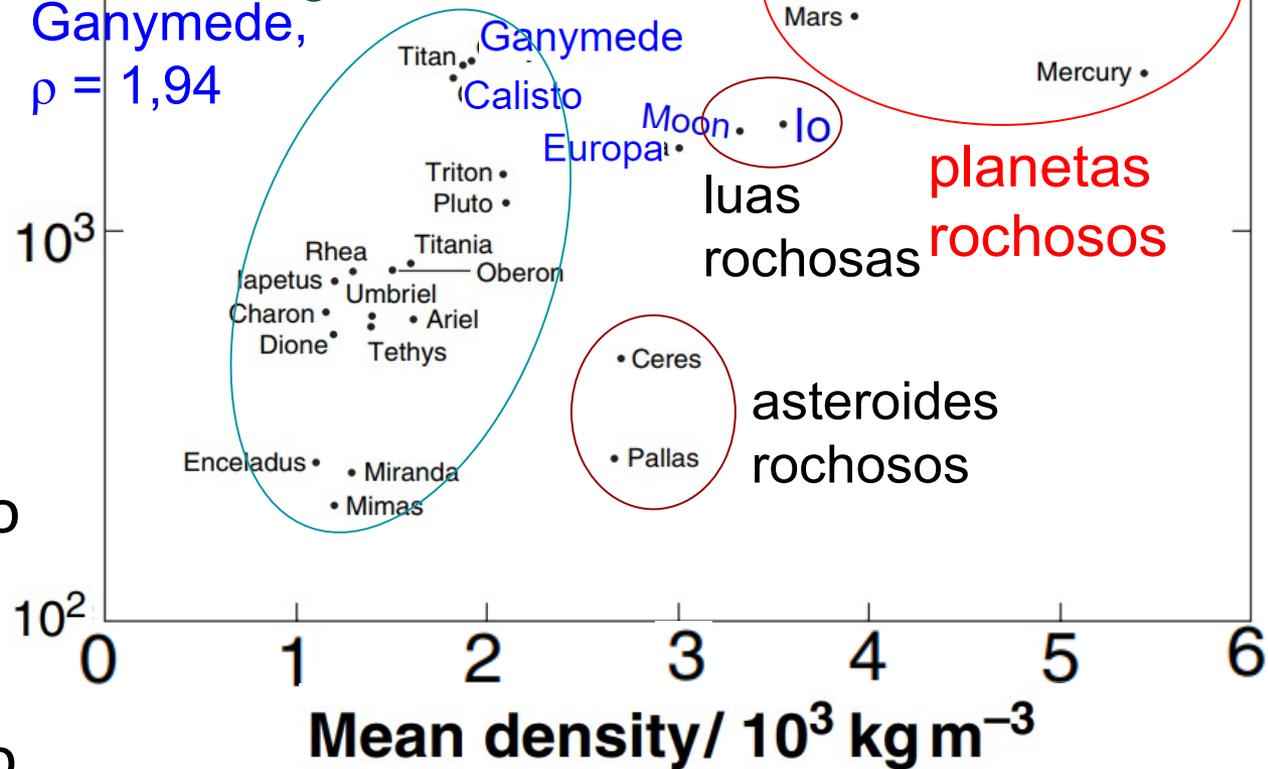
Radius/ km

Ganymede, $\rho = 1,94$

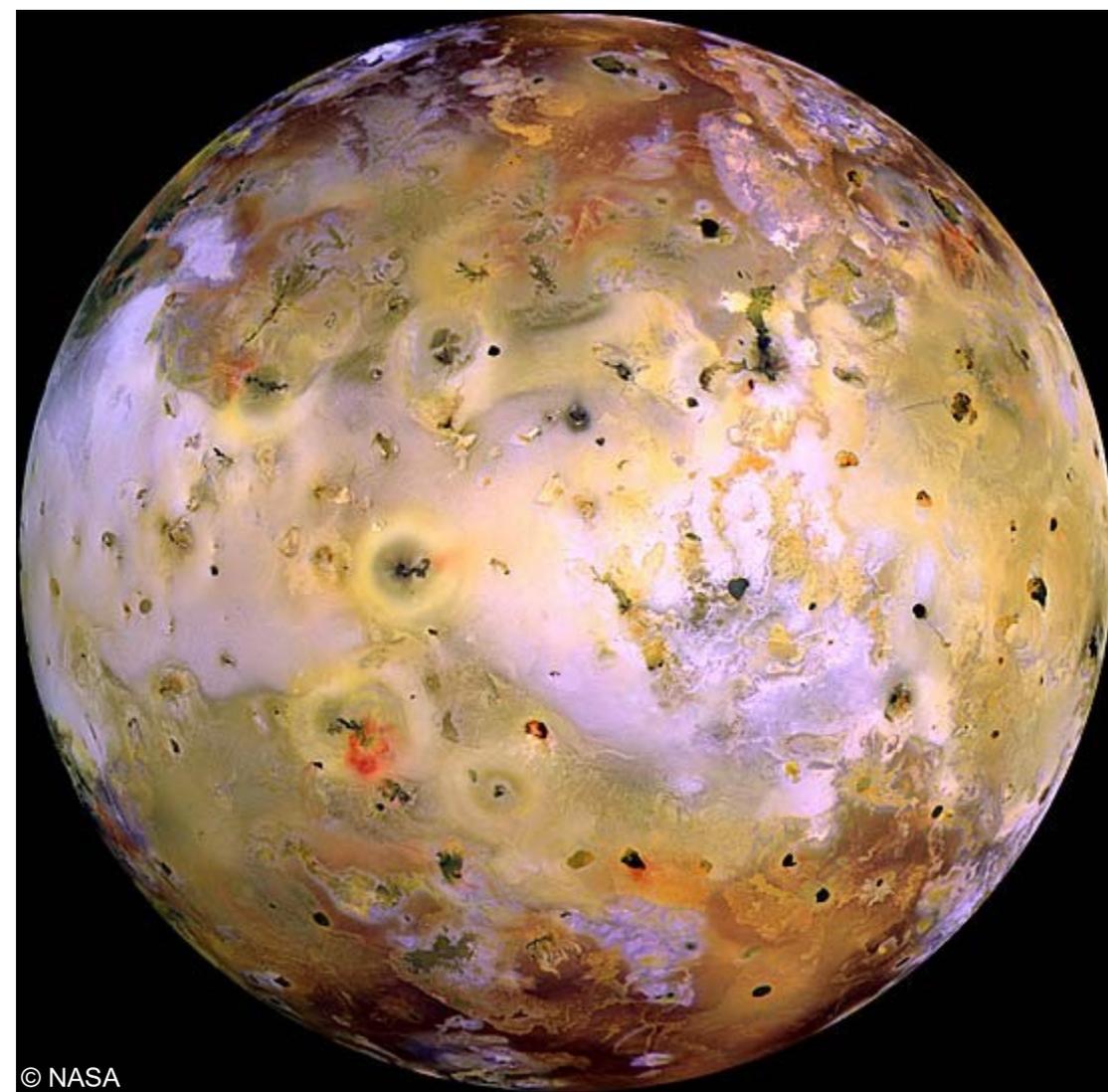


Calisto, $\rho = 1,83$

As luas galileanas são bem diferentes: Io é mais rochosa, já Calisto tem mais gelo



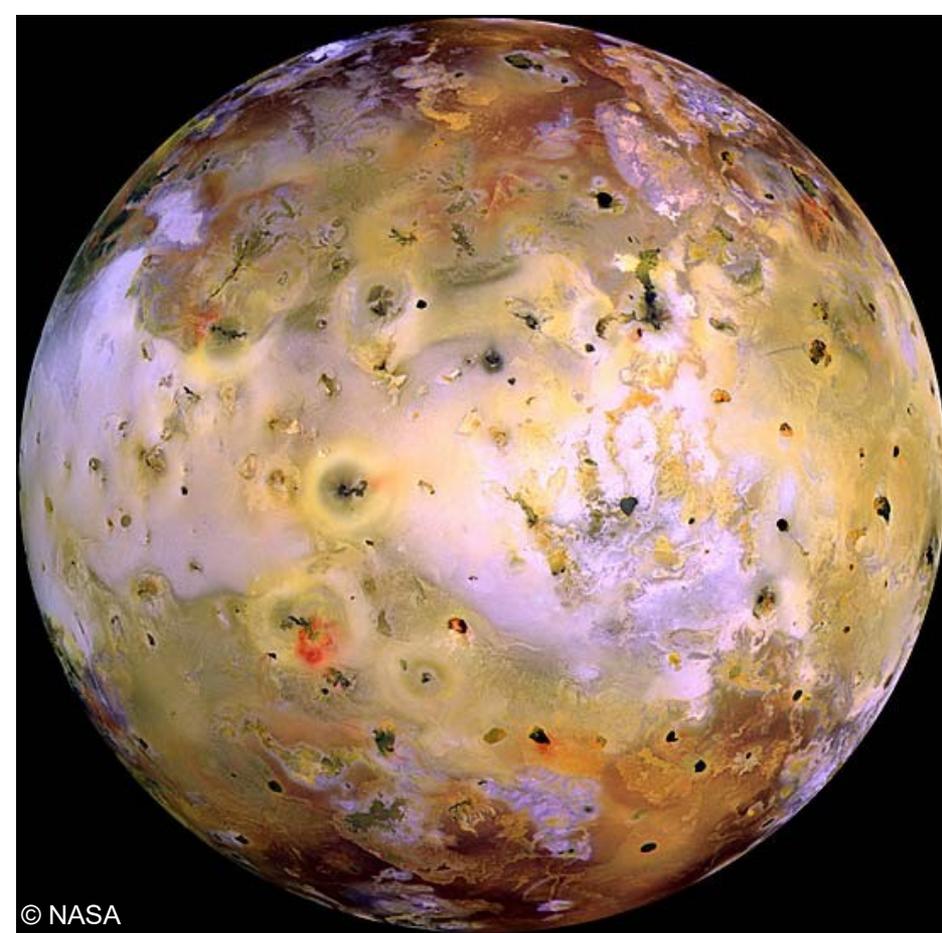
Io



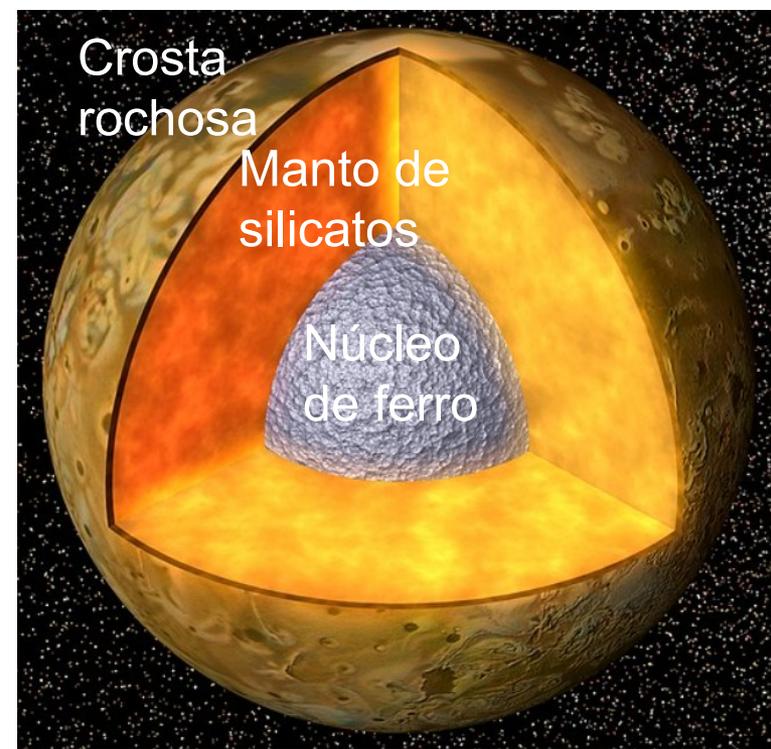
Superfície não apresenta crateras → deve ser jovem (< 1 Myr), ressurgida por atividade vulcânica.

Composição da superfície: silicatos e enxofre.

Superfície majormente plana, com regiões montanhosas de até 9 km de altura.

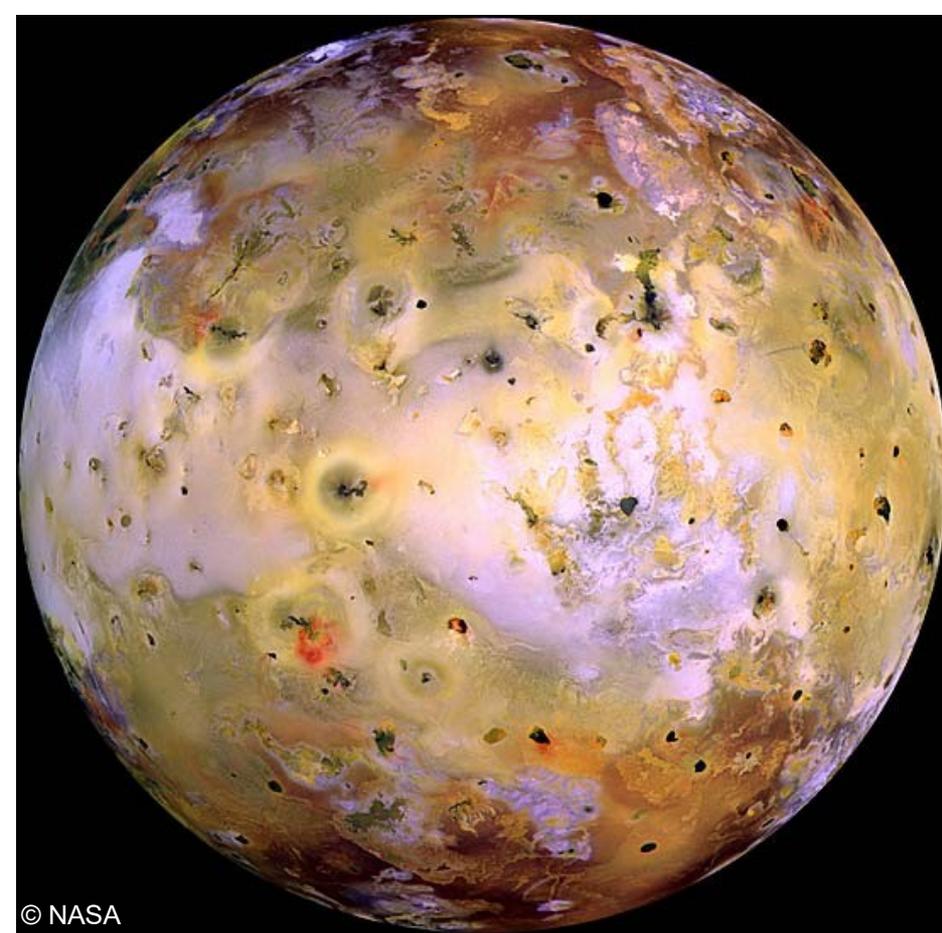


Io

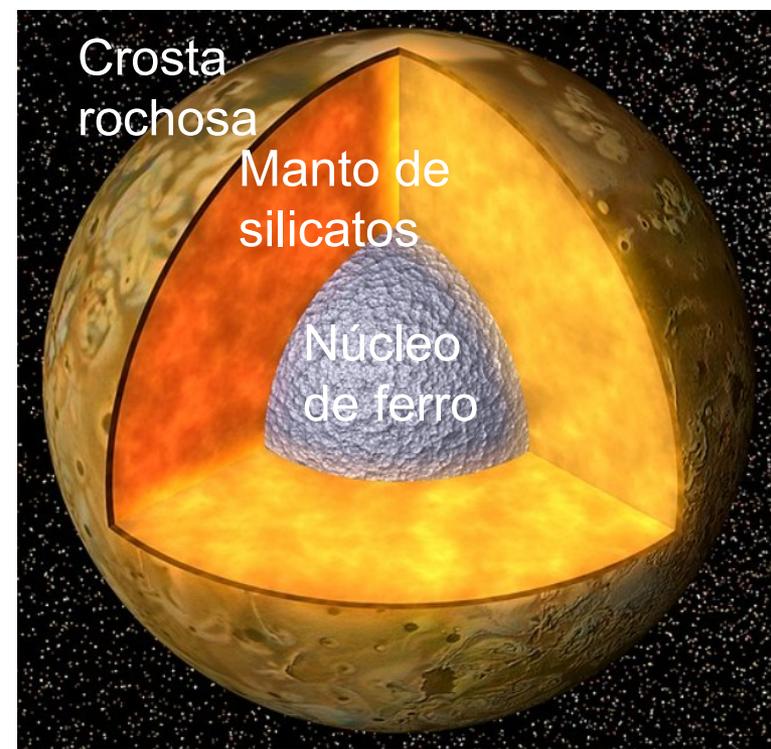


Lua	raio (km)	massa (kg)	densidade (g/cm ³)	<i>a</i> (km)	período orbital (dias)
Io	1830	8,9x10 ²²	3,53	421800	1,769

- Densidade é consistente com corpo rochoso e núcleo metálico



Io



Raio médio de Júpiter,

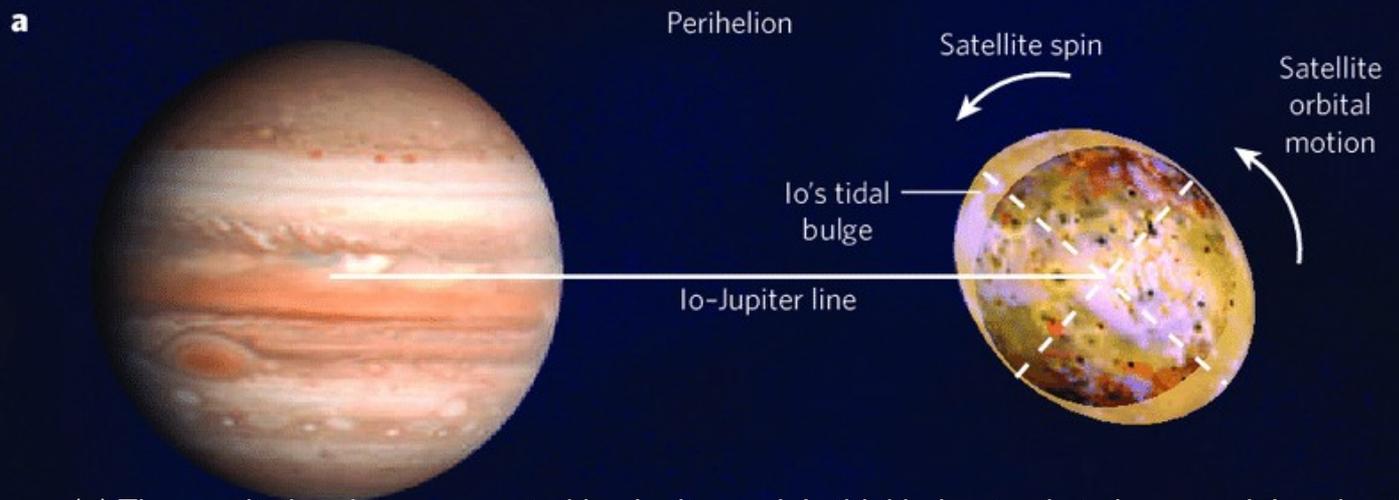
$$R_{\text{Jup}} = 69911 \text{ km} \rightarrow a \sim 6 R_{\text{Jup}}$$

Lua	raio (km)	massa (kg)	densidade (g/cm ³)	a (km)	período orbital (dias)
Io	1830	$8,9 \times 10^{22}$	3,53	421800	1,769 $P_{\text{rotação}} = P_{\text{orbital}}$

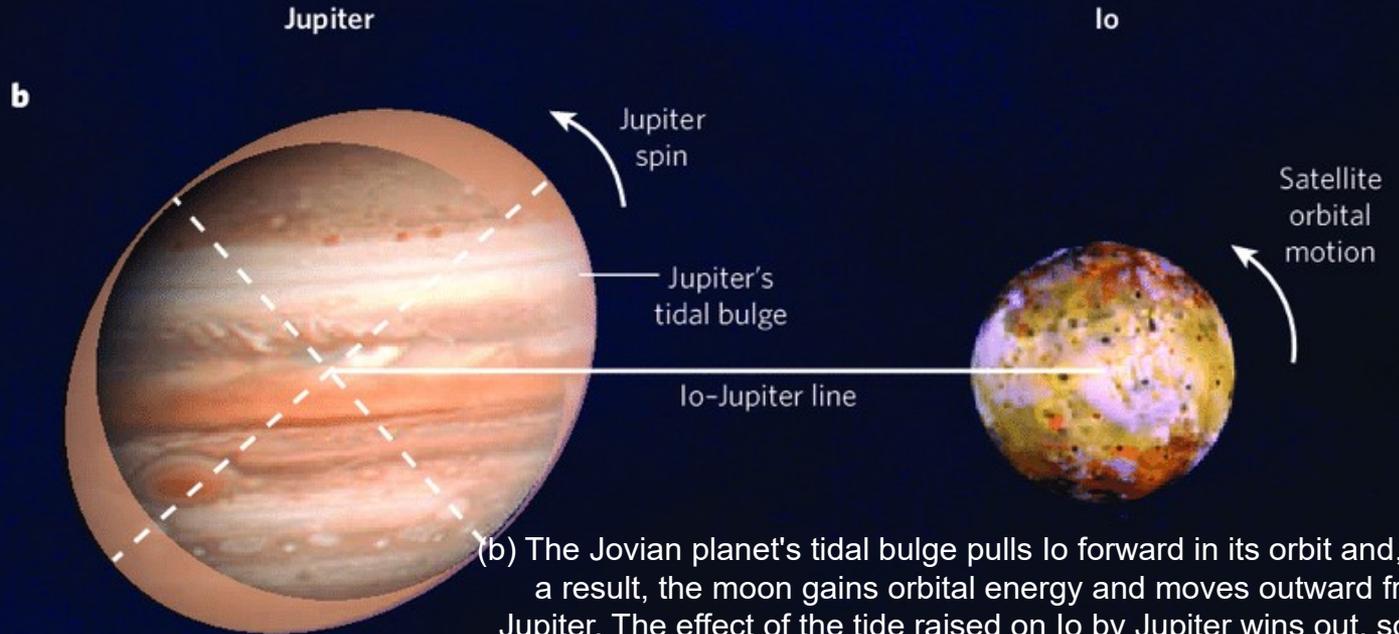
Lua a 6 vezes R_{Jup} \rightarrow importante maré

$$dF = \frac{2GMm}{r^3} R$$

Devido à excentricidade da órbita → variações na Maré. Também, maré de Europa e Ganymede induzem distorções → atrito interno → vulcanismo (lava) e gêiseres de dióxido de enxofre. Io é o corpo mais ativo do Sistema Solar.



(a) The gravitational torque exerted by Jupiter on Io's tidal bulge tends to increase Io's spin at the expense of its orbital energy, and forces Io to move inward.

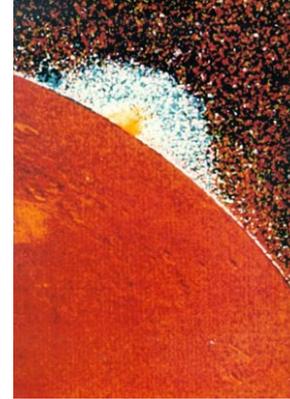


(b) The Jovian planet's tidal bulge pulls Io forward in its orbit and, as a result, the moon gains orbital energy and moves outward from Jupiter. The effect of the tide raised on Io by Jupiter wins out, so Io is moving in towards Jupiter

$$dF = \frac{2GMm}{r^3} R$$



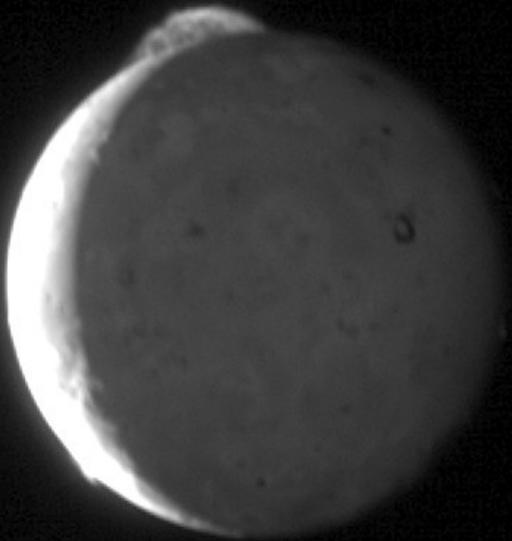
Imagem histórica do primeiro registro de erupções vulcânicas em Io, em 8/3/1979 pela Voyager 1. Uma erupção é visível no limbo e outra no terminador.



