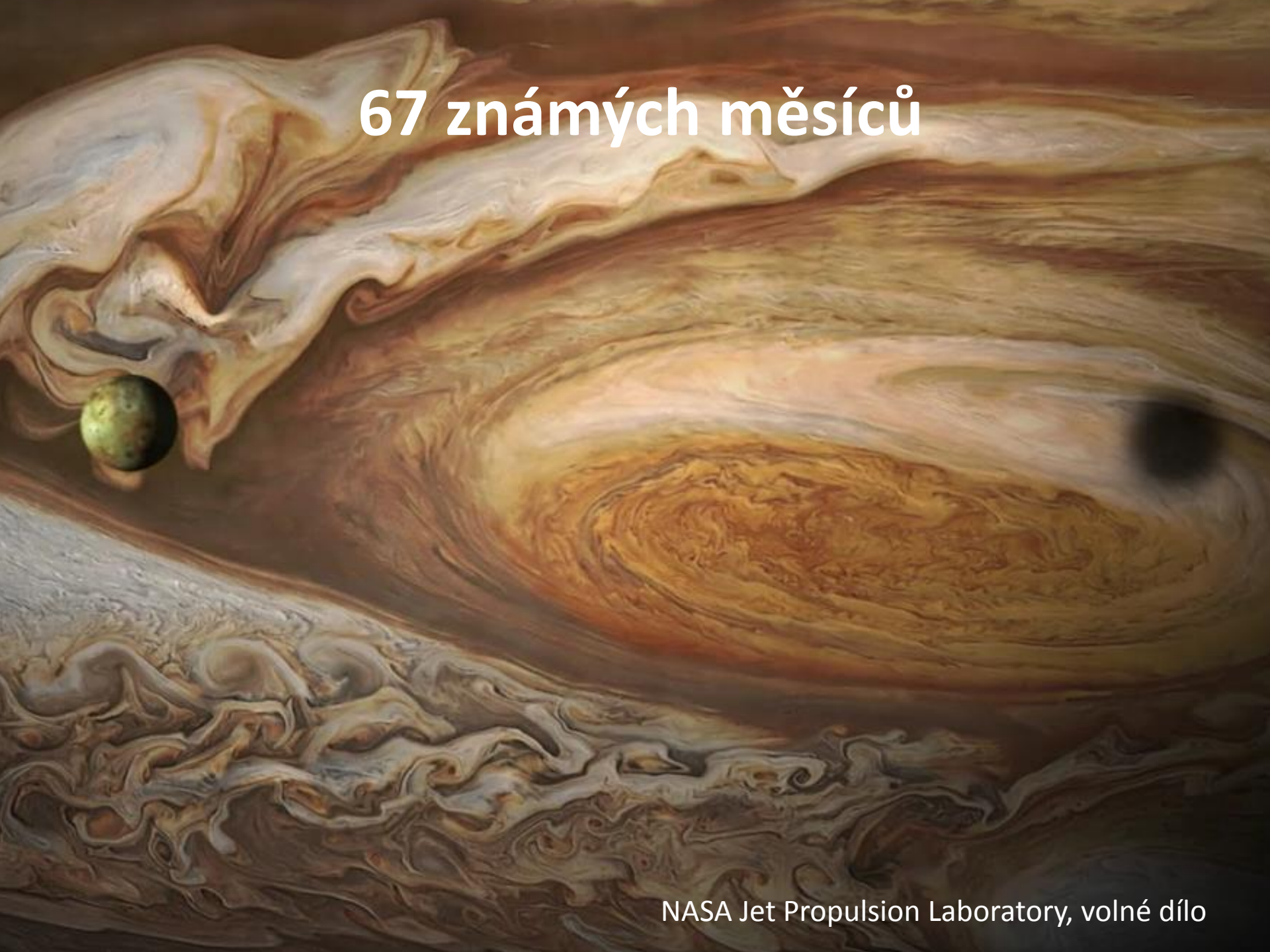


Vulkanismus ve vnější části sluneční soustavy

Petr Brož

Geofyzikální ústav AV ČR v. v. i.

67 známých měsíců



Objevení

Měsíc poprvé pozoroval

8. ledna 1610

Galileo Galilei,

nicméně **Simon**

Marius lo možná

pozoroval o pár

dní dříve



Observationes Jesuitarum
1610

2. J. Jbris. marč H. 12	○ **
30. marc	** ○ *
2. J. Jbris.	○ ** *
3. marc	○ * *
3. Ho. 5.	* ○ *
4. marc	* ○ **
6. marc	** ○ *
8. marc H. 13.	* * * ○
10. marc	* * * ○ *
11.	* * ○ *
12. H. 4. uesp.	* ○ *
13. marc	* ** ○ *
14. kasē.	* * * ○ *

Galileovo měsíce

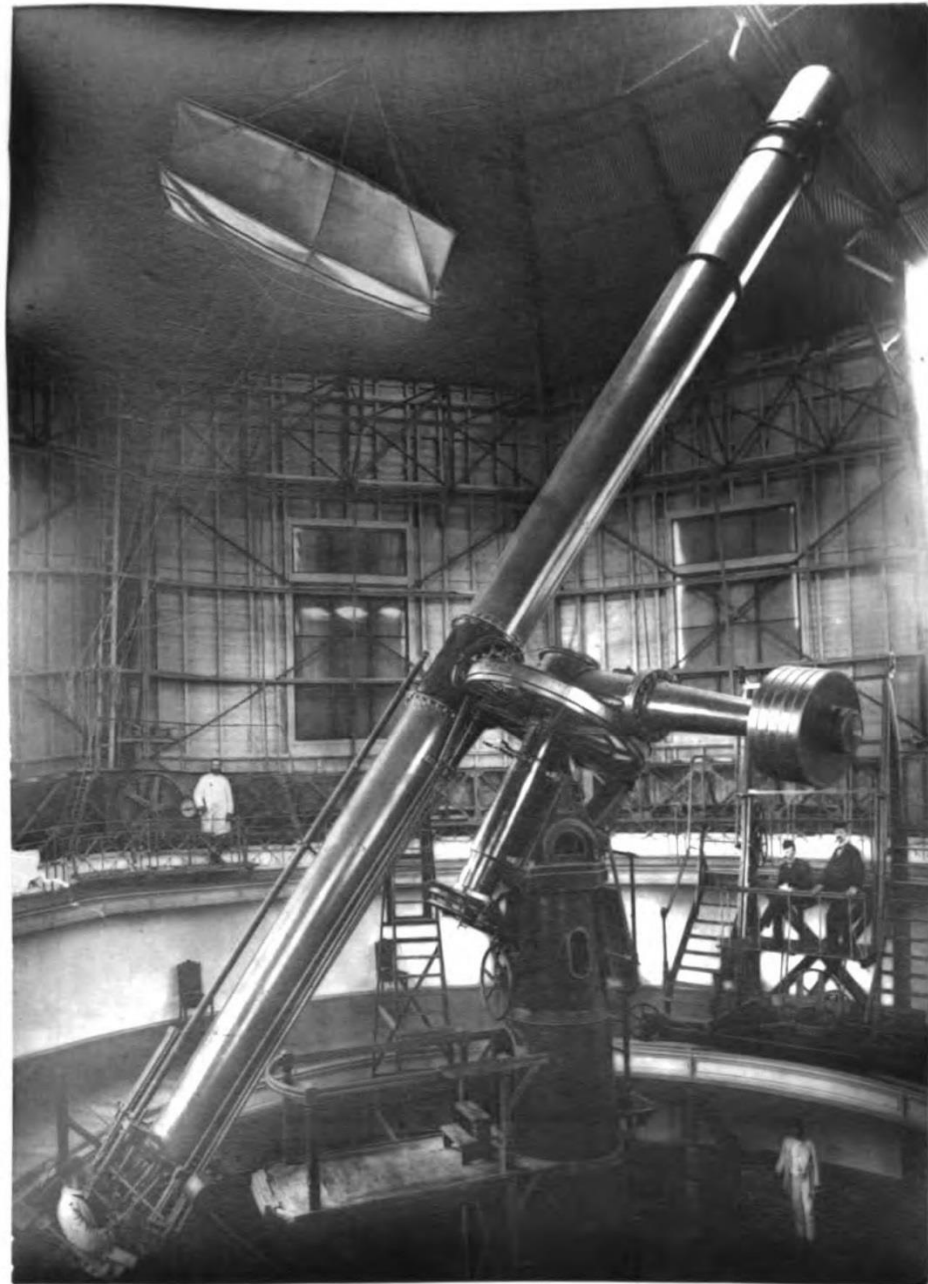


Io: průměr 3642 km (o 5 % větší než Měsíc), 0.183 g; téměř vakuum

NASA/JPL/DLR, volné dílo

Technologický pokrok

- V 19. a 20. století se zlepšilo rozlišení teleskopů natolik, že se na povrchu loď daly pozorovat velké povrchové útvary
- Začátkem 20. století spektroskopická pozorování – objevení absence vodního ledu

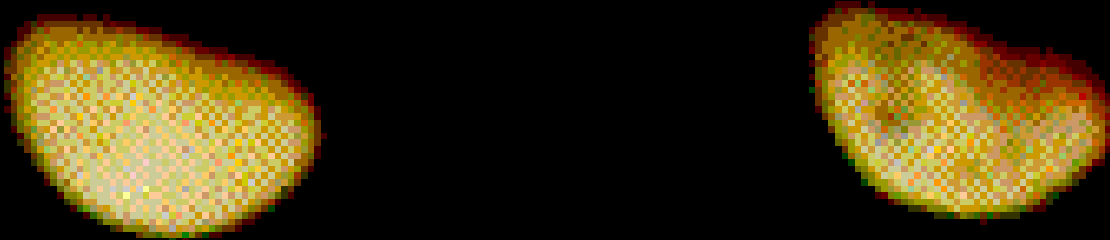


Rok 1890, Woodburytype, Oxford University Press, volné dílo

Pioneer 10 a 11

- Testovací mise
- Průlet 1973 a 1974
- Zpřesnění velikosti a hmotnosti měsíce
- Setkání s vysokou radiací
- Prokázaly existenci atmosféry za pomoci radiového vysílání

První fotografie měsíce Io z „bezprostřední“ blízkosti



Rozlišení: 357 km/pixel

3.5 g/cm³

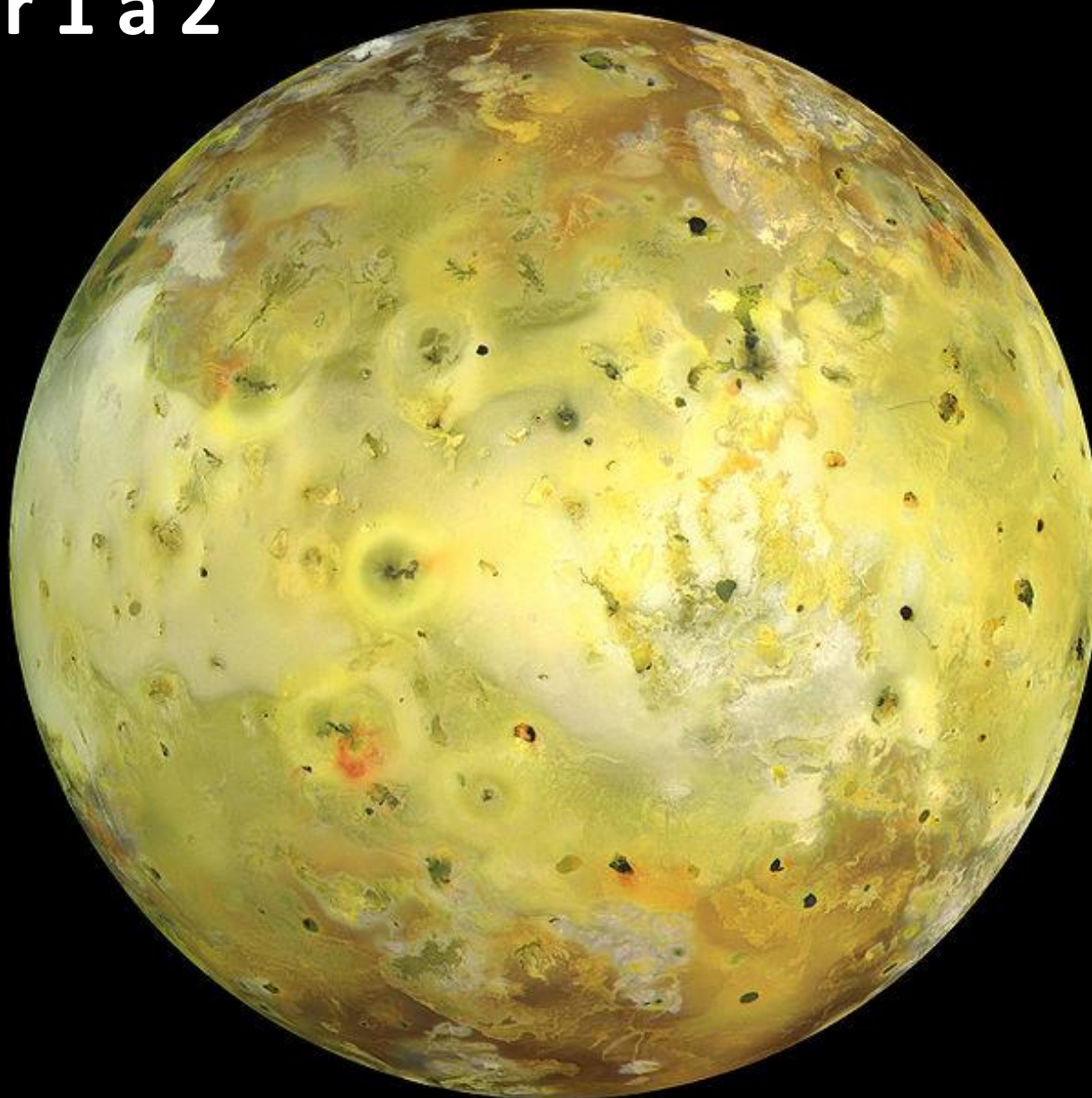
Pioneer 11, NASA, volné dílo

Bude Io sopečně aktivním světem?

- Pár dní před příletem sond Voyager 1 a 2 publikována studie dokládající, že uvnitř měsíce musí vznikat obrovské množství tepla díky slapovému zahřívání
- Předpověď povrchové vulkanismu [Peale et al. \(1979\)](#)

Umělecká představa, NASA. Volné dílo

Voyager 1 a 2



Voyager 1 proletěl okolo Io 5. března 1979 ve vzdálenosti 20 600 km
Voyager 2 následně proletěl okolo Io 9. července 1979 ve vzdálenosti 1 130 000 km

NASA/Voyager 2

Povrch měsíce Io

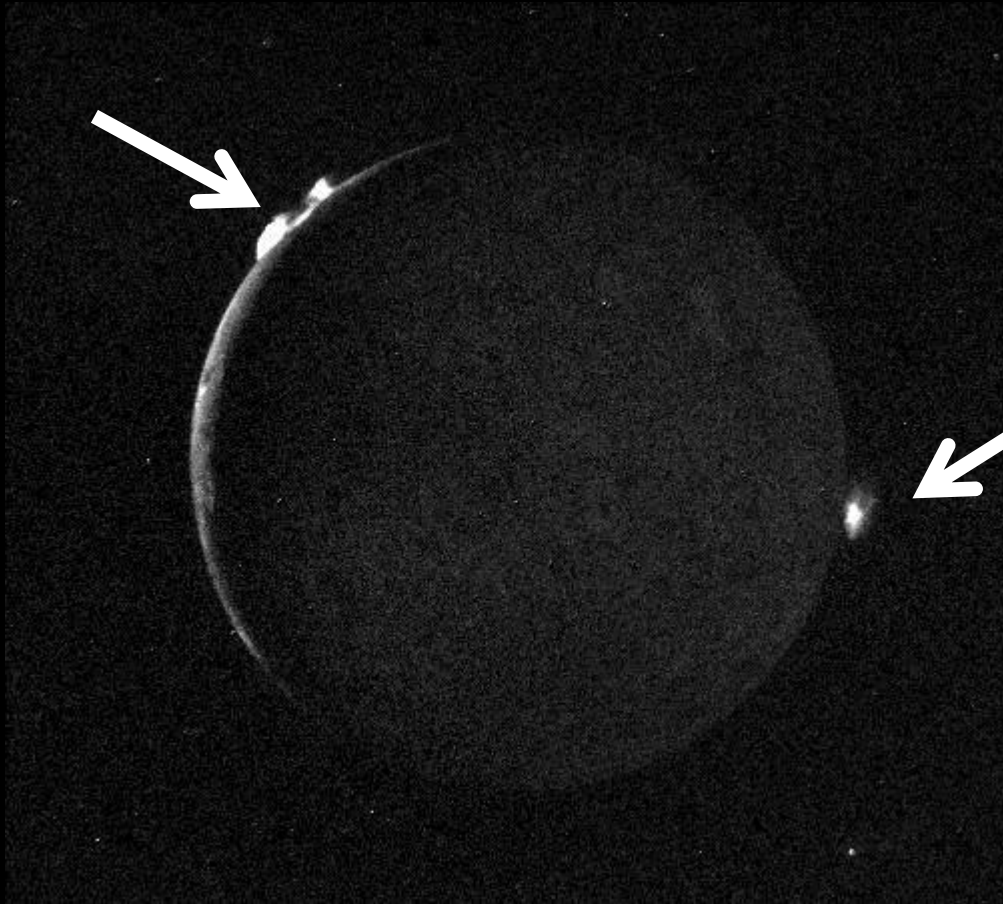
- „Hraje všemi barvami“
- Relativně hladký
- Pokryt minimem impaktních kráterů
- Velké atypické krátery často doprovázené světlými lemy
- Světlé a tmavé oblasti

Objevení aktivní sopečné činnosti



Voyager 1, NASA/JPL, volné dílo

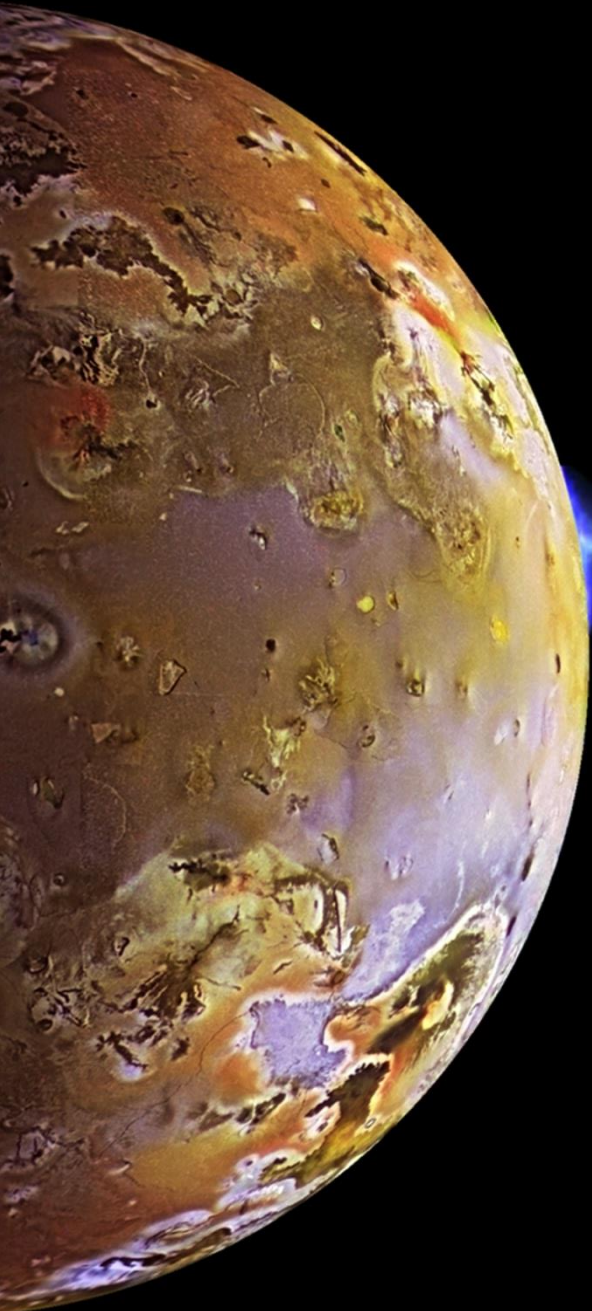
Potvrzení předchozích pozorování



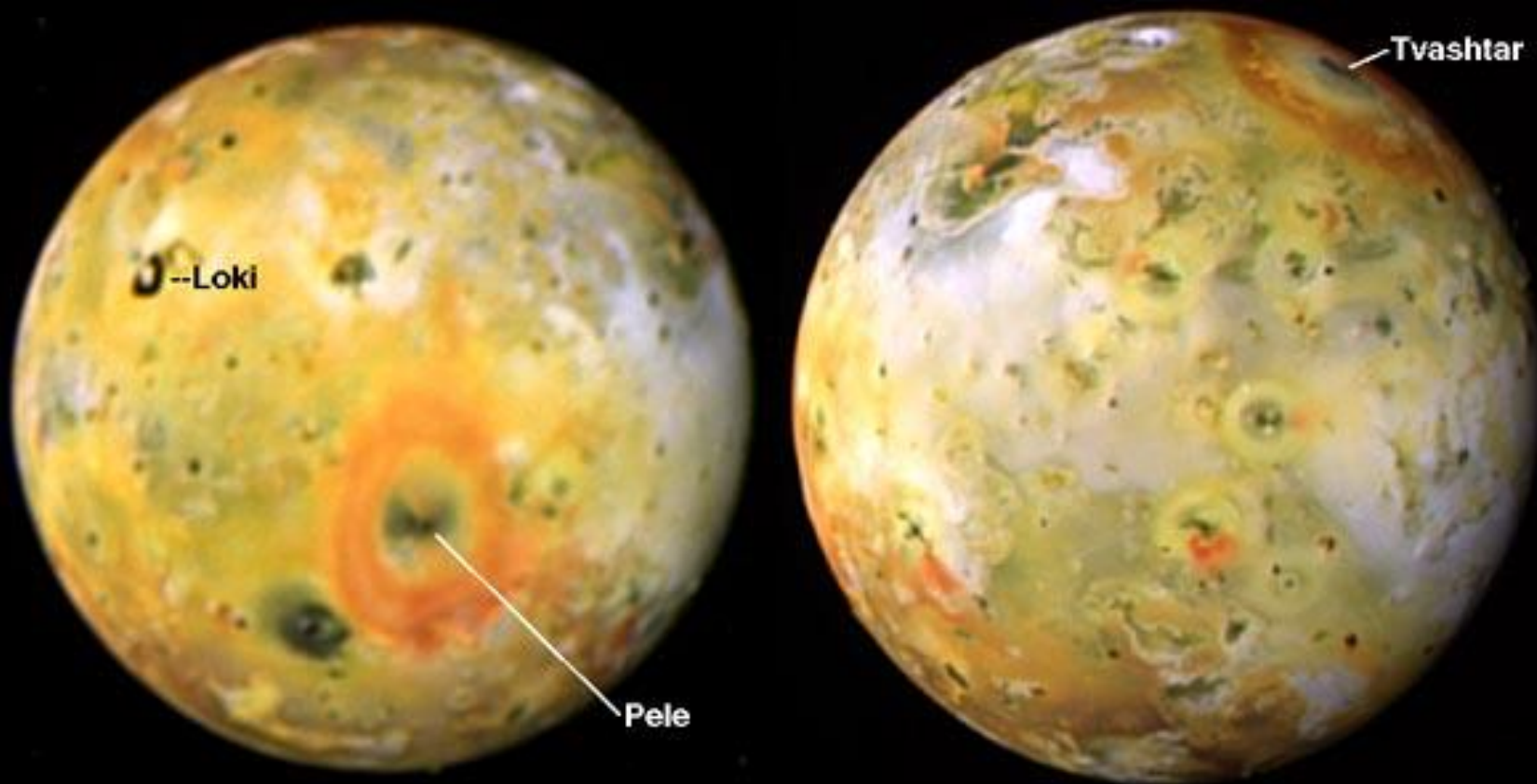
Voyager 2, NASA/JPL, volné dílo

Mračna

- Výskyt mračen se povedlo propojit s útvary na povrchu měsíce, i s teplotními anomáliemi
- Rychlost vyvrhování okolo 1 km/s
- Výzkum mračen odhalil, že na povrchu existují dva typy
 - Nižší mračna (vázané na okraje tmavších oblastí)
 - Vyšší mračna (vázané na široké krátery)

