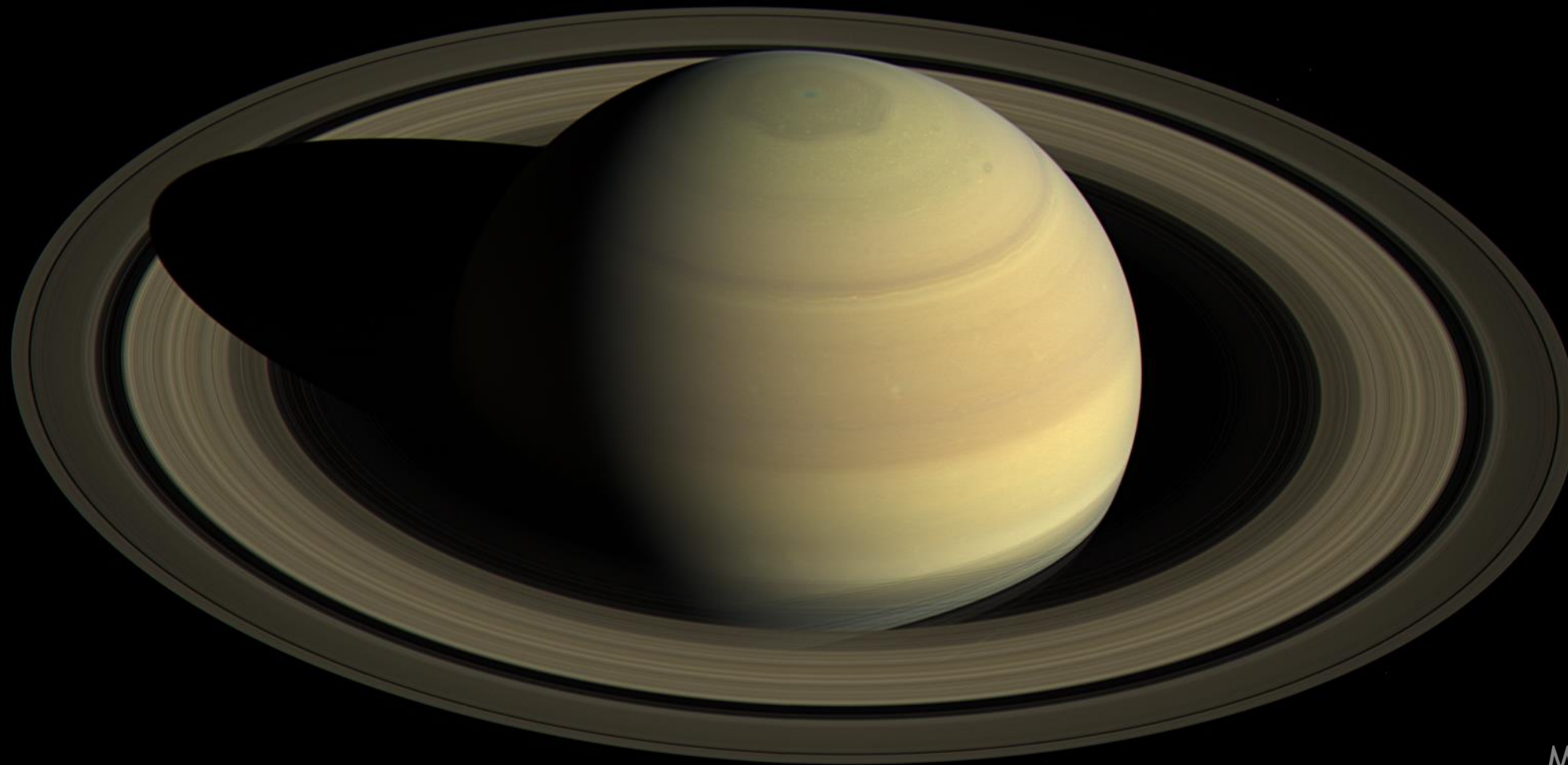


Základy planetologie



Vznik, vývoj a objekty sluneční soustavy

Martin Lulák

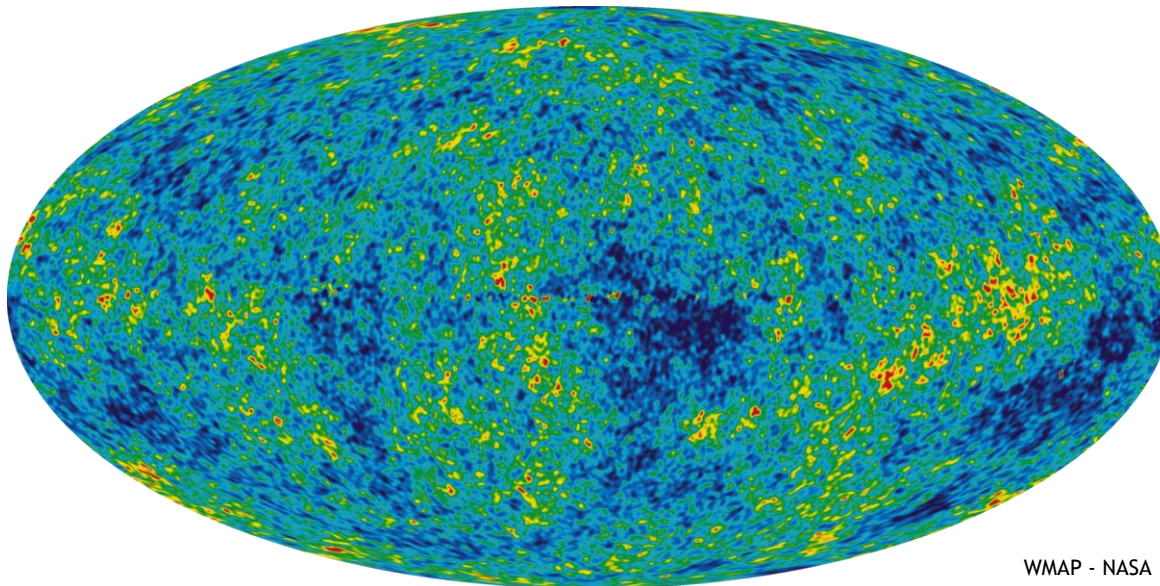
nitram.kalul@gmail.com

Osnova

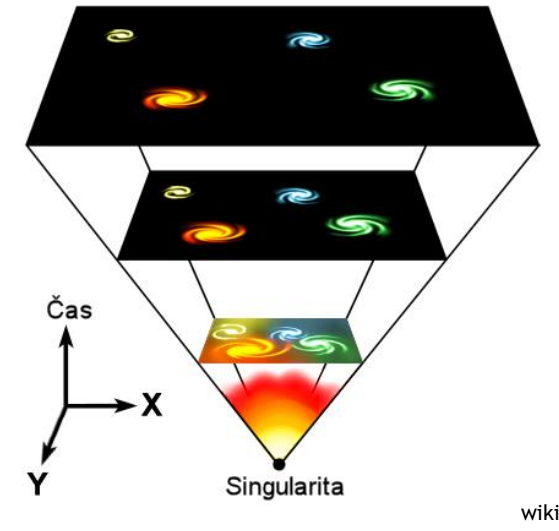
- ▶ Vznik vesmíru a syntéza prvků
- ▶ S jakými časovými a vzdálenostními měřítky pracujeme?
- ▶ Vznik a vývoj sluneční soustavy
- ▶ Přehled a klasifikace těles sluneční soustavy
- ▶ Vnitřní stavba planet
- ▶ Planetární povrchy - příklady na tělesech sluneční soustavy
 1. Primitivní povrchy - impaktní procesy
 2. Endogenní procesy - vulkanismus a kryovulkanismus
 3. Exogenní procesy a atmosféry vybraných těles

Vznik vesmíru - Velký třesk

- ▶ Stáří vesmíru 13,8 mld. let
- ▶ Během velkého třesku došlo k syntéze pouze atomů H (3/4), He (1/4) a malé množství Li - NIC JINÉHO!
- ▶ Průhledný stav až po 380 000 letech - pozůstatek dodnes v podobě reliktního záření