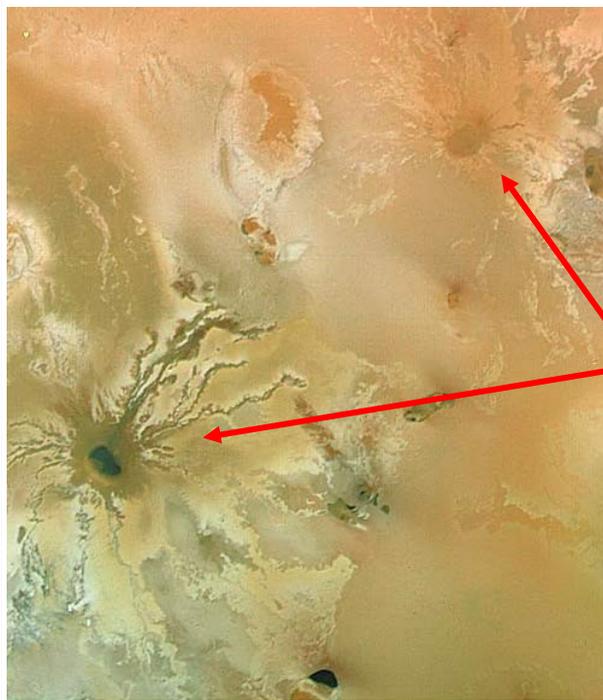
Pluma vulcânica em Io, observada pela sonda Voyager 1 /NASA em 5/4/1979.

Pluma vulcânica em Io, observada em 28/6/1997 pela New Horizons da NASA.





Pluma vulcânica de 330 km de altura em Io, observada pela sonda New Horizons da NASA em 1/3/2007. Animação usando 5 imagens no intervalo total de 8 minutos, mostrando erupção na região vulcânica de Tvashtar Paterae.

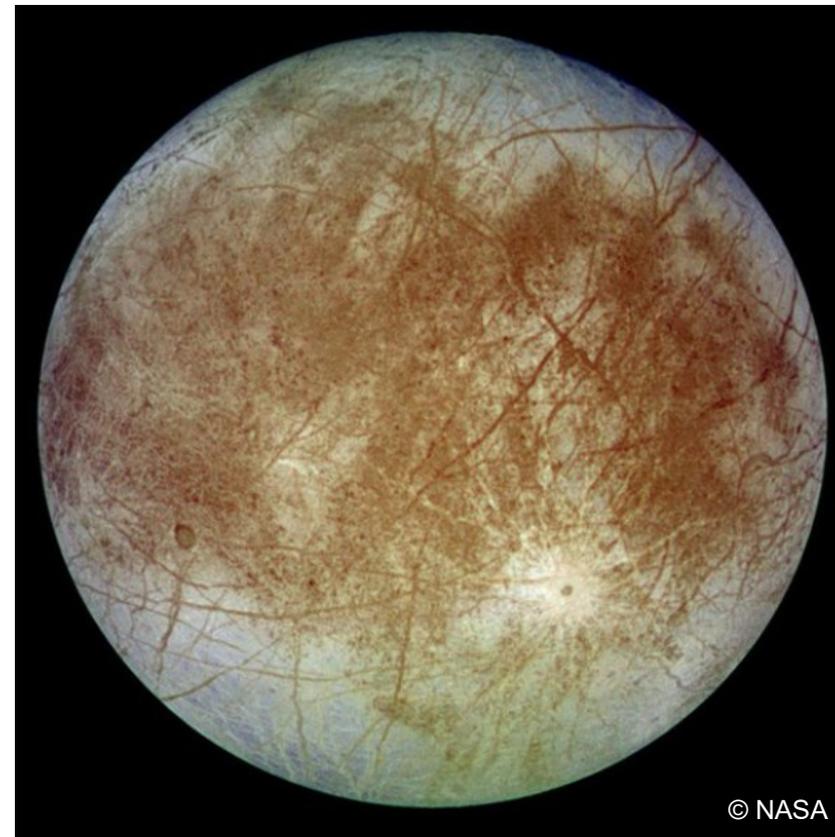
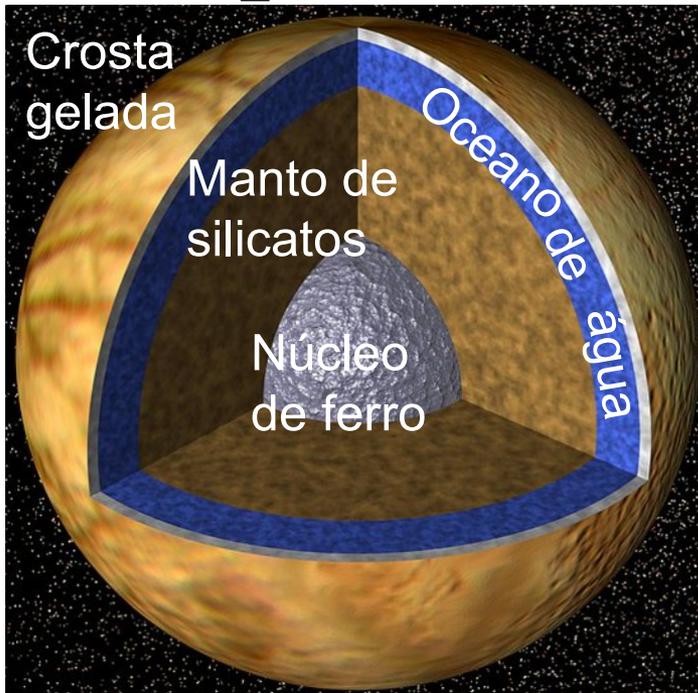


Calderas e fluxo de lava em Io.



Paterae são estruturas escuras de colapso vulcânico (como caldeiras), mas não estão no topo de cones ou escudos vulcânicos. Cada *patera* tem dezenas de km de diâmetro.

Europa



$\sim 9,5 R_{Jup}$

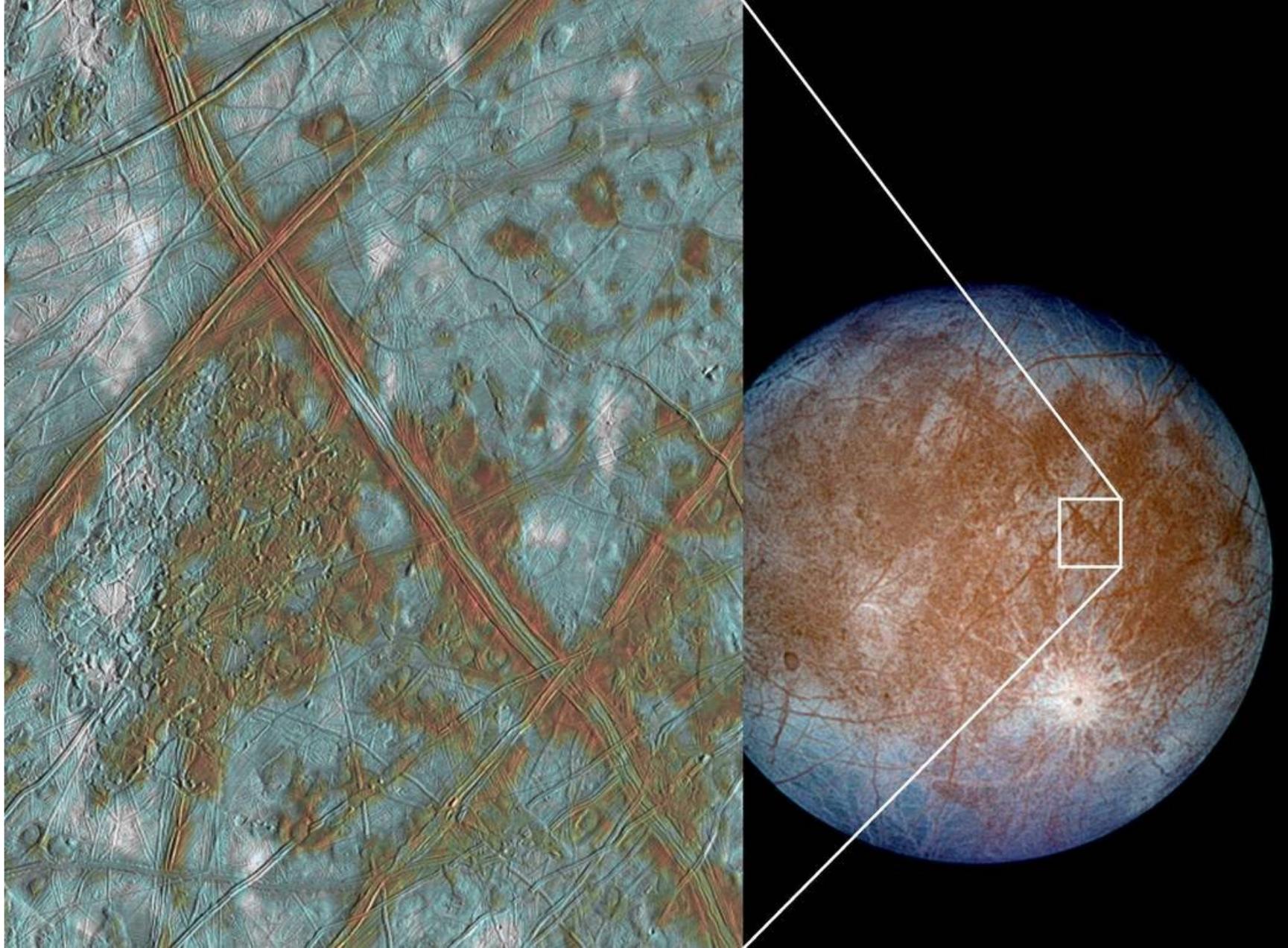
Lua	raio (km)	massa (kg)	densidade (g/cm ³)	a (km)	período orbital (dias)
Europa	1561	$4,8 \times 10^{22}$	3,01	671100	3,551

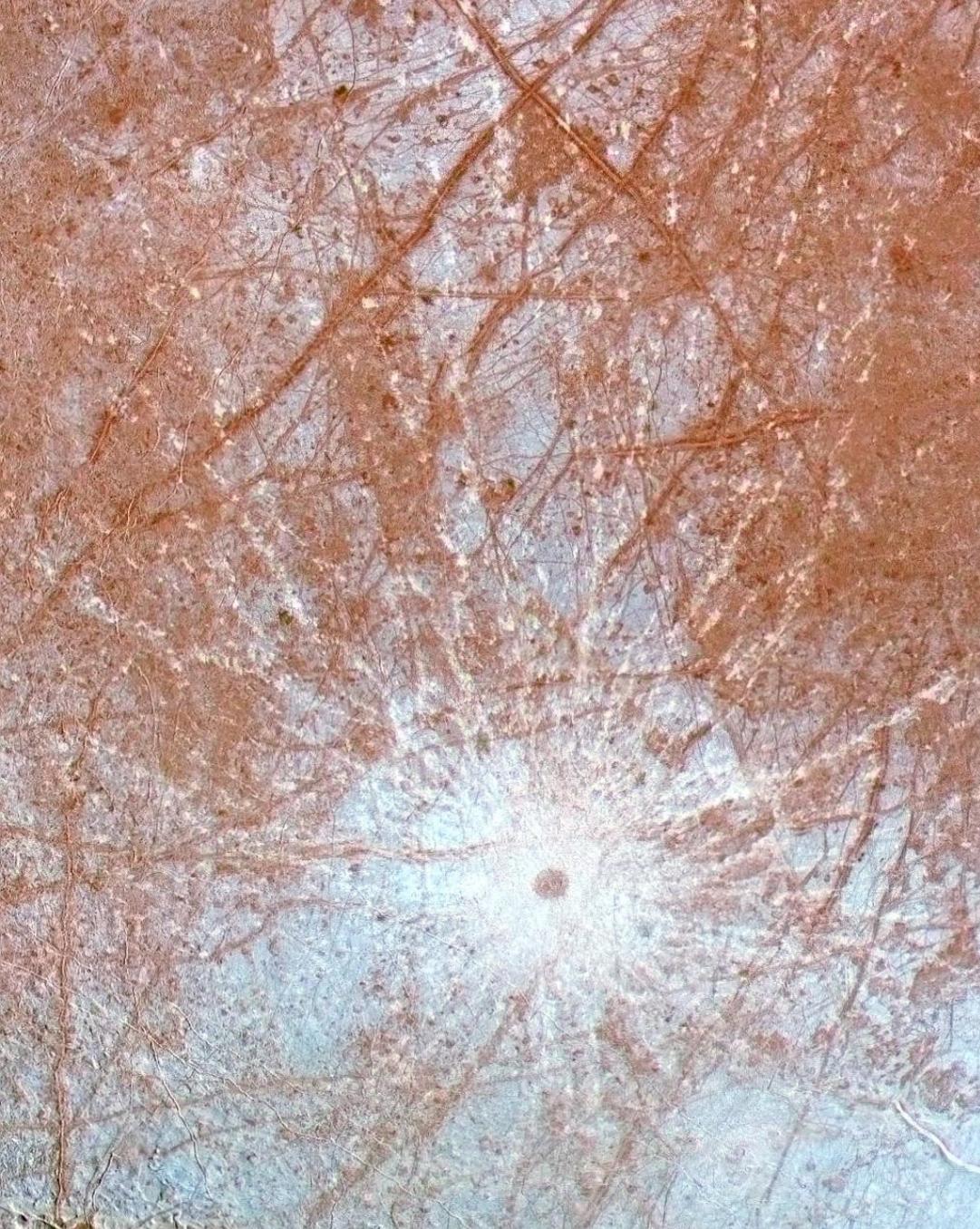
Europa possui a superfície mais lisa do Sistema Solar (relevos < 1 km), e quase sem crateras → superfície jovem (< 90Myr)

Europa não é completamente lisa, mas apresenta estrias longas e escuras devidas a cristas e fraturas na crosta, algumas com mais de 3000 km de comprimento.

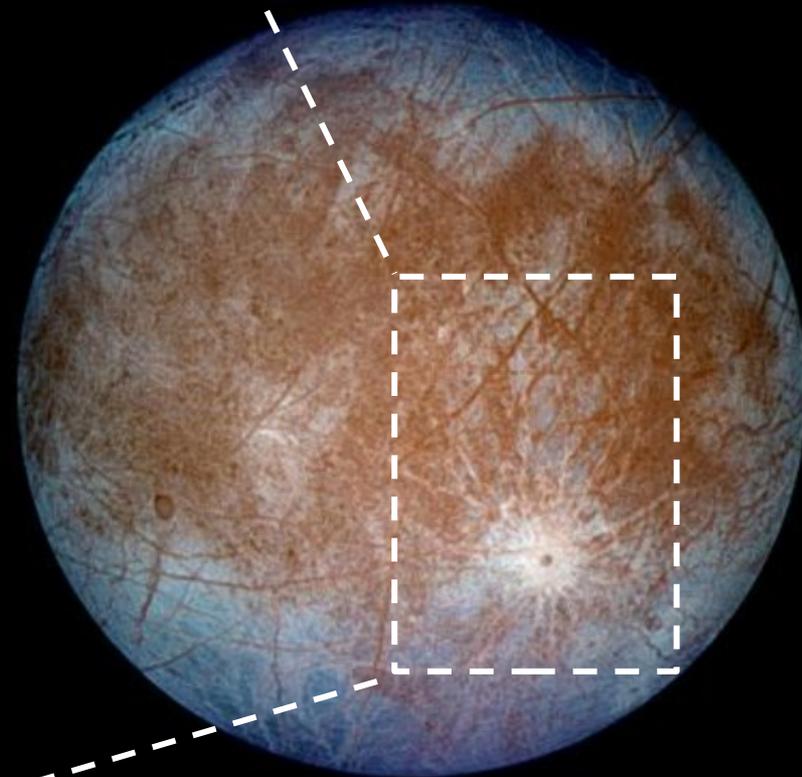
https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1339.html

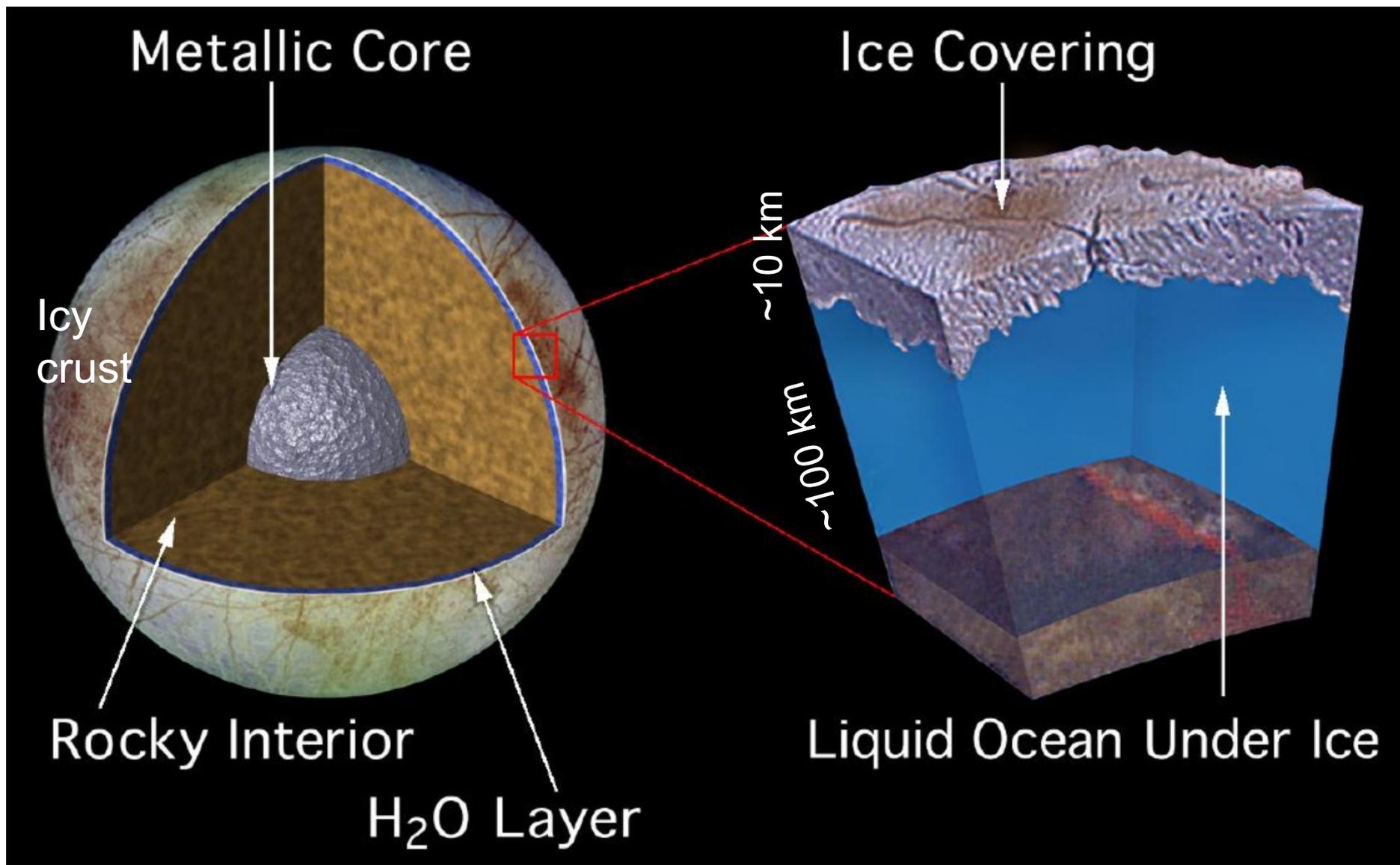
Gaillio, NASA, 1996-1997





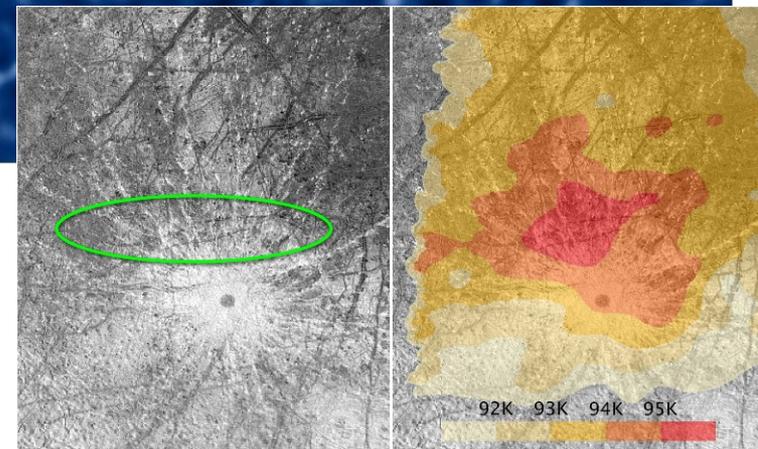
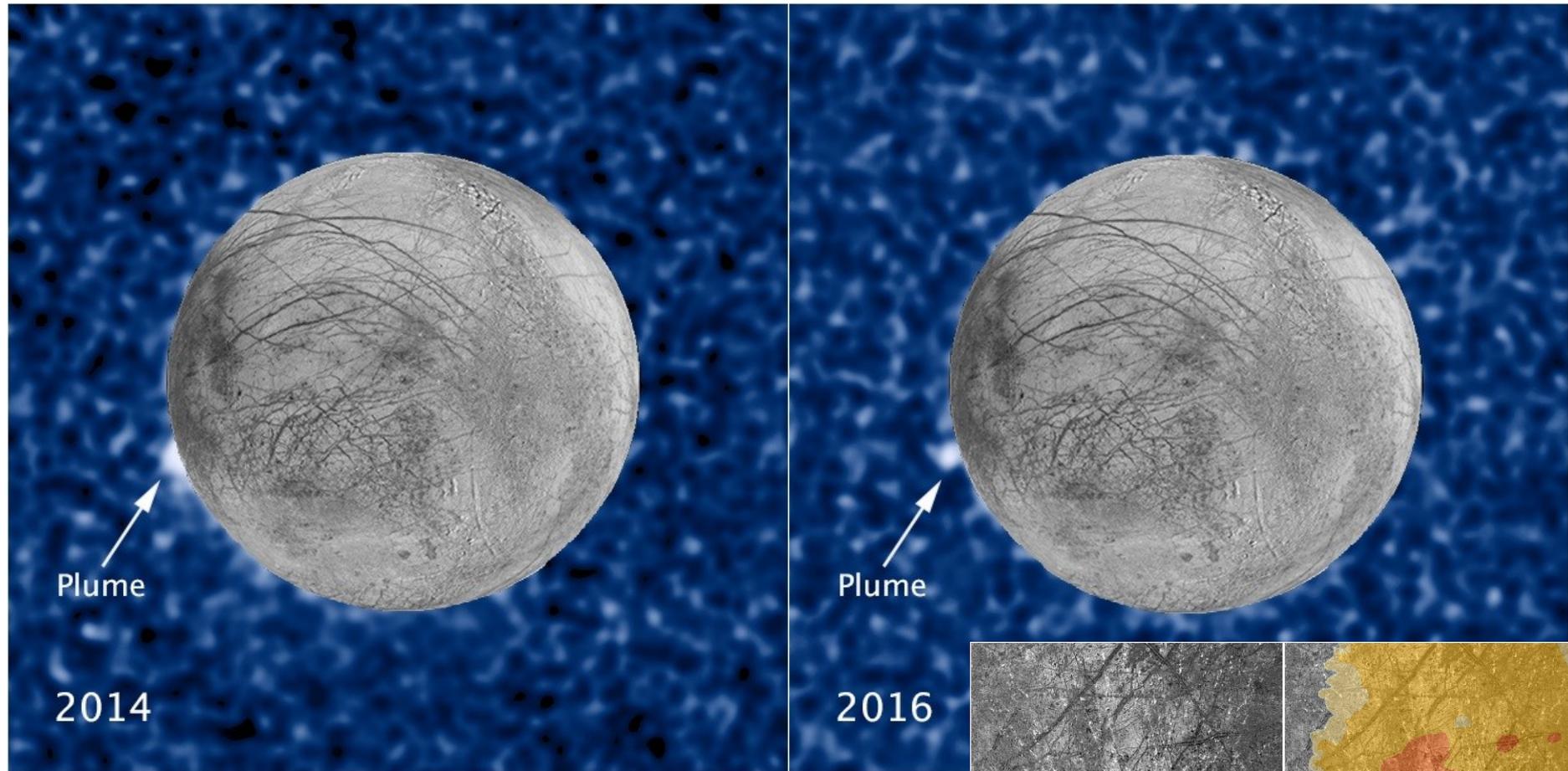
Europa apresenta algumas poucas crateras, como Pwyll (diâmetro = 25 km). A mancha escura central (pelo material ejetado sob superfície de Europa), tem ~40 km. Raios claros brilhantes se estendem > 1000 km em todas as direções





Existe vida no oceano de Europa?