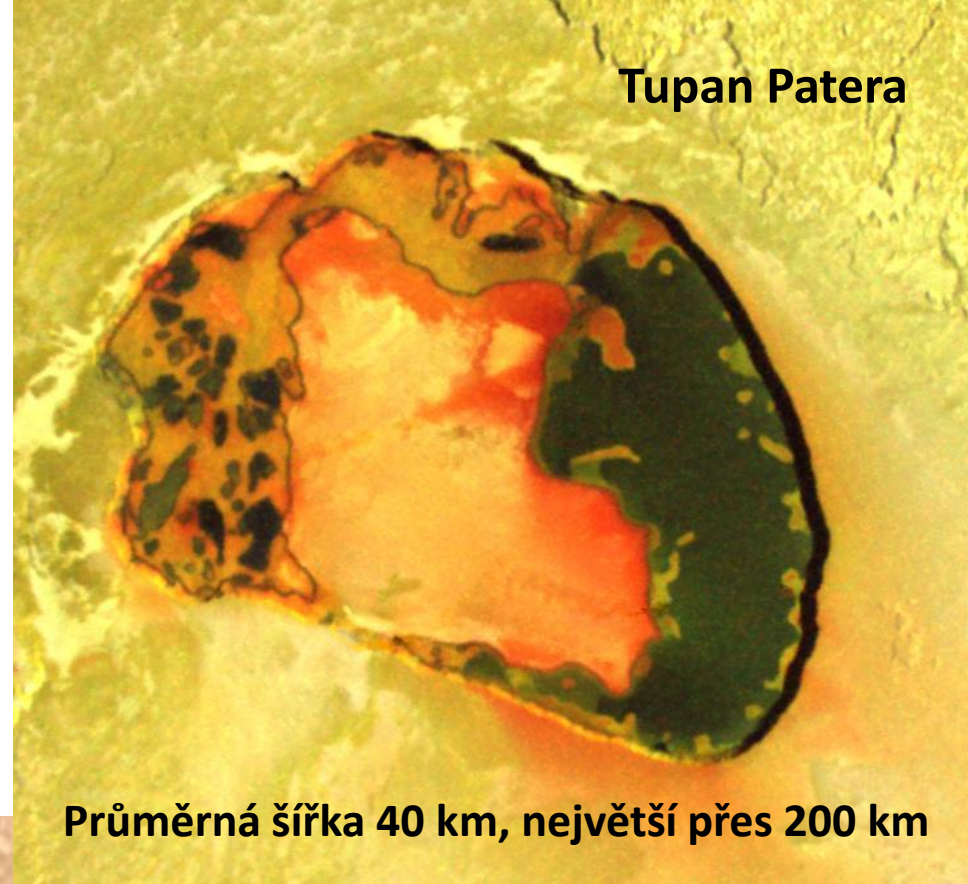


Spad materiálu zpět na Io



Zvláštní krátery, tzv. *paterae*

Tupan Patera



Průměrná šířka 40 km, největší přes 200 km

Thomagata Patera



Ah Peku Patera

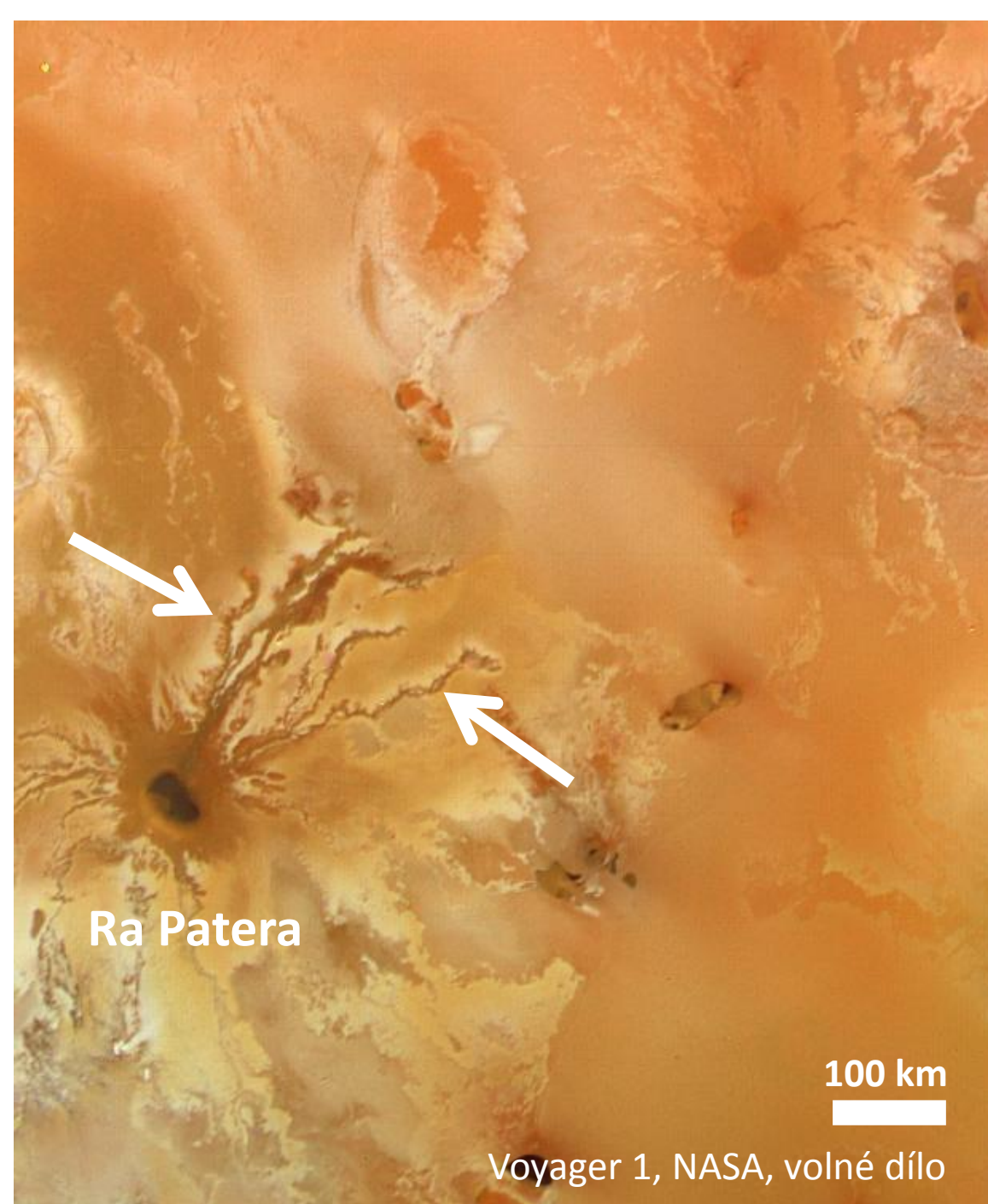


Monan Patera



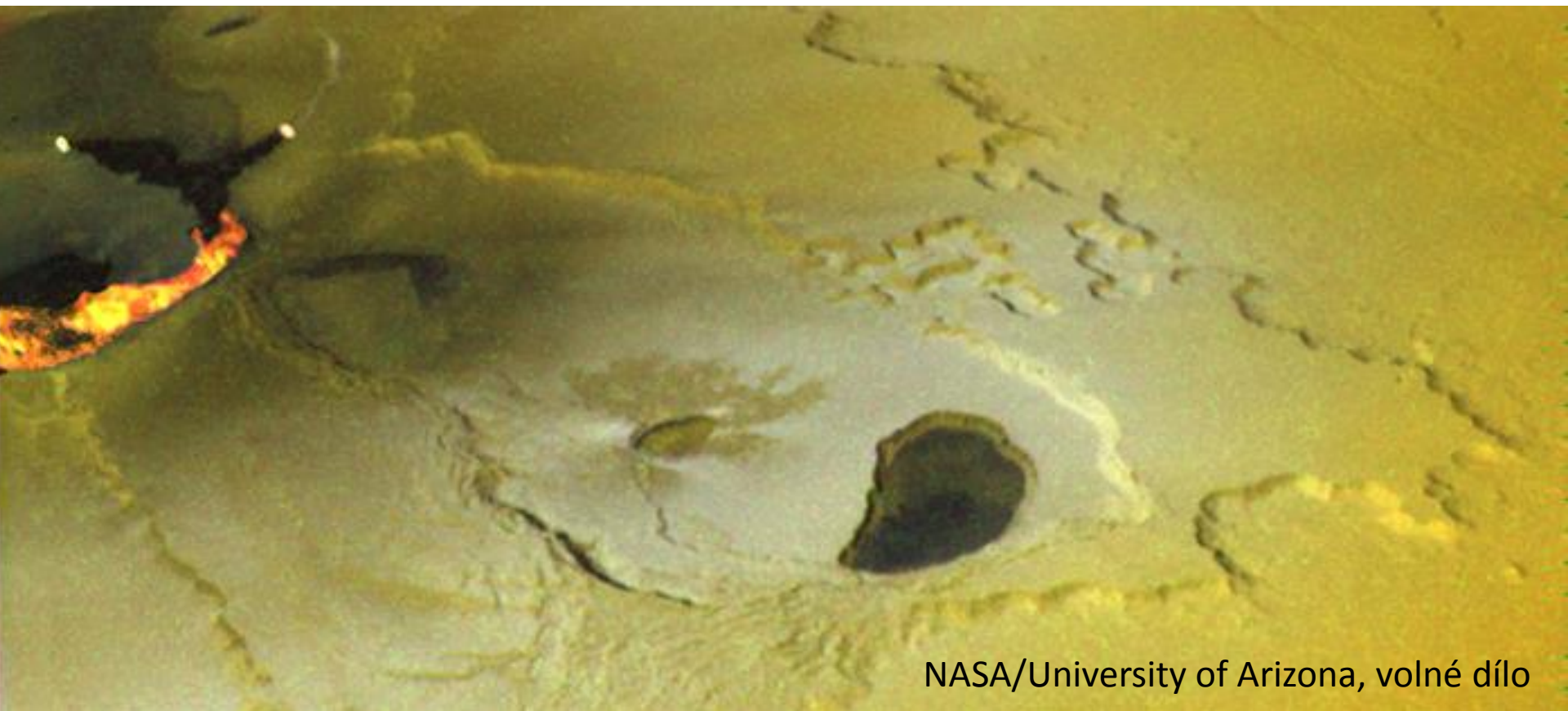
Proudy

- Na povrchu pozorována řada proudů vycházejících z nepravidelných kráterů
- Jejich vzhled se nápadně podobá pozemským lávovým proudům



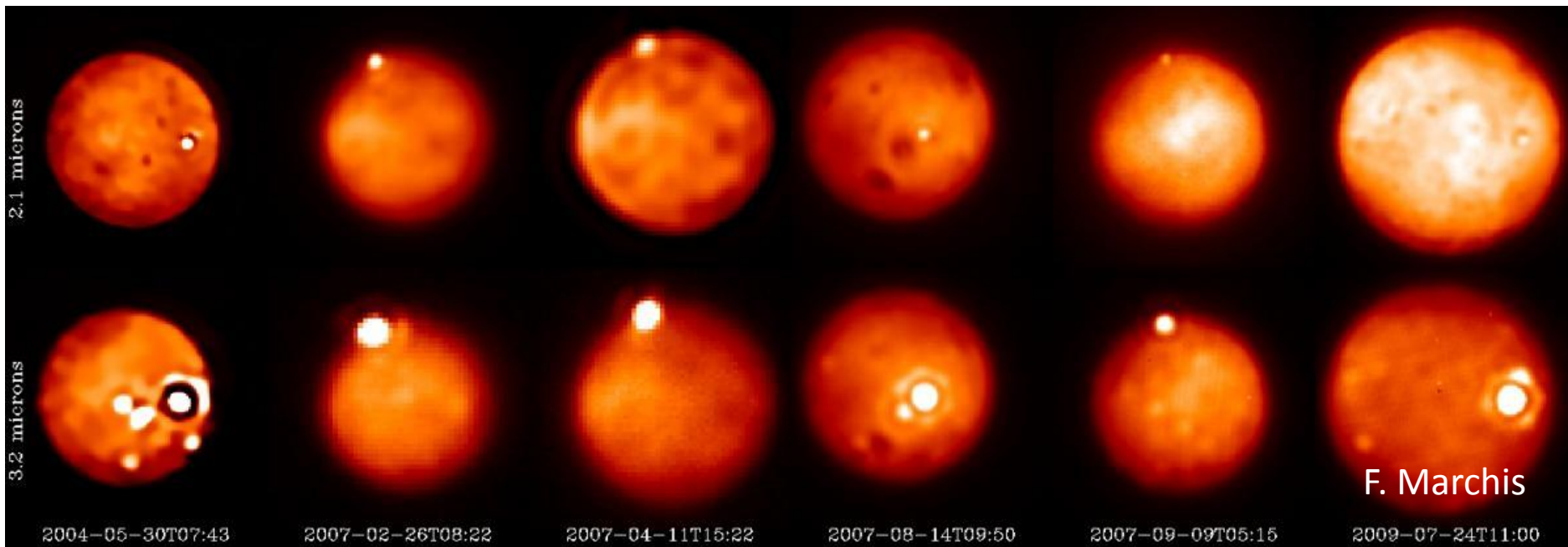
Aktivní lávové proudy

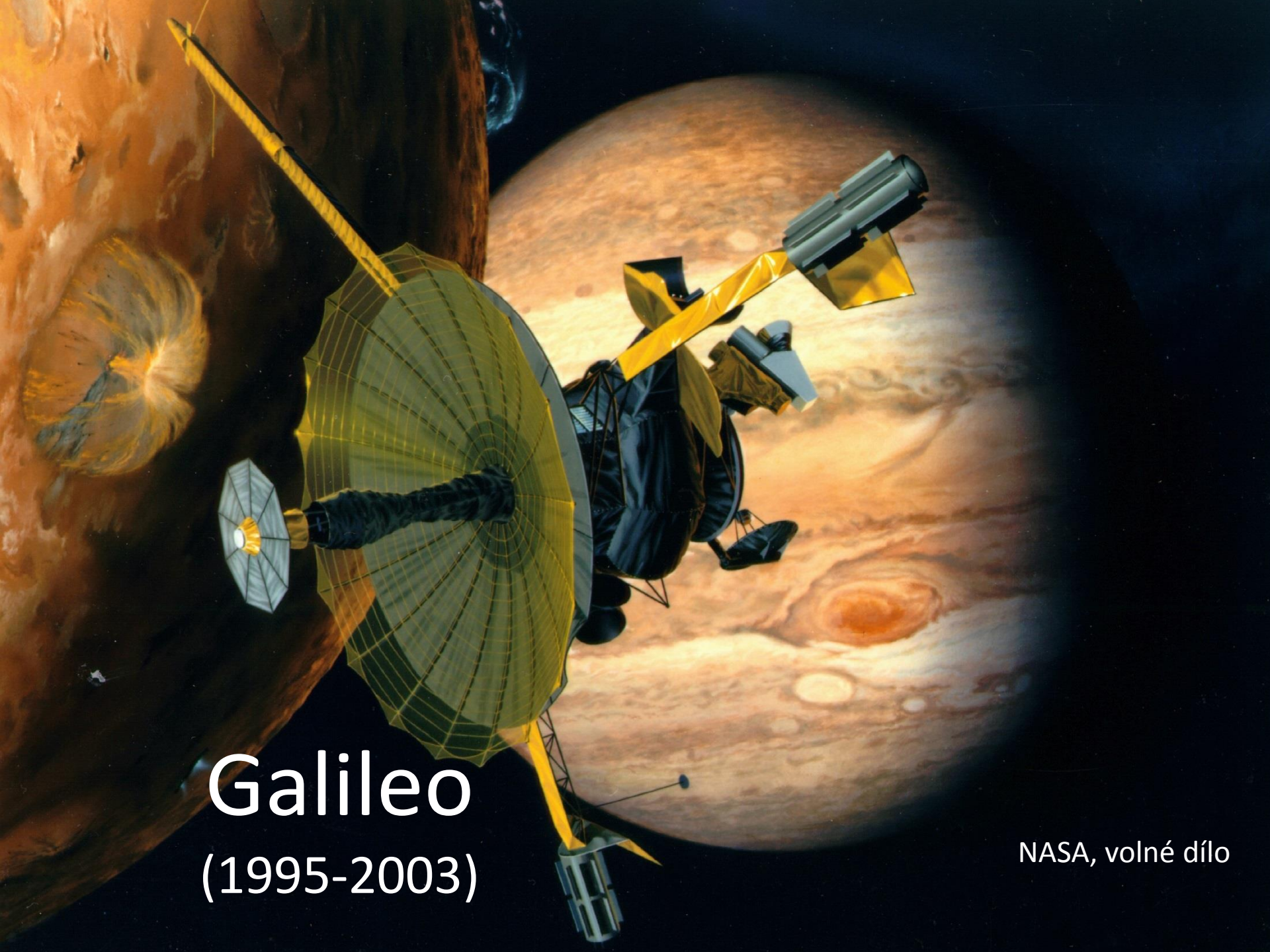
- Termální snímkování odhalilo teplotu proudů mezi 150 až 250 °C
- Četná přítomnost síry na povrchu
- Představa lo jakožto světa utvářeného výlevy síry



Teplotní anomálie

- V roce 1986 se povedlo pozemským observatořím zaznamenat teplotní anomálii na povrchu Io, u které se teplota pohybovala vysoko nad bodem varu síry (!), okolo 1600 K
- Vulkanismu musí dominovat **silikátové magma**
- Láva se na povrchu v prostředí vakua chladí rychle