WMAP - NASA

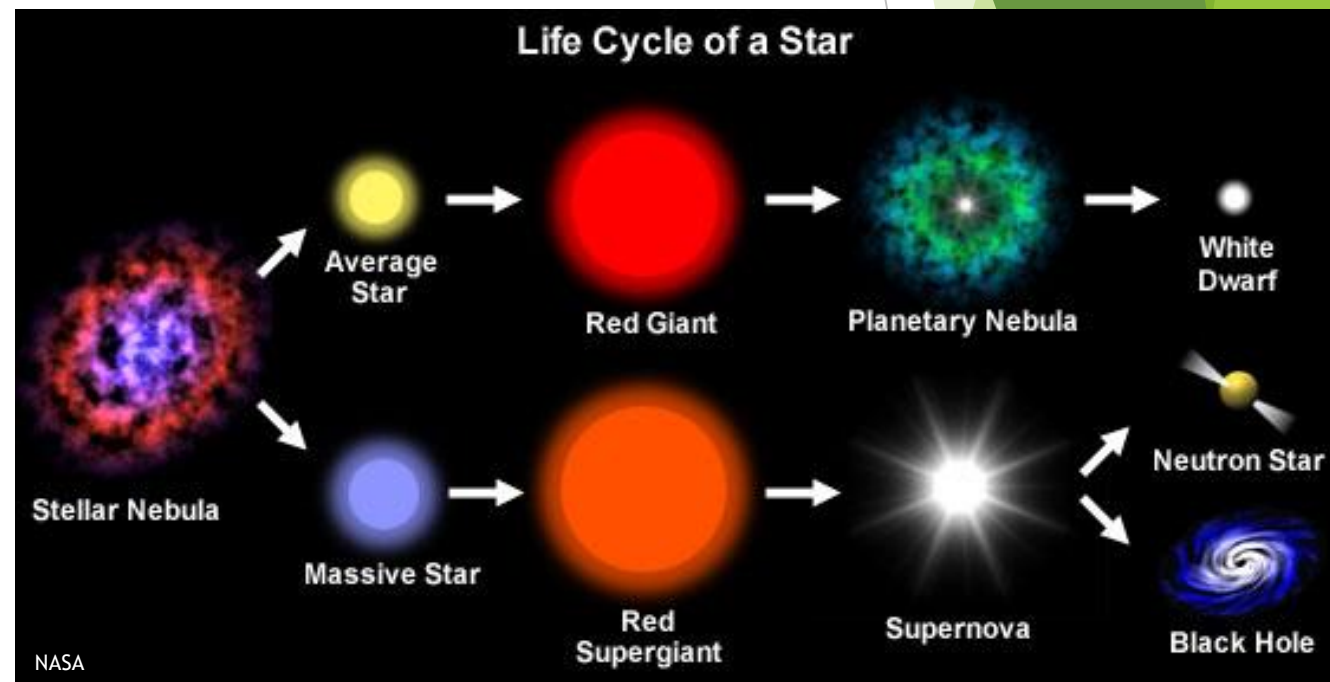


wiki

Syntéza těžích prvků - hvězdné továrny

- ▶ Během velkého třesku vznikly pouze 3 nejlehčí prvky (H, He, Li)
- ▶ Termonukleární fúze uvnitř hvězd produkuje prvky až po Fe
- ▶ Těžší prvky při výbuších supernov

- ▶ We are made of star stuff! :-)



Syntéza těžích prvků - hvězdné továrny

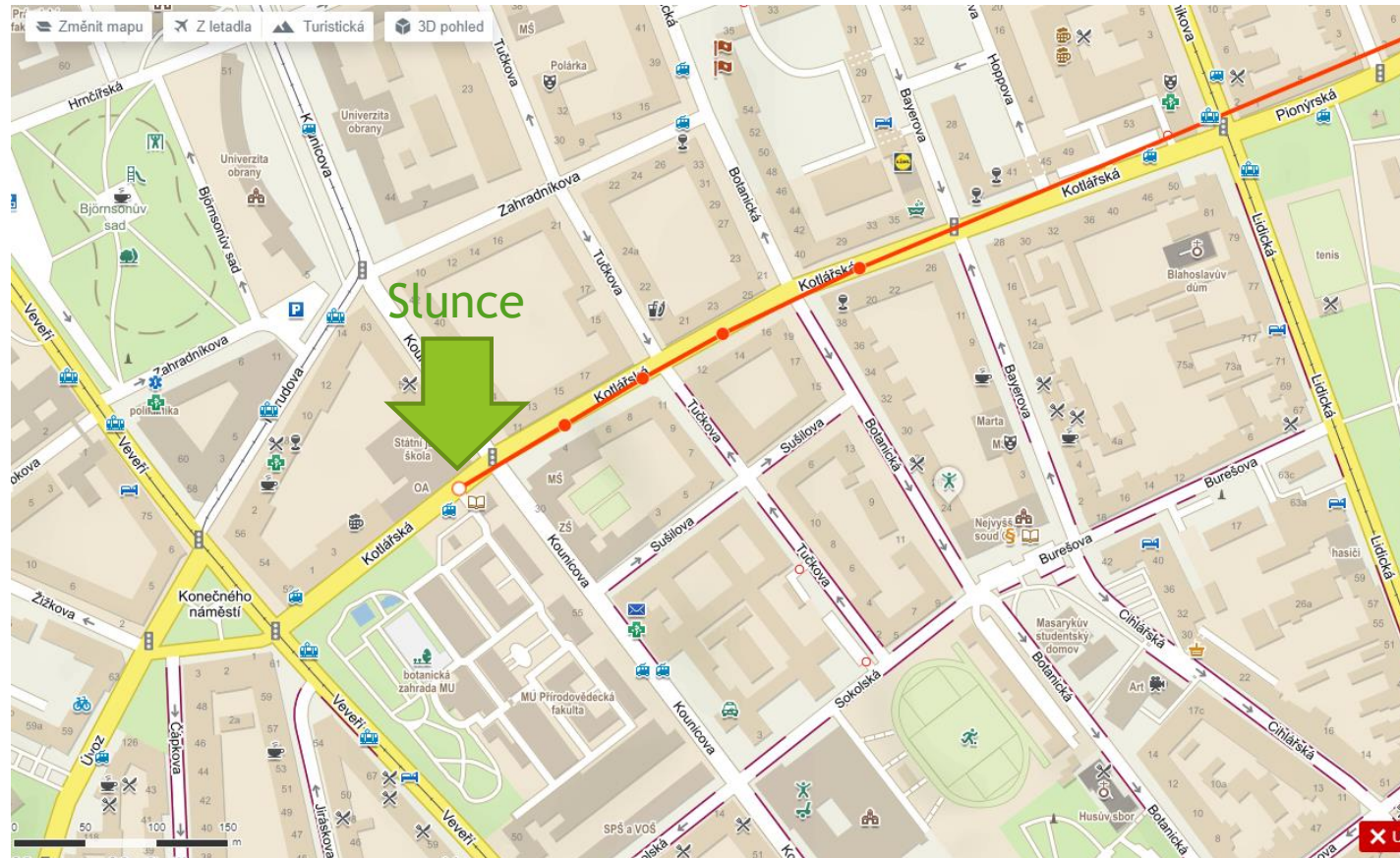
Skupina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CAS skupina	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	---	VIII B	---	IB	II B	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
Perioda																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			↓															
Lanthanoidy	*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
Aktinoidy	**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Skutečný rozměr sluneční soustavy

S jakými rozměry vzdáleností a času pracujeme?