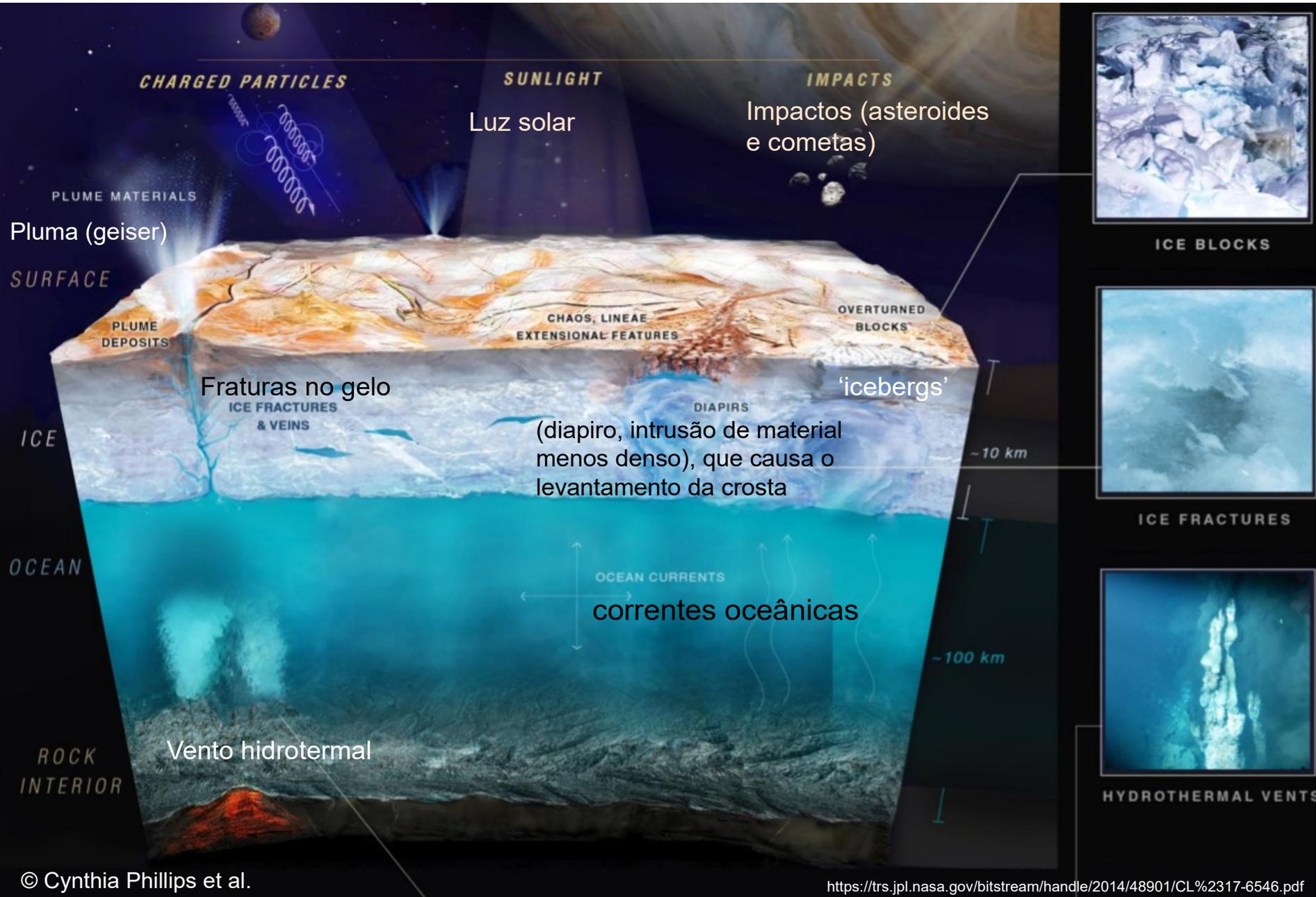
Gigantescas plumas (50 a 100 km) devidas a gêiseres em Europa, observados em luz UV, na mesma posição, pelo Hubble



<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-missions-provide-new-insights-into-ocean-worlds-in-our-solar-system>

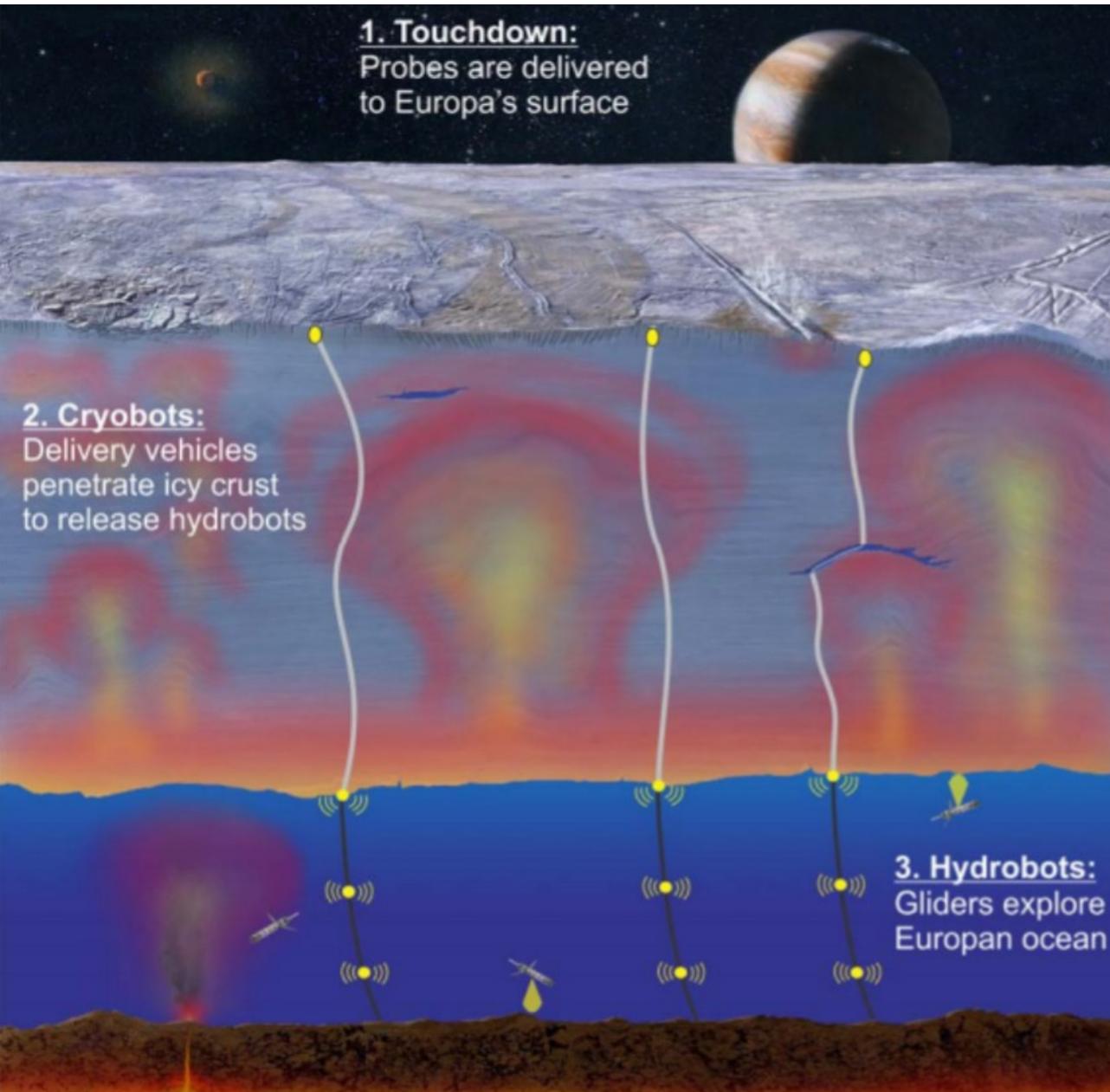
O oval verde marca a região onde o Hubble observou as plumas. Essa área corresponde a uma região quente na superfície de Europa. Mapas da sonda

Atividade em Europa, talvez pela energia de torção das marés.



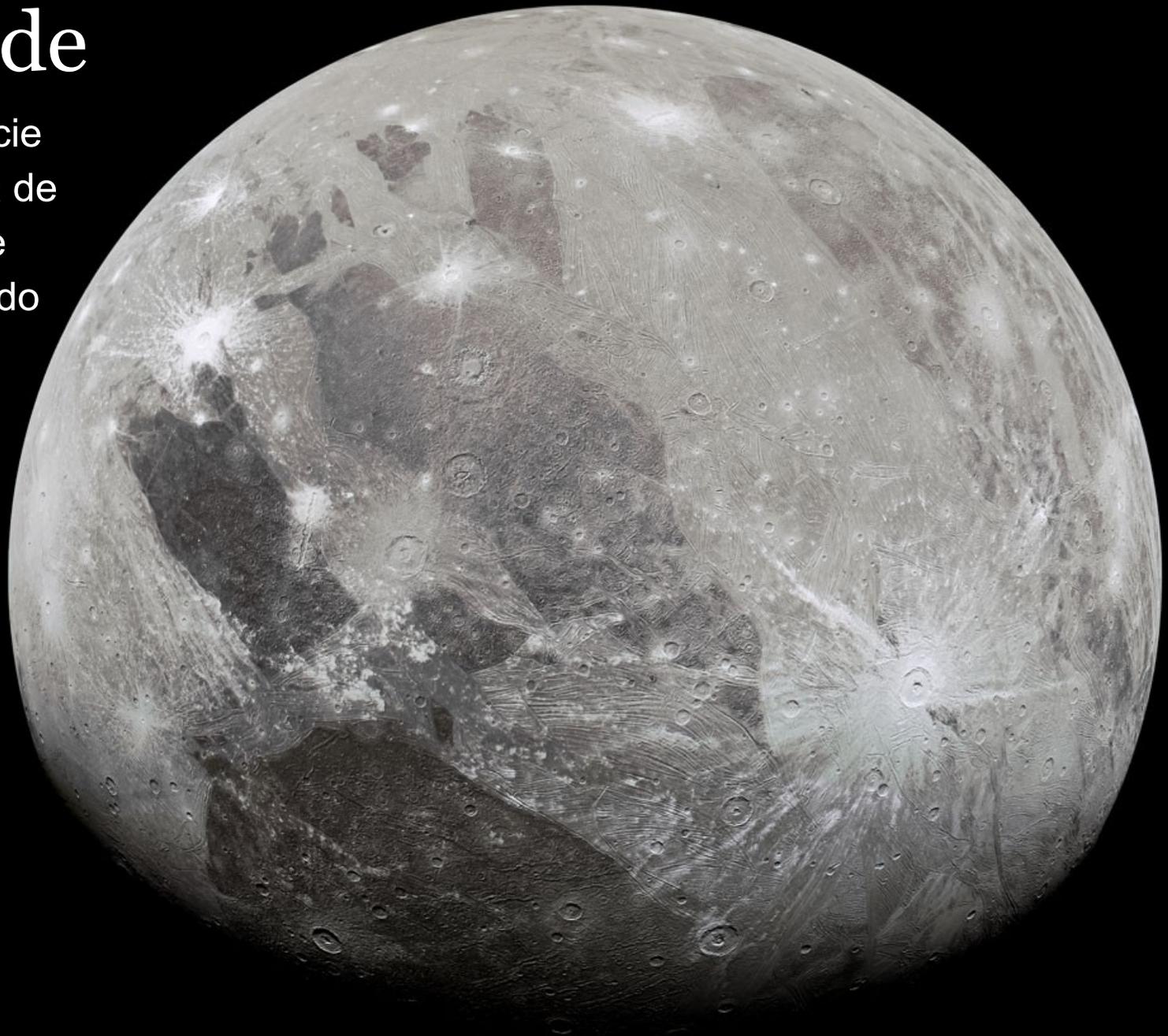
É importante explorar o oceano de Europa, mas existem diversos desafios.

Por exemplo, como penetrar 10 km da crosta gelada?

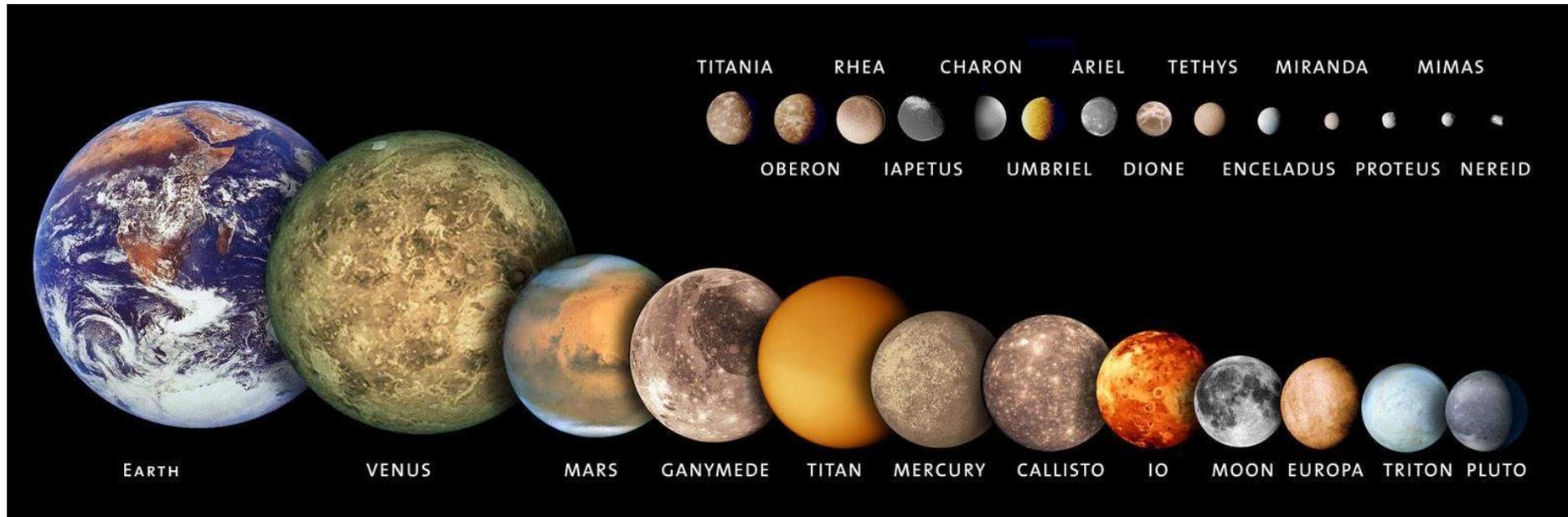


Ganymede

tem uma superfície gelada salpicada de crateras jovens e brilhantes cobrindo uma mistura de terreno mais antigo, mais escuro, e com sulcos, cristas e crateras.



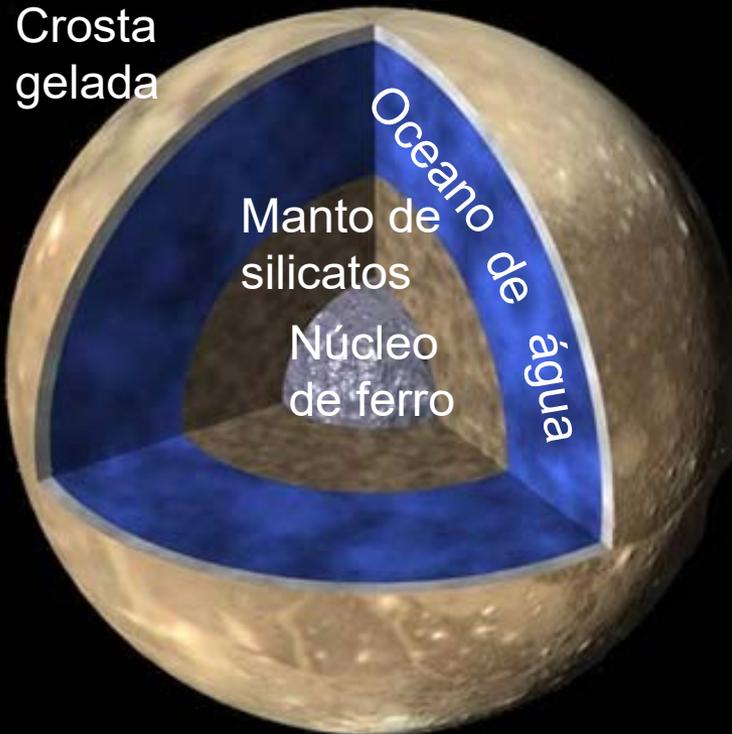
Ganímedes é a maior Lua do Sistema Solar. É até maior que Mercúrio



26 maiores planetas rochosos e luas do Sistema Solar

Lua	diâm. (km)	massa (kg)	densidade (g/cm ³)	<i>a</i> (km)	período (dias)	razão lua/Ío
Ío	3660	8,9x10 ²²	3,53	421800	1,769	1
Europa	3122	4,8x10 ²²	3,01	671100	3,551	2
Ganímedes	5268	1,5x10 ²³	1,94	1070400	7,151	4
Calisto	4821	1,1x10 ²³	1,83	1882700	16,69	9,4

Ganímedes tem menor densidade ($1,94 \text{ g/cm}^3$) que Io ($3,53$) e Europa ($3,01$), pois tem mais água e gelo



Camadas alternantes de gelo e oceanos de água salgada.

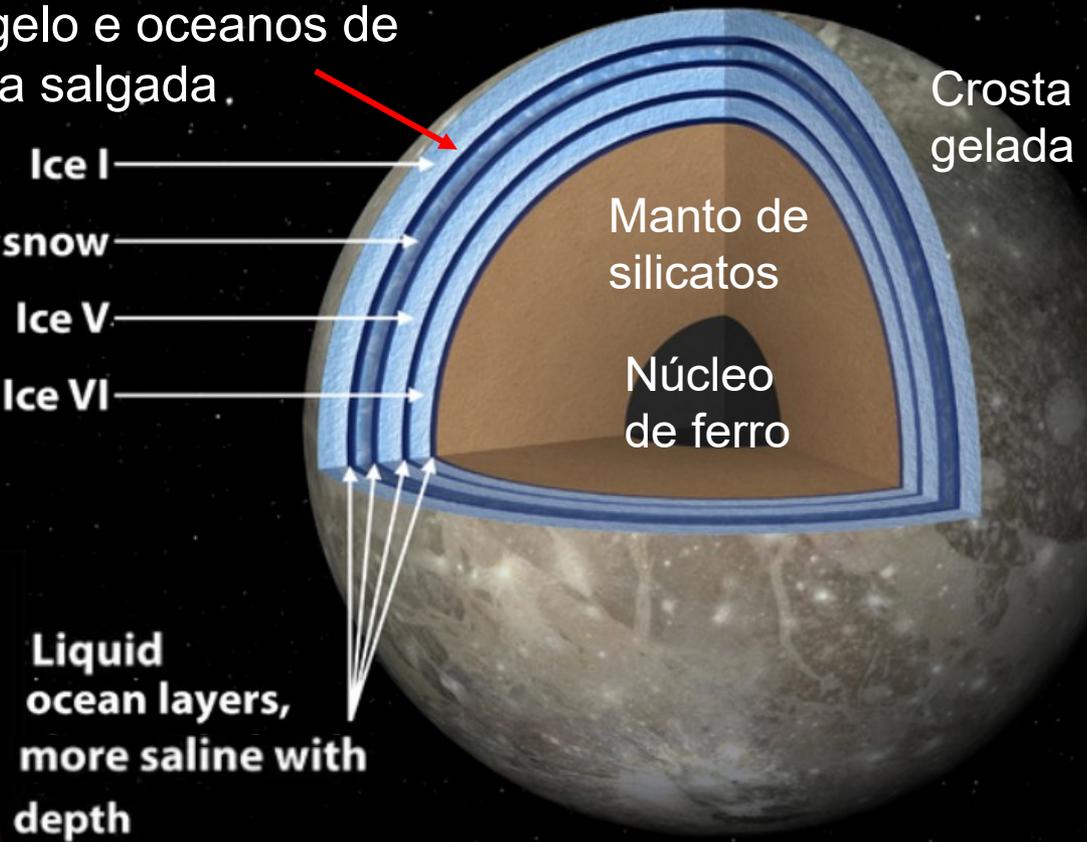
Ice I

Ice III snow

Ice V

Ice VI

Ganímede

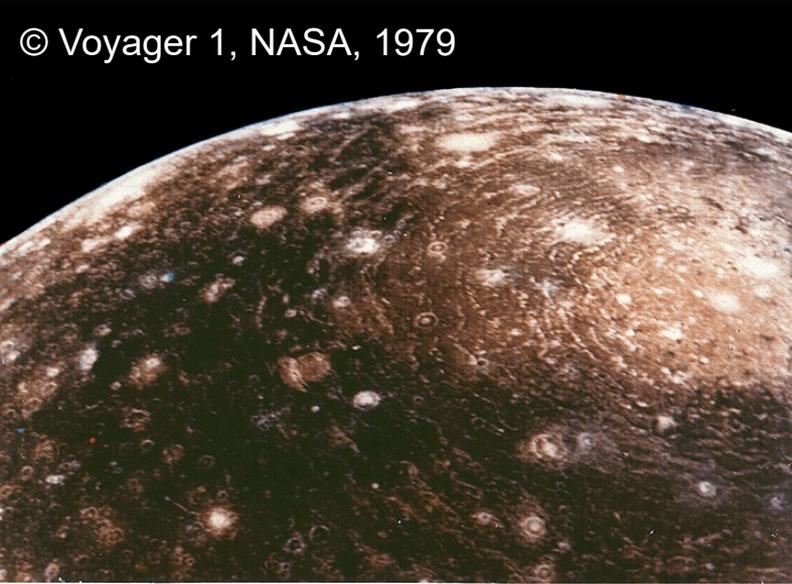


Moon

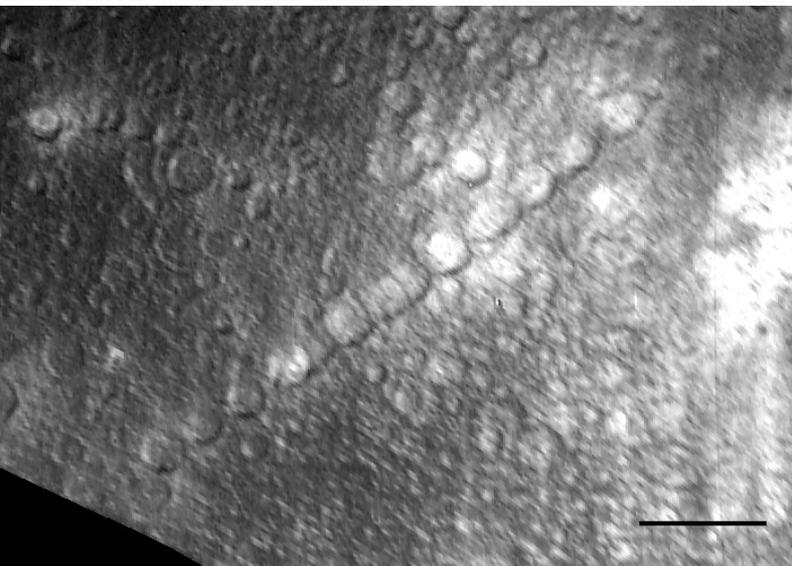
<https://www.jpl.nasa.gov/images/possible-moonwich-of-ice-and-oceans-on-ganymede-artists-concept>