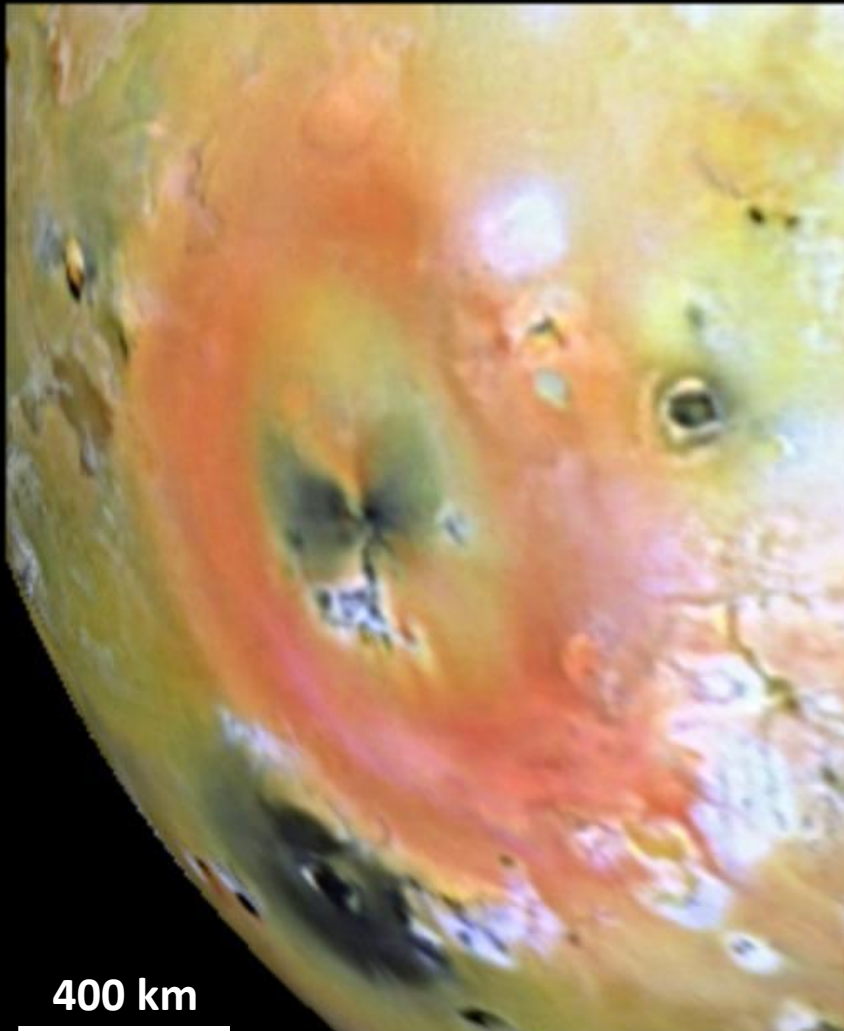


Galileo

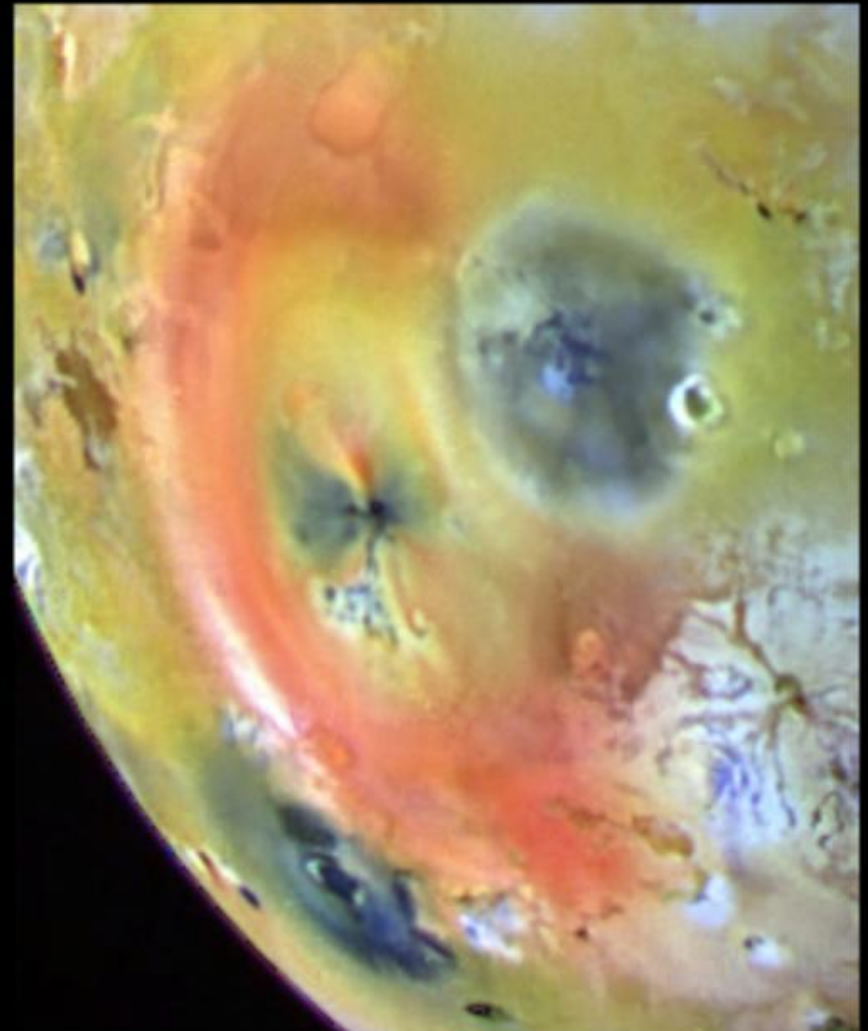
(1995-2003)

NASA, volné dílo

Snímkování povrchu v čase



400 km



04/1997 a 09/1997

Galileo, NASA, volné dílo



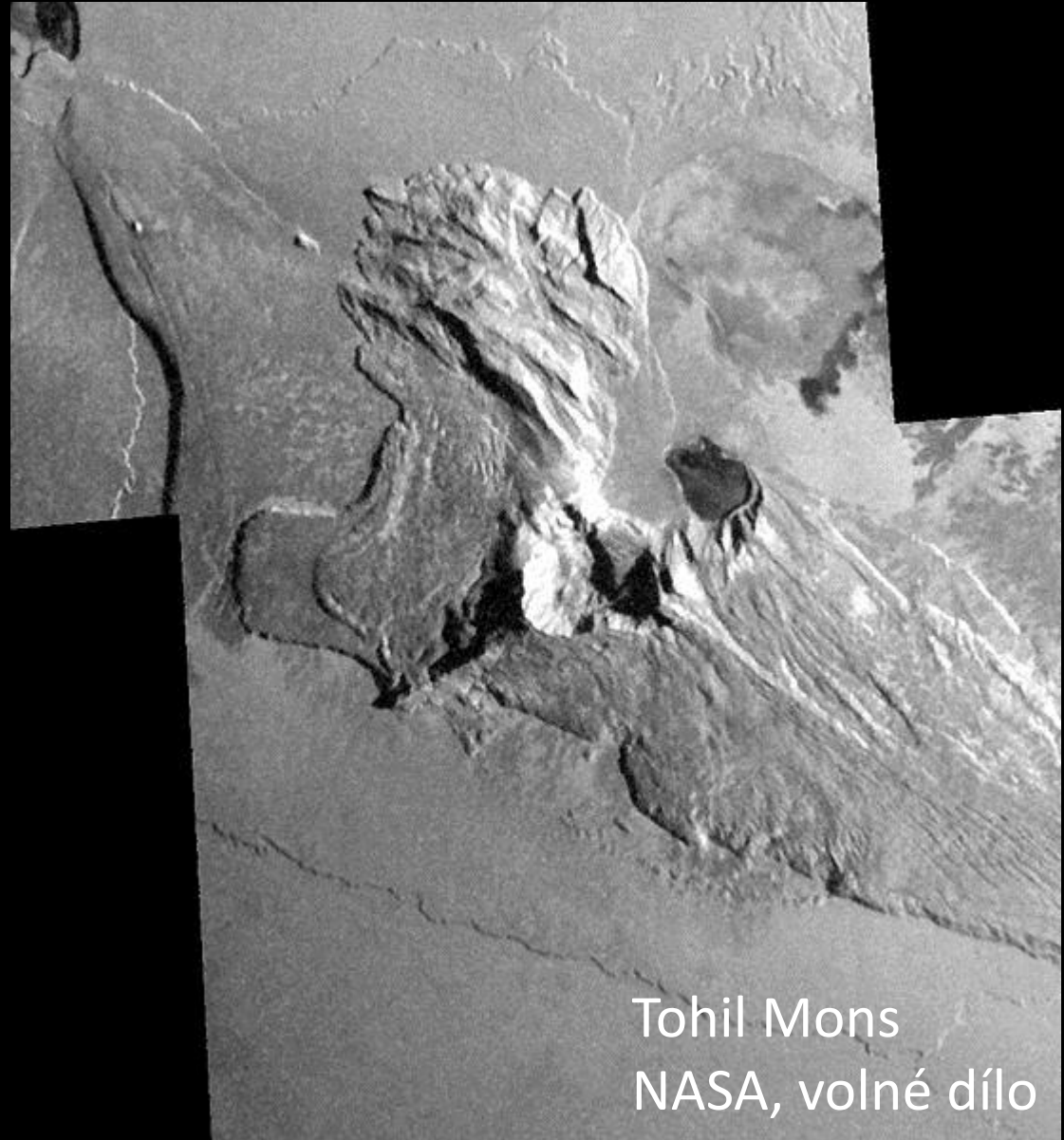
Relativně hladký povrch

Vlivem usazování sopečných
hornin, rychlost ca 1 mm/rok

Měřítko geologického času...
1 km za 1 milión let...

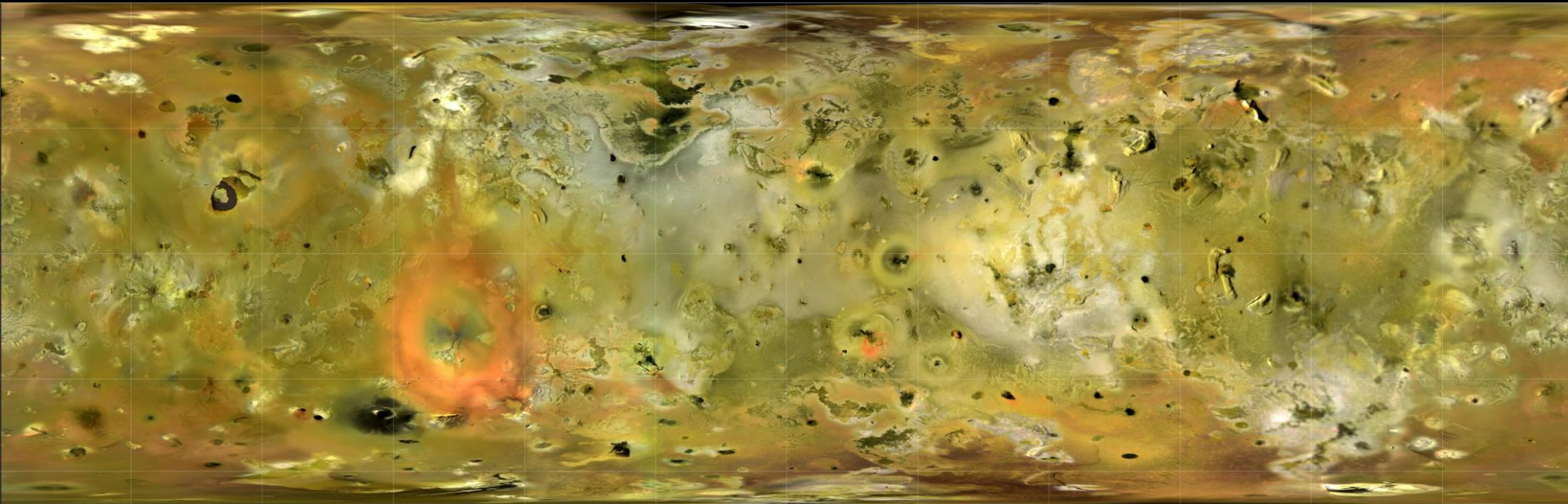
Hory

- Na povrchu 100 až 150 hor, většinou v místech, kde nejsou sopky
- Průměrná výška 6 km, nejvyšší 17,5 km
- Většinou tektonického původu
 - komprese na bázi litosféry kvůli neustálé subsidence litosféry



Tohil Mons
NASA, volné dílo

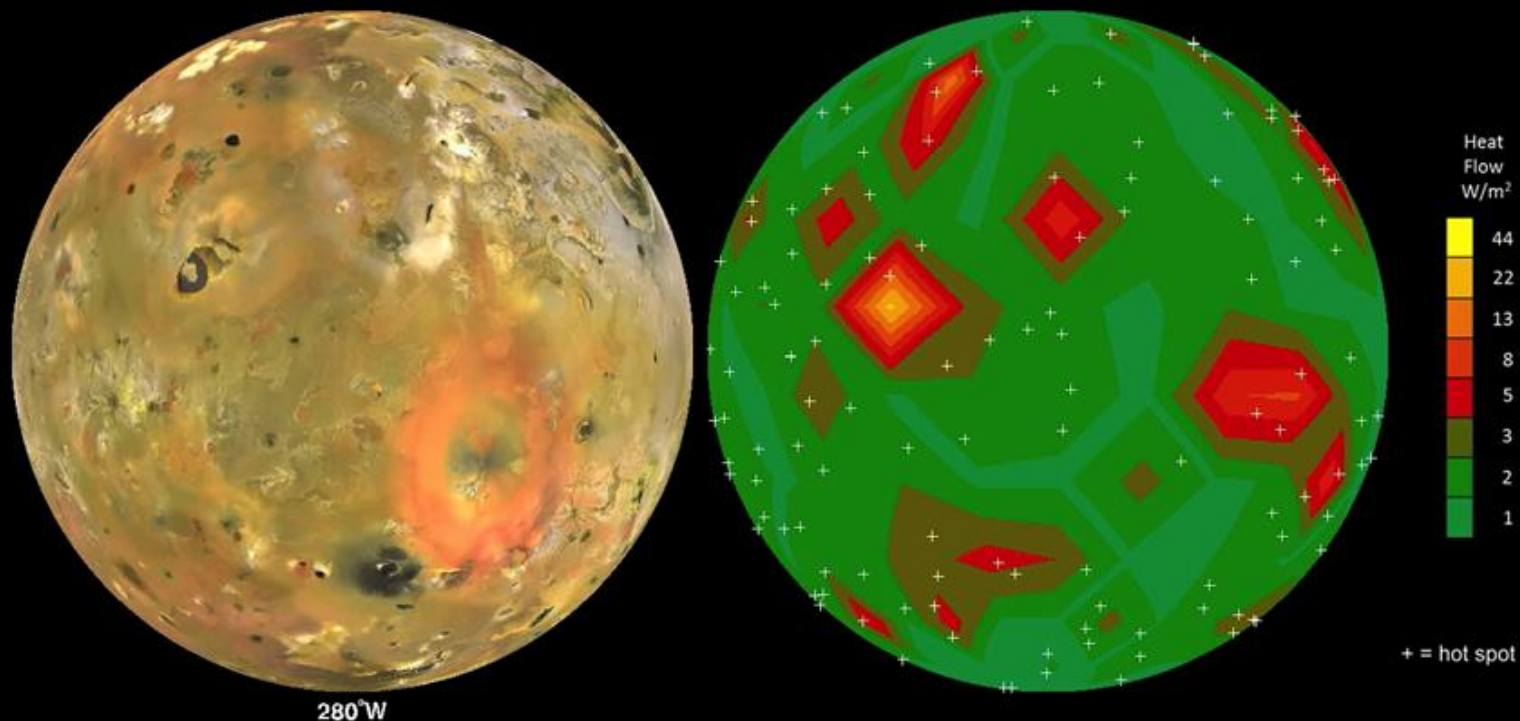
Globální sopečná činnost



NASA. Volné dílo

- Na povrchu pozorováno okolo 150 aktivních sopek
- Povrch pokryt množstvím uloženin síry – různý stupeň oxidace mění její barvu (čtyřmocná se mění na osmimocnou)

Mapa průměrného tepelného toku

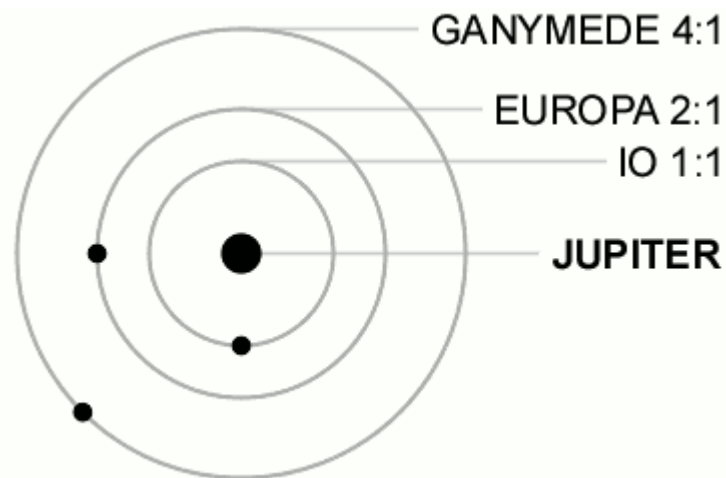


[Davies et al., 2015](#)

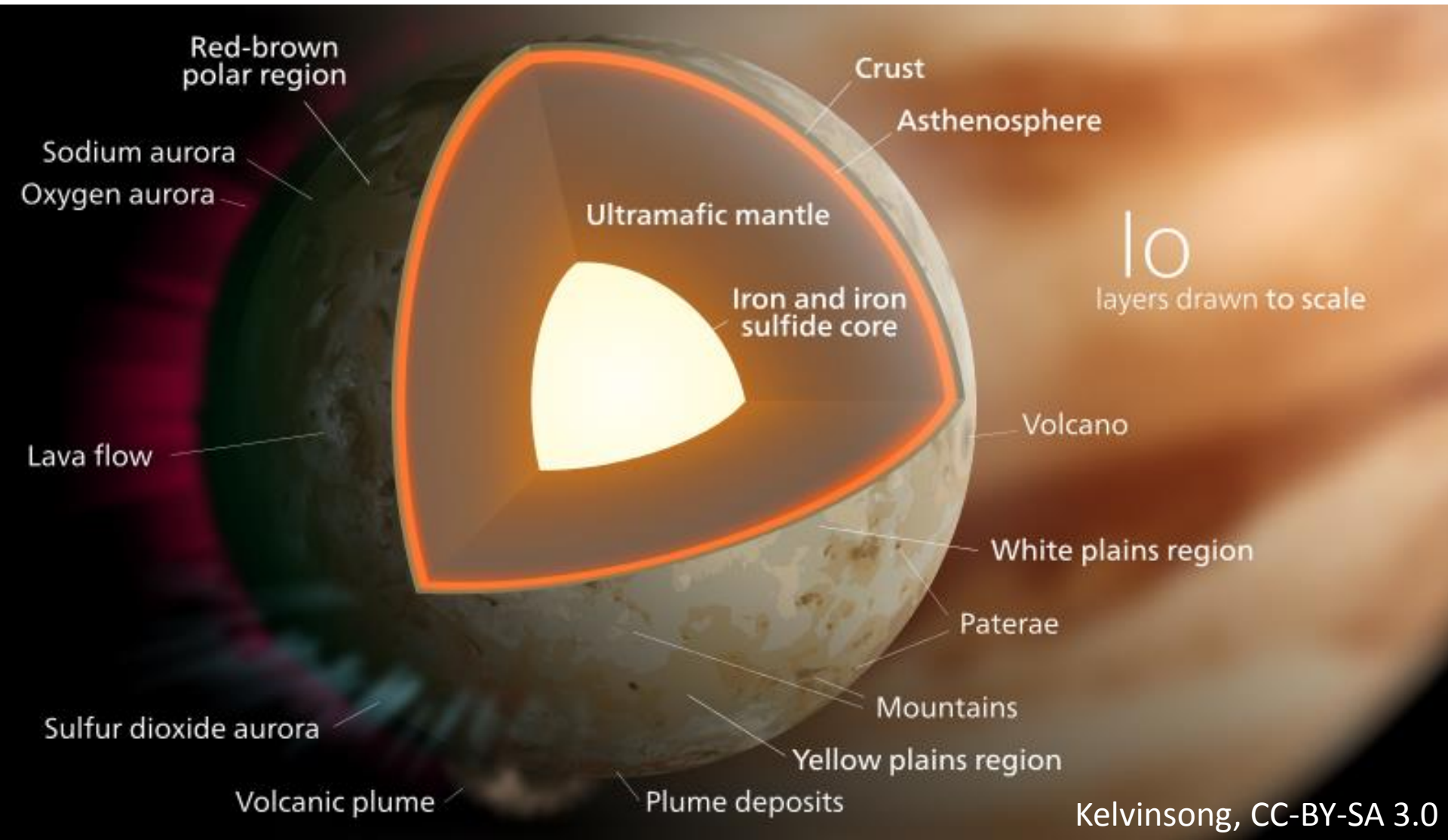
**Tepelný tok Io je přibližně 40 krát větší než tepelný tok Země.
To je 200 krát více, než umožňuje (s ohledem na velikosti Io)
rozpad radioaktivní prvků.**

Zdroj tepla – slapové zahřívání

- Obíhá 421 700 km od středu planety
- Oběžná dráha měsíce není kruhová
- Gravitace Jupiteru se snaží deviaci dráhy upravit
- Interakce s dalšími měsíci (rezonance) tomu brání
- **Slapové síly deformují měsíc přibližně o 100 metrů**
- Změna síly zahřívání v čase



Vnitřní stavba Io

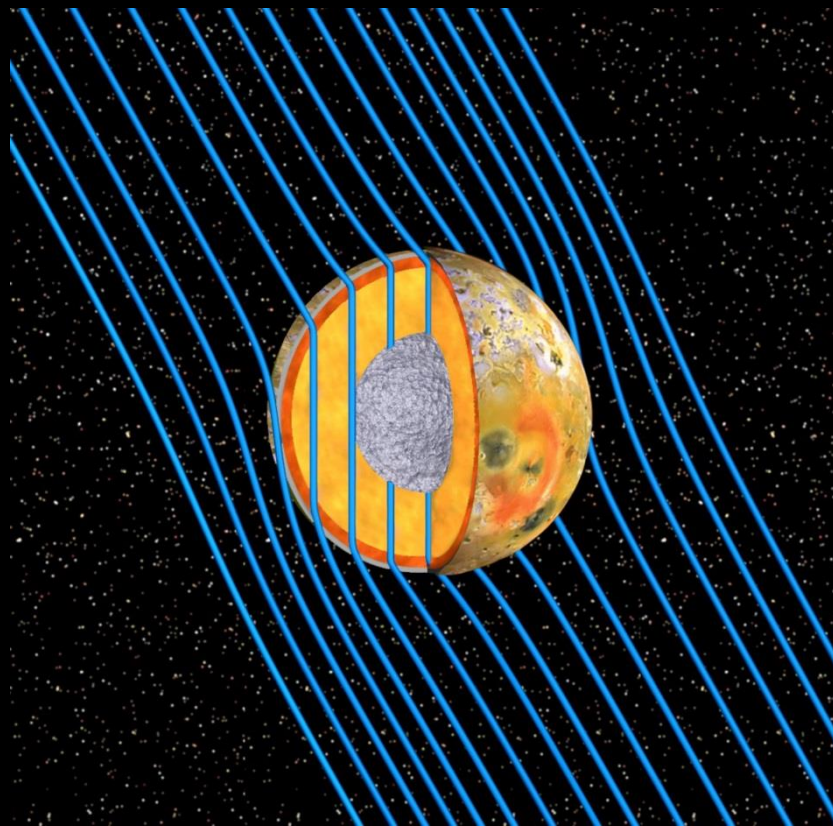


Plášť musí být z 10 až 20 % tvořen taveninou

Indukované magnetické pole

- V roce 2009 se po znovuzpracování dat ze sondy Galileo podařilo objevit indukované magnetické pole
- K jeho vzniku dochází relativně blízko povrchu (~50 km)
- To naznačuje existenci kapalné vrstvy – magmatického oceánu o min. tloušťce 50 kilometrů