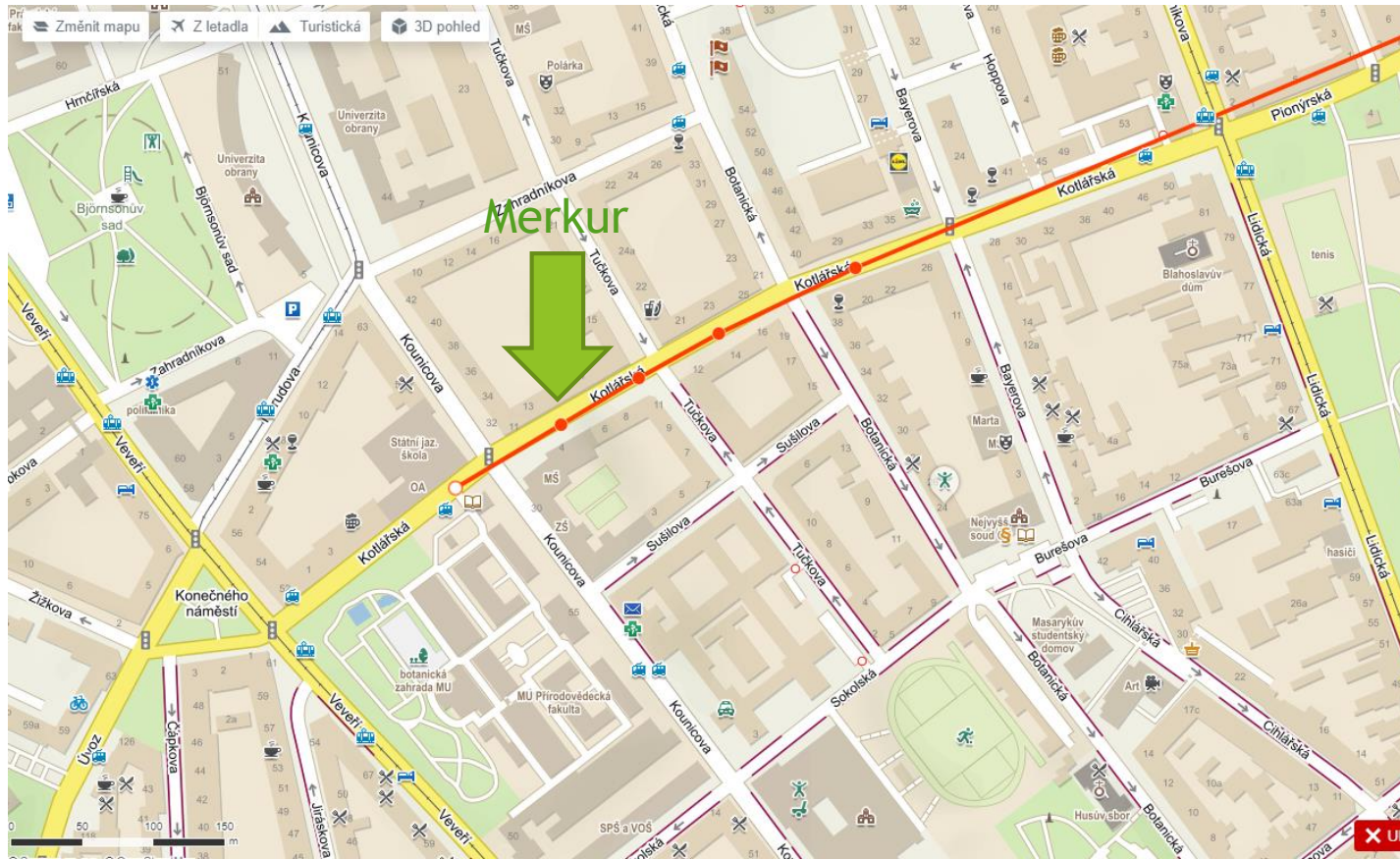
- ▶ Myšlenkový experiment - rozměr slunce (1 400 000 km) zmenšíme na kouli o průměru 2 m
- ▶ Jak bude vypadat sluneční soustava?