Calisto é o objeto mais craterado do Sistema Solar

© Voyager 1, NASA, 1979



https://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/vg1_p21287.html



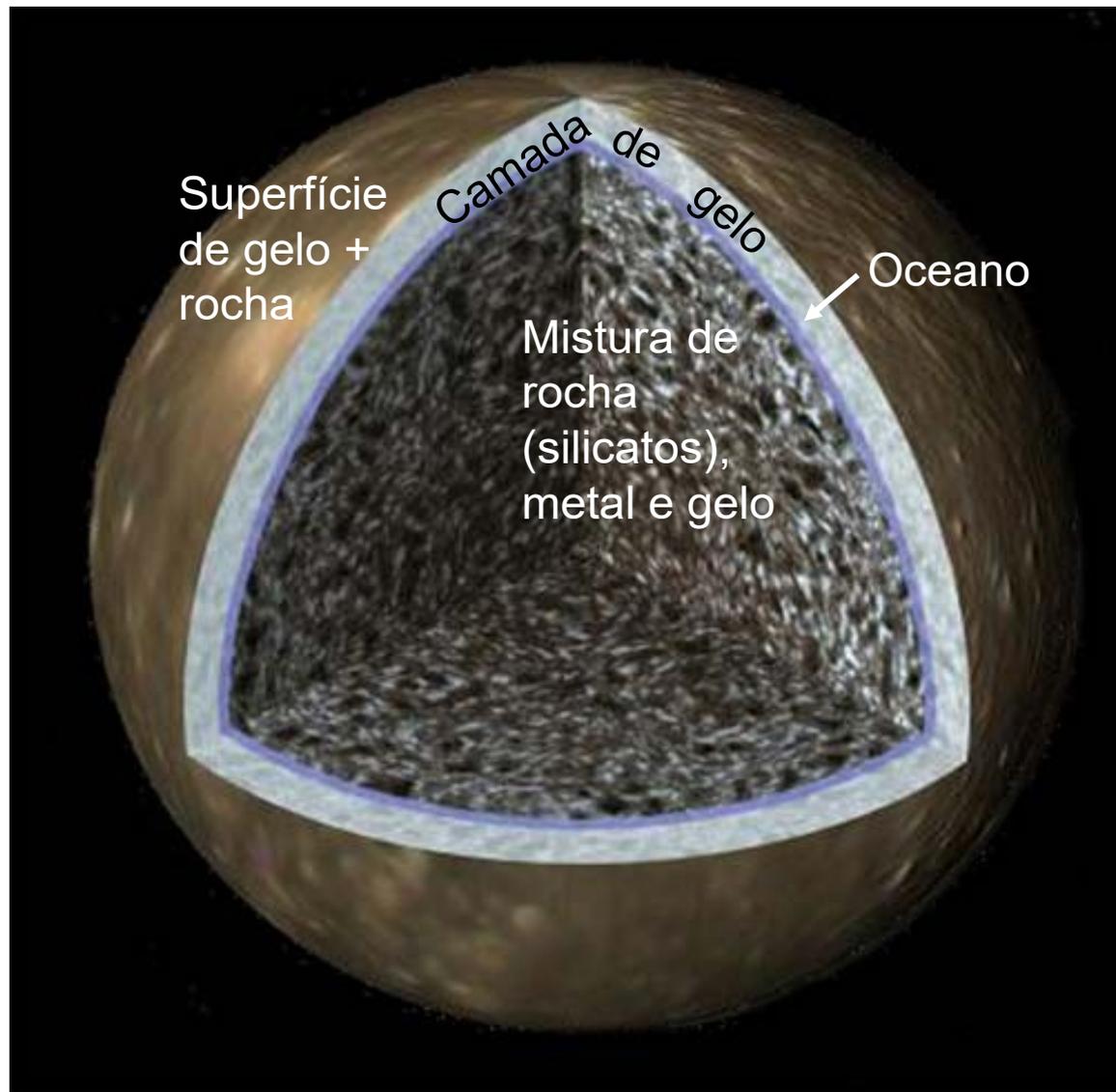
© Sonda Galileo, NASA, 5/2001

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03456>

Cadeia de crateras formada pelo impacto de cometa rompido por forças de maré. A cadeia tem ~620 km de comprimento, com crateras de até 40 km de diâmetro (barra de escala = 100 km). Região de Gipul Catena está localizada próxima ao pólo N. de Calisto.

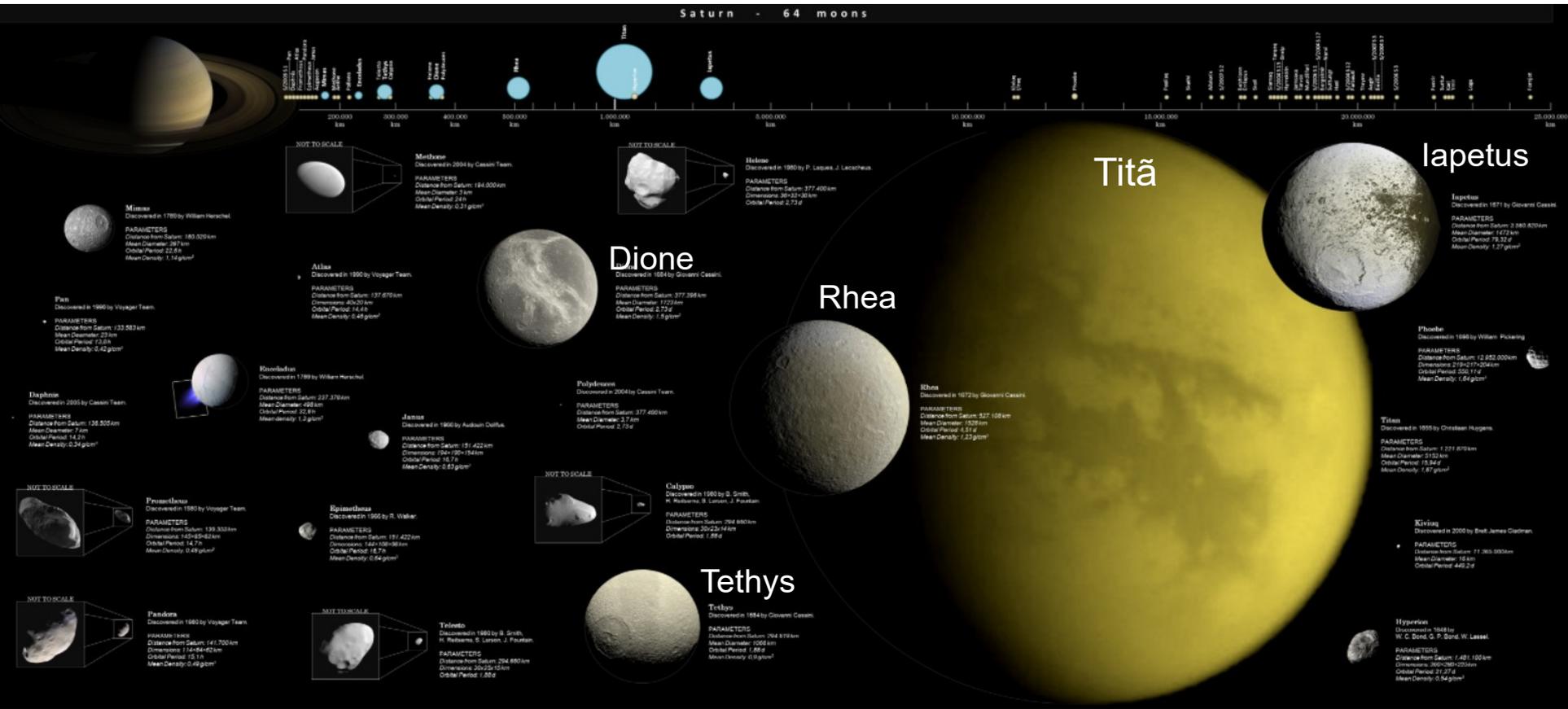
Calisto tem densidade ($1,83 \text{ g/cm}^3$) similar à de Ganímedes ($1,94$), devido à importante fração de gelos no seu interior. Talvez possui um oceano de água líquida.

A superfície é composta de gelo de água e regiões com mistura de rocha e gelo.



<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01478>

Satélites de Saturno: 82 luas!



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Small_bodies_of_the_Solar_System.jpg

Lista de 82 luas de Saturno

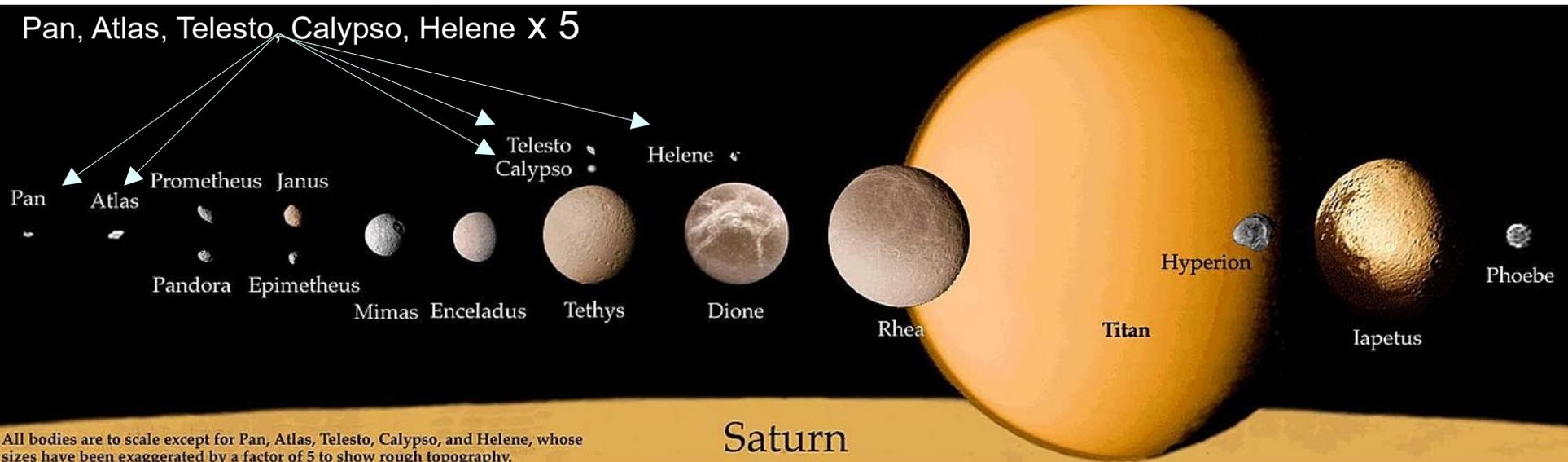
https://pt.wikipedia.org/wiki/Sat%C3%A9lites_de_Saturno

Ordem ^[34]	N.º ^[35]	Nome	Imagem	Diâmetro (km) ^[36]	Massa (10 ¹⁸ kg) ^[37]	Semieixo maior (km) ^[38]	Período orbital (j) ^[39]	Inclinação (°) ^[40]	Exc. ^[41]	Posição	Ano desc. ^[42]	Descobridor
1		S/2009 S 1		≈ 0,3	< 0,0000001	≈ 117 000	0,4715	≈ 0°	≈ 0	Anel Externo B	2009	Cassini-Huygens
2	XVIII	Pã		28,4 ± 2,6 (35×32×21)	0,00495 ± 0,00075	133 583	+0,5750	0,0°	0,0000	Divisão de Encke	1990	Mark Showalter
3	XXXV	Dafne		7,8 ± 1,6 (9×8×6)	0,000084 ± 0,000012	136 500	+0,594	0,0°	0,000	Brecha de Keeler	2005	Cassini-Huygens
4	XV	Atlas		30,2 ± 2,8 (42×36×18)	0,0066 ± 0,0006	137 670	+0,6019	0,003°	0,0012	Anel A (pastora externa)	1980	<i>Voyager 2</i>
5	XVI	Prometeu		86,2 ± 5,4 (133×79×61)	0,1566 ± 0,0020	139 353	+0,6130	0,008°	0,0022	Anel F (pastora interna)	1980	<i>Voyager 2</i>
6	XVII	Pandora		80,6 ± 4,4 (103×80×64)	0,1356 ± 0,0023	141 700	+0,6285	0,050°	0,0042	Anel F (pastora externa)	1980	<i>Voyager 2</i>
6a	XI	Epimeteu		113,4 ± 3,8 (116×117×106)	0,5307 ± 0,0014	151 410	+0,6942	0,351°	0,0098	Compartilha a órbita de Jano	1977	J. Fountain and S. Larson
6b	X	Jano		179,2 ± 4 (195×194×152)	1,8891 ± 0,005	151 460	+0,6945	0,163°	0,0068	Compartilha a órbita de Epimeteu	1966	A. Dollfus
9	LIII	Aegaeon		≈ 0,66	~0,0000001	167 500	+0,8081	0,001°	0,0002	No anel G	2008	Cassini-Huygens
10	I	†Mimas		396,4 ± 1,0 (415×394×381)	37,493 ± 0,031	185 520	+0,9424218	1,53°	0,0202		1789	W. Herschel
14	II	†Encélado		504,2 ± 0,4 (513×503×497)	108,022 ± 0,101	238 020	+1,370218	0,00°	0,0045	Anel E	1789	W. Herschel
22	VI	♁Titã		5 151 ± 4	134 520 ± 20	1 221 830	+15,945421	0,33°	0,0292		1655	C. Huygens
23	VII	†Hipérion		266 ± 16 (328×260×214)	5,584 ± 0,068	1 481 100	+21,276609	0,43°	0,1042	III ressonância orbital 3:4 com Titã	1848	W. Bond G. Bond W. Lassell

Arte mostrando as luas e anéis de Saturno. © NASA

Tamanhos em escala, exceto

Pan, Atlas, Telesto, Calypso, Helene X 5

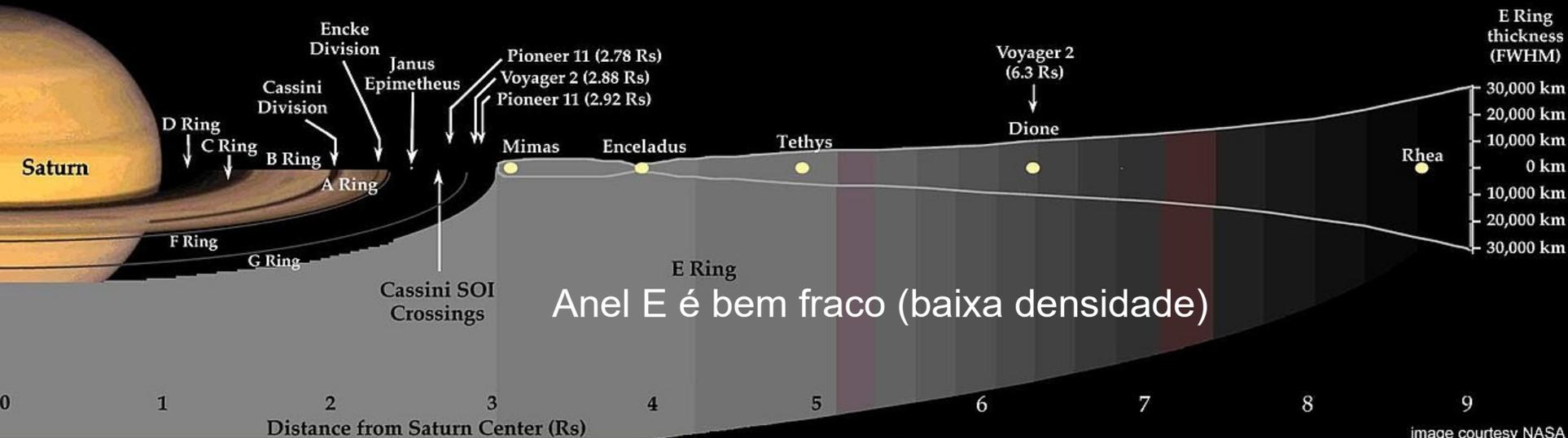


All bodies are to scale except for Pan, Atlas, Telesto, Calypso, and Helene, whose sizes have been exaggerated by a factor of 5 to show rough topography.

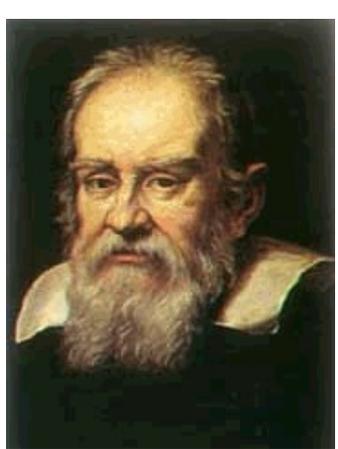
Anéis A e B são mais brilhantes

Not shown:

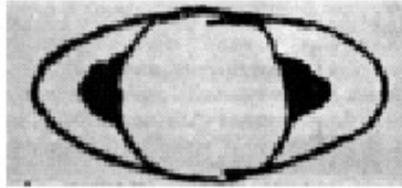
Pan	2.22 Rs	Titan	20.3 Rs
Atlas	2.28 Rs	Hyperion	24.6 Rs
Prometheus	2.31 Rs	Iapetus	59.1 Rs
Pandora	2.35 Rs	Phoebe	214.9 Rs



Anel E é bem fraco (baixa densidade)



Galileo (1610): Saturno e 2 luas?



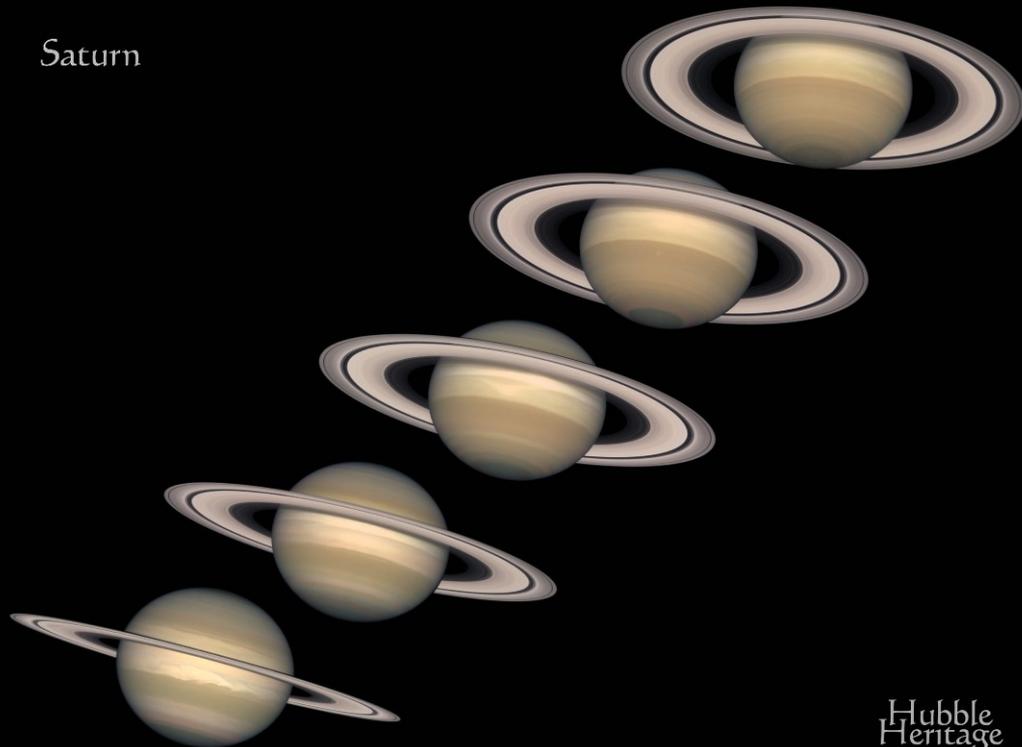
Galileo (1612): Saturno sem luas?

Galileo (1616): Saturno e 'braços'?

Christiaan Huygens (1659): Saturno tem anéis!

Descobriu a lua Titã.