[Khurana et al., 2009](#)



Umělecká představa, NASA, volné dílo

Podpovrchový magmatický oceán

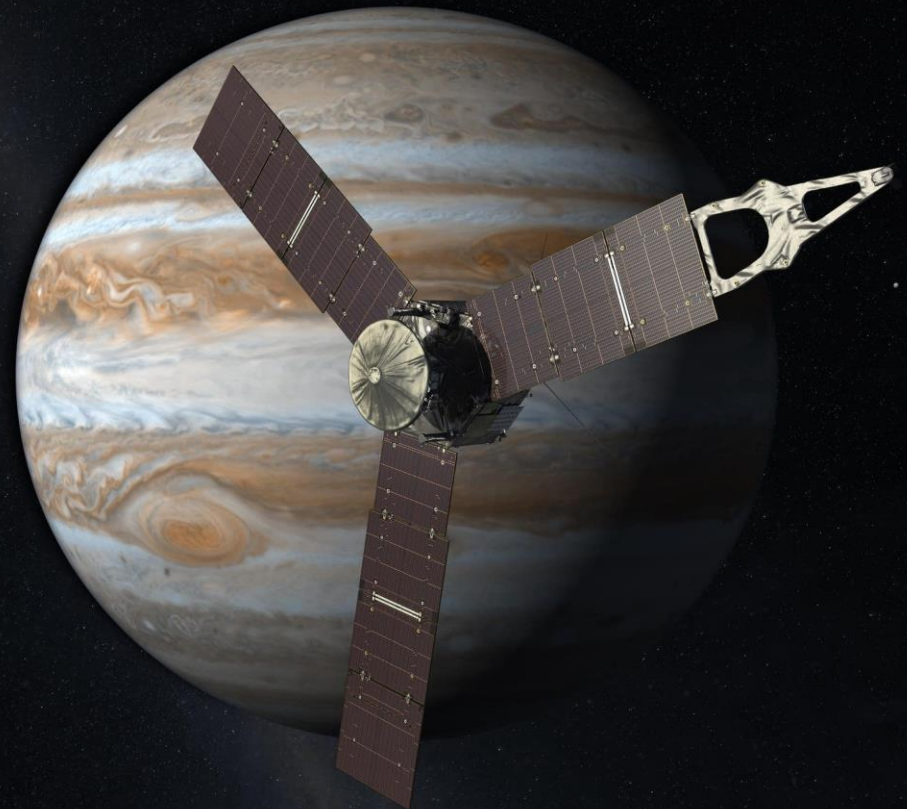
- Magma ovlivňováno slapovými jevy > dodatečně zahříváno
- Chlazení měsíce za pomoci „Heat-pipe“ modelu (advekce)

[O'Reilly and Davies, 1981](#)



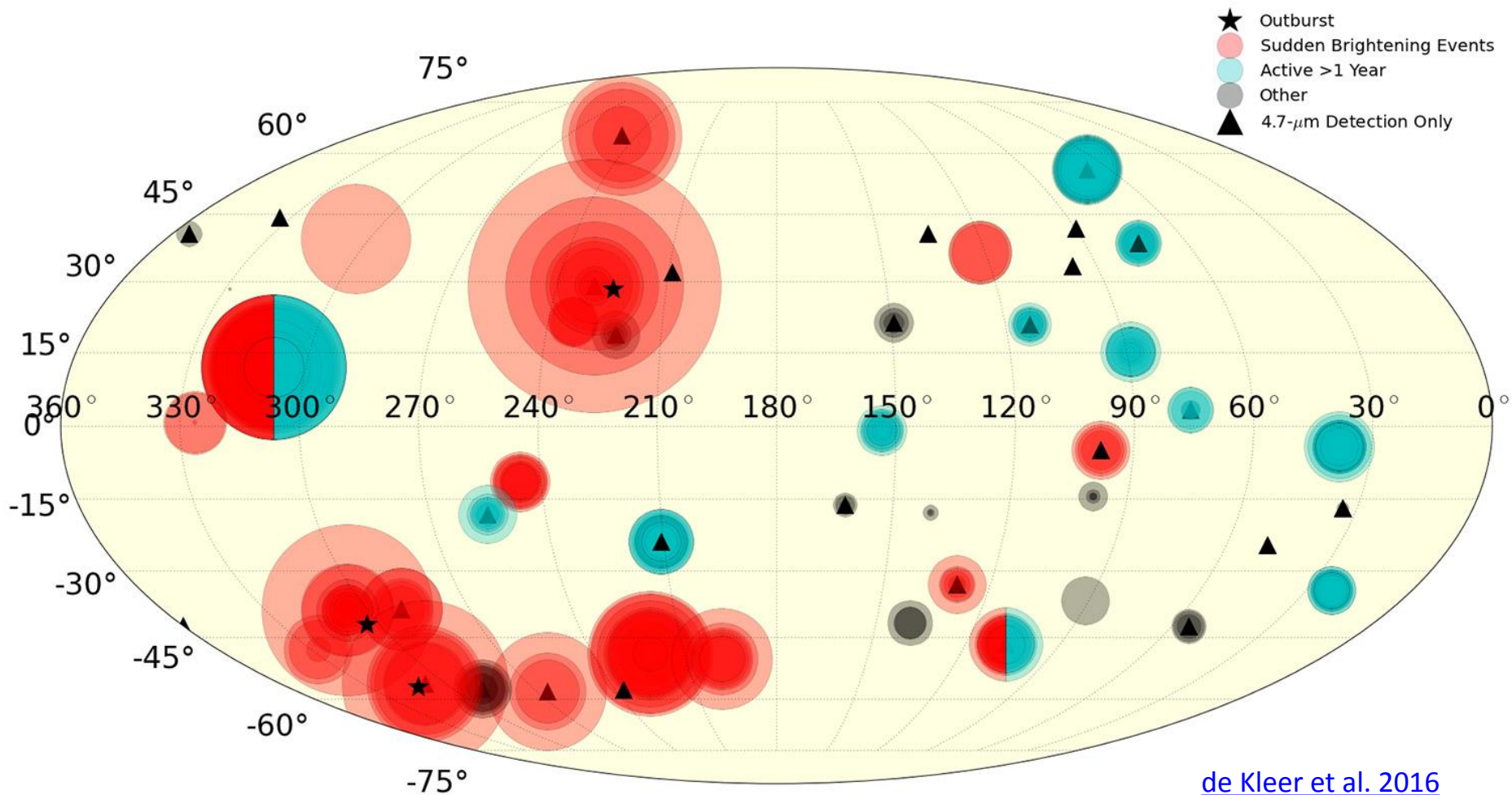
Budoucnost

- JUNO – nemá vhodné kamery, ale může sopečnou činnost pozorovat infračerveným spektrometrem
- Evropská sonda JUICE - nemá ho přímo zkoumat, ale může udělat pozorování během cesty ke Ganymedu
- Návrh mise Io Volcano Observer v rámci projektu Discovery



Umělecká představa, NASA, volné dílo

Závislost na pozemských pozorování...



48 horkých skvrn aktivních v rozmezí 8/2014 až 12/2015

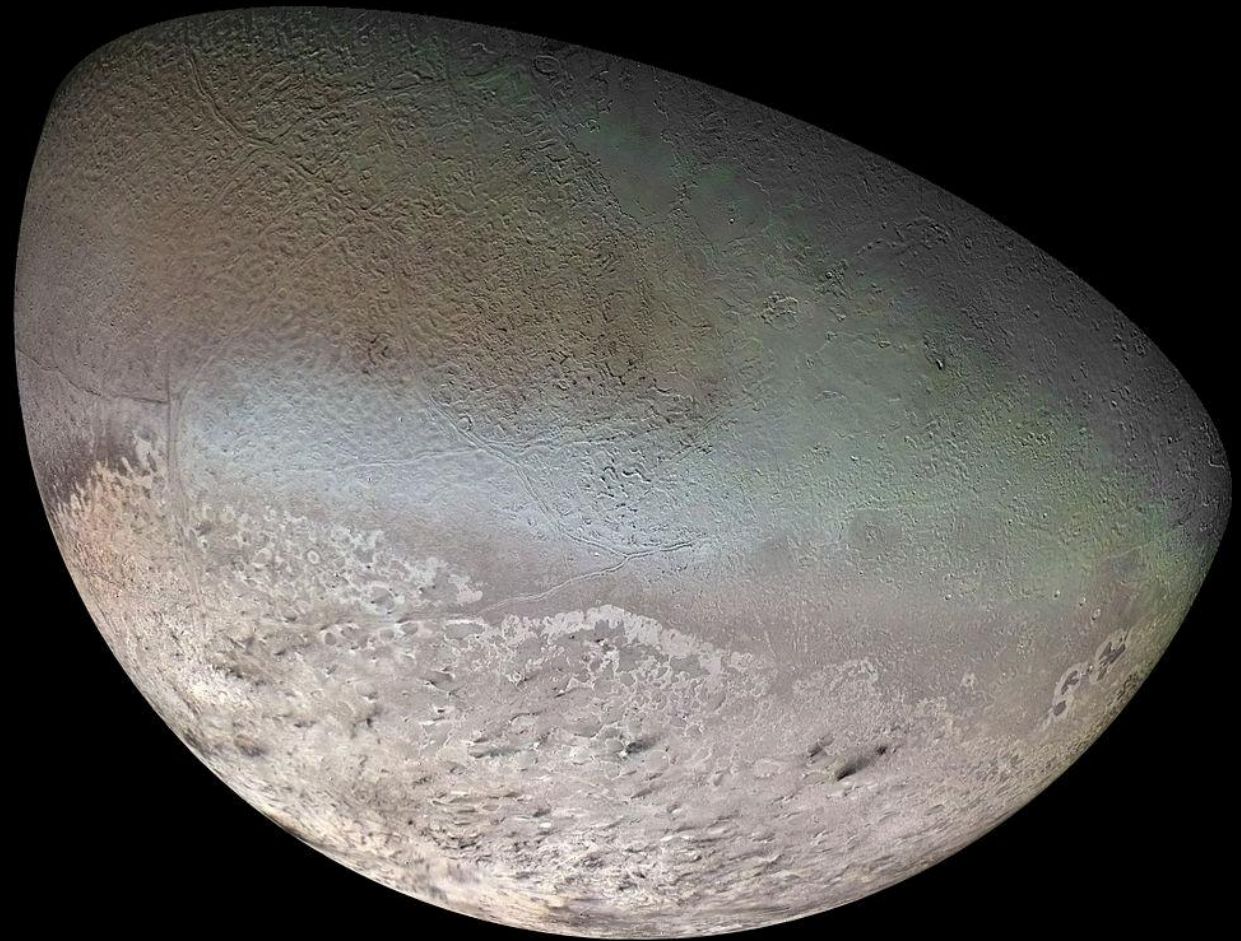
Shrnutí

- Sopečně nejaktivnější těleso sluneční soustavy
- Sopečná činnost široce rozšířena po povrchu
- Znamky výlevného, i explozivního vulkanismu
- Teplo vzniká díky slapovému zahřívání
- Existence podpovrchového magmatického oceánu

Kryovulkanismus

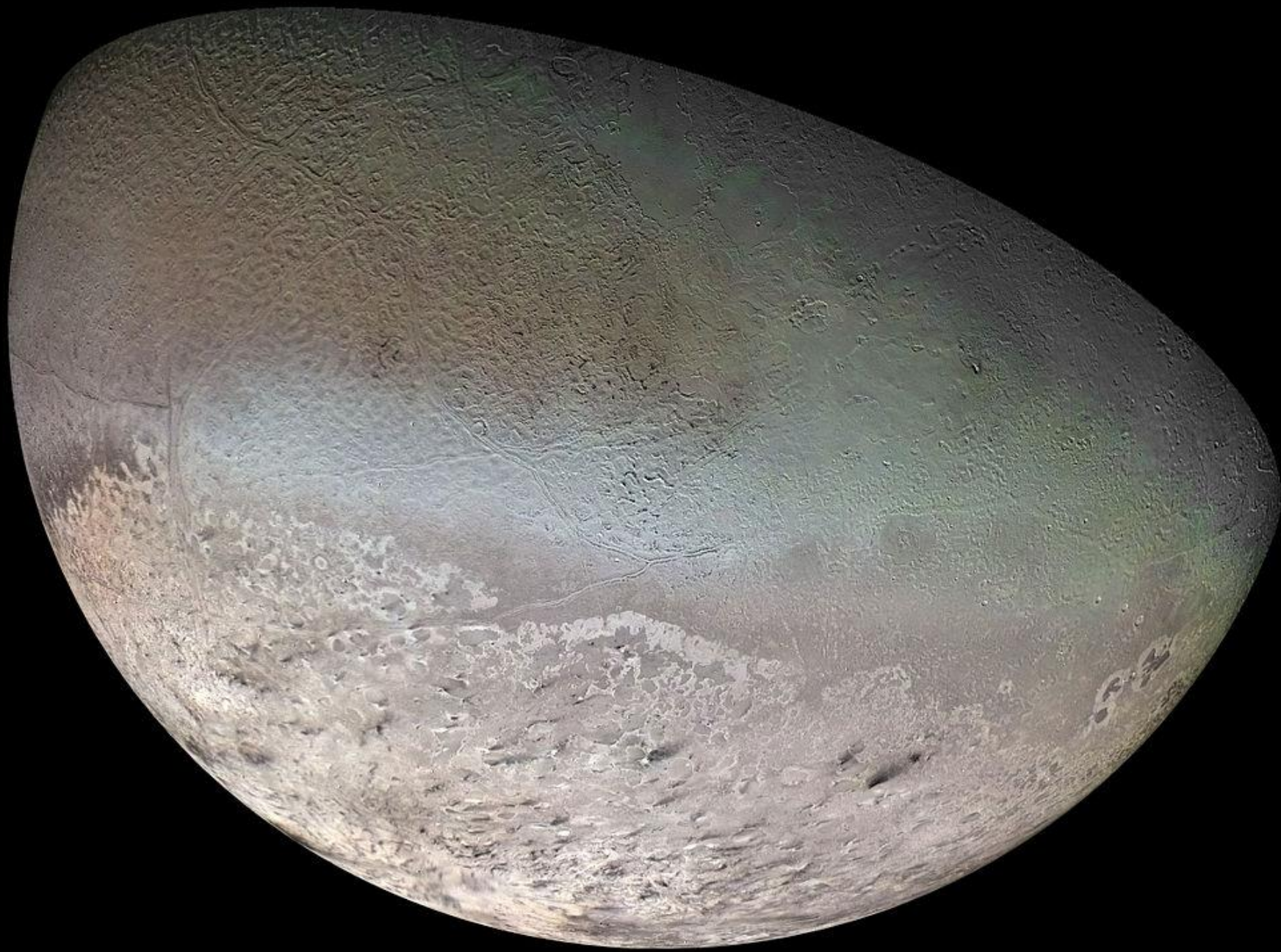


NASA



Triton

- Objeven roku 1846 a navštíven sondou Voyager 2 roku 1989
- Průměr $2706.8 \pm 0,9$ km (0,21 Země) = 7 největší měsíc
- Složením podobný Plutu (vodní led a zmrzlý dusík)



Hladké pláně



[Kargel and Strom, 1990](#); [Helfenstein et al., 1992](#)

Voyager 2/NASA

Povrch Měsíce



Voyager 2/NASA

Pásky propadlin



Voyager 2/NASA

Pásky propadlin

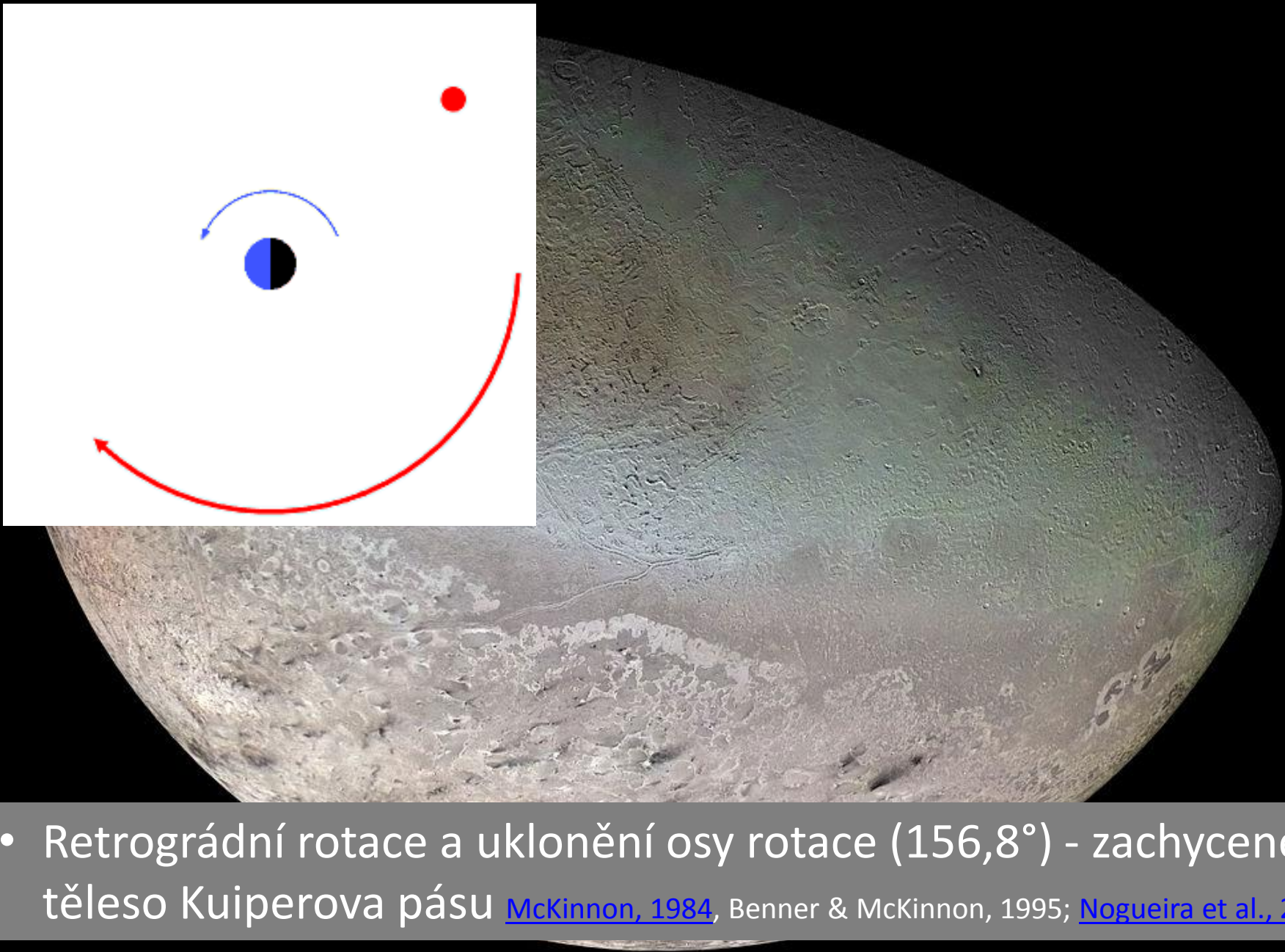


Dave Bunnell, CC-BY-SA 2.5

Voyager 2/NASA

Zlomy



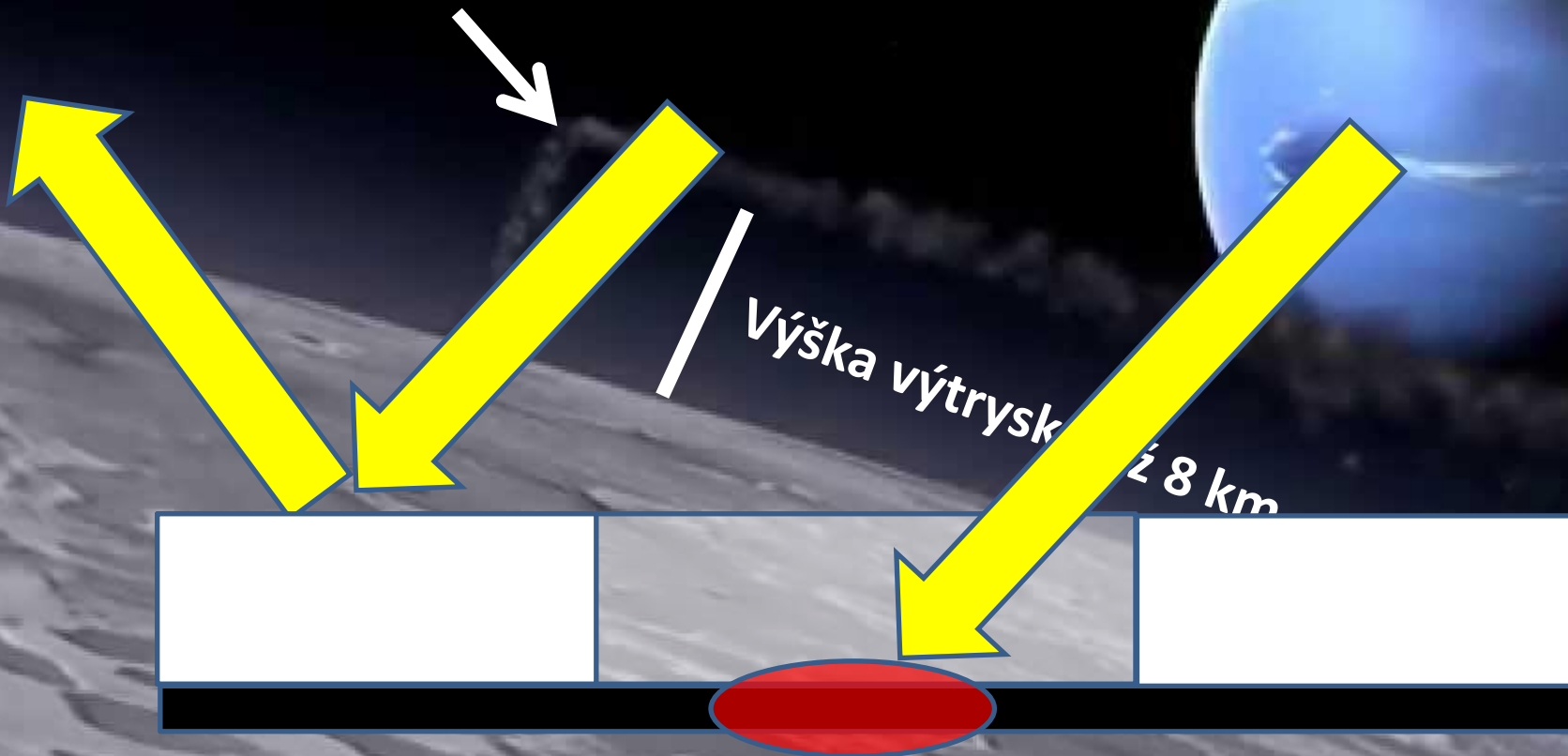


- Retrográdní rotace a uklonění osy rotace ($156,8^\circ$) - zachycené těleso Kuiperova pásu [McKinnon, 1984](#), Benner & McKinnon, 1995; [Nogueira et al., 2011](#)