Skutečný rozměr sluneční soustavy



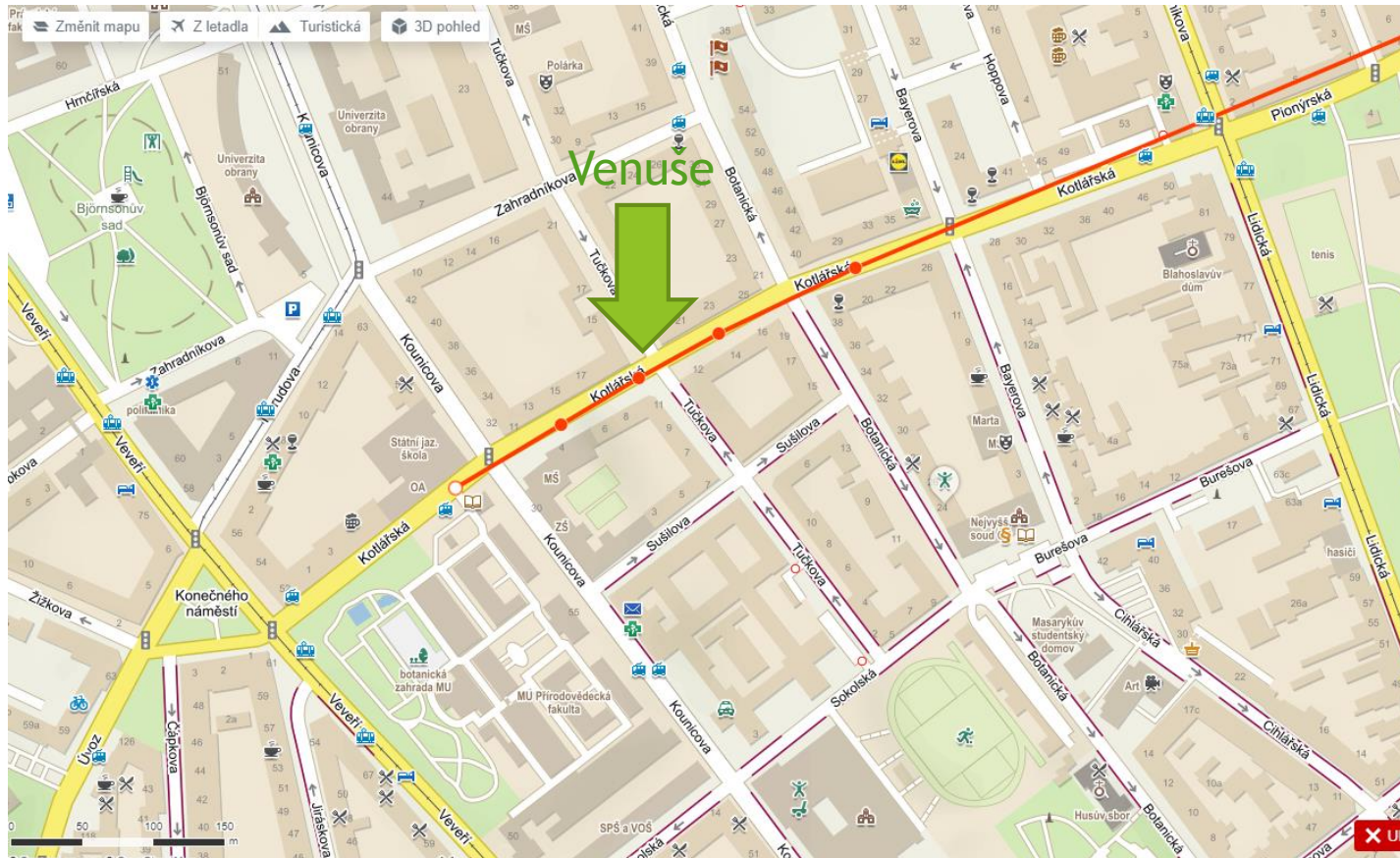
Slunce - dvoumetrový balon u vrátnice

Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu

Skutečný rozměr sluneční soustavy

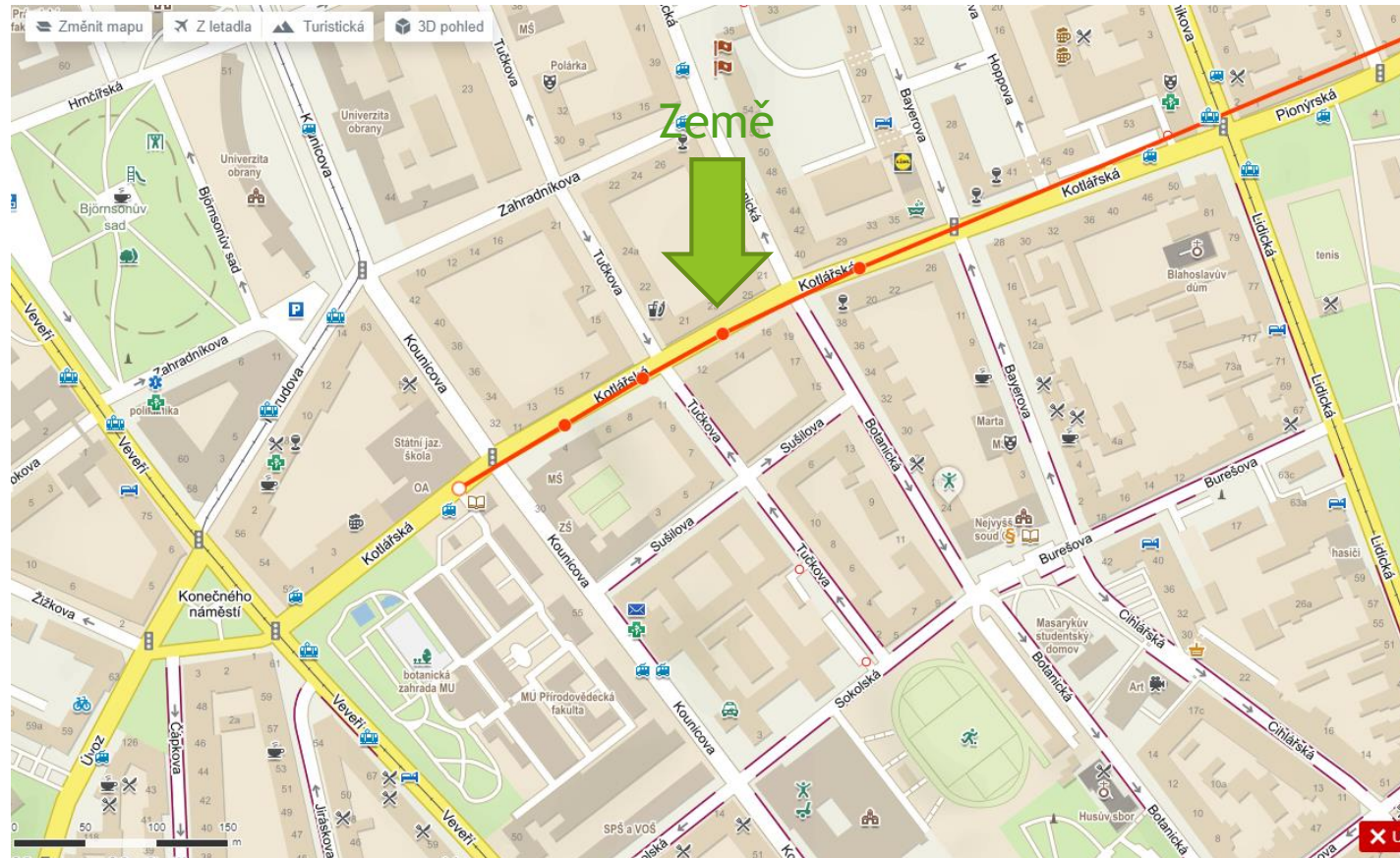


Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice

Merkur - hrášek 86 m od vchodu

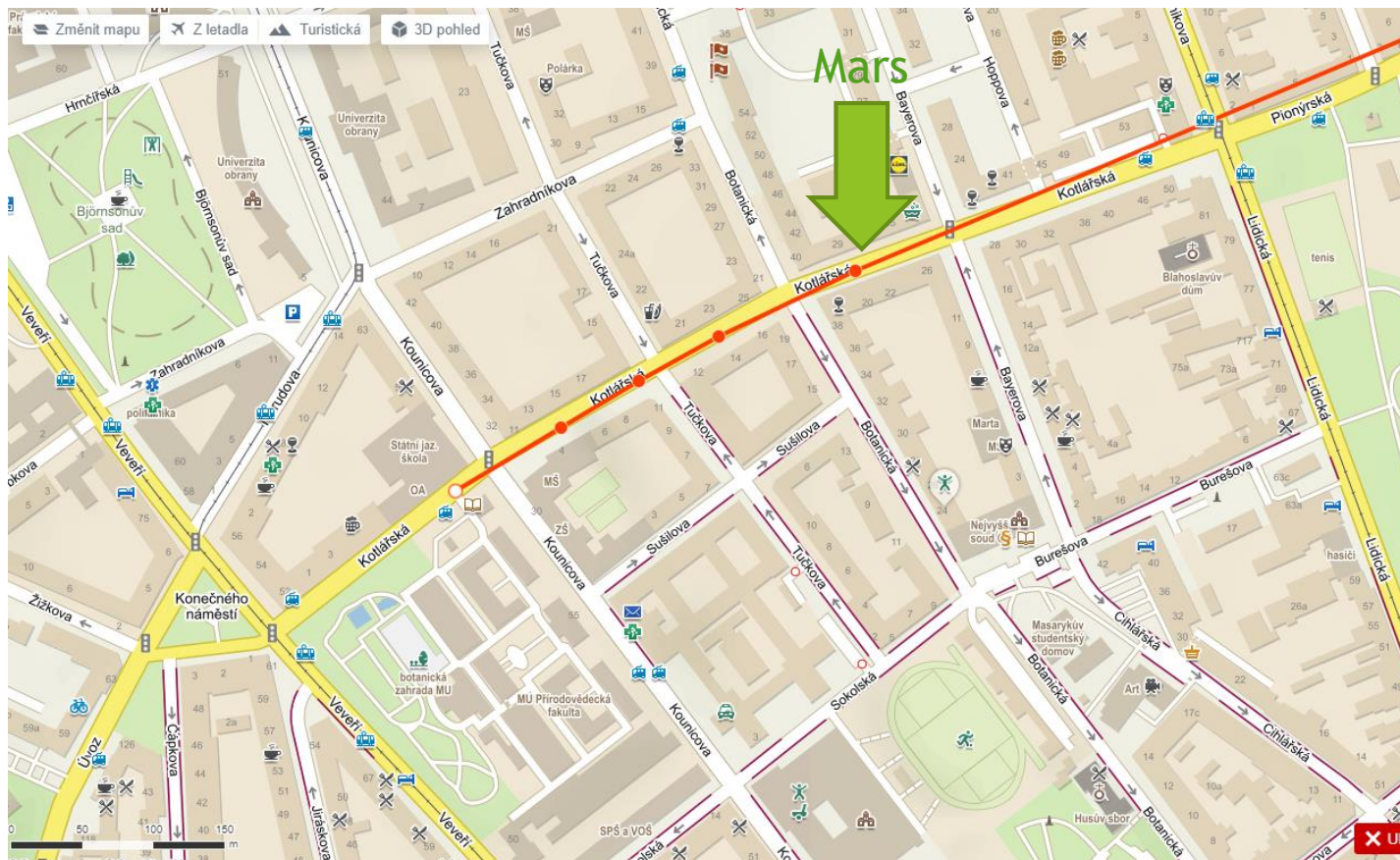
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko

Skutečný rozměr sluneční soustavy



- Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
- Merkur - hrášek 86 m od vchodu
- Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
- Země - skleněná kulička 214 m daleko

Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice

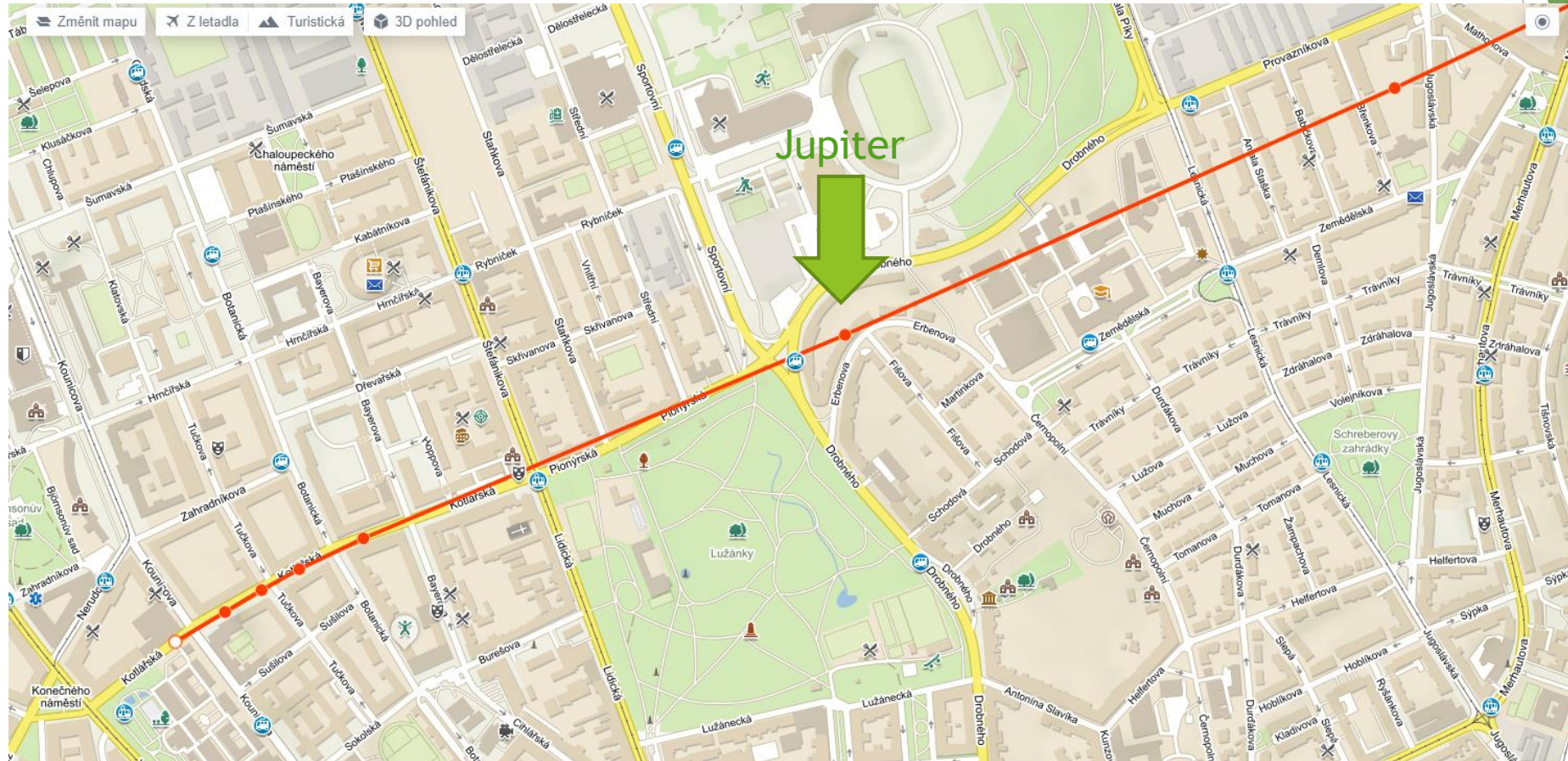
Merkur - hrášek 86 m od vchodu

Venuše - skleněná kulička 150 m daleko

Země - skleněná kulička 214 m daleko

Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

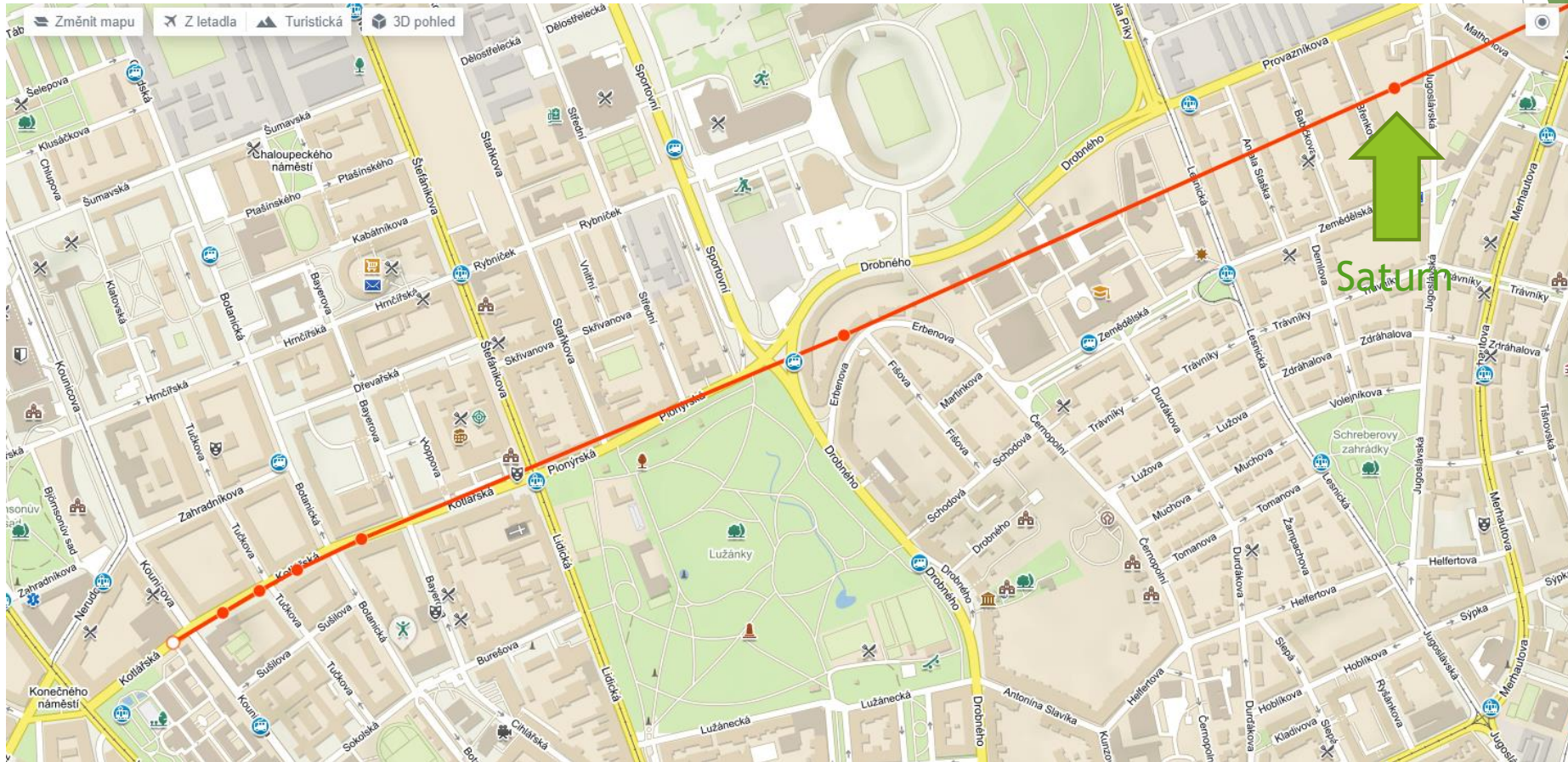
Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
Země - skleněná kulička 214 m daleko
Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