Saturn

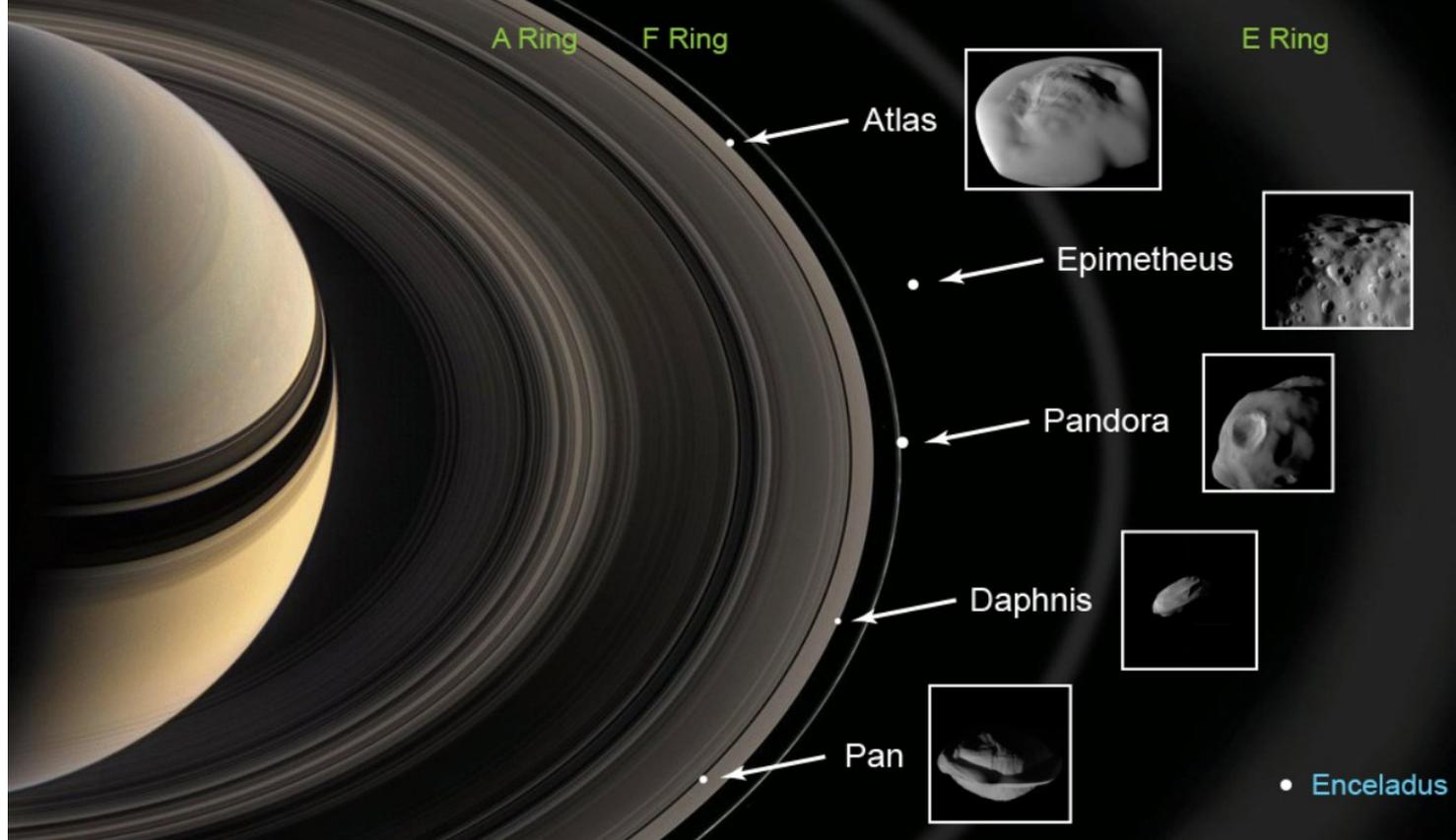


Jean- Dominique Cassini (1675): descobriu 4 outras luas de Saturno e uma divisão entre os anéis A (mais externo) e B (mais interno)

Hubble
Heritage

Arte mostrando os anéis e luas de Saturno

© NASA



<https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-cassini-finds-saturns-rings-coat-tiny-moons>

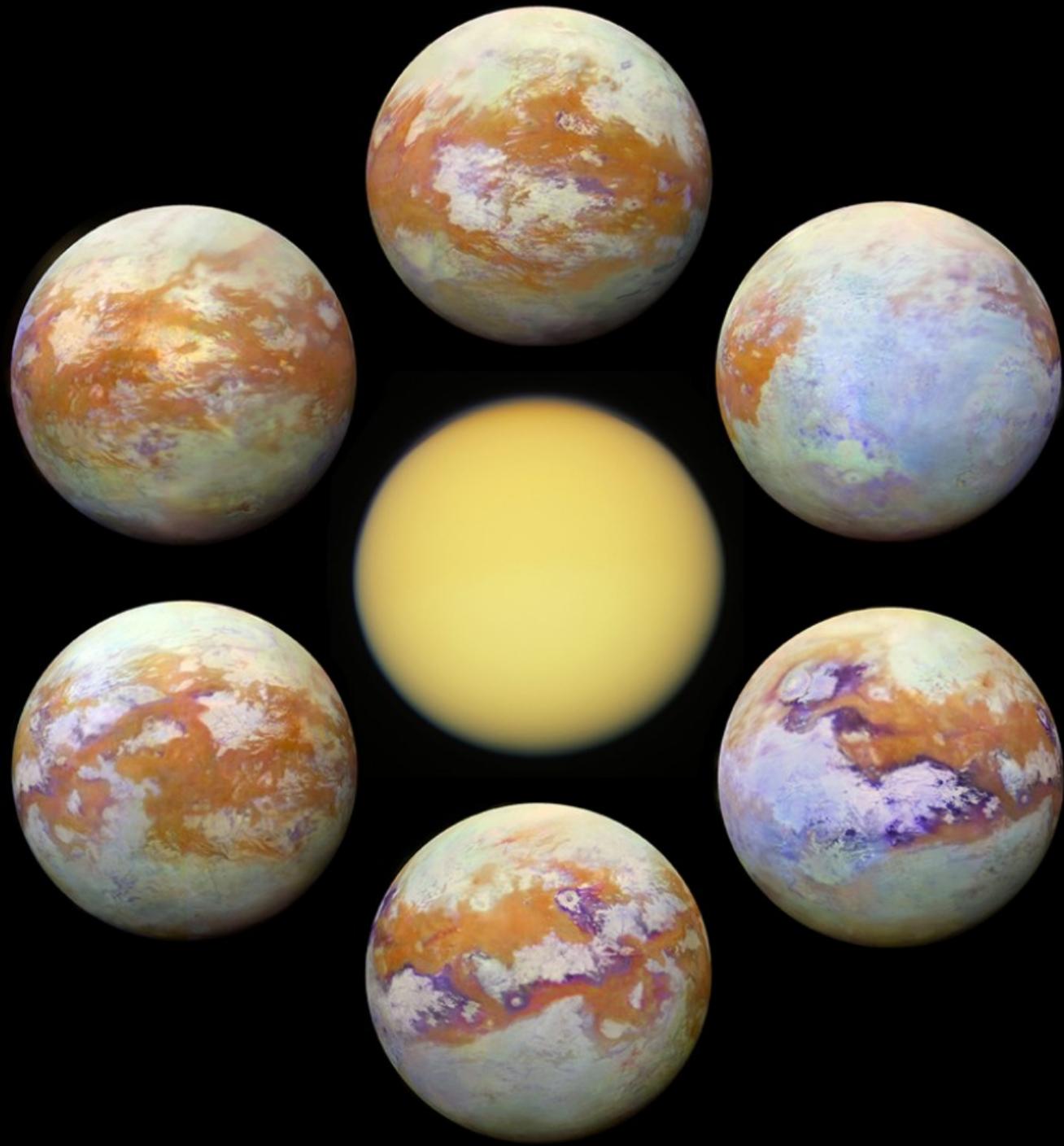
<https://solarsystem.nasa.gov/resources/12669/saturns-rings/>



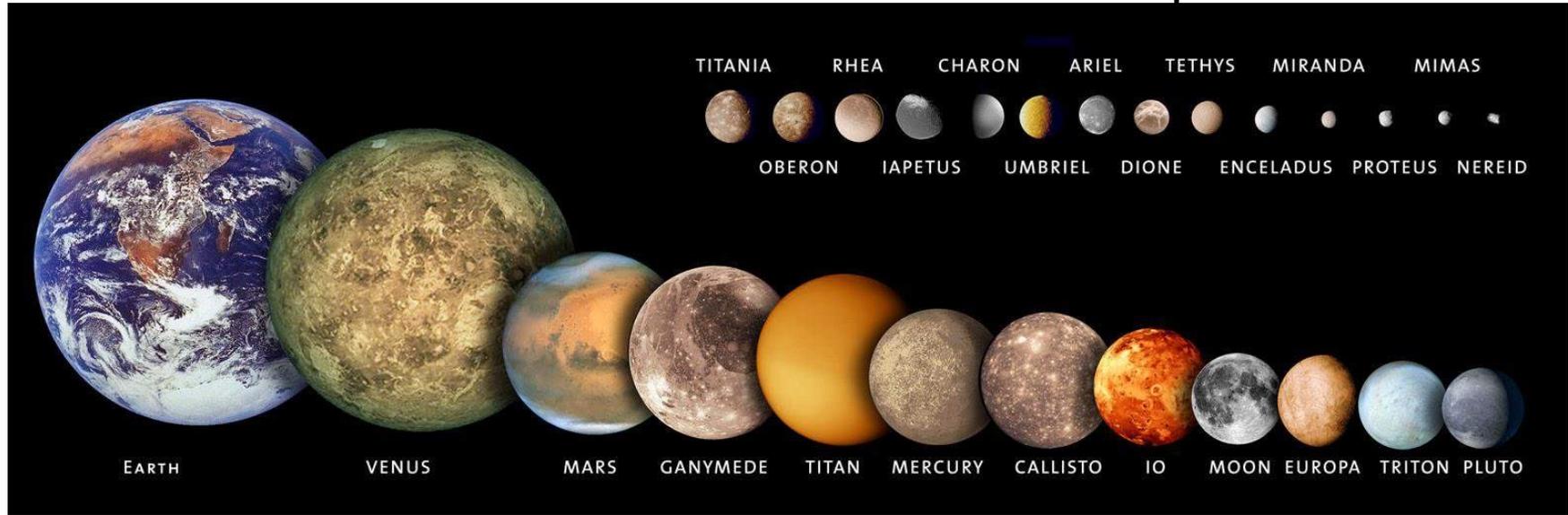
Titã

É a maior lua de Saturno. A espessa atmosfera não permite enxergar a lua no visível (centro), mas janelas no infravermelho permitem enxergar a superfície de Titã.

© Cassini / NASA;
cores falsas



Titã é a 2a maior Lua do Sistema Solar. É maior que Mercúrio!

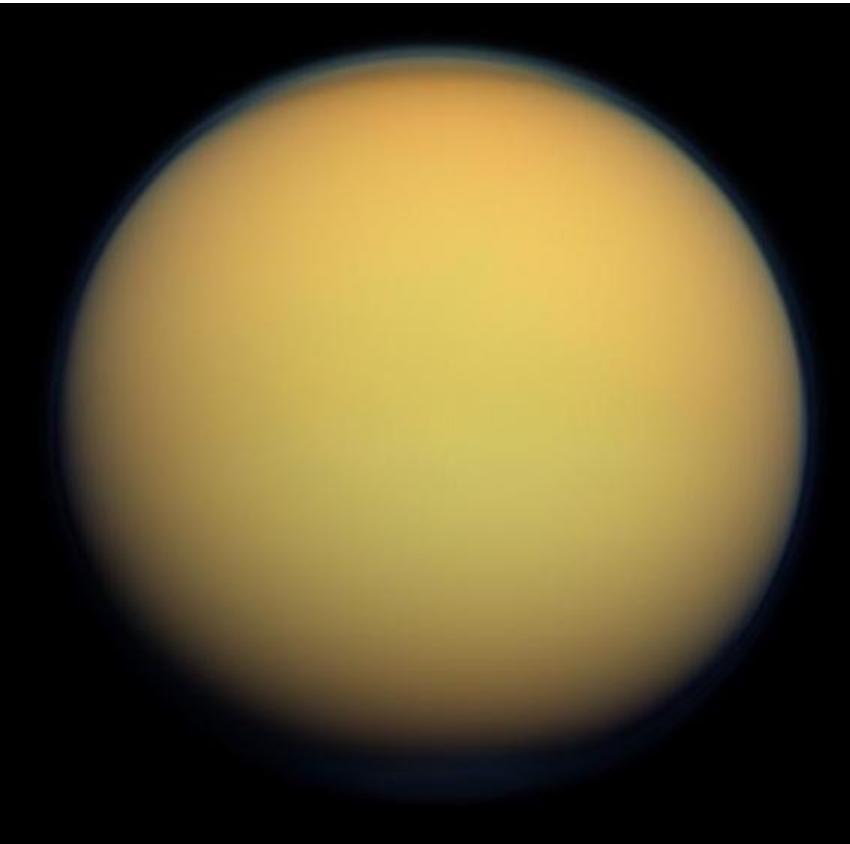


Lua **diâm.** **massa** **densidade** ***a*** **período** **planeta**

	(km)	(kg)	(g/cm ³)	(km)	(dias)	
Io	3660	8,9x10 ²²	3,53	421800	1,769	Júpiter
Europa	3122	4,8x10 ²²	3,01	671100	3,551	Júpiter
Ganímedes	5268	1,5x10 ²³	1,94	1070400	7,151	Júpiter
Calisto	4821	1,1x10 ²³	1,83	1882700	16,69	Júpiter
Encélado	504	1,1x10 ²⁰	1,61	237948	1,37	Saturno
Reia	1527	2,3x10 ²¹	1,23	527108	4,52	Saturno
Titã	5150	1,35x10 ²³	1,88	1221870	15,94	Saturno
Jápeto	1470	1,8x10 ²¹	1,08	3560820	79,32	Saturno

*ρ menor
pois
Saturno
é mais
externo*

A espessa atmosfera (95% de N_2 , 5% de metano e talvez traços de compostos ricos em carbono) não permite enxergar a lua no visível.

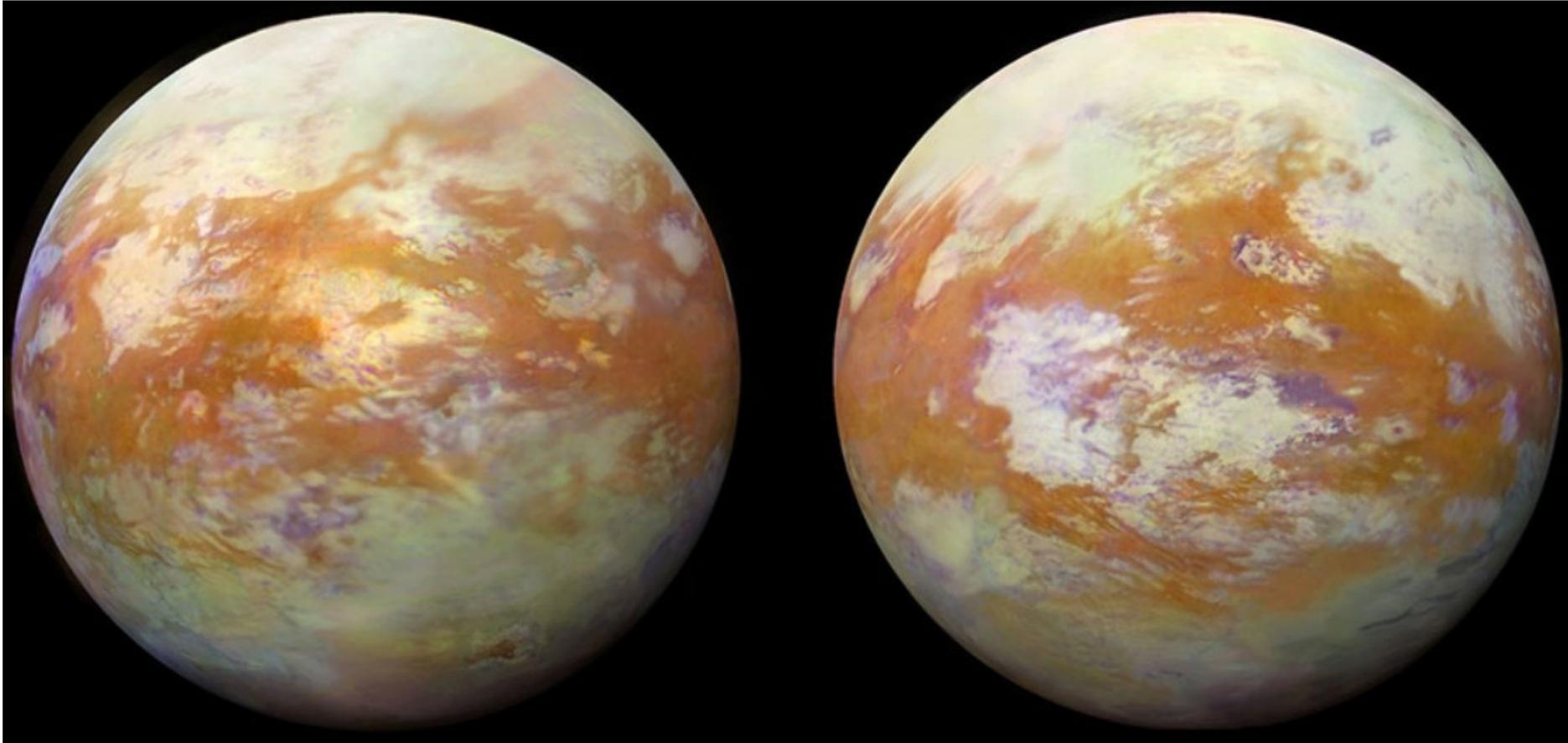


Camadas individuais de névoa podem ser vistas nesta imagem da Cassini de 2005 da atmosfera superior de Titã.



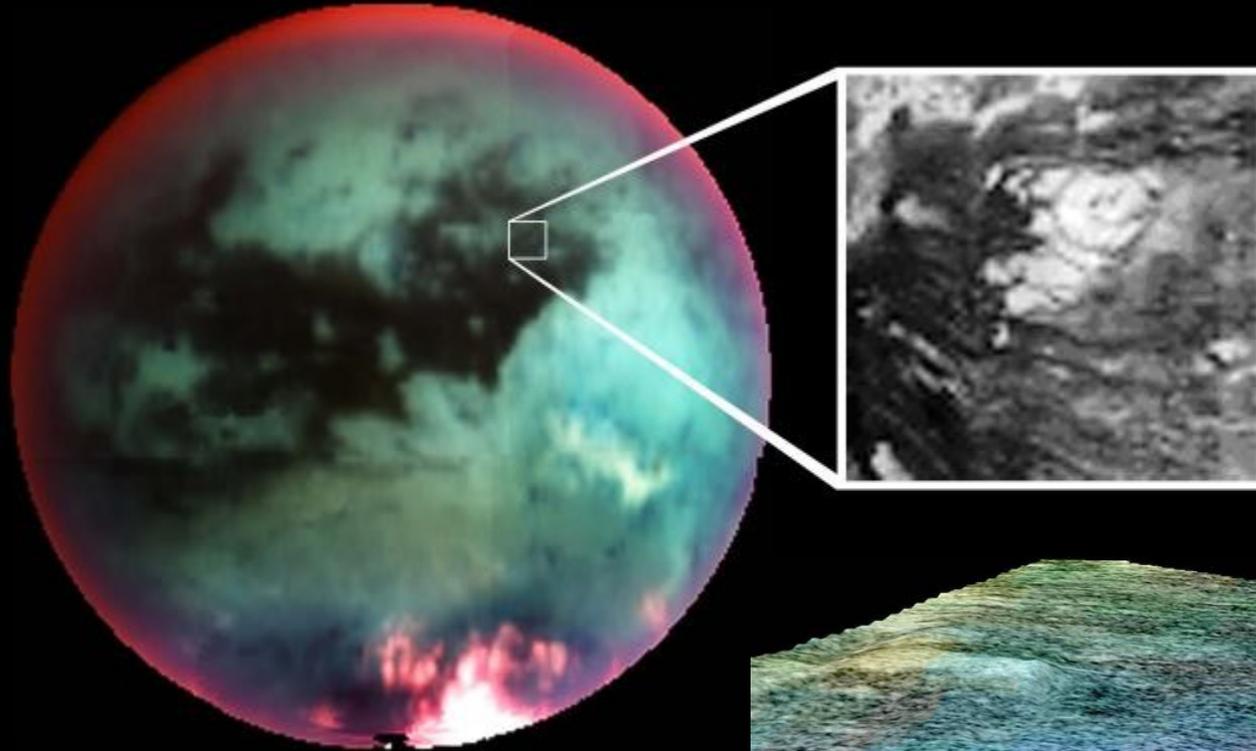
<https://solarsystem.nasa.gov/news/1184/why-is-nasa-sending-dragonfly-to-titan-here-are-five-reasons/>

Imagens no infravermelho (cores falsas) da Cassini permitem enxergar uma complexa superfície em Titã. Poucas crateras são observadas.



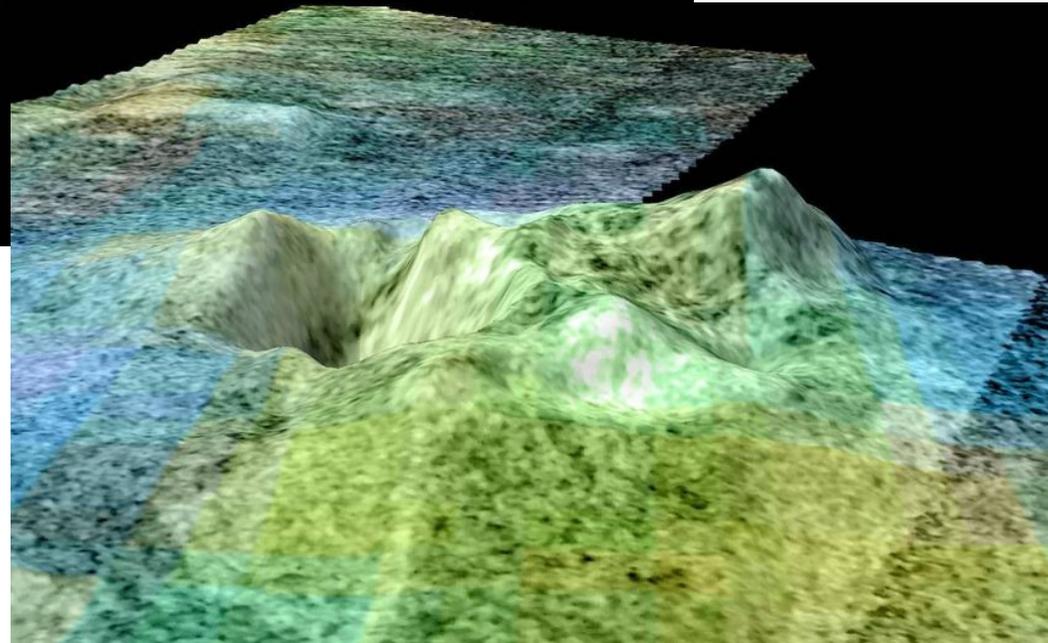
Possível criovulcão (vulcão de gelo) em Titã?

© Cassini/NASA, 26/10/2004



<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA07965>

Criovulcão na região Sotra Facula? © Cassini/NASA, 2010?



https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1824.html

Lago de metano
Ligeia Mare.
Talvez é
preenchido
com
hidrocarbonetos
líquidos, como
etano e
metano.