Ale to není vše! Aktivní kryovulkanismus



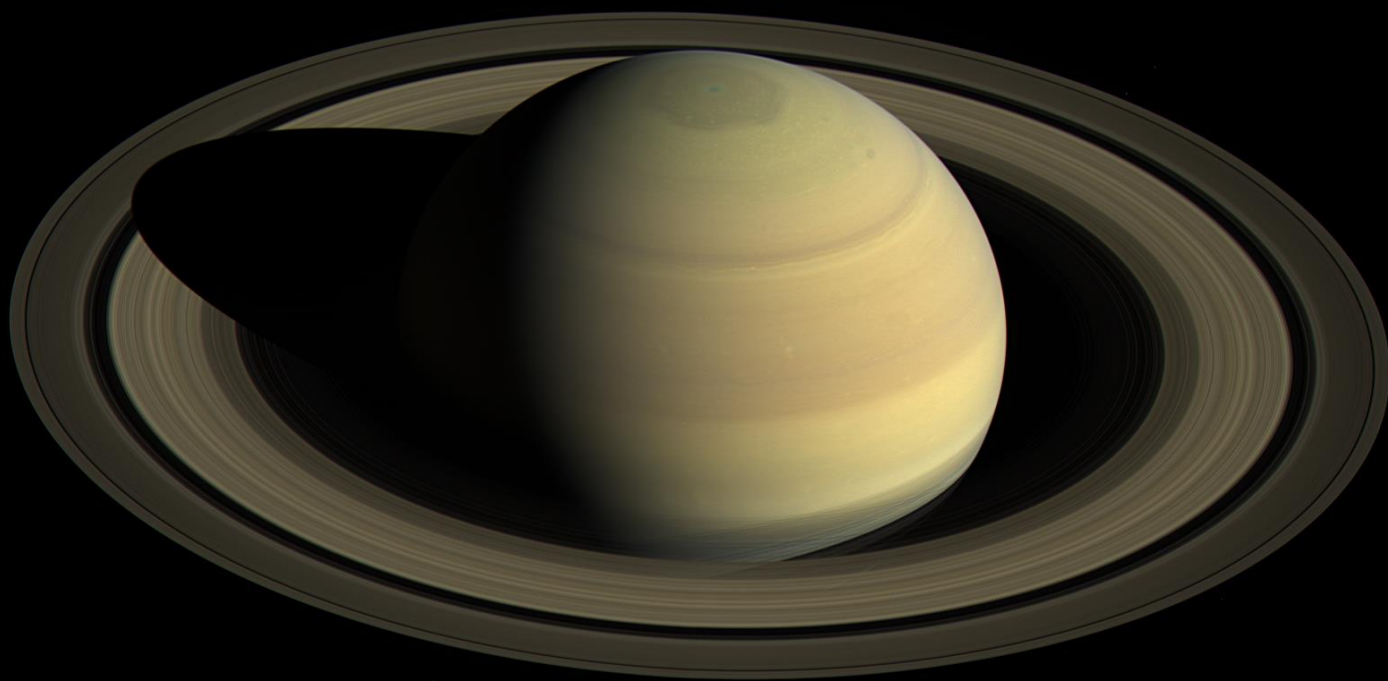
Částice dusíku



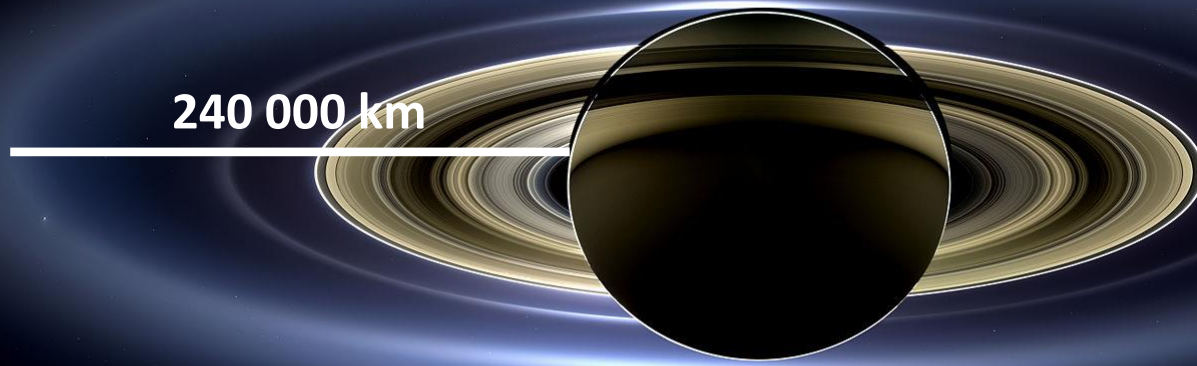
Slunce + čirý led = skleníkový efekt!

Umělecká představa, Mark A. Garlick

Saturn



Prstence Saturnu



240 000 km



Prsteneč E

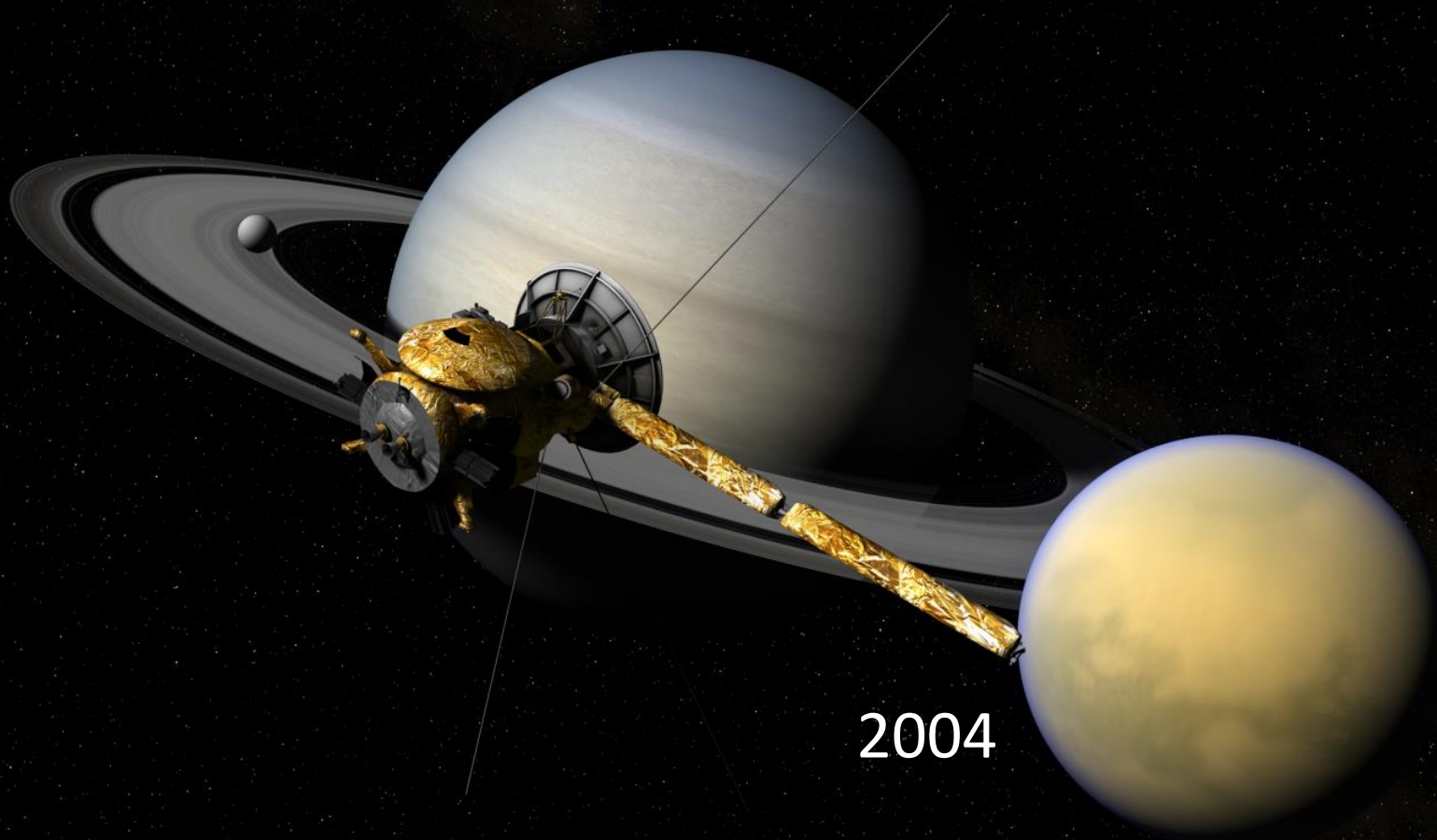
A black and white photograph of Saturn's rings. A white arrow points to a small, bright spot on the inner edge of the rings, labeled "Měsíc Enceladus". The rings are a bright, glowing arc on the right side of the image, set against a dark background. Several other small, bright spots are visible in the background.

Měsíc Enceladus

Leží v nejužší, ale zato na částice nejbohatší části Prstence E
Prstenec je v čase nestabilní! Během 10 000 až 1 000 000 let zmizí.

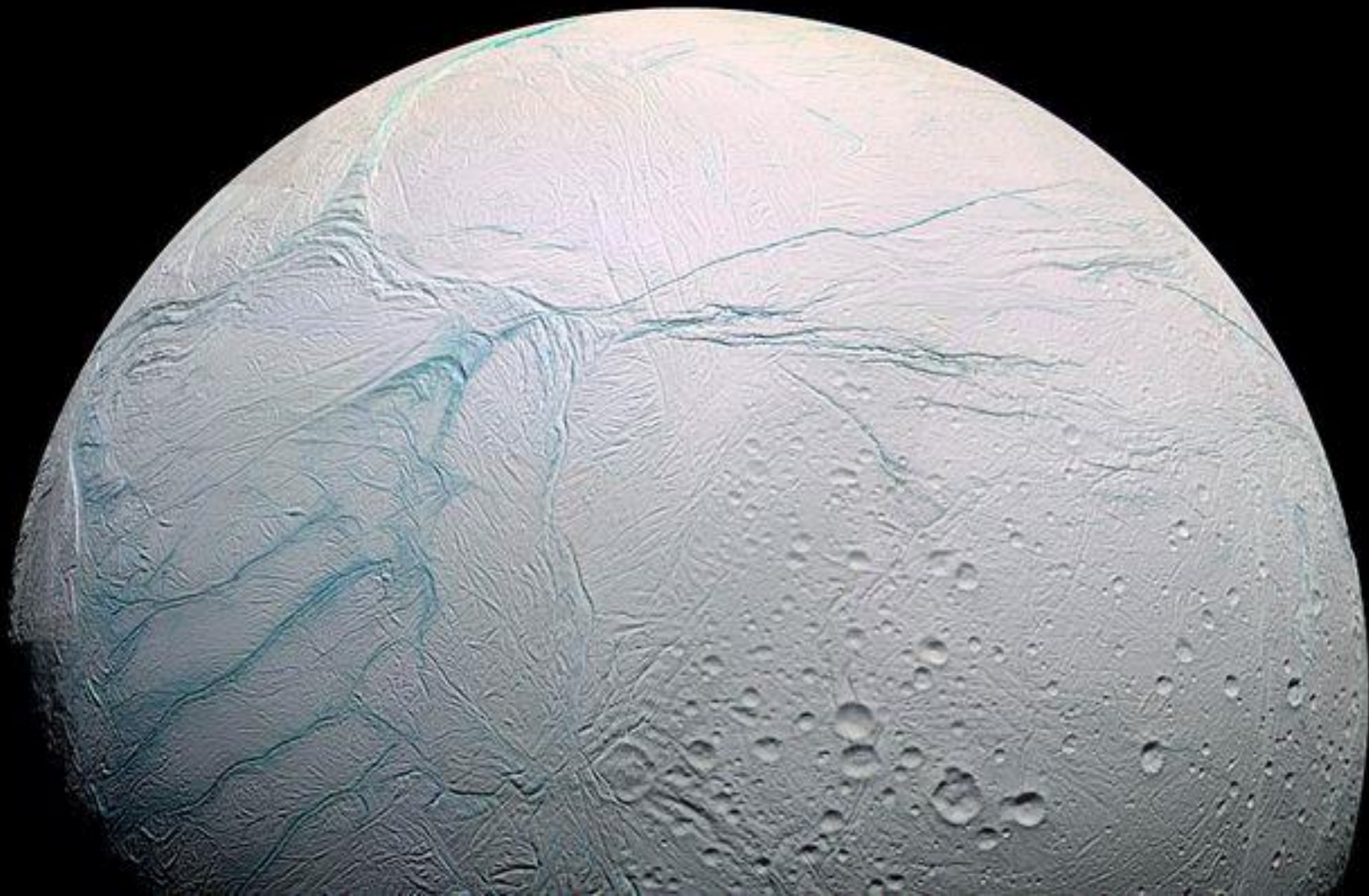
Velkolepá mise Cassini

(1997 až 2017)

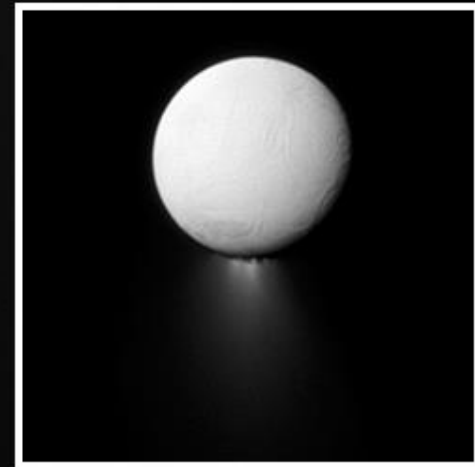


Enceladus

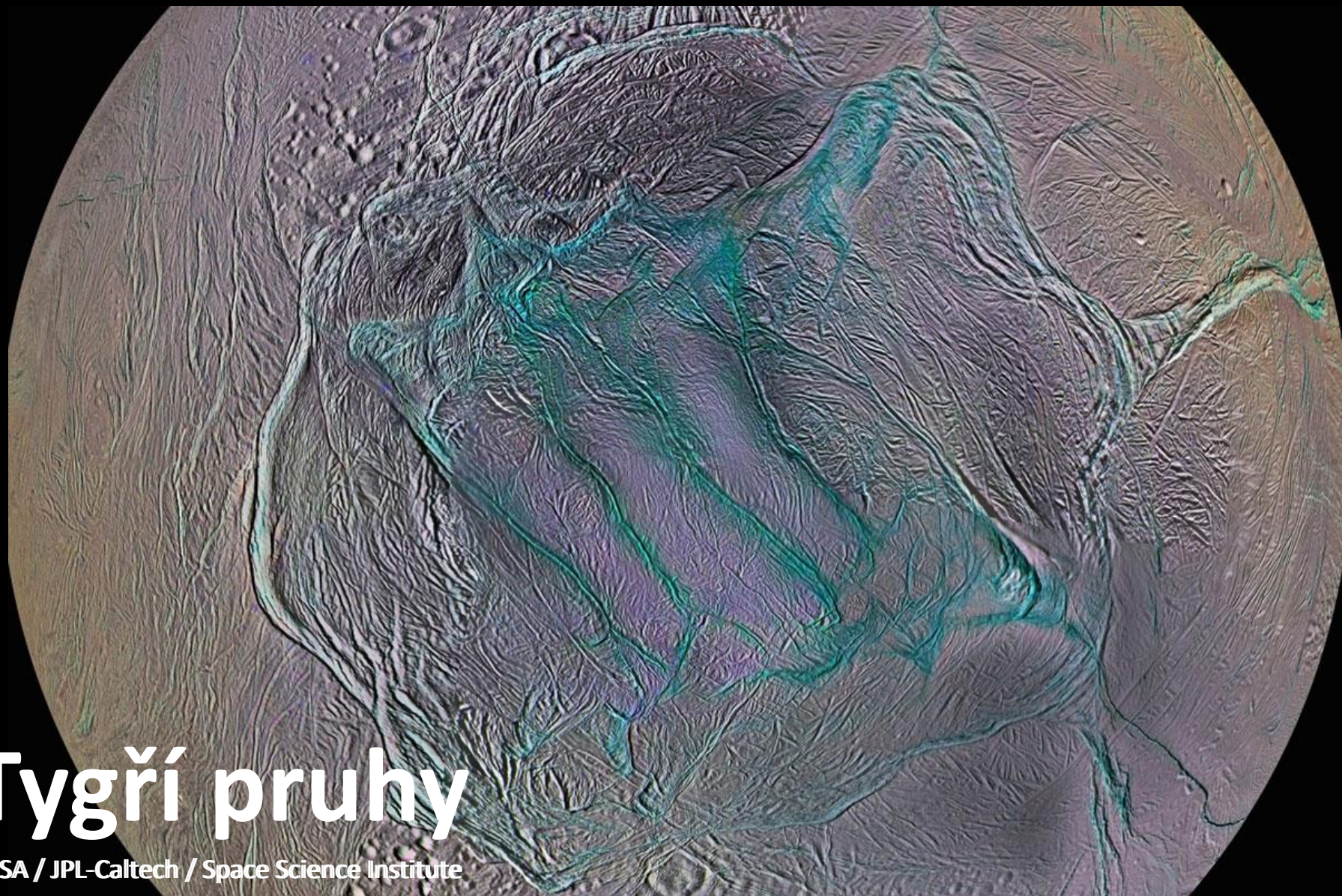
Objeven 1789, odráží téměř
100 % dopadajícího světla
Průměr 508 × 496 × 490 km



- Výtrysky materiálu o rychlosti až 2100 km/h – dost rychle, aby materiál unikl do okolního prostoru
- Množství ca 250 kg/s
- Složení: převážně vodní led a soli NaCl
- Část materiálu dopadá zpět na povrch, část uniká a tvoří prstenec E