Jupiter - basketbalový míč 1,1 km daleko

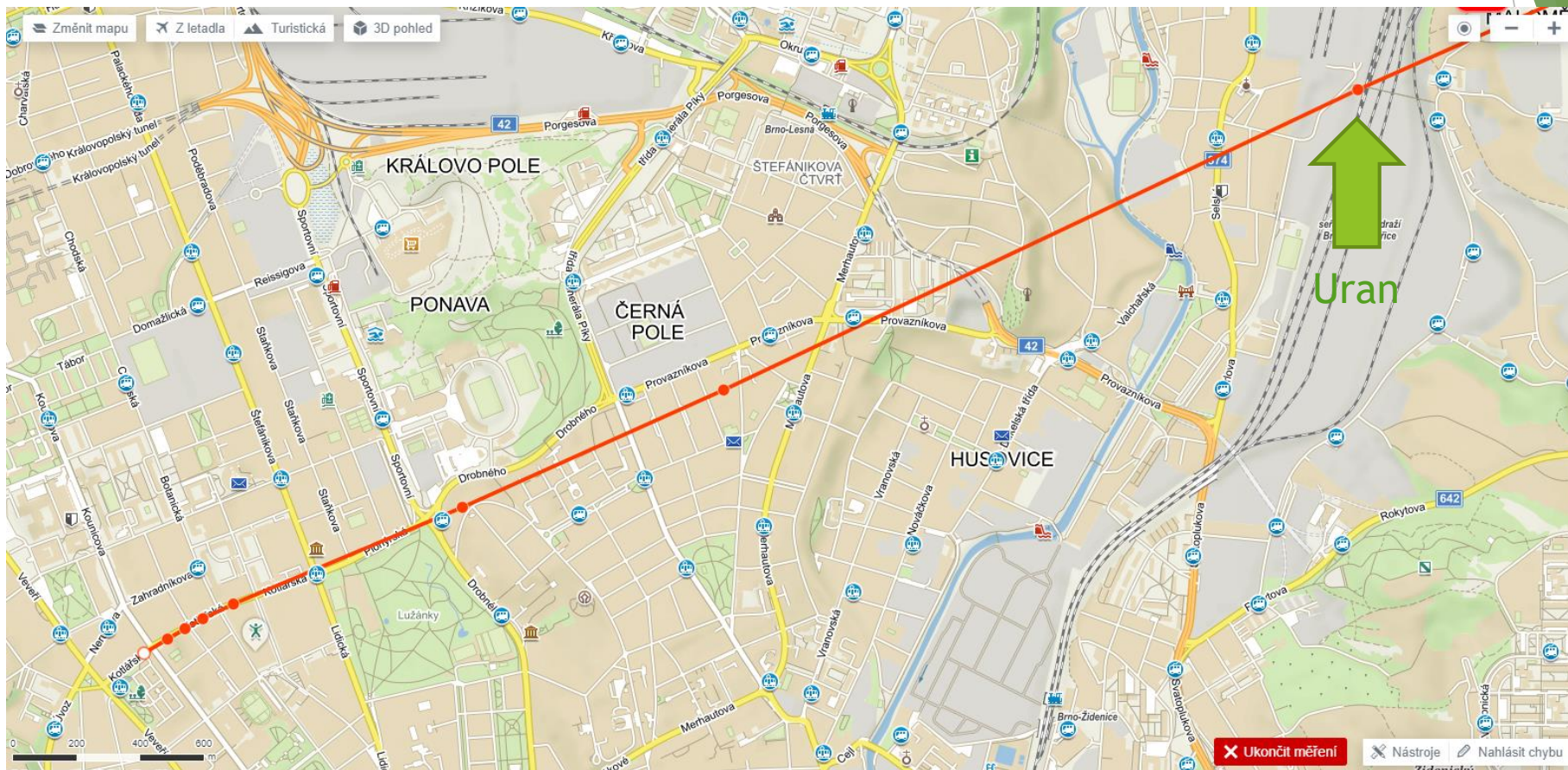
Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
Země - skleněná kulička 214 m daleko
Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

Jupiter - basketbalový míč 1,1 km daleko
Saturn - volejbalový míč 2 km daleko

Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
Země - skleněná kulička 214 m daleko
Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

Jupiter - basketbalový míč 1,1 km daleko
Saturn - volejbalový míč 2 km daleko
Uran - pomeranč 4,2 km daleko

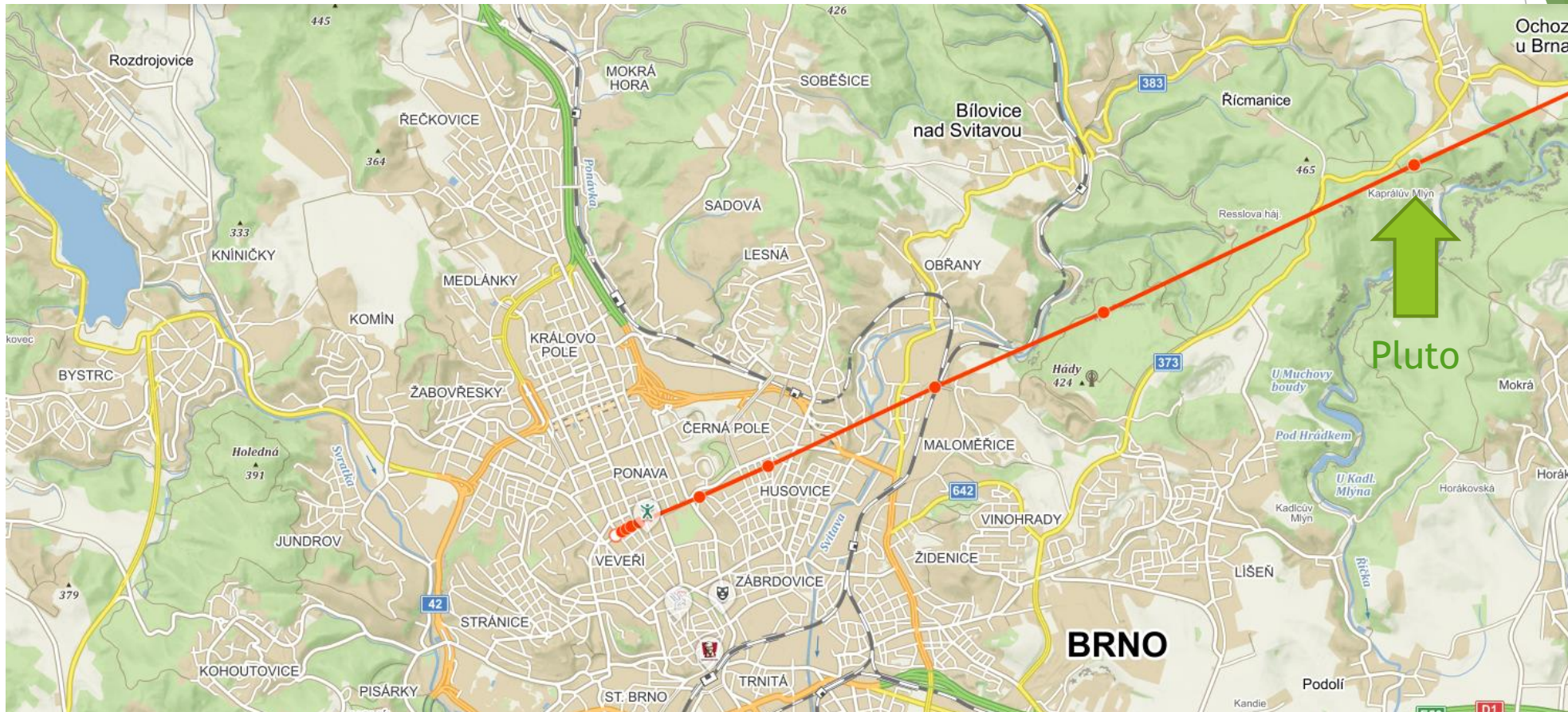
Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
Země - skleněná kulička 214 m daleko
Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

Jupiter - basketbalový míč 1,1 km daleko
Saturn - volejbalový míč 2 km daleko
Uran - pomeranč 4,2 km daleko
Neptun - pomeranč 6,4 km daleko