© Cassini, via
radar, 2/2006 -
4/2007

80 km

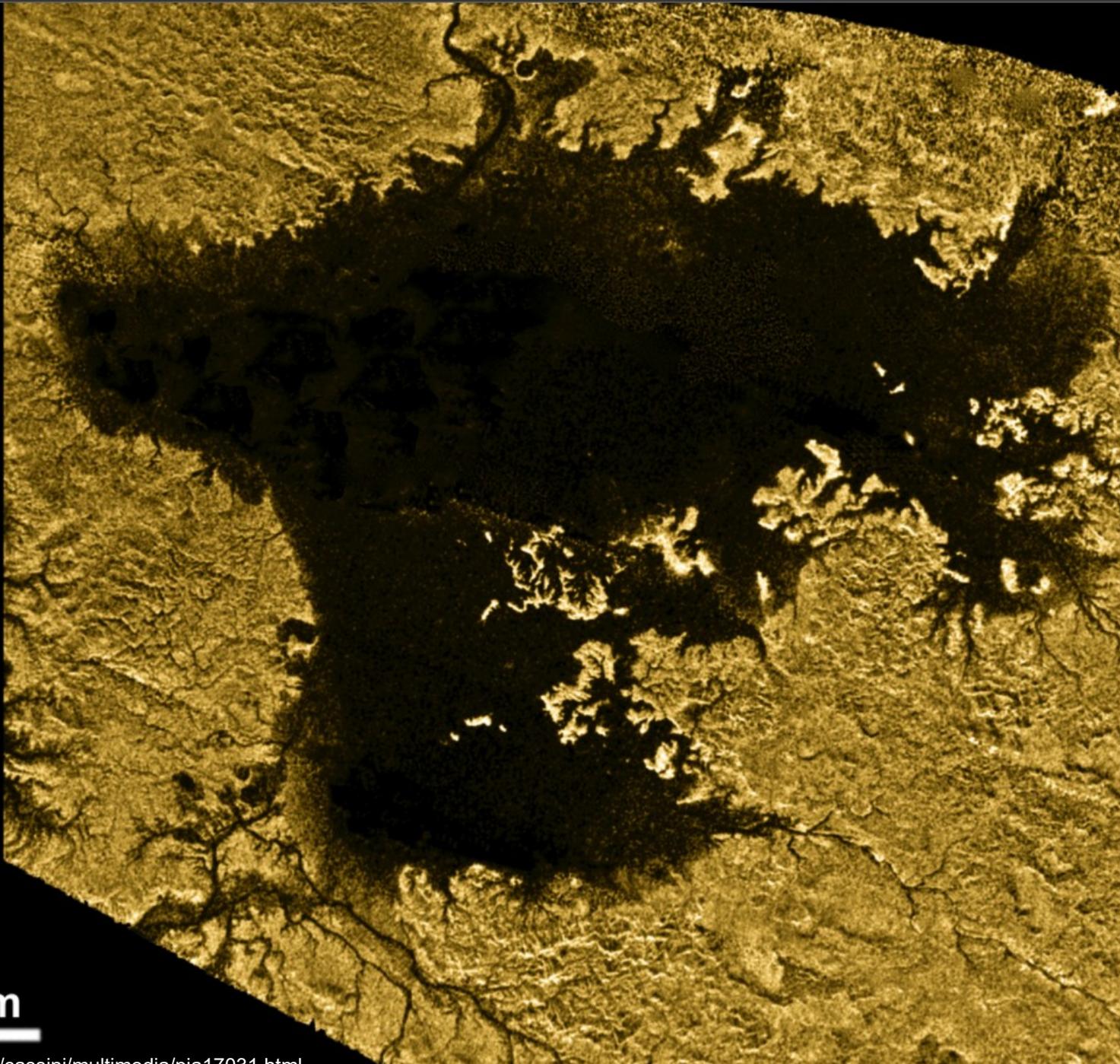
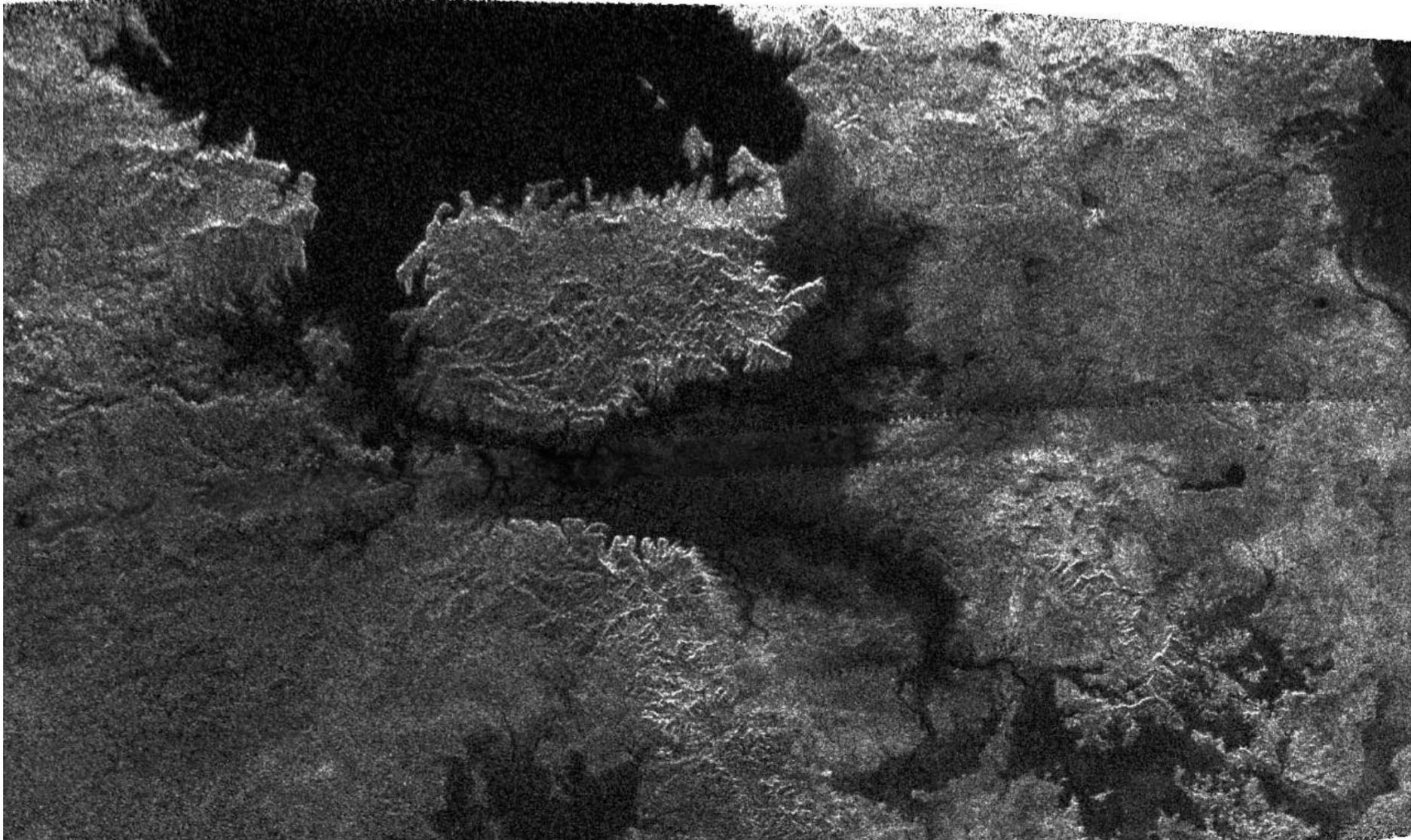
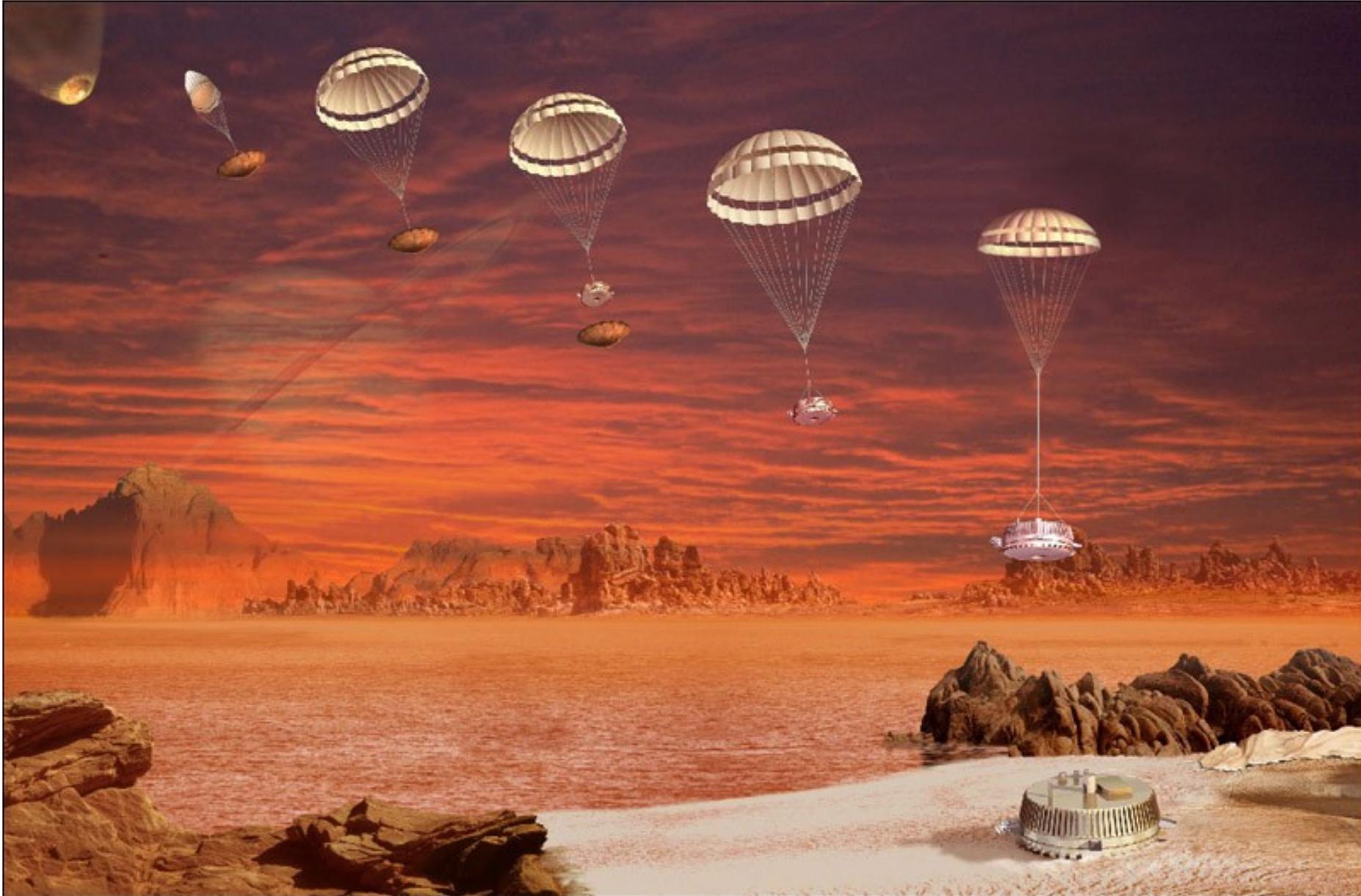
A radar image of Ligeia Mare on Titan, showing a large, dark, irregularly shaped lake. The surrounding terrain is textured and appears to be covered in a network of cracks or channels. The image is presented in a golden-brown color scheme.

Imagem via radar, mostrando ilha (90x150 km) sobre lago de metano em Titã.

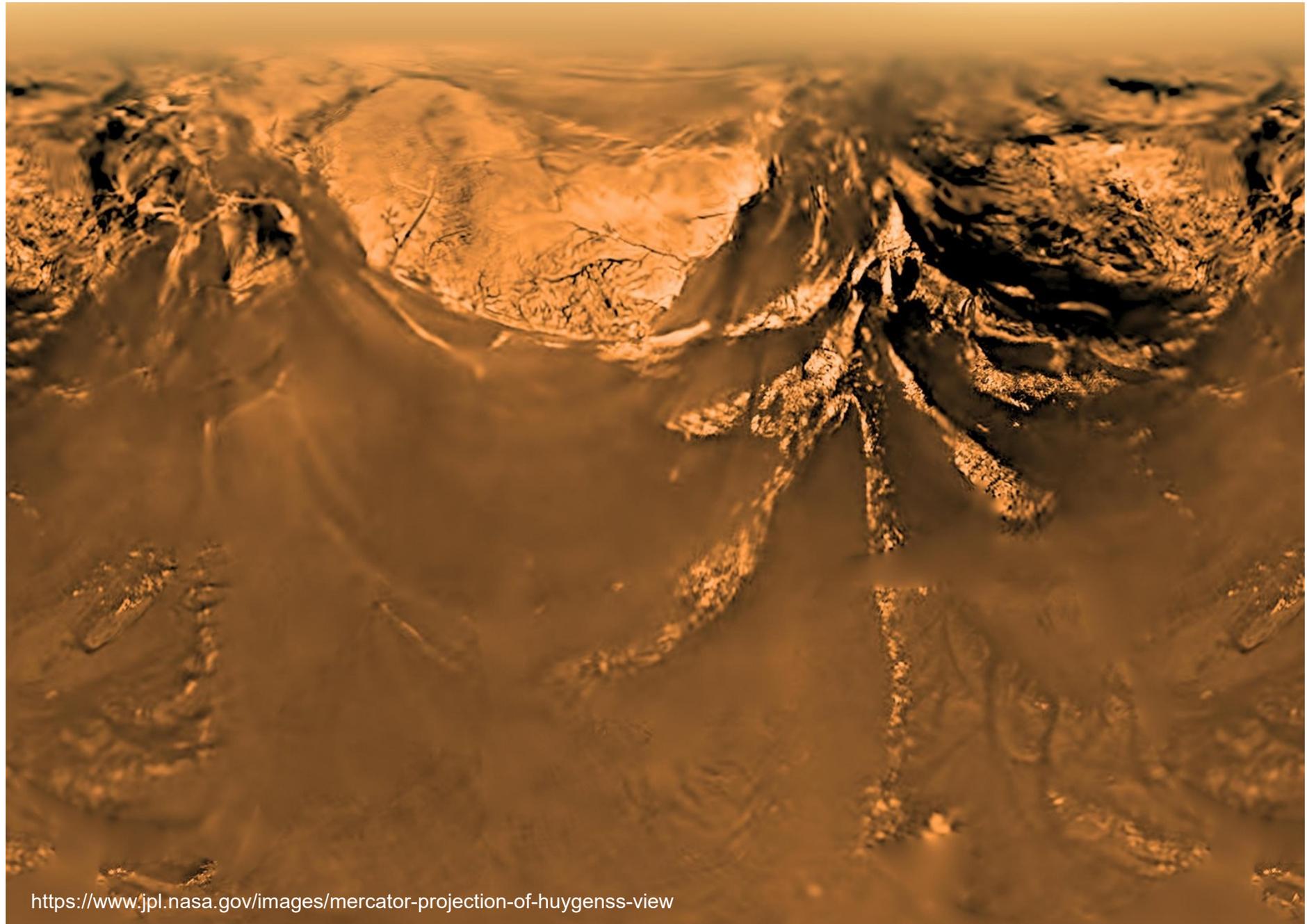
© Cassini/NASA, 22/2/2007 <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA09180>



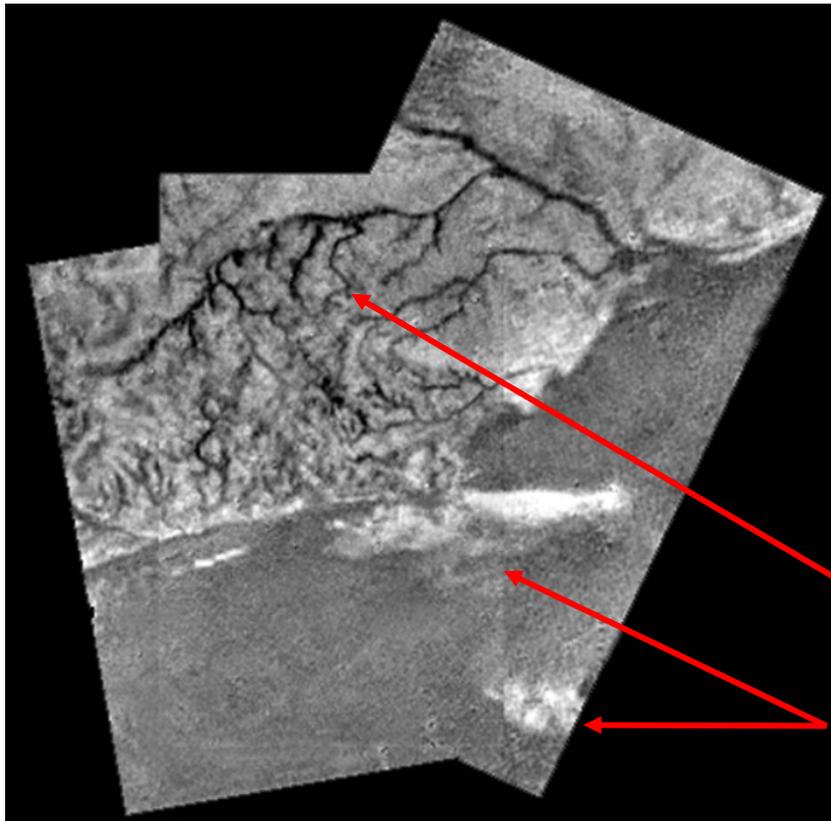
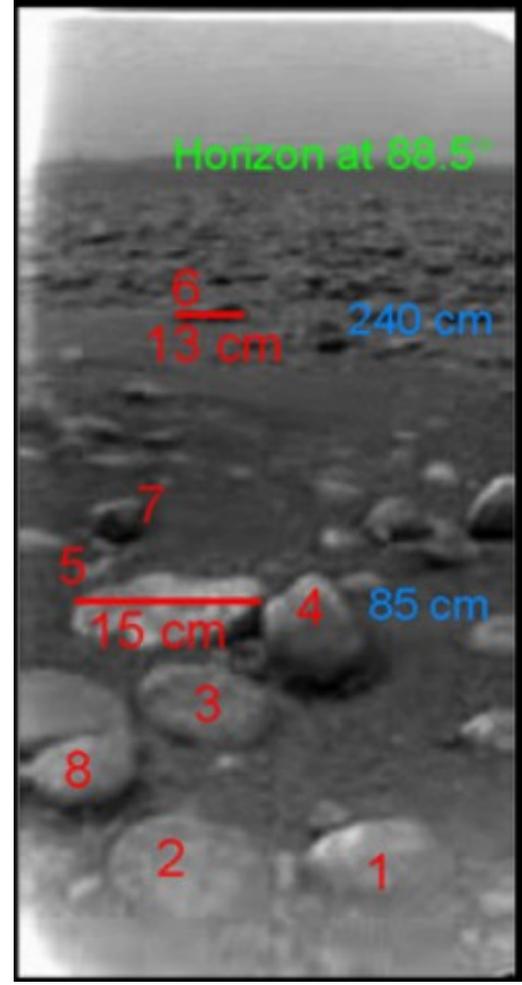
A sonda Huygens, a bordo da Cassini, pousou sobre Titã em 14/1/2005. Imagem artística. © NASA



Visão da sonda Huygens de 10 km de altitude da superfície de Titã



Pedras pequenas, possivelmente feitas de gelo de água, no local de pouso de Huygens. Evidências de erosão na base desses objetos sugerem atividade fluvial. O painel direito mostra, aproximadamente, a verdadeira cor da cena.



Canais de erosão produzidos por metano líquido e ilhas de gelo?
A imagem tem ~7km

Encélado apresenta regiões com baixo número de crateras →

experimentou recentemente derretimento interno e ressurgimento por criovulcões. As estrias são talvez falhas resultantes da deformação crustal.

© Cassini,
ESA/NASA

<https://apod.nasa.gov/apod/ap200427.html>

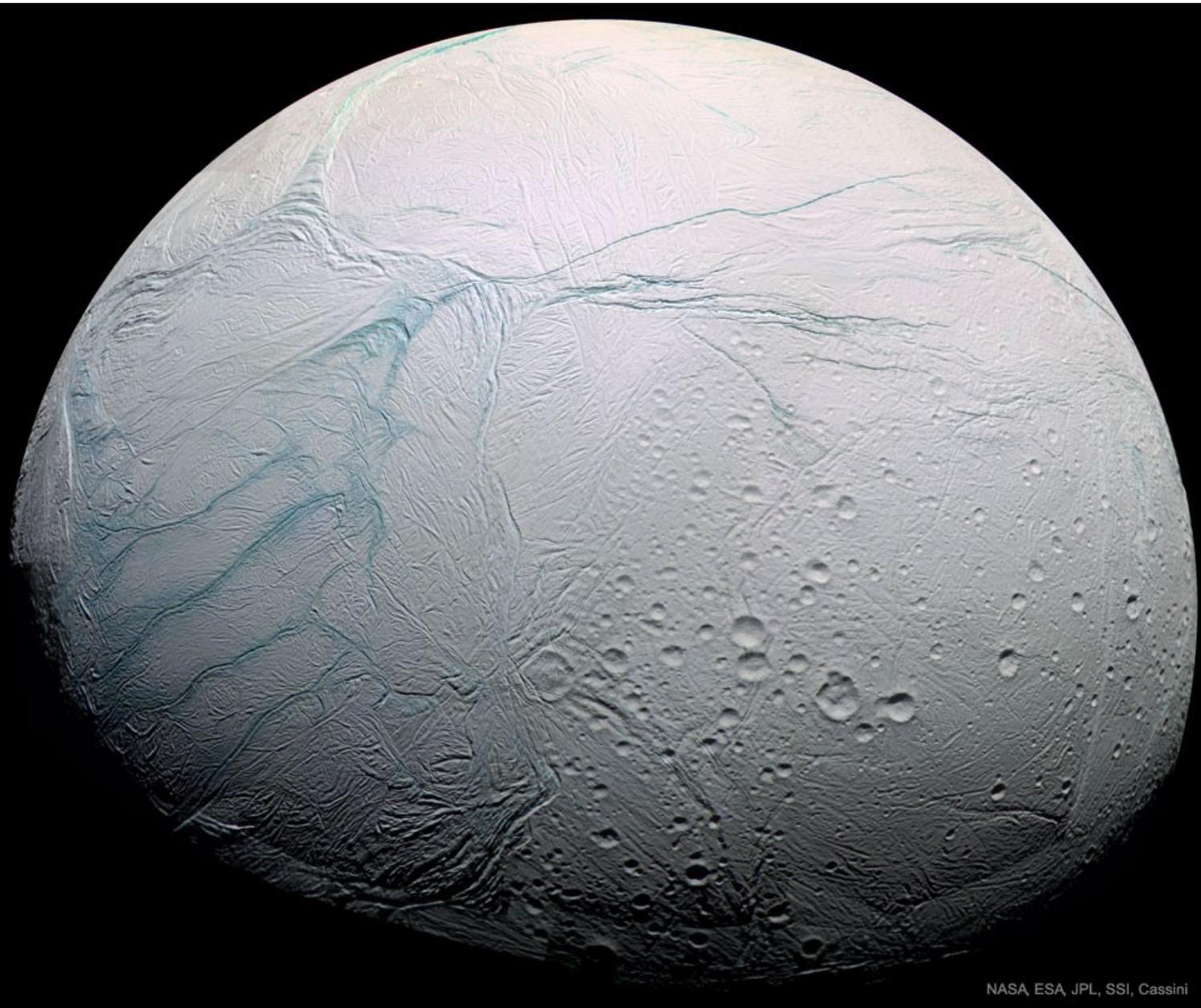


Imagem de plumas de vapor de água e grãos de gelo em Encélado, observadas pela Cassini (NASA/ESA) em 17/2/2005. O gelo ejetado pode apresentar moléculas orgânicas.