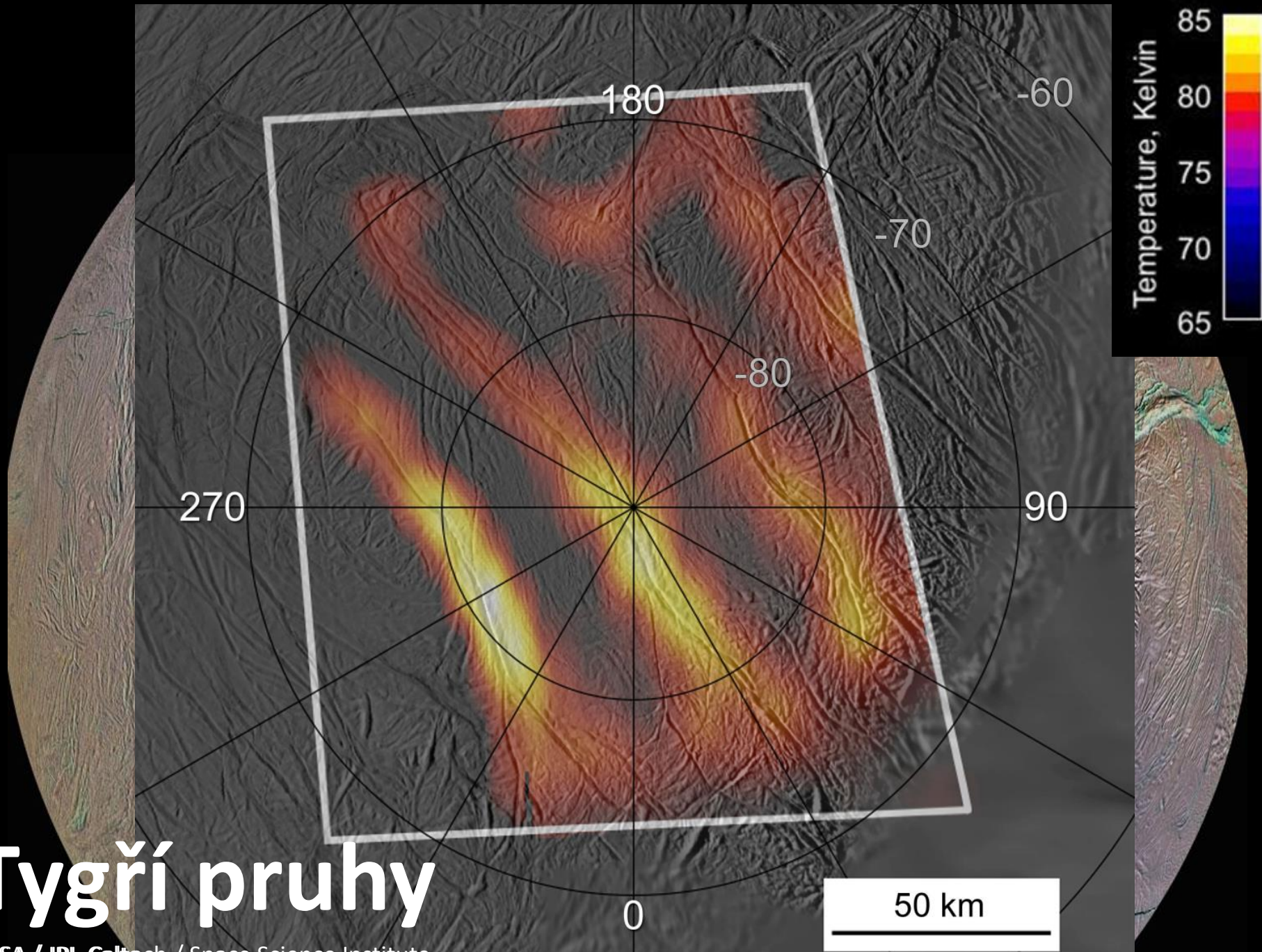


Jižní polokoule Enceladu



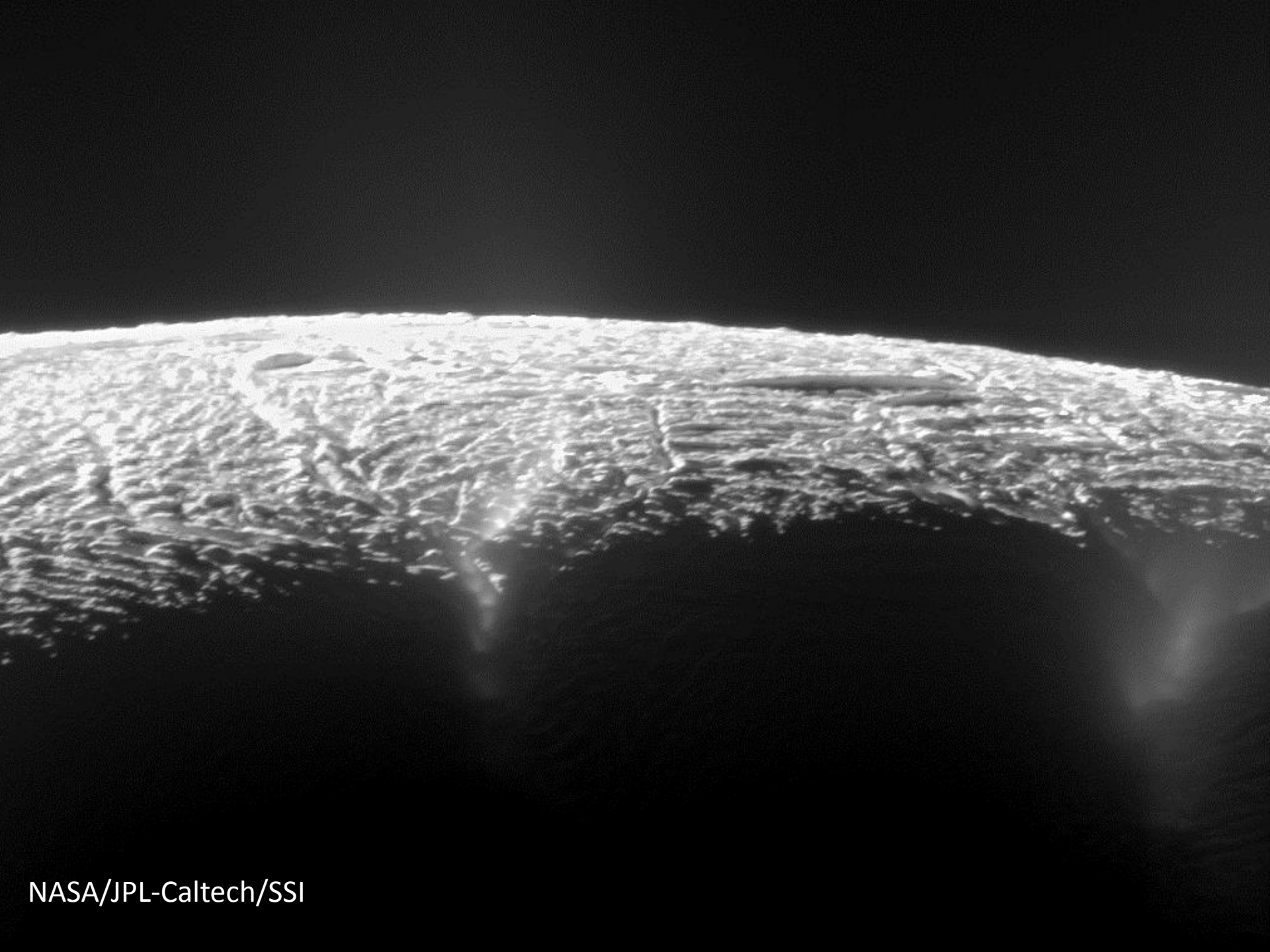
Tygrí pruhy

NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute

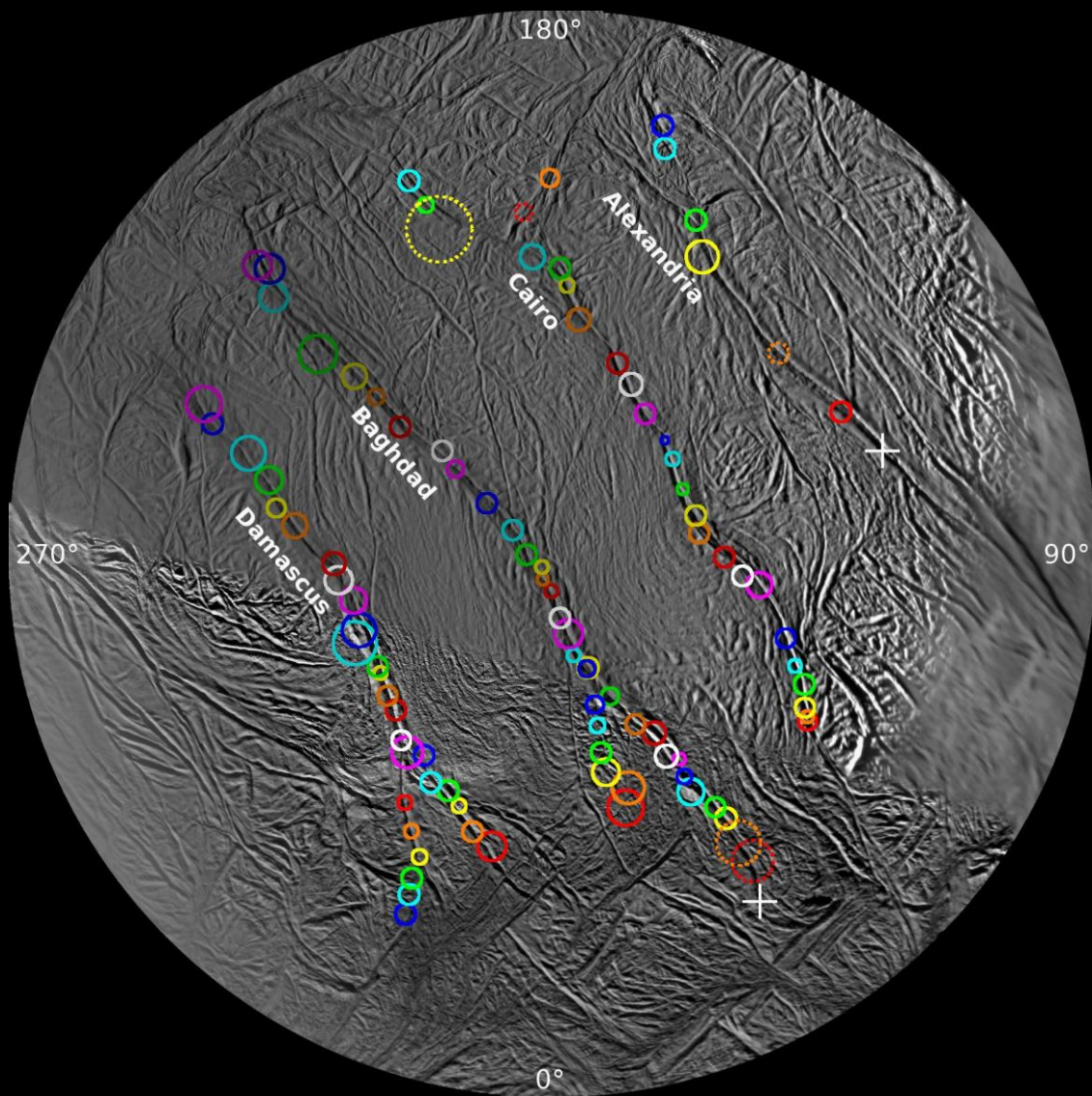


Tygrí pruhy

NASA / JPL-Caltech / Space Science Institute



NASA/JPL-Caltech/SSI

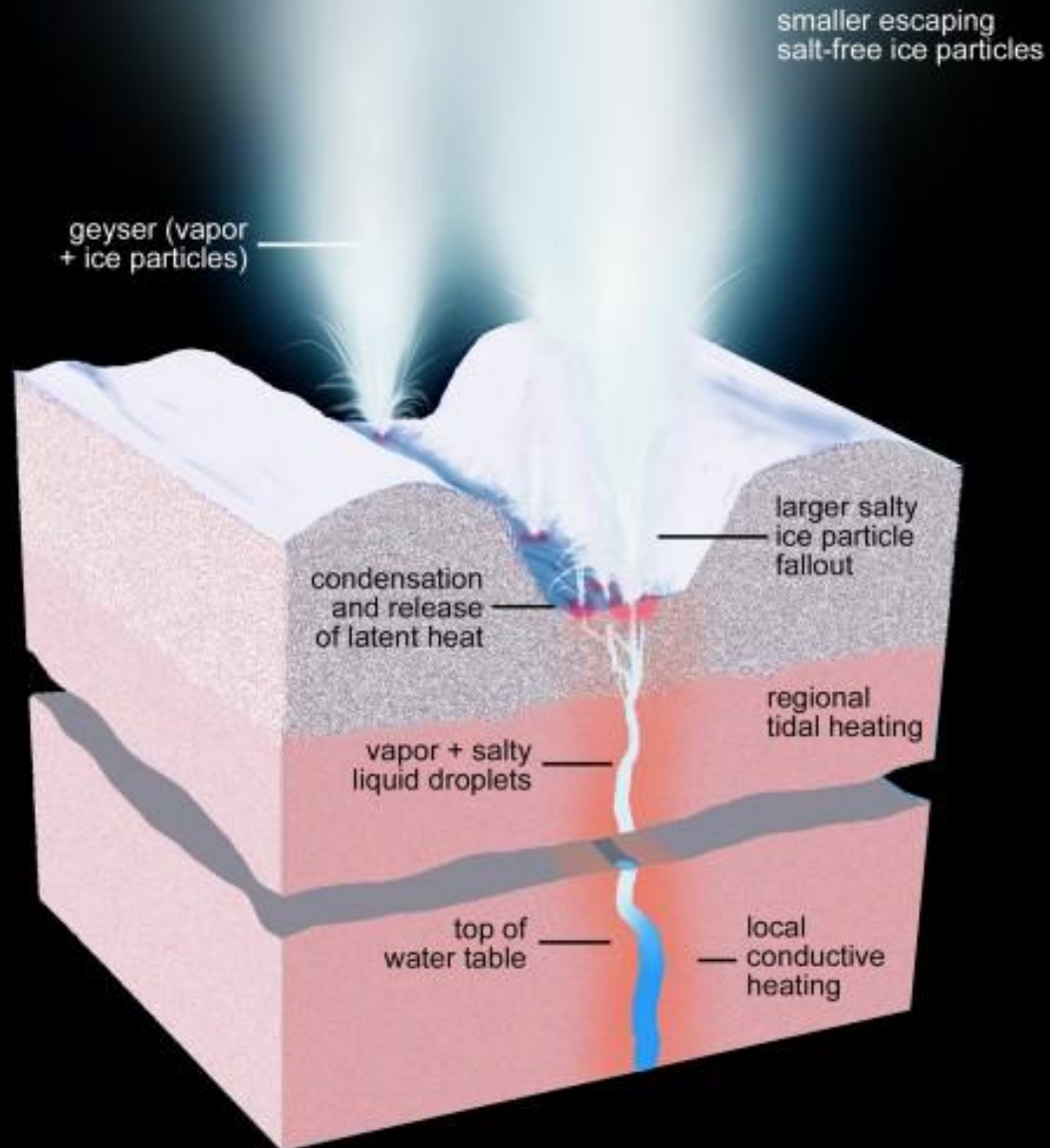


Nerovnoměrná distribuce

[Porco et al., 2006](#)

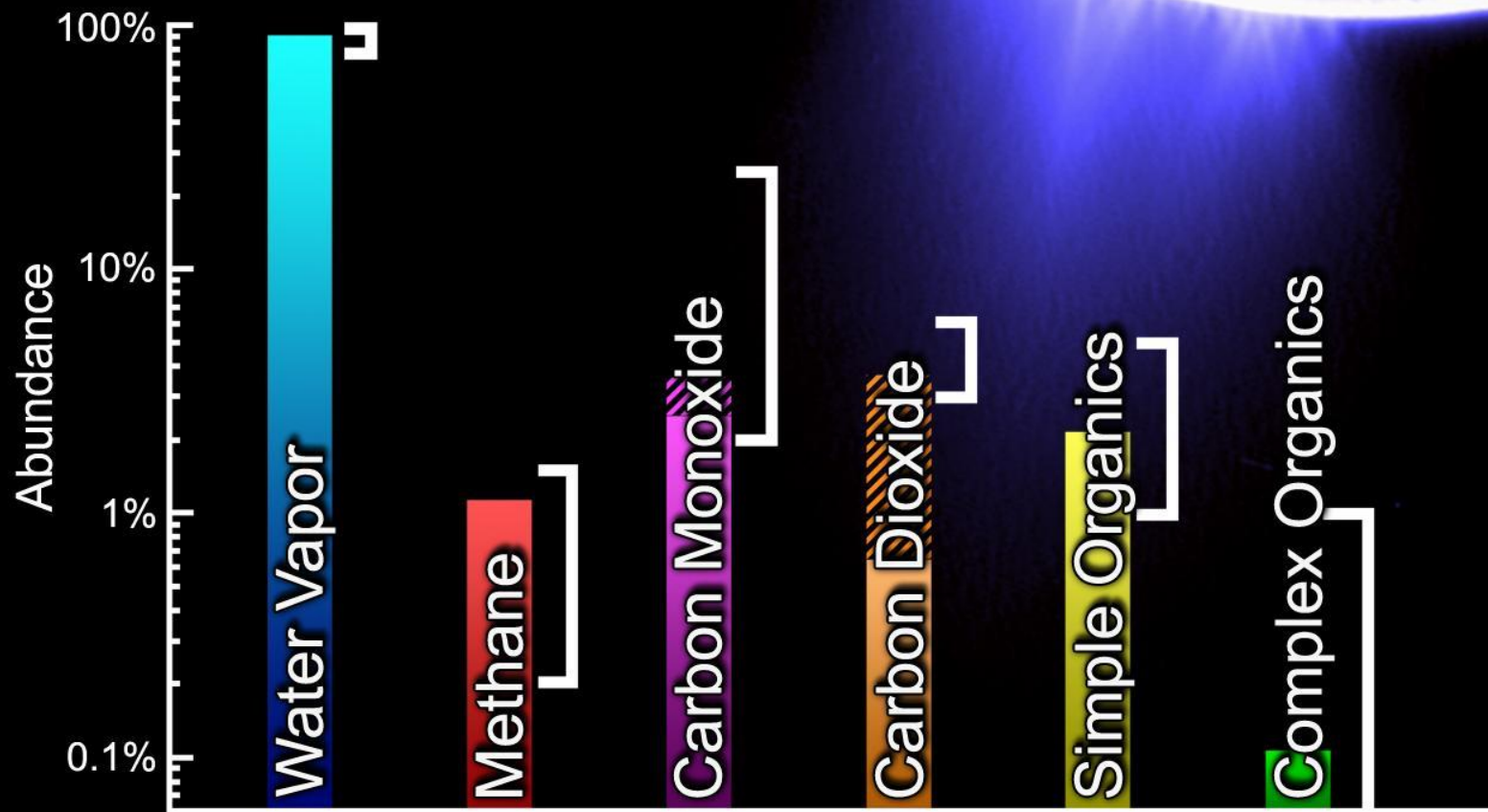
Intenzita erupcí kolísá v čase

[Běhounková et al., 2017](#)



NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, umělecká představa

Co gezíry vyvrhují?

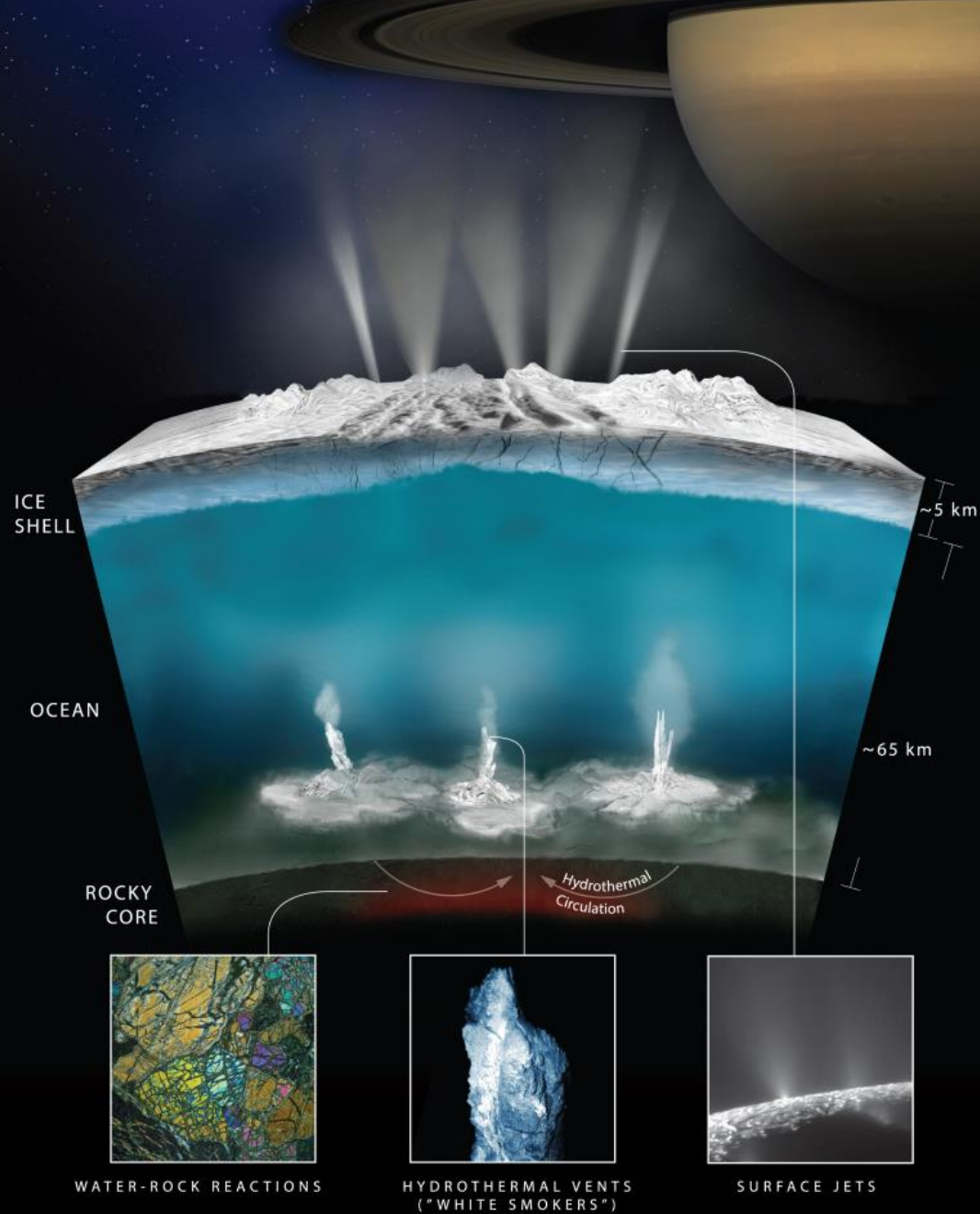


White brackets show range of cometary values

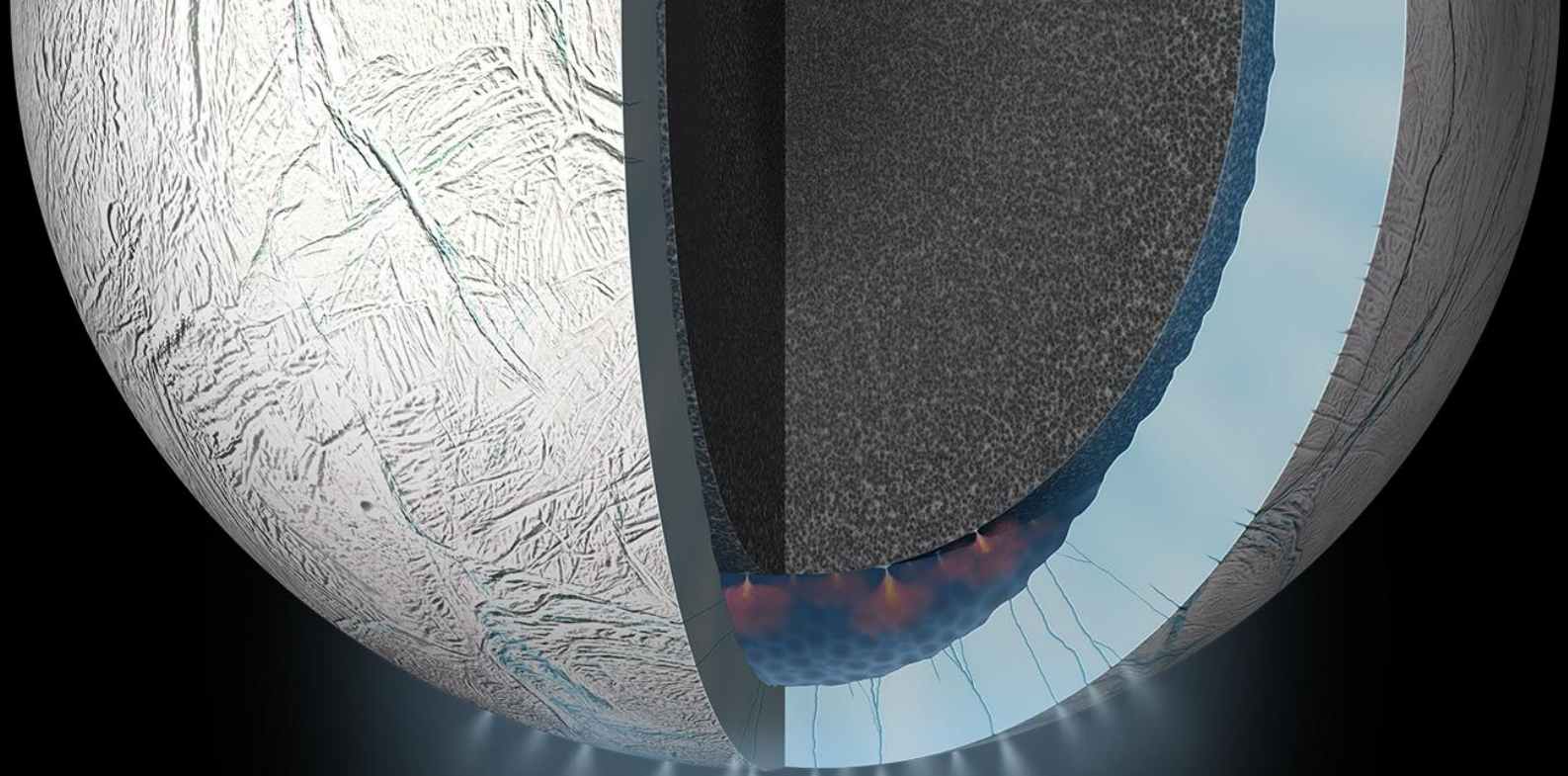
Hydrotermální průduchy

Objevení drobných silikátových částic [Hsu et al., 2015](#)