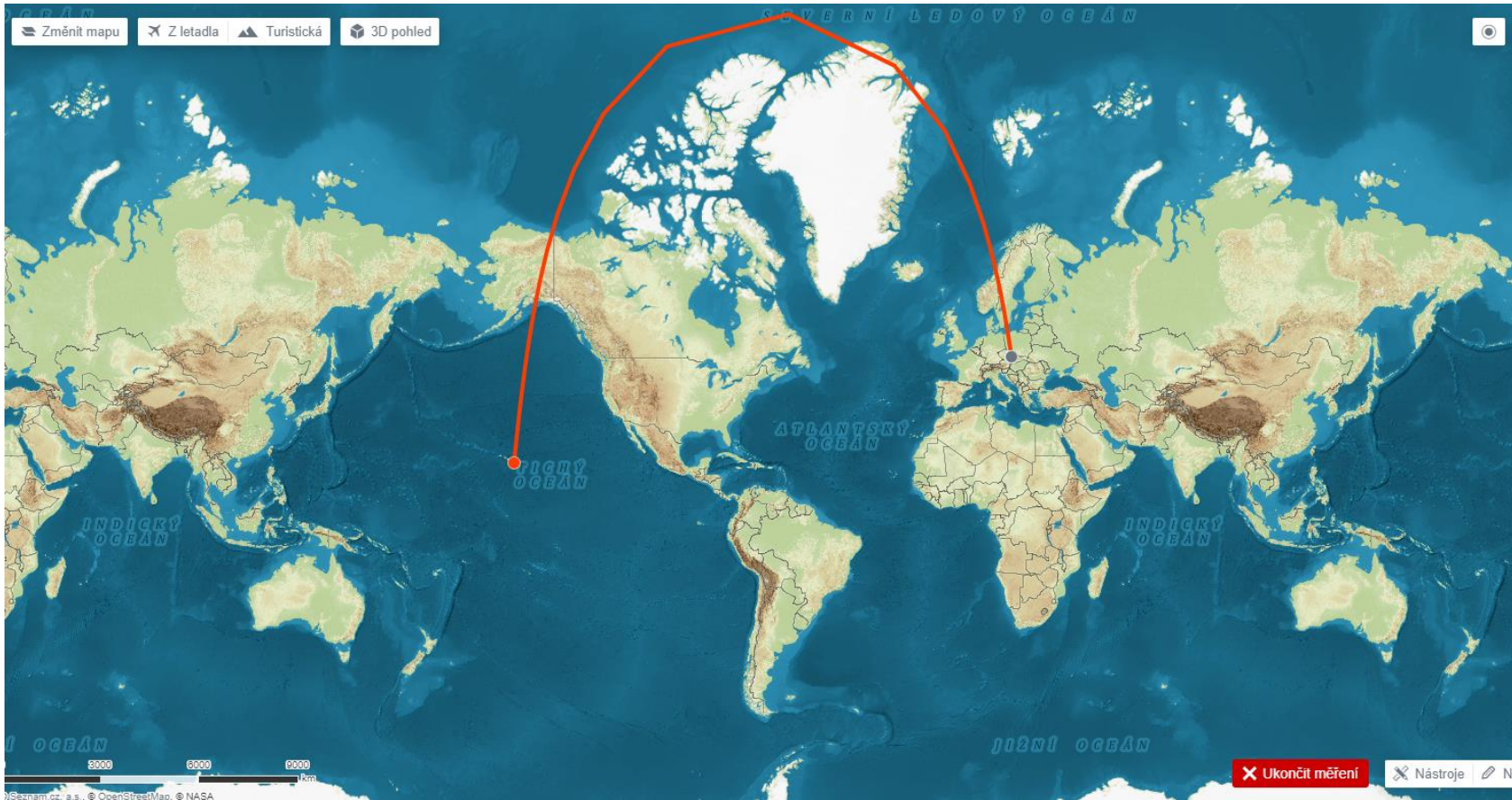
Skutečný rozměr sluneční soustavy



Slunce - dvoumetrový balón u vrátnice
Merkur - hrášek 86 m od vchodu
Venuše - skleněná kulička 150 m daleko
Země - skleněná kulička 214 m daleko
Mars - větší hrášek 320 m od vchodu

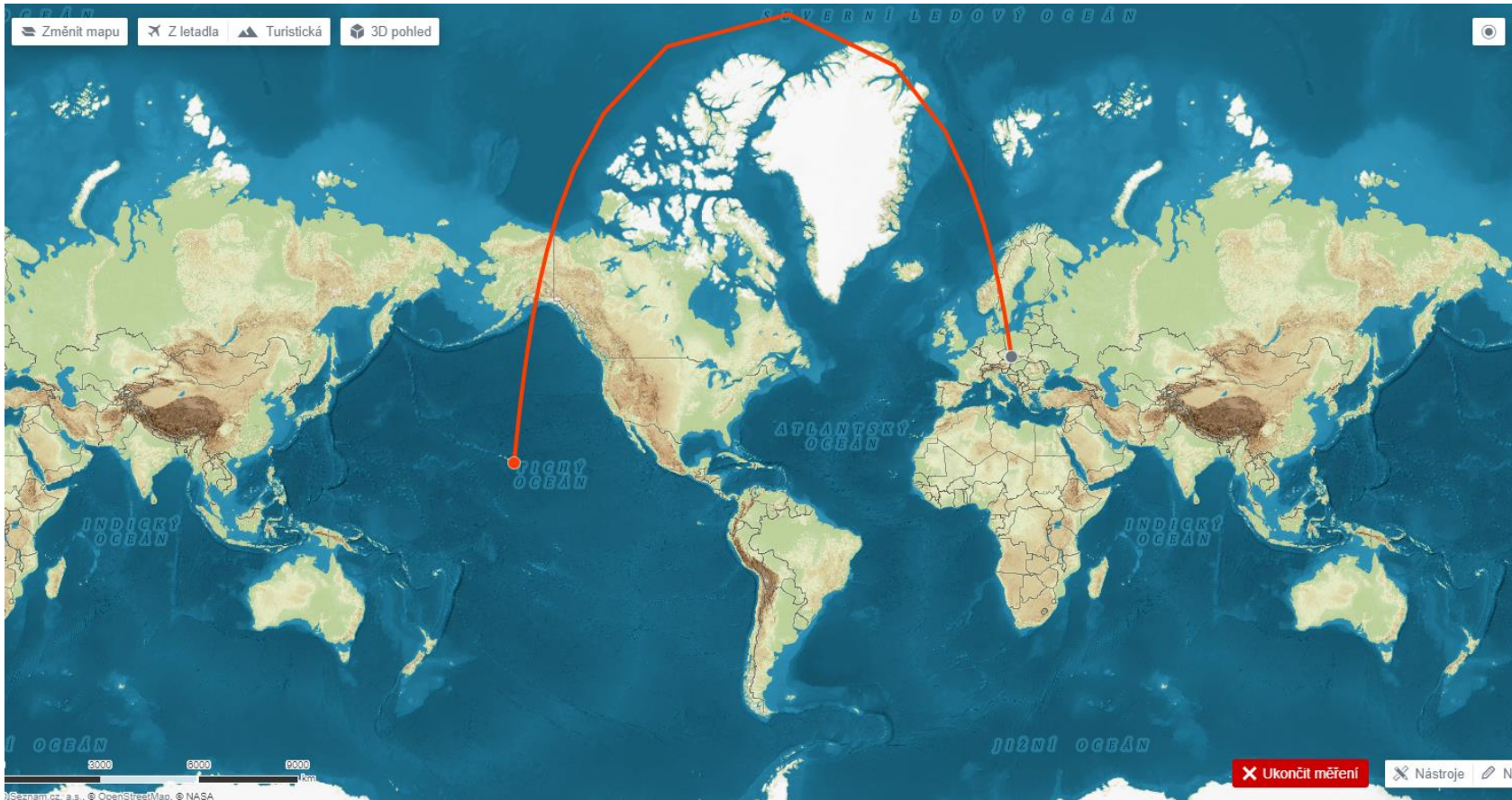
Jupiter - basketbalový míč 1,1 km daleko
Saturn - volejbalový míč 2 km daleko
Uran - pomeranč 4,2 km daleko
Neptun - pomeranč 6,4 km daleko
Pluto - špendlíková hlavička 10,5 km daleko

Skutečný rozměr sluneční soustavy



Nejbližší hvězda Proxima Centauri - míč na házenou někde u Havaje...