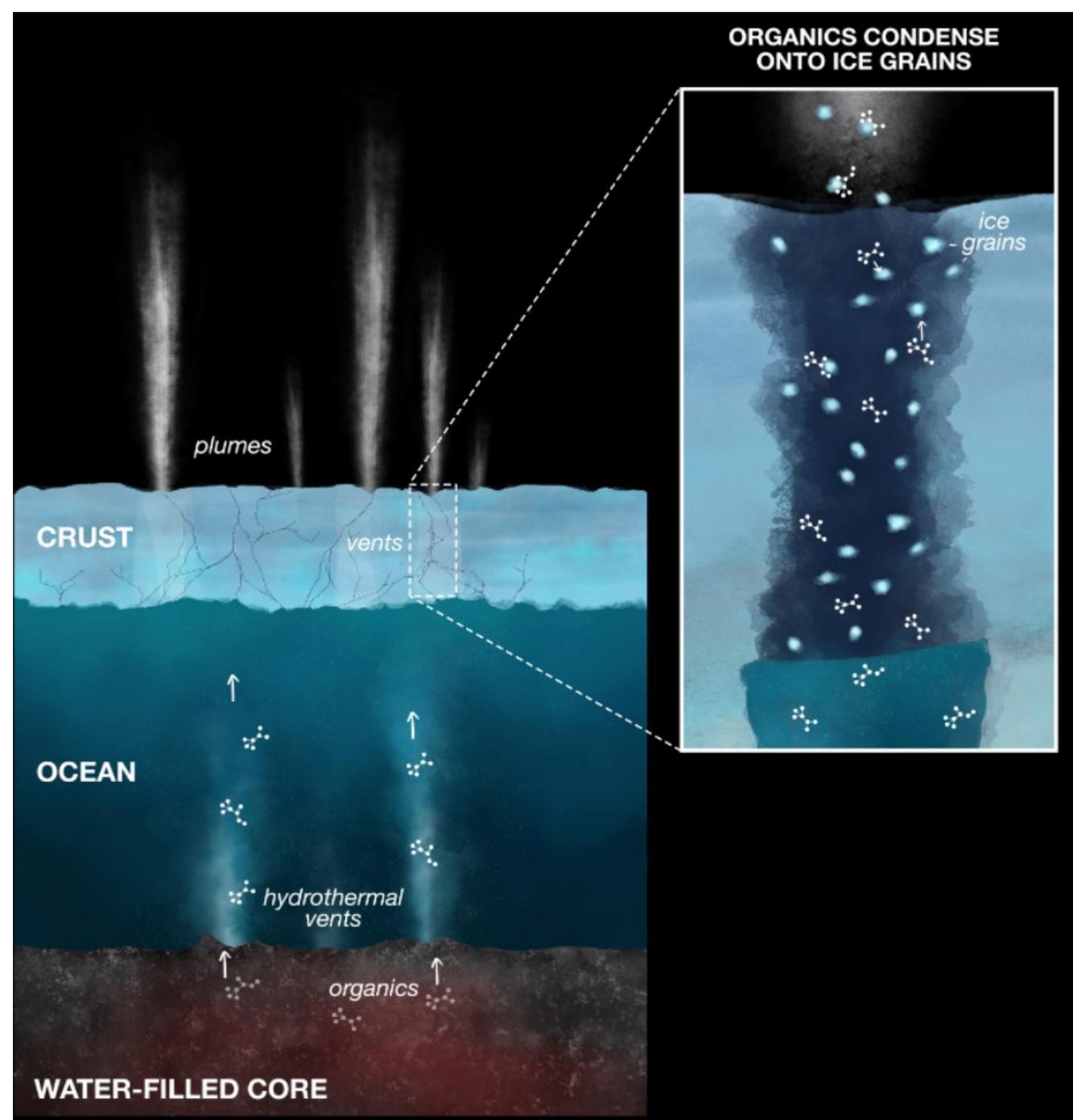
9/2022: existe evidência de fósforo no oceano subterrâneo



ORGANICS CONDENSE
ONTO ICE GRAINS

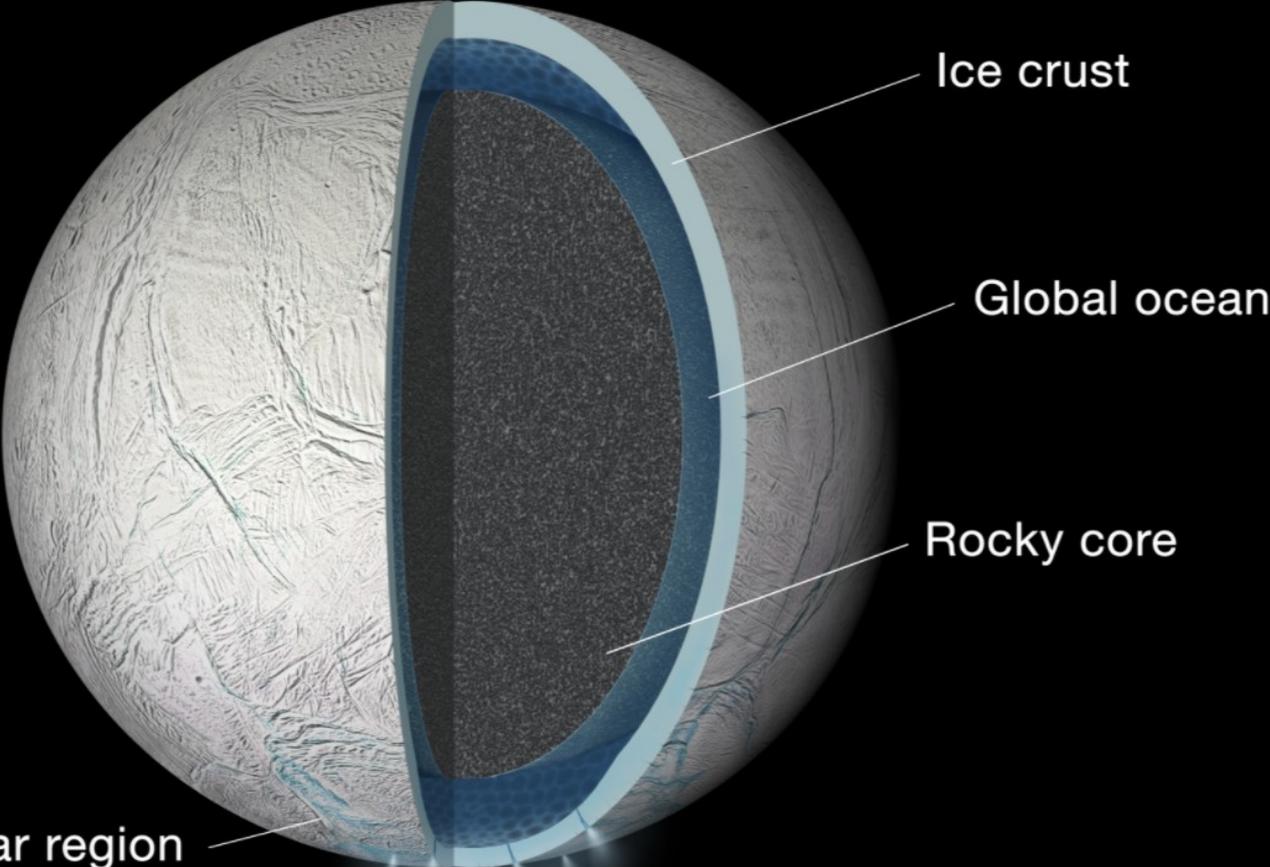
Possível caminho dos
compostos orgânicos
para grãos de gelo
emitidos nas plumas
de Encélado.

© NASA



Estrutura interior de Encélado

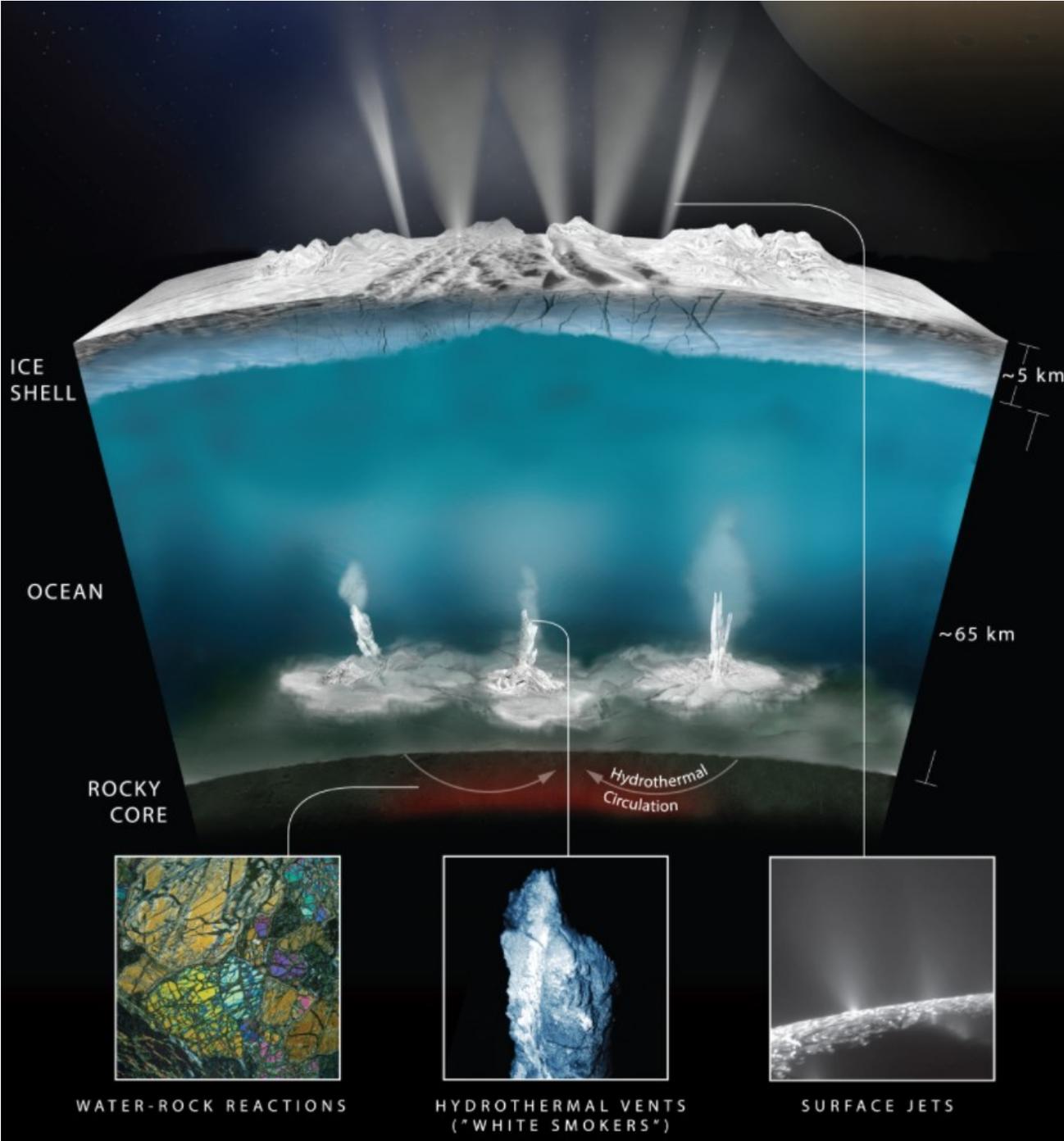
Global Ocean on
Saturn's Moon
ENCELADUS



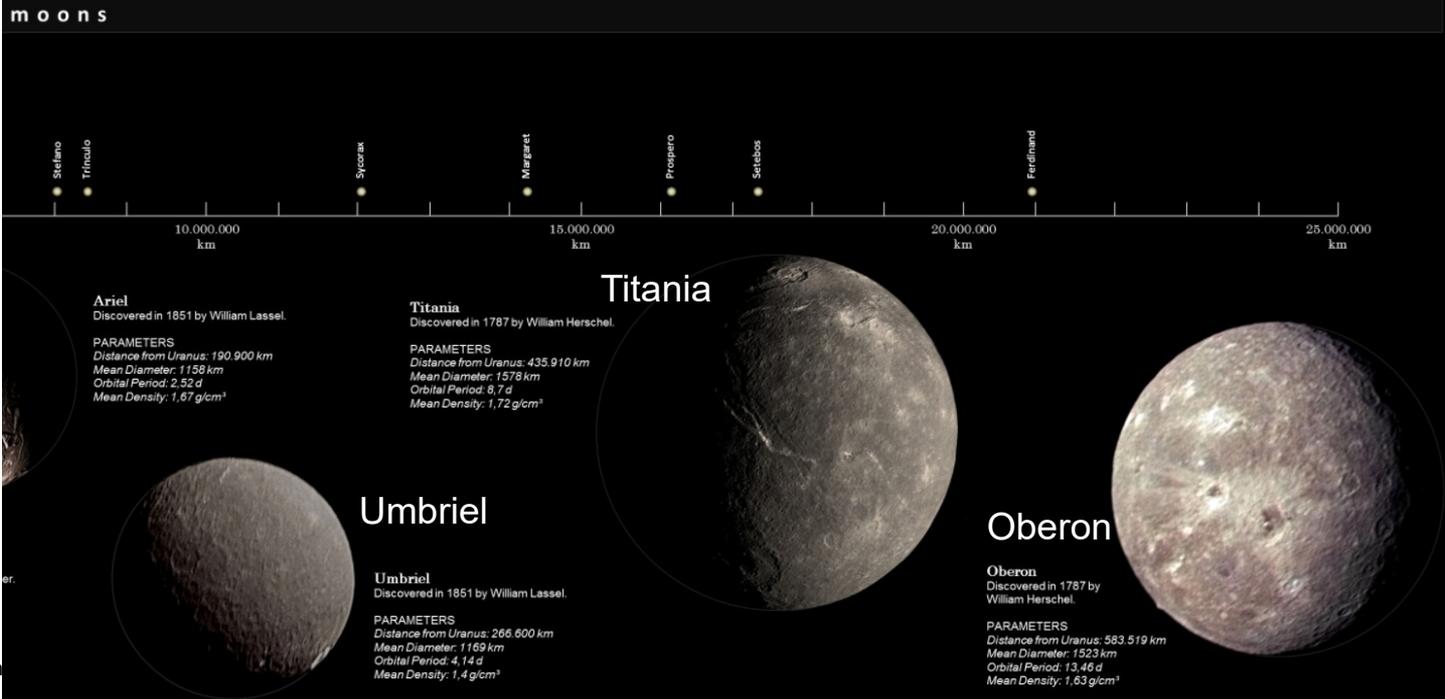
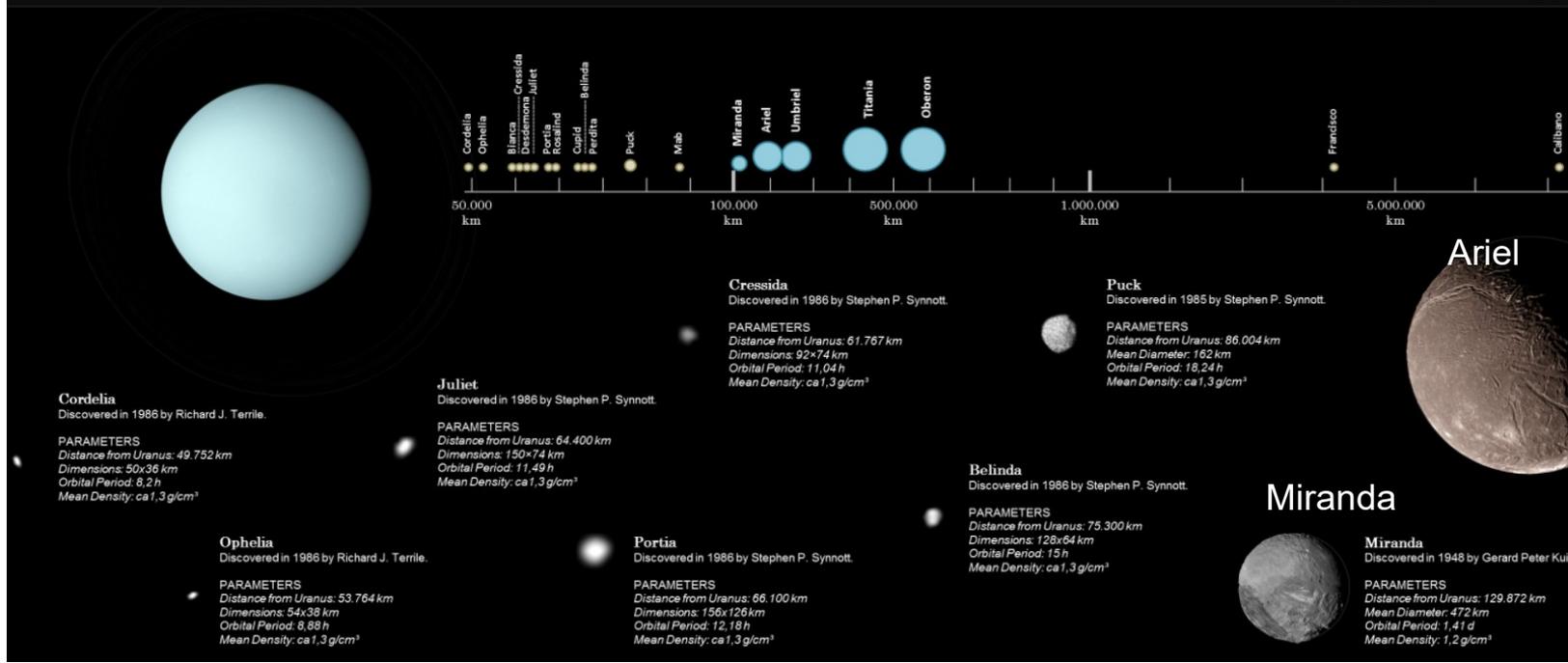
South polar region
with active jets

* Thickness of layers is not to scale

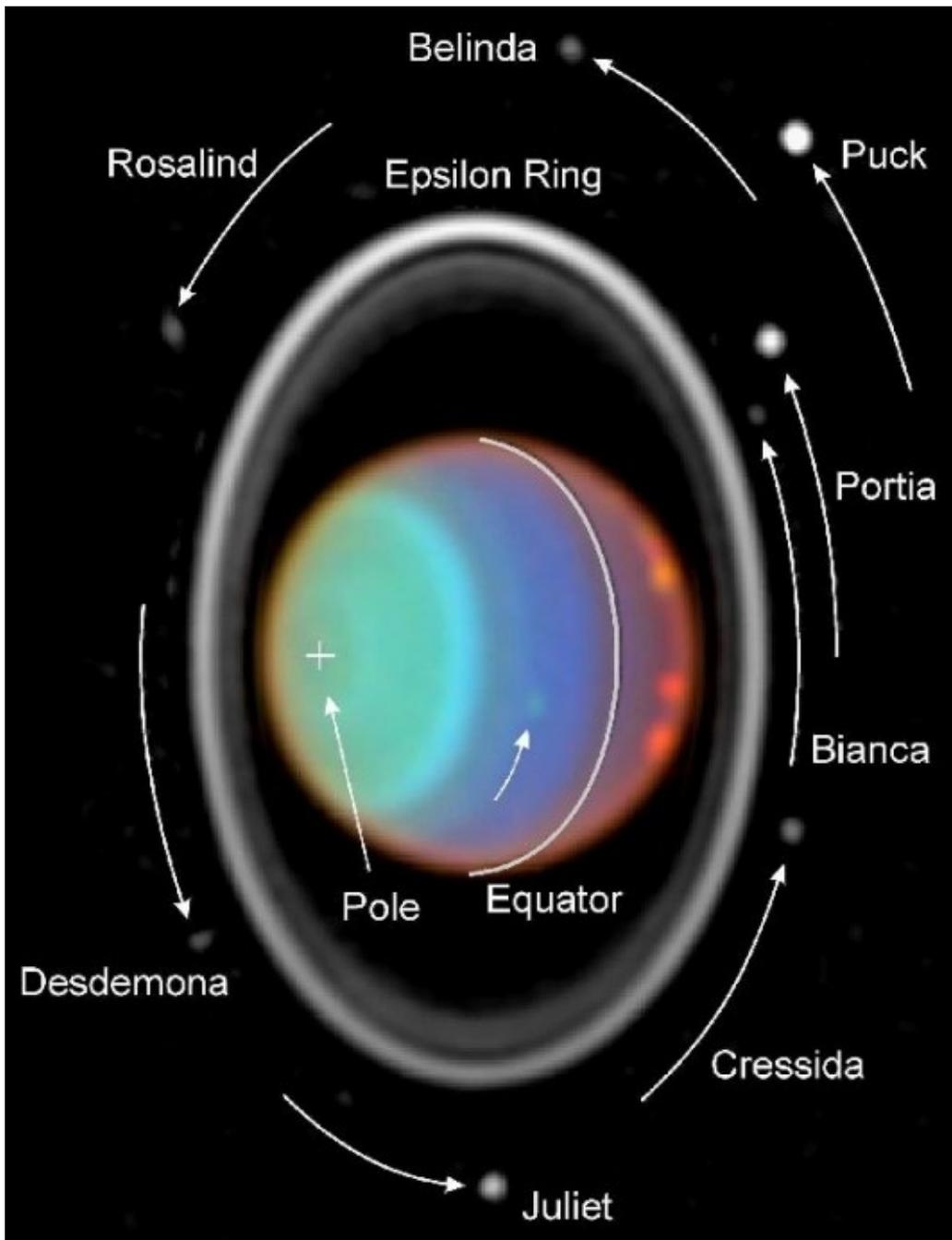
Energia hidrotermal é importante para o desenvolvimento de possíveis formas de vida em Encélado.



<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/picture-this-selfi-nasa-advances-instrument-to-study-the-plumes-of-enceladus>



Urano
apresenta
27 luas



Anéis e luas internas de Urano.

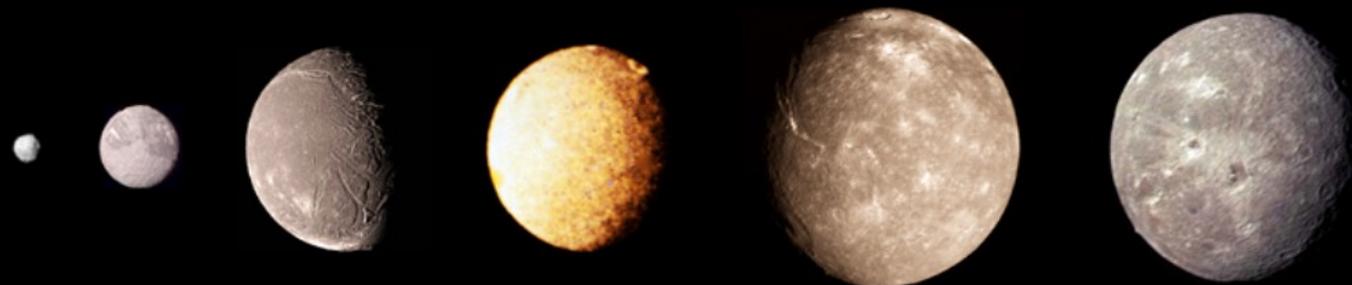
© Telescópio Espacial Hubble

Comparação do raio de Urano e suas 6 maiores luas

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Uranus_moons.jpg

Urano
25362 km

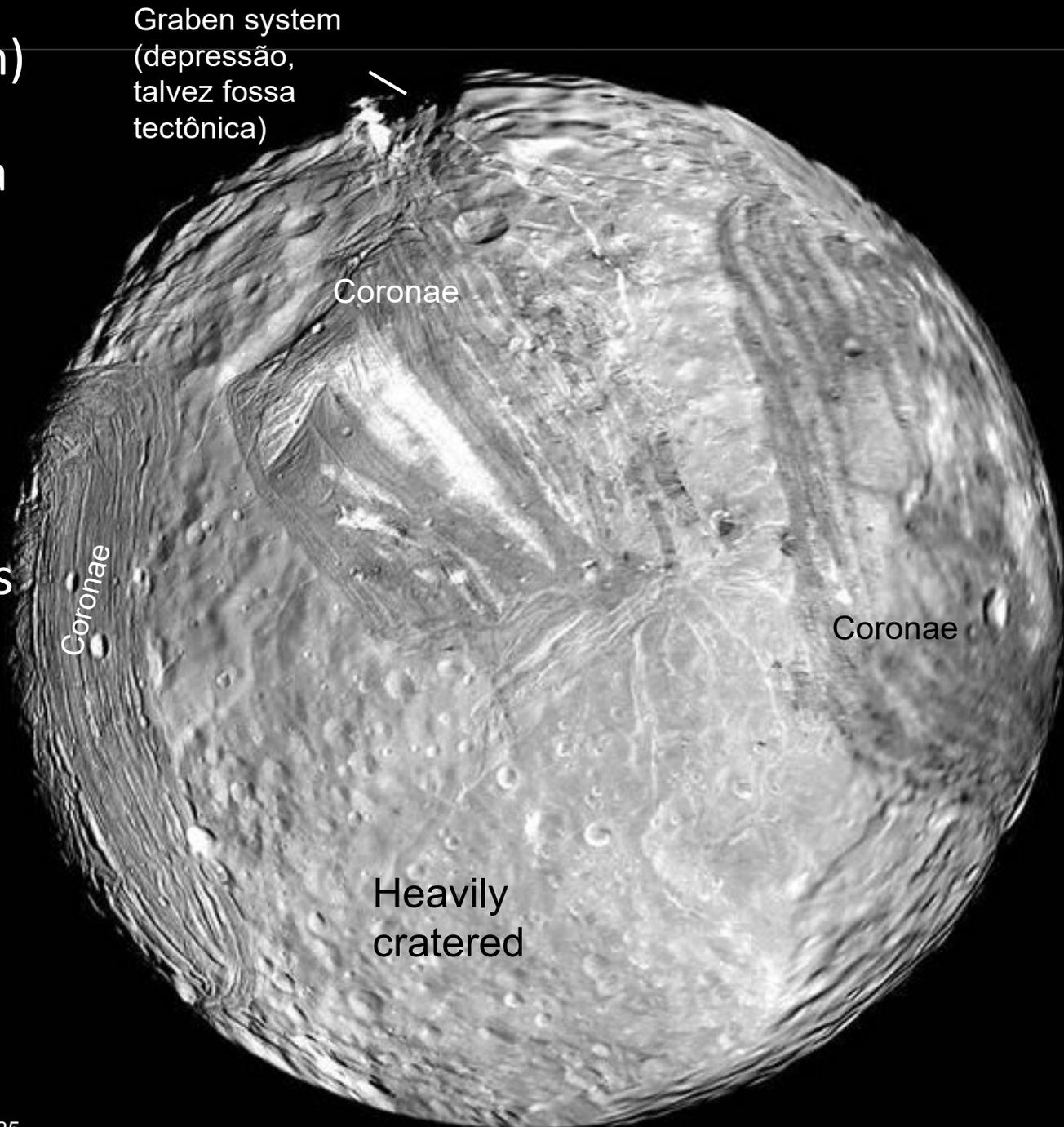
Puck 81km Miranda 240km Ariel 581km Umbriel 585 km Titânia 789 km Oberon 761 km