ENCELADUS

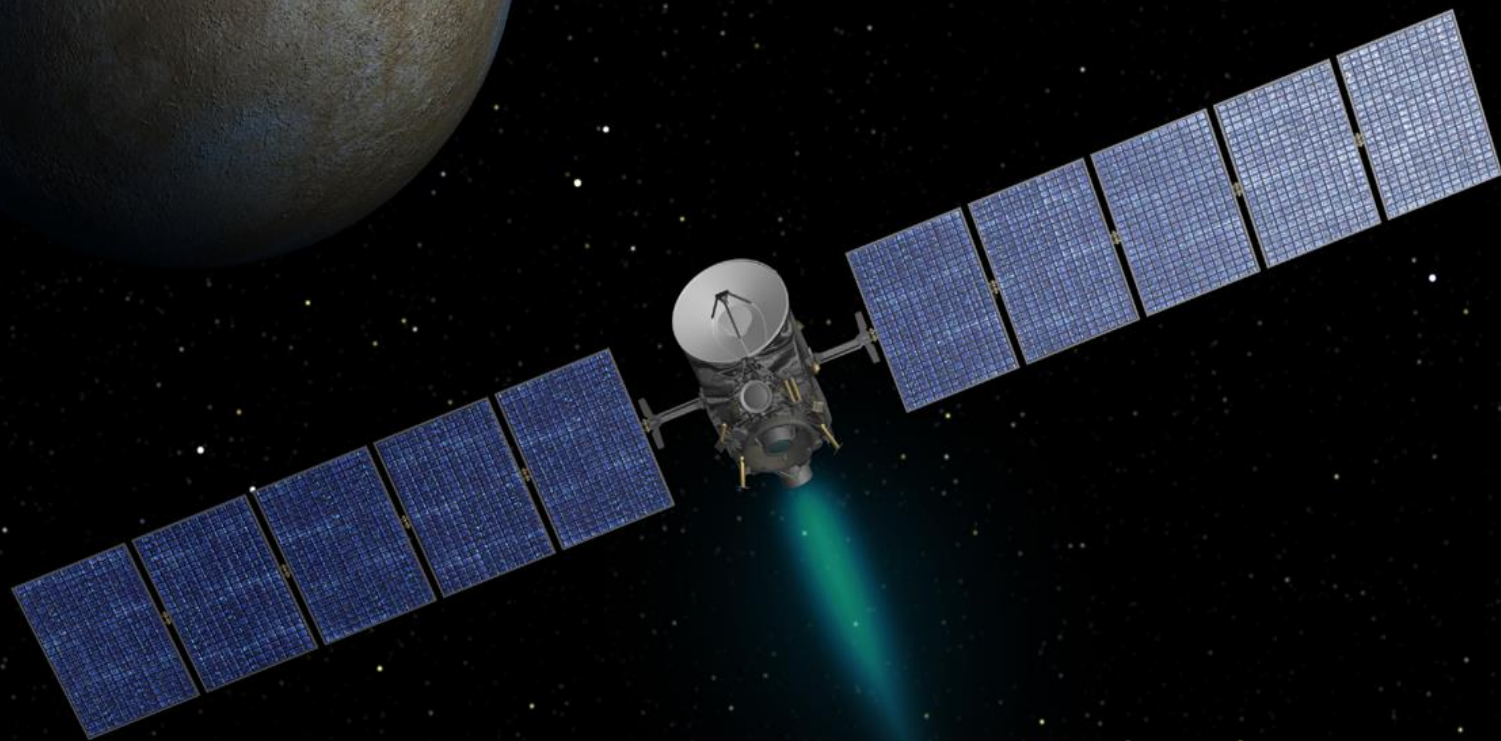
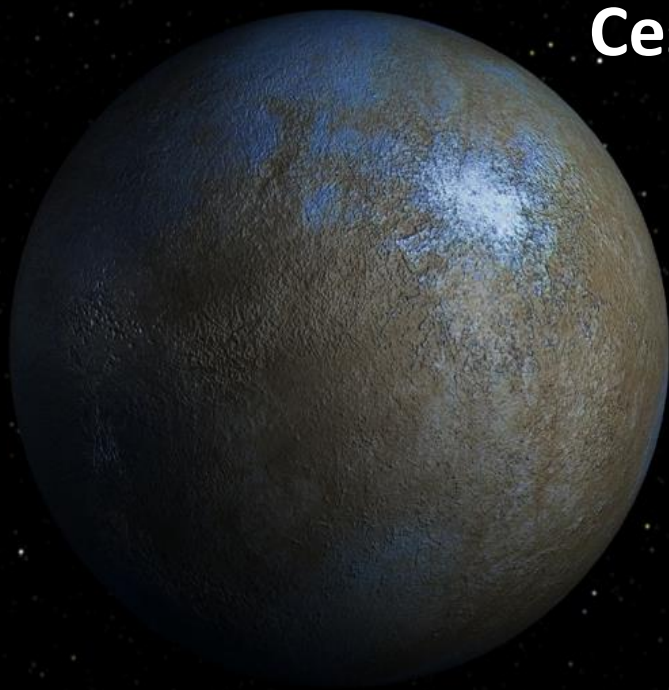


Podpovrchový globální oceán

[Thomas et al., 2016](#)

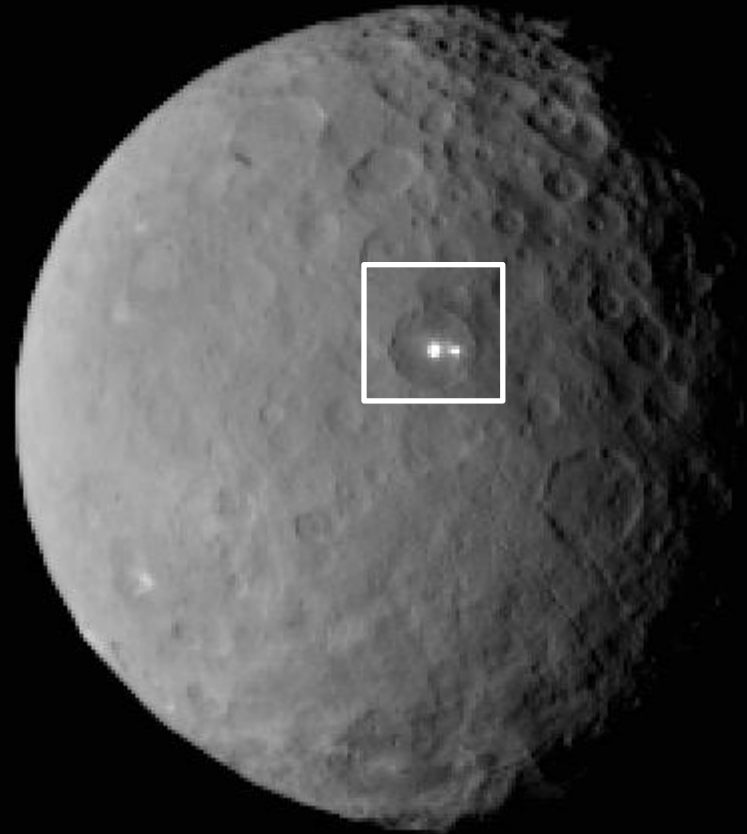
NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, umělecká představa

Cesta sondy Dawn do Pásu asteroidů



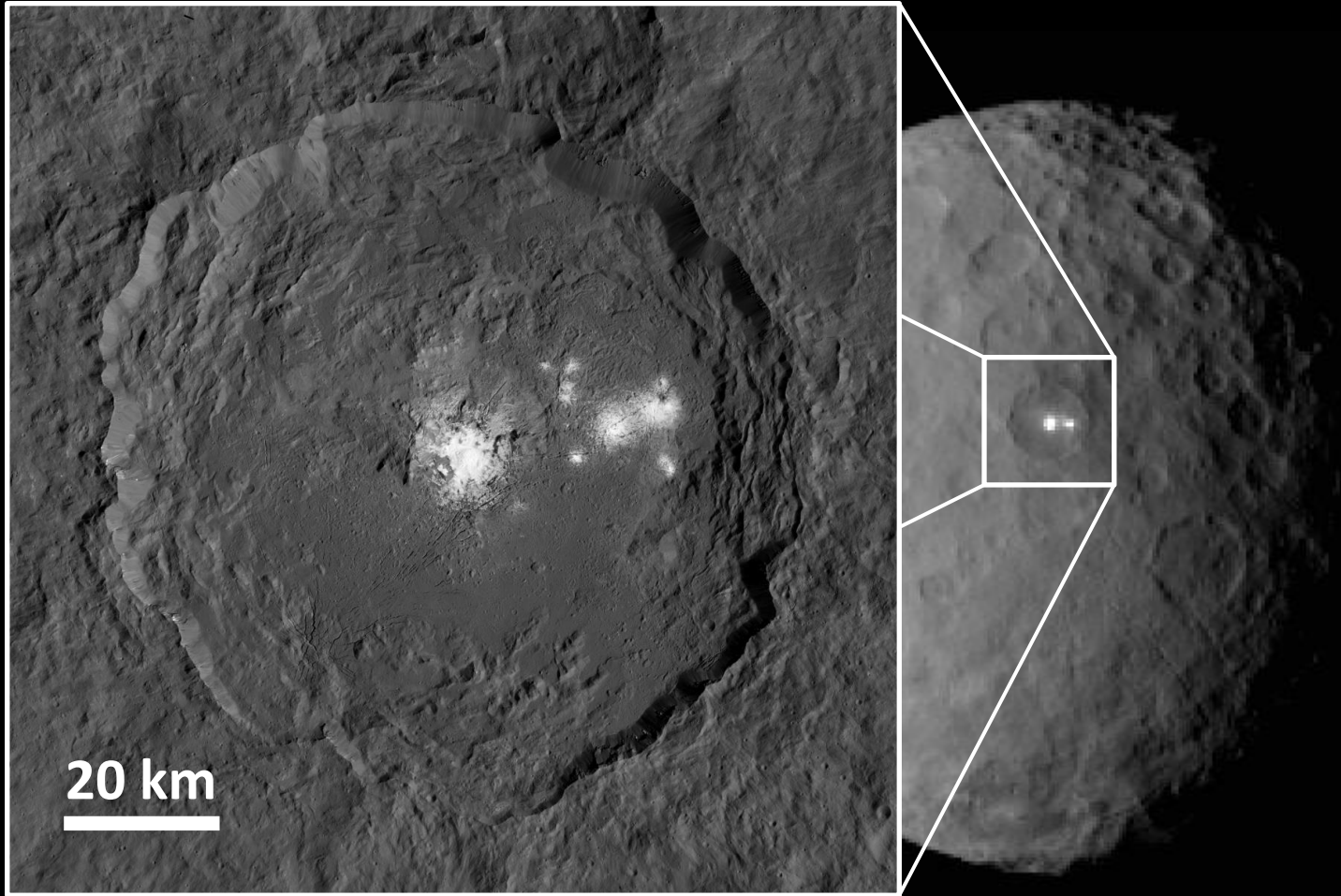
(1) Ceres

- Průměr 945 km, objevena 1801
- Těleso má nízkou hustotu
- Kůra tvořená směsí vodního ledu a hornin
- Těleso v hydrostatické rovnováze
- Pod povrchem se nejspíše nachází oceán kapalné vody
- Kapsy chloridové solanky (?)

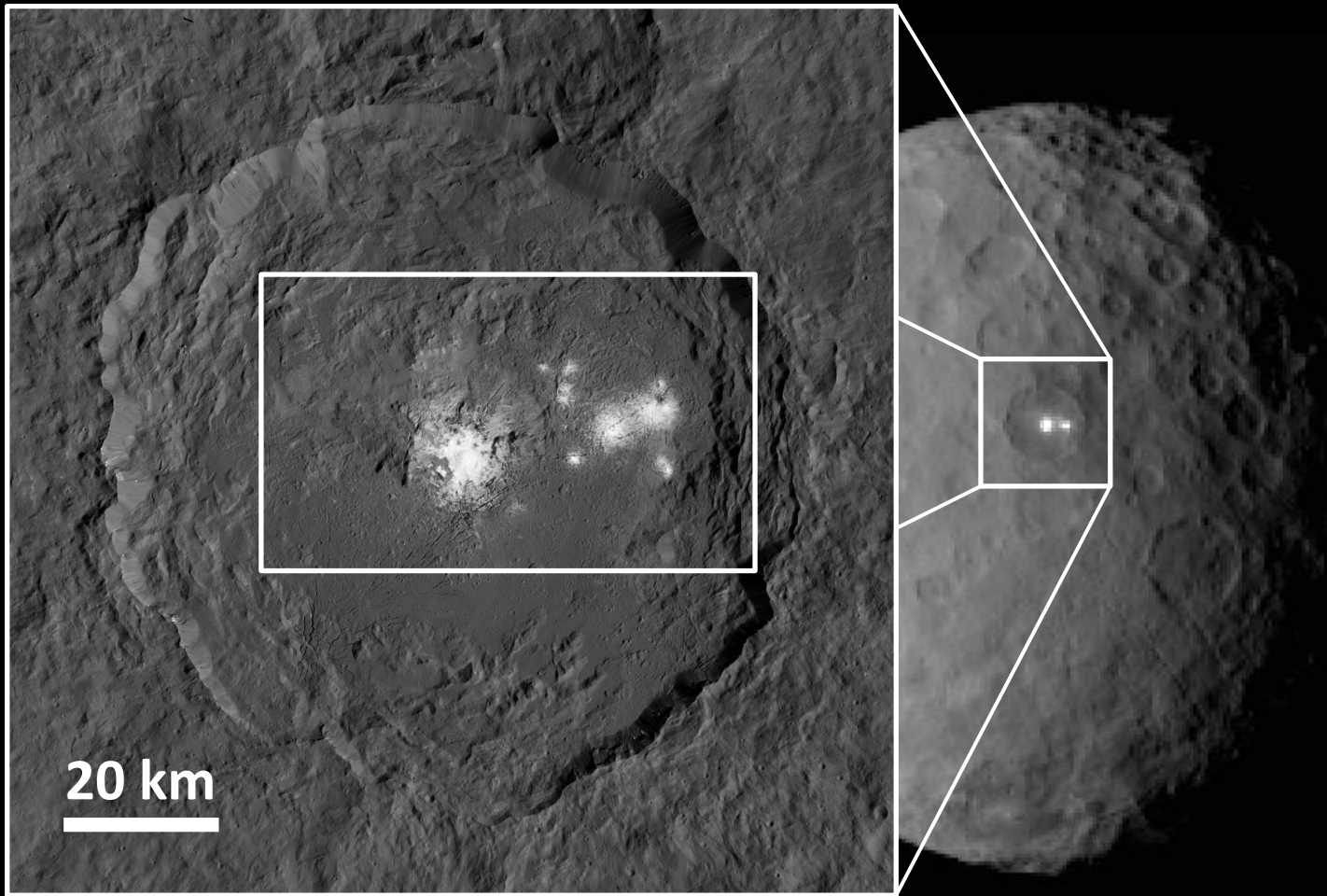


NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

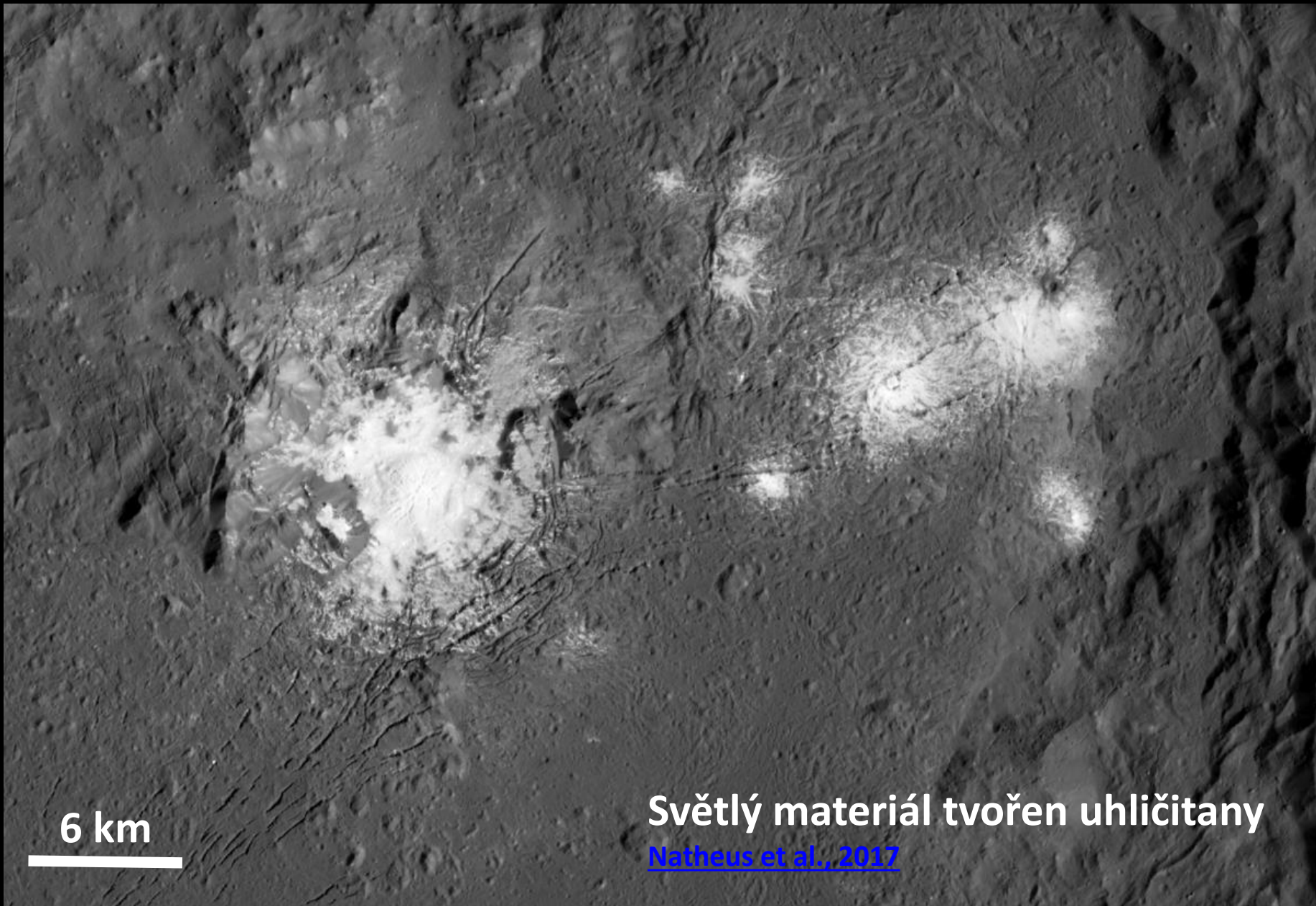
Kráter Occator



NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA



NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

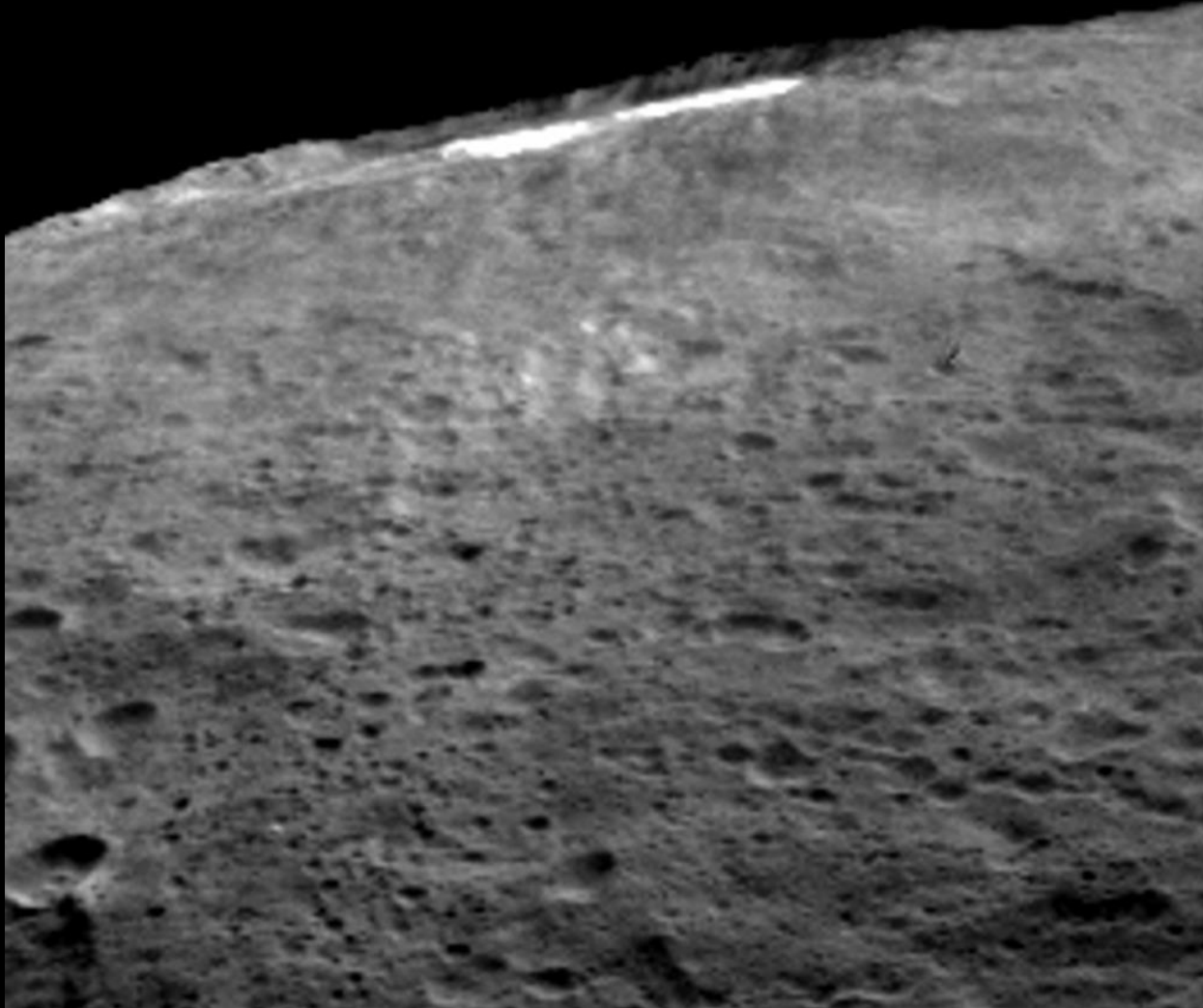


6 km

Světlý materiál tvořen uhličitany

[Natheus et al., 2017](#)

NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

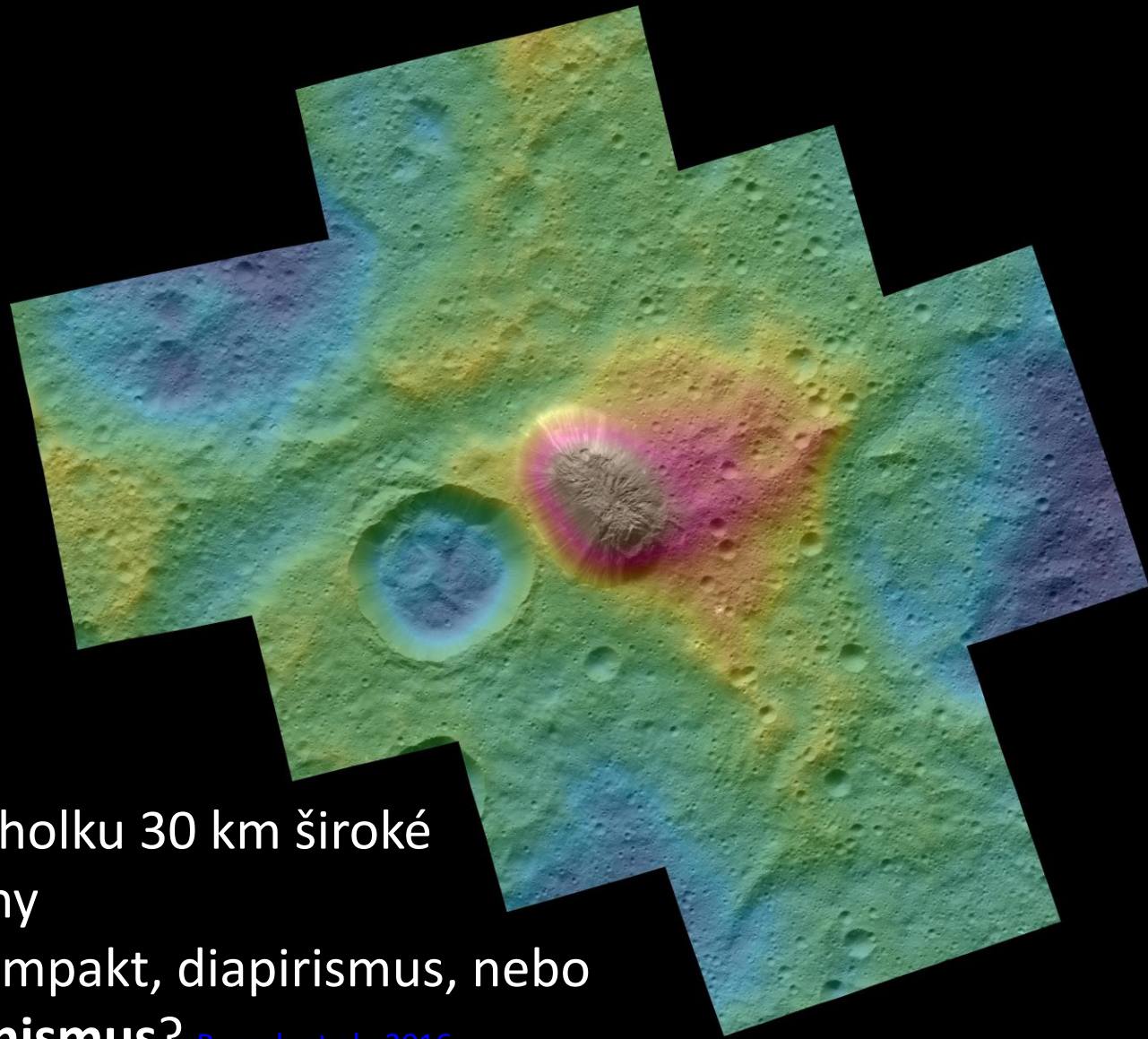


[Thangjam et al., 2017](#)
NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

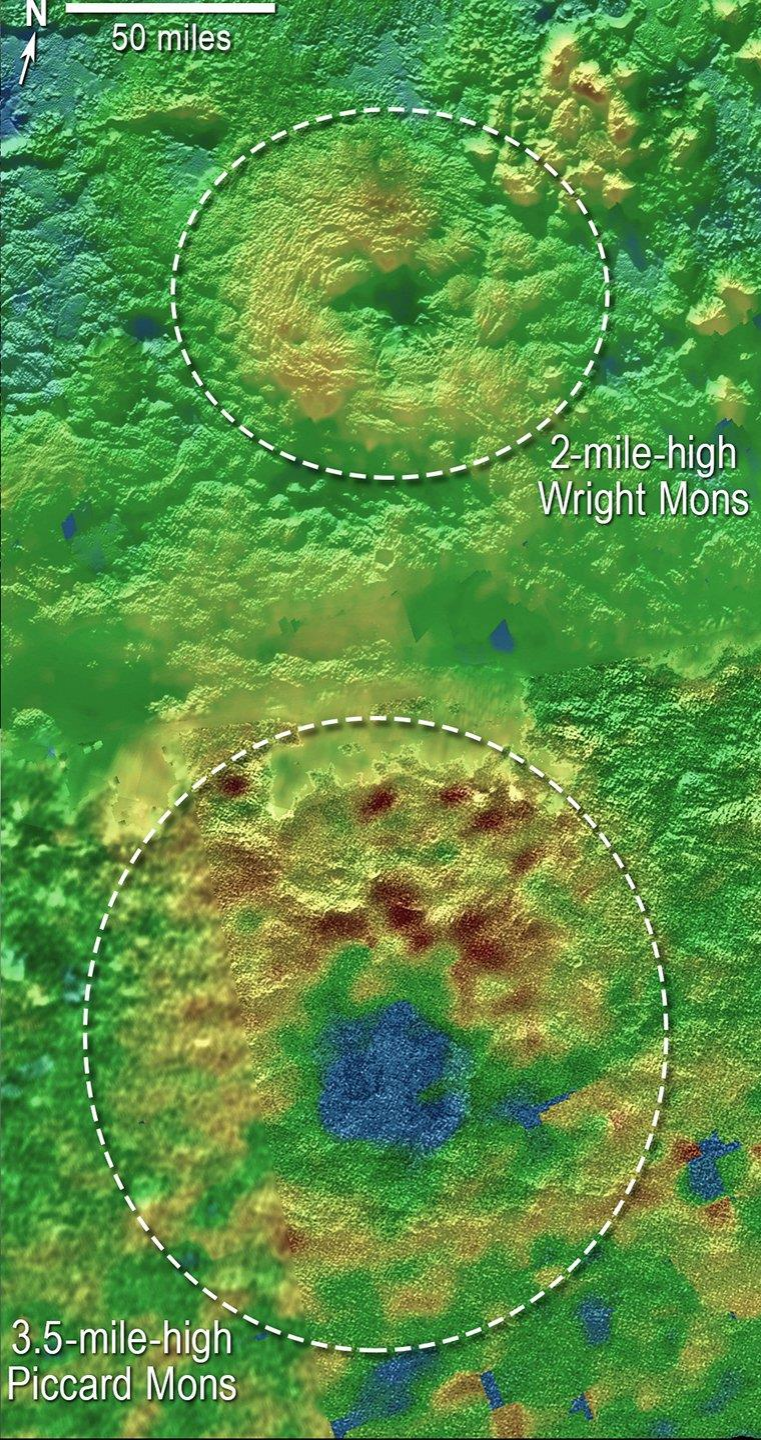
Ahuna Mons



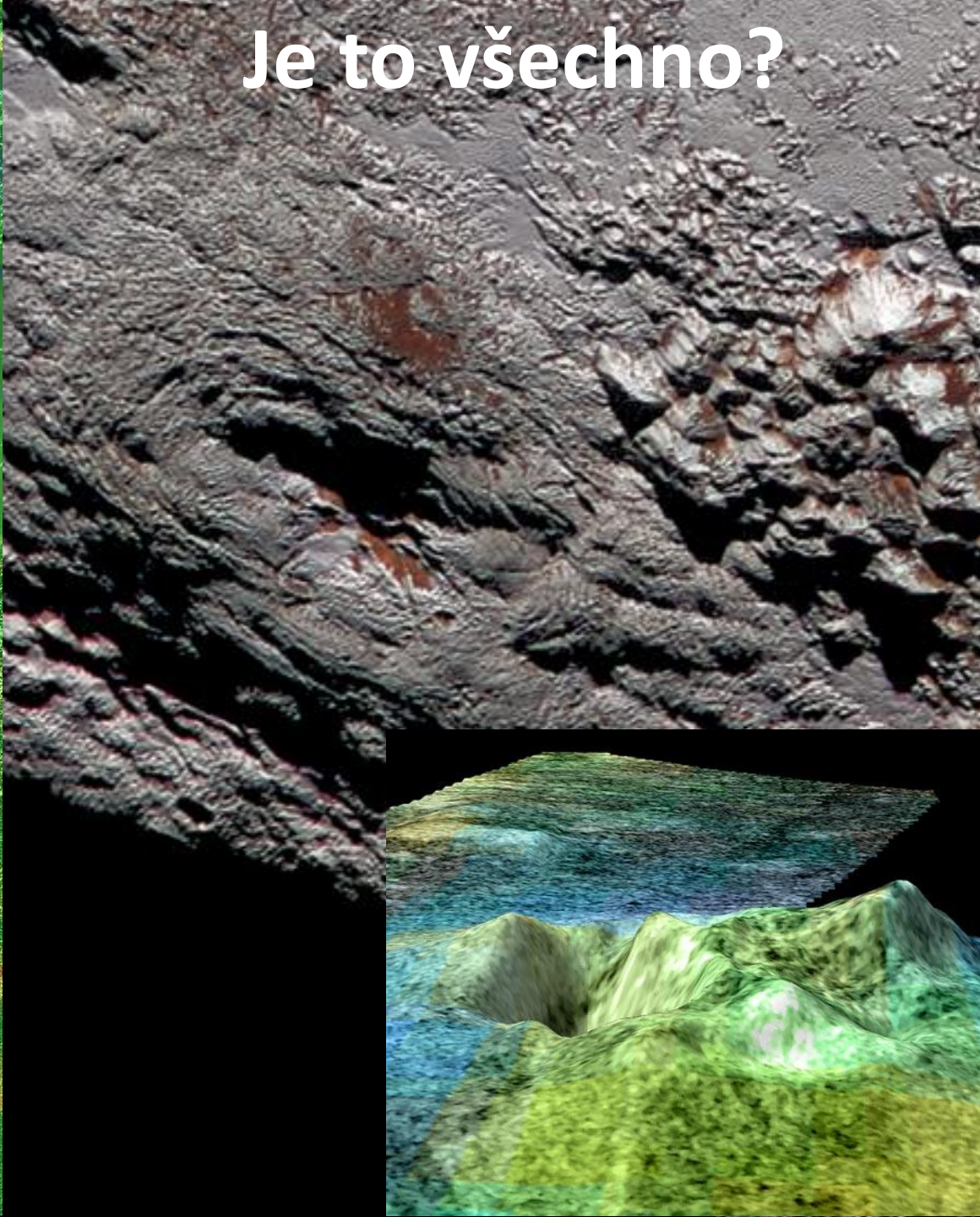
- Izolovaná a unikátní hora
- 21 x 13 km velká a 4 km vysoká



- Leží na vrcholku 30 km široké
vybouleniny
- Vytvořil ji impakt, diapirismus, nebo
kryovulkanismus? [Ruesch et al., 2016](#)
- Roztékání hory v čase [Mori et al., 2017](#)



Je to všechno?



Shrnutí kryovulkanismus

- Kryovulkanismus hrál významnou roli ve formování povrchu řady ledových těles sluneční soustavy
- Může se projevovat, podobně jako klasický silikátový vulkanismus, celou řadou způsobů

A co dál?

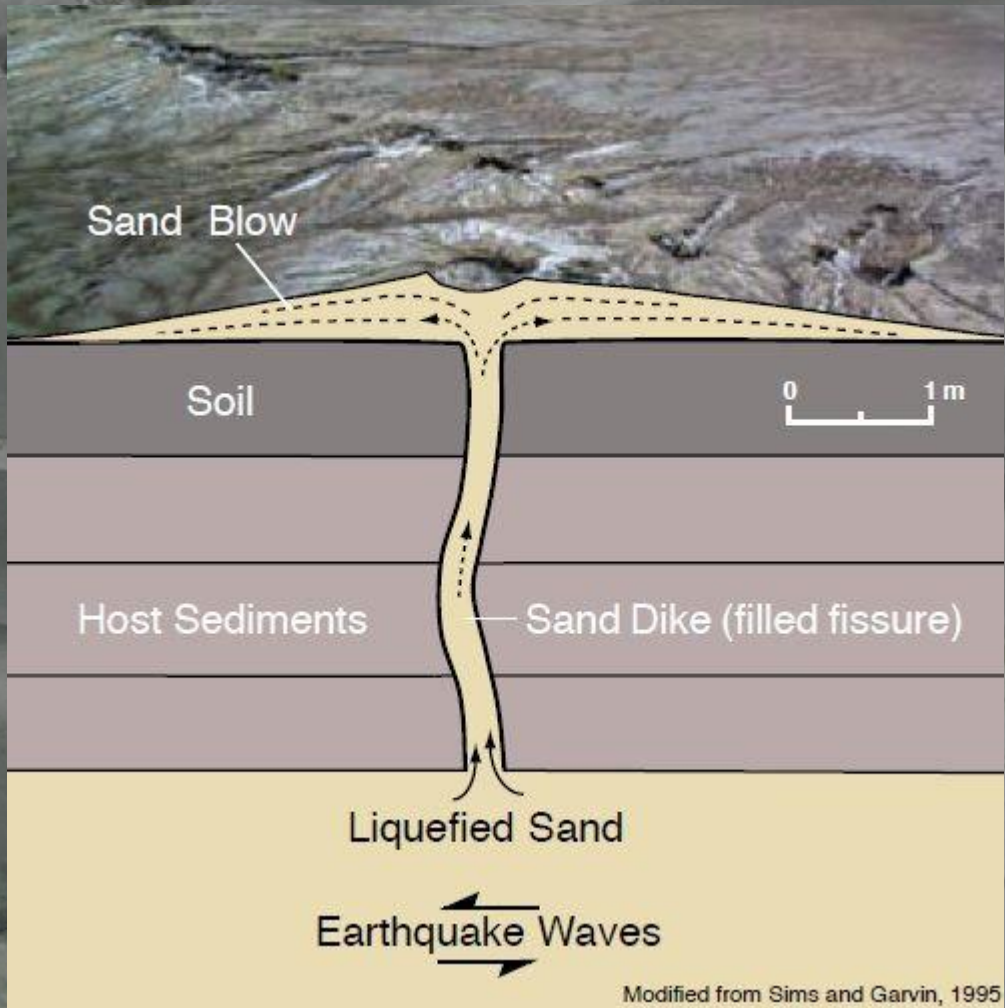
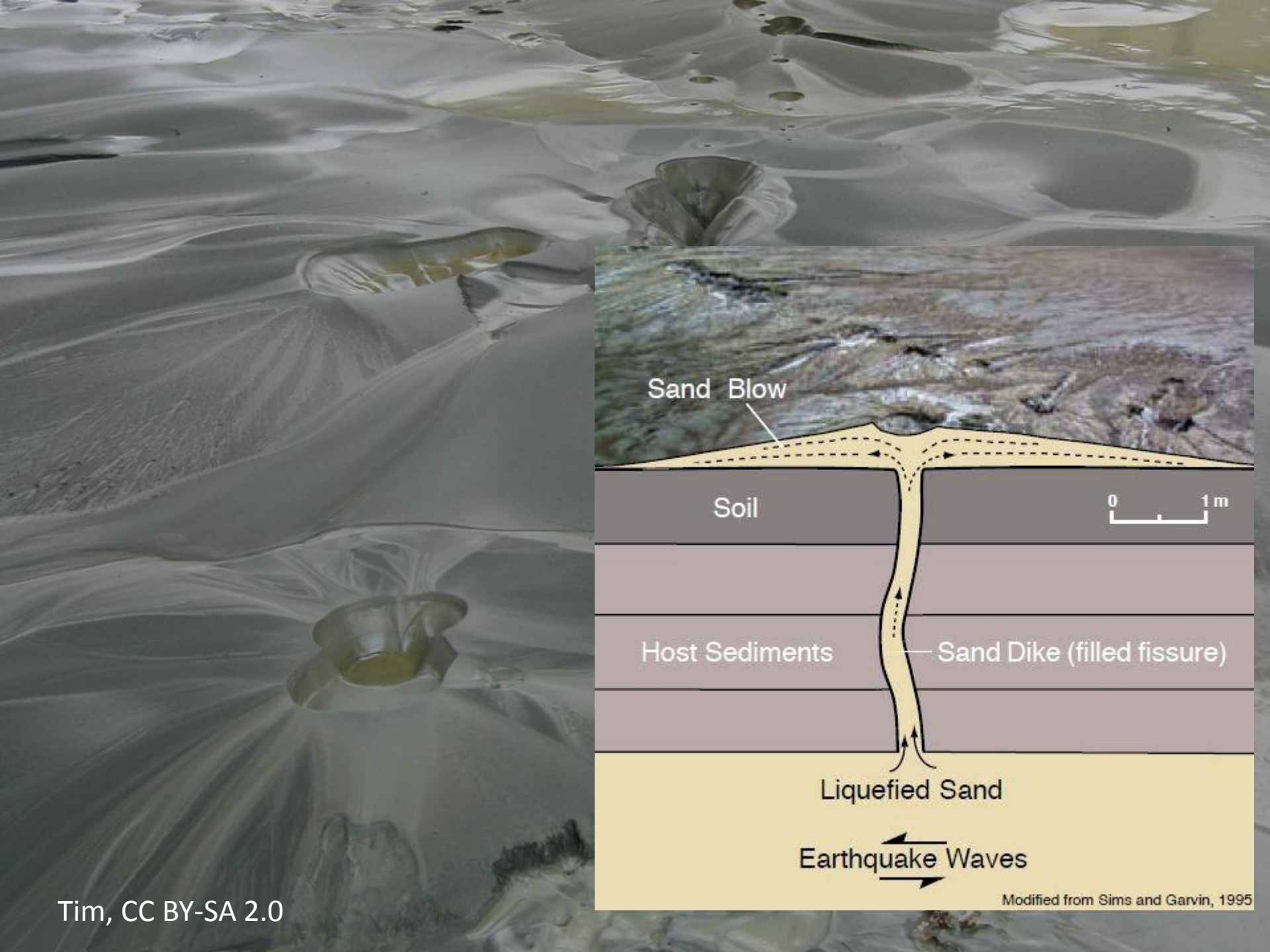


Fotos593, všechna práva vyhrazena

Bahenní sopka, aneb udělejme si svět složitějším







Asfaltová sopka



NOAA Ocean Explorer, volné dílo