Skutečný rozměr sluneční soustavy

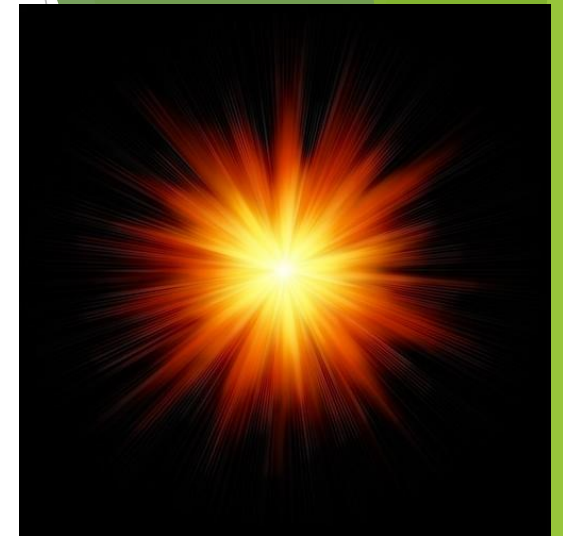
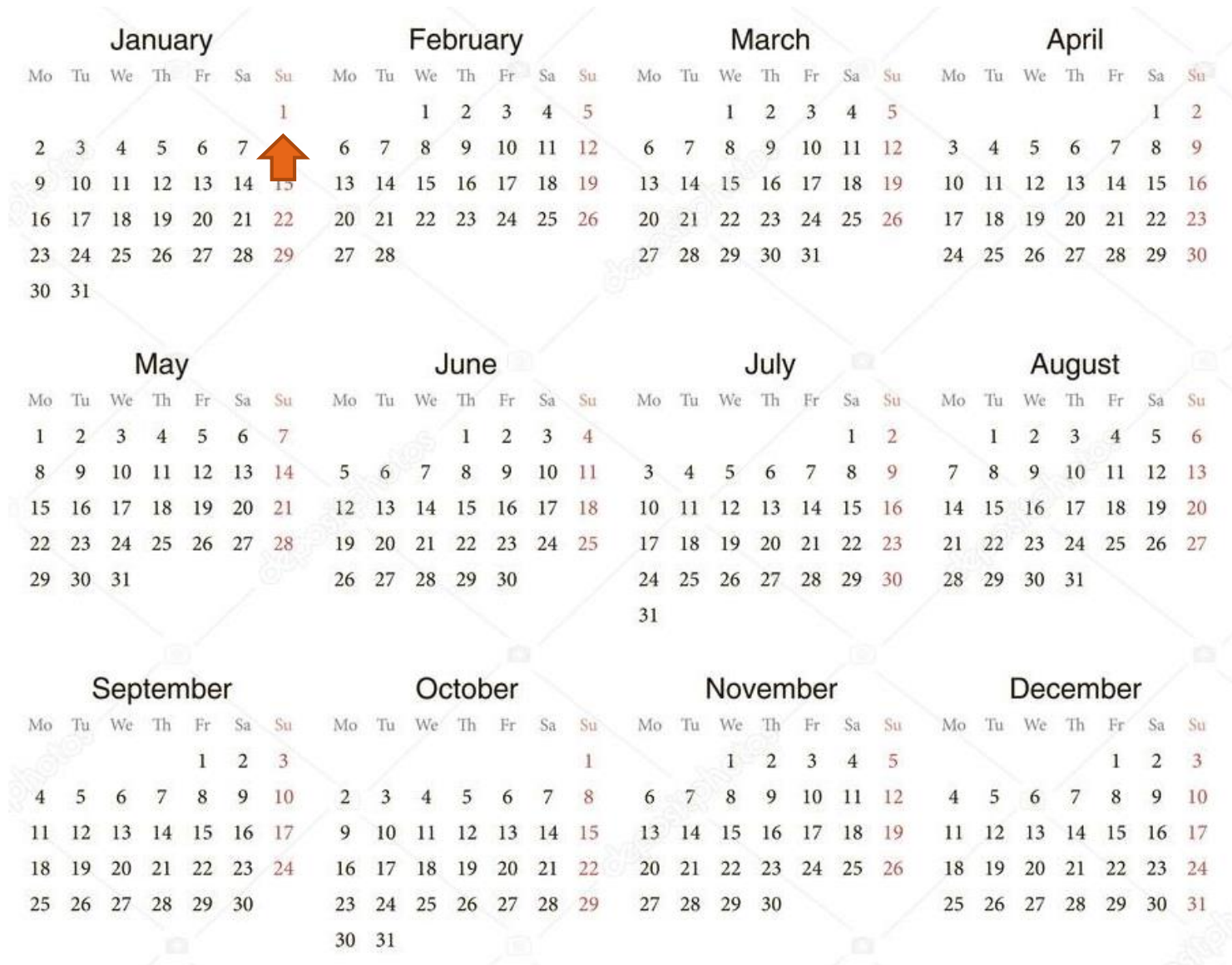


Nejbližší hvězda Proxima Centauri - míč na házenou někde u Havaje...

Nejbližší galaxie by byla 3x dál než Uran...

Jak starý vesmír je?

Vznik vesmíru
1. ledna



Jak starý vesmír je?

První dinosauři
na Vánoce! :-)



December

Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	↑



Jak starý vesmír je?

Dinosauri
vymřeli 28.
prosince

December

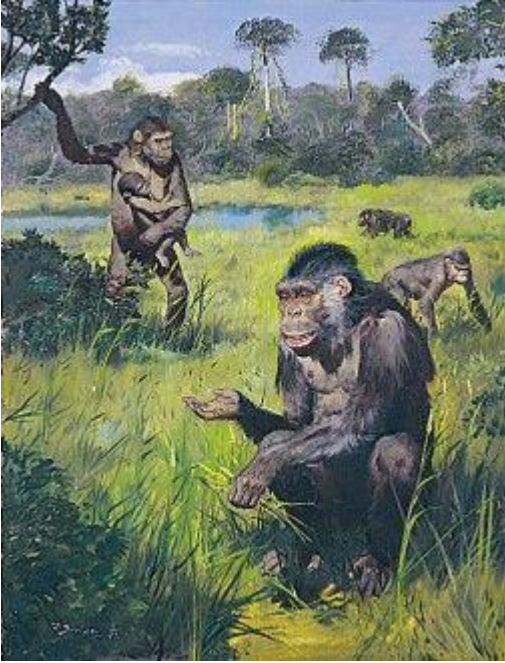
Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	↑



Jak starý vesmír je?

31. prosinec

14:30 - první předchůdci člověka

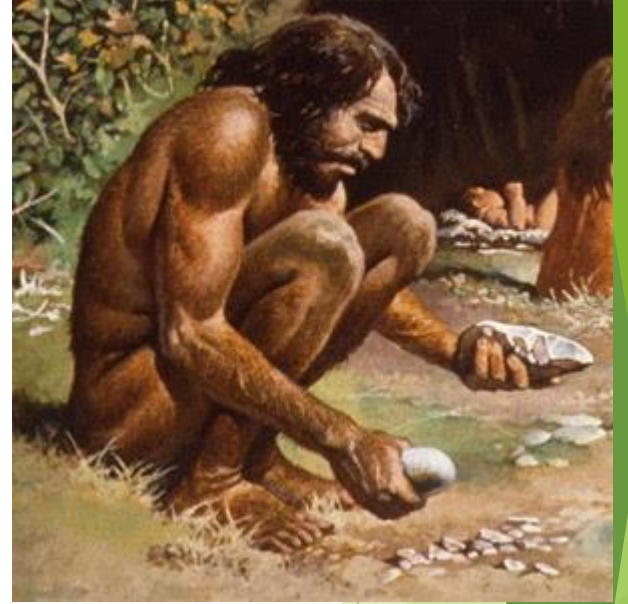