Satélite	Raio (km)	Período (h)	Densidade (g/cm ³)
Miranda	242	33.9	1.26
Ariel	580	60.5	1.65
Umbriel	595	99.5	1.44
Titania	805	208.9	1.59
Oberão	775	323.1	1.50

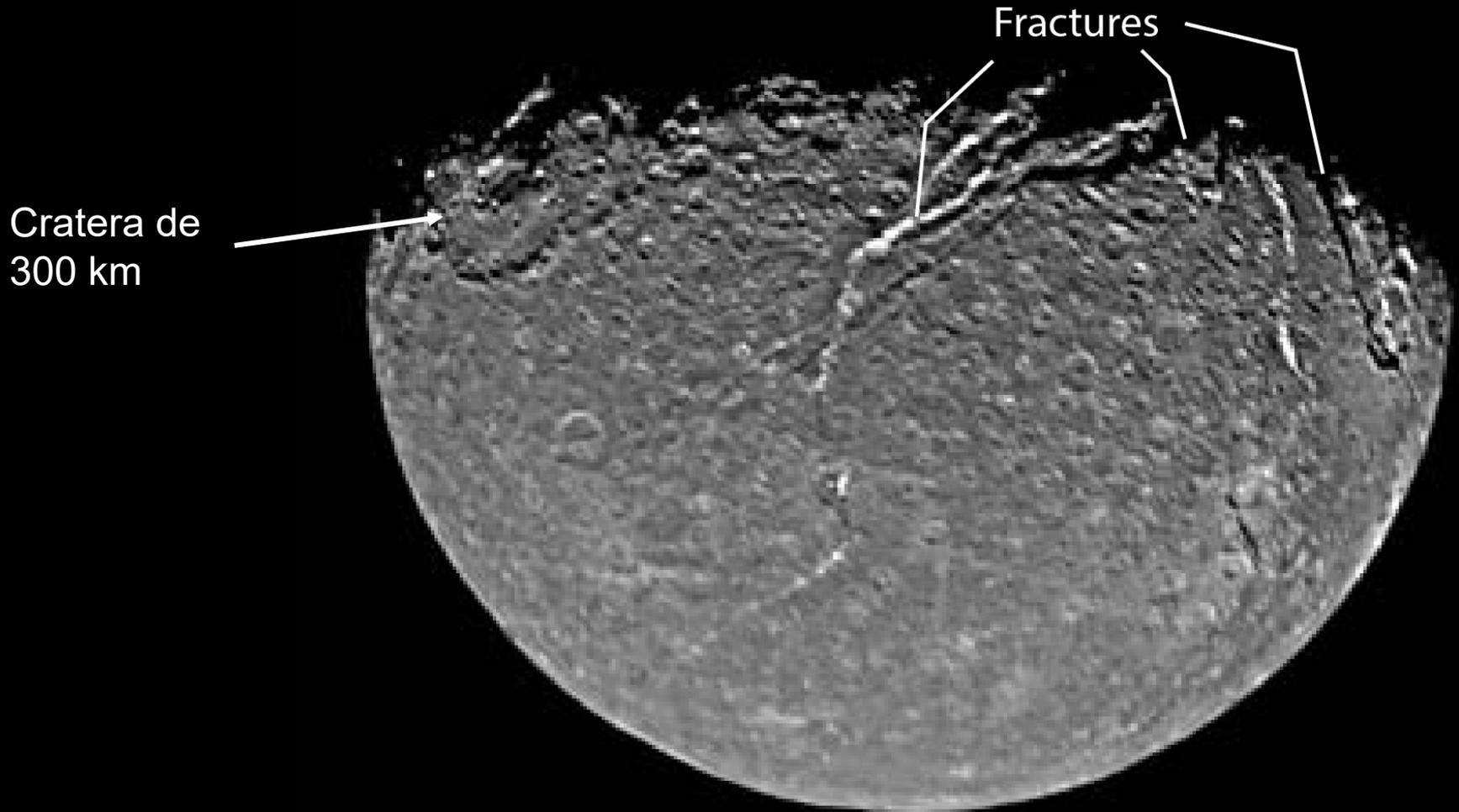
Miranda (d=480km)

Imagem obtida pela Voyager 2 em 24/1/1986 mostra uma superfície complexa, muito craterada na parte inferior (região mais antiga), enquanto na parte superior mostra evidências de mudanças na crosta (região mais jovem).

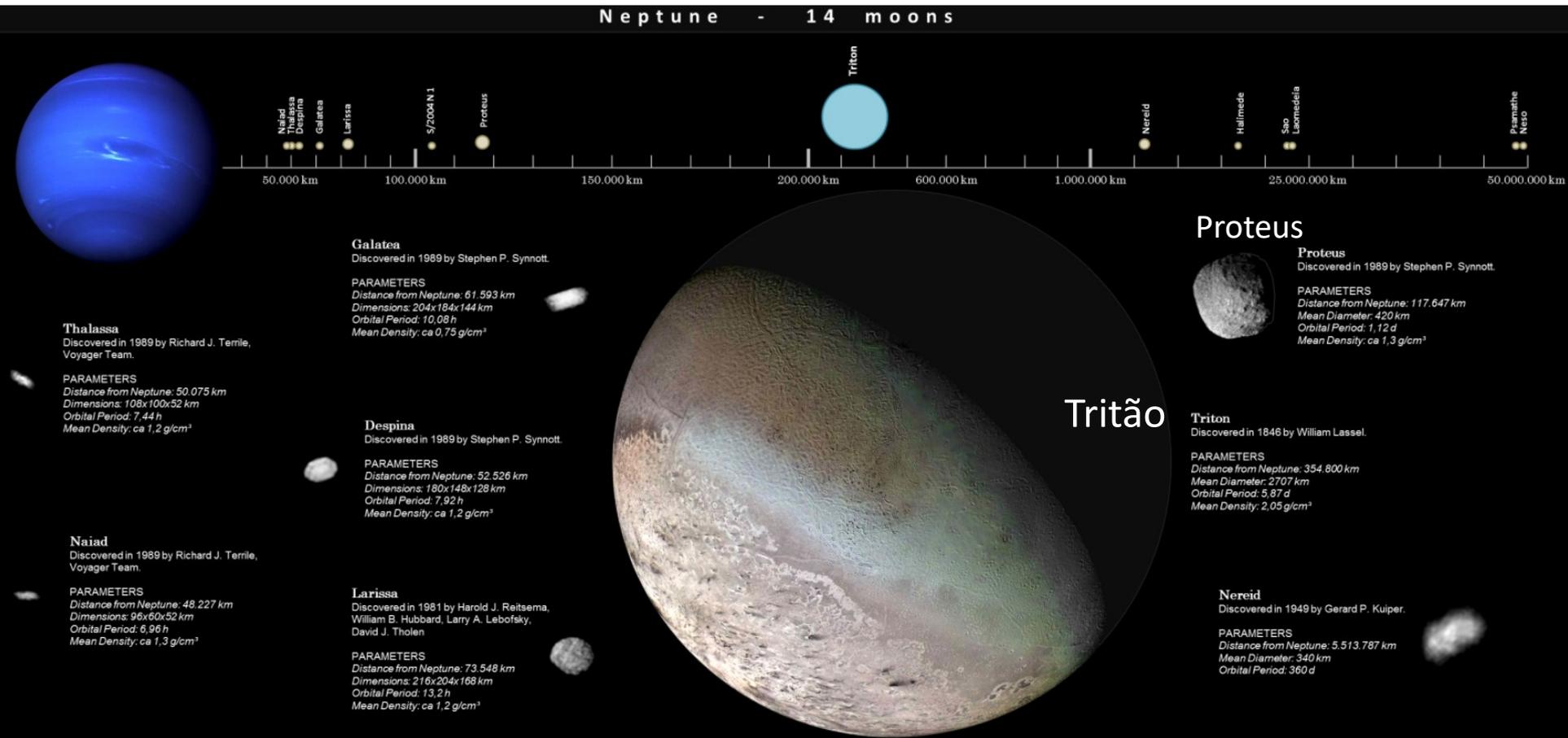


Titania (d = 1600 km)

Imagem obtida pela Voyager 2 em 24/1/1986 mostra crateras e fraturas na superfície.

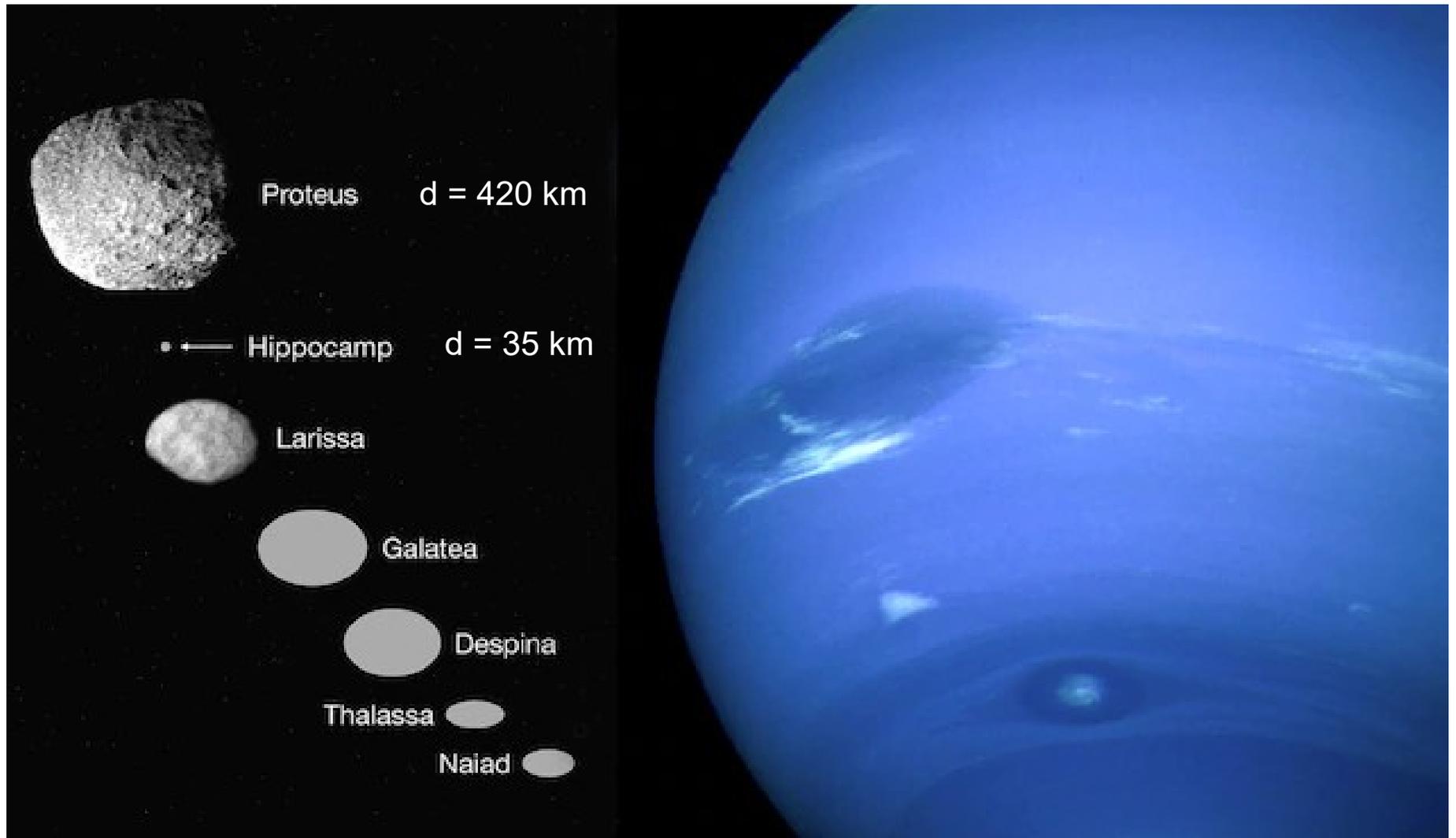


Netuno apresenta 14 luas



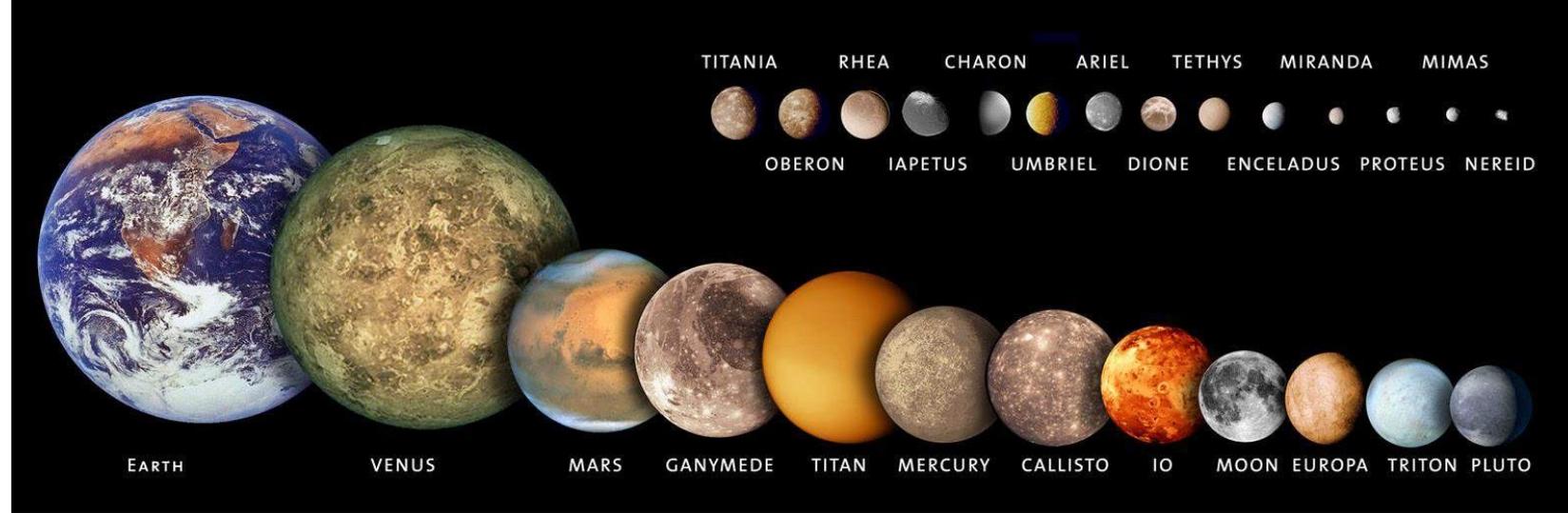
As 7 luas mais internas de Netuno.

As 6 maiores foram descobertas pela Voyager 2 em 1989 e Hippocamp foi descoberta em 2013 pelo telescópio Hubble.



Left: illustration by Mark R. Showalter. Right: image of Neptune by JPL/NASA.

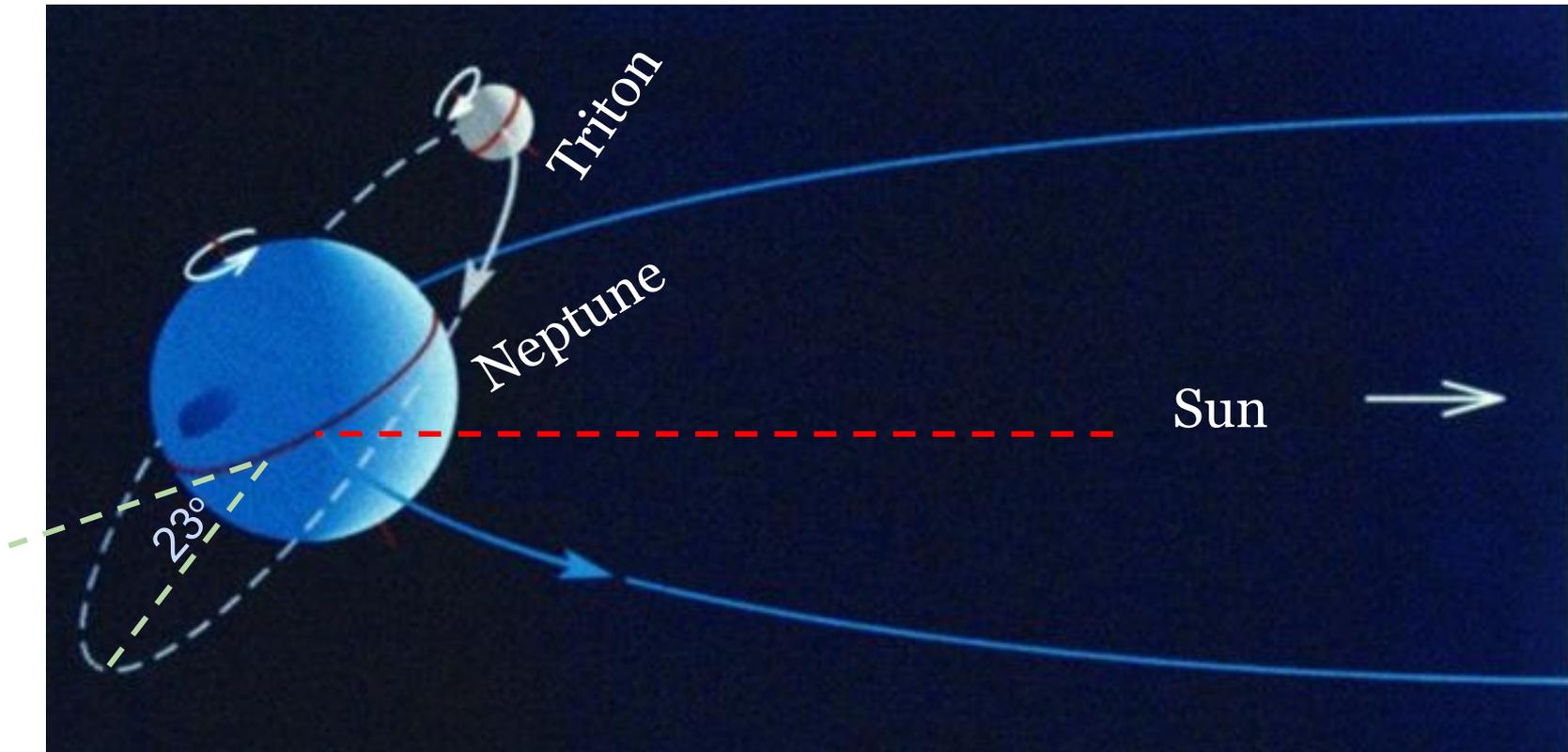
A Lua
Tritão é
maior
que
Plutão!



Tritão ($d = 2700 \text{ km}$)
observado pela Voyager 2
em 8/1989. Superfície
esparsa de crateras e
evidências de vulcanismo e
tectonismo.

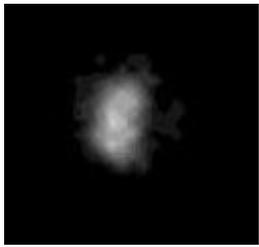
Lua tem órbita retrógrada
(oposta à rotação de Netuno)
⇒ talvez foi capturada do
Cinturão de Kuiper

Tritão tem órbita retrógrada e altamente inclinada (23°).

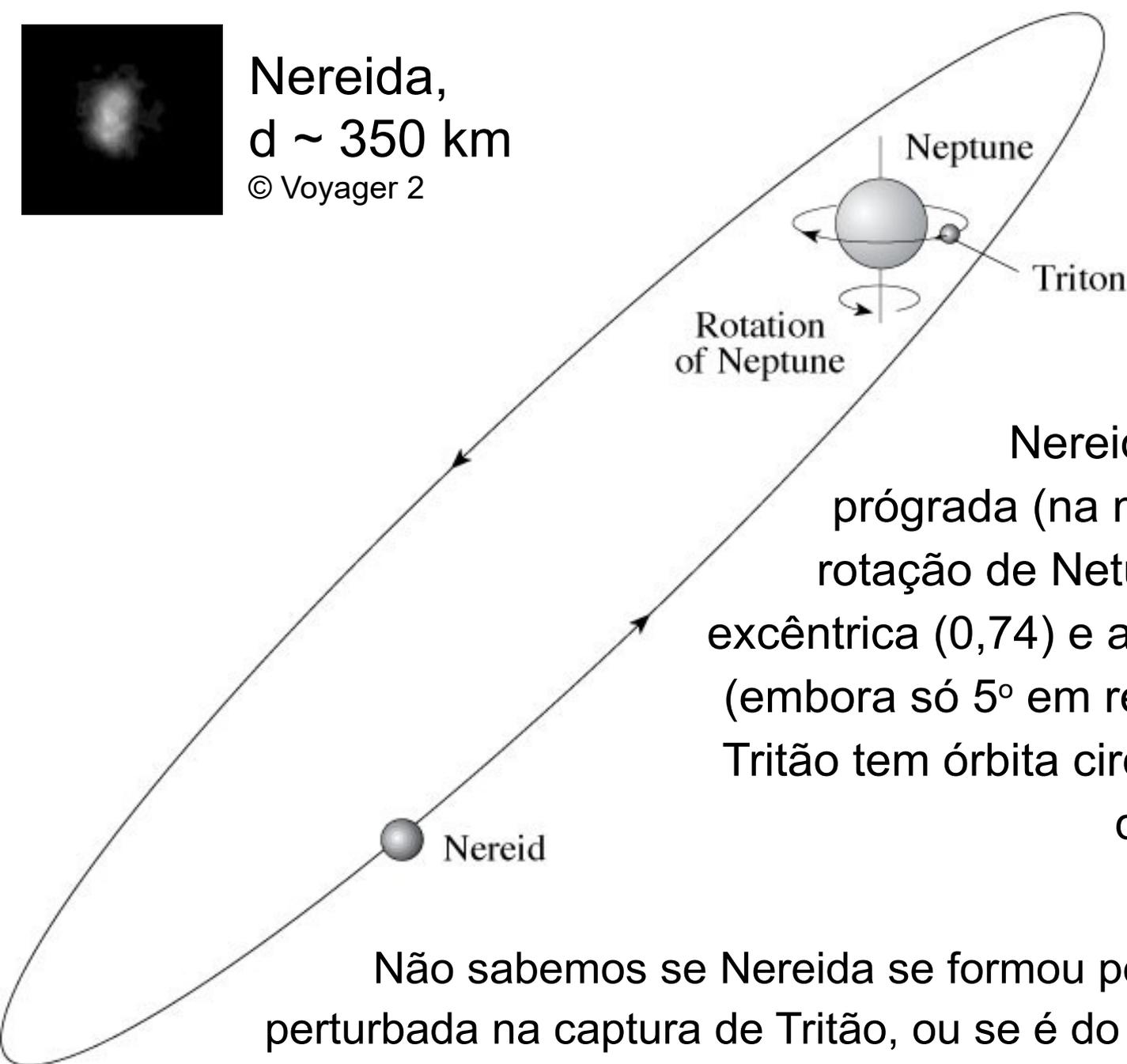


- Inclinação orbital de Netuno (em relação à eclíptica) = $1,8^\circ$
- Inclinação do equador de Netuno (em relação à órbita) = $28,3^\circ$
- Inclinação orbital de Triton (em relação ao equador de Netuno) = 23°
(ou 157° considerando que a órbita é retrógrada)

Tritão está sendo lentamente puxado em direção a Netuno.



Nereida,
d ~ 350 km
© Voyager 2



Nereida tem uma órbita prógrada (na mesma direção de rotação de Netuno), mas é muito excêntrica (0,74) e altamente inclinada (embora só 5° em relação à eclíptica). Tritão tem órbita circular, mas viaja na direção retrógrada.

Não sabemos se Nereida se formou perto de Netuno e foi perturbada na captura de Tritão, ou se é do Cinturão de Kuiper.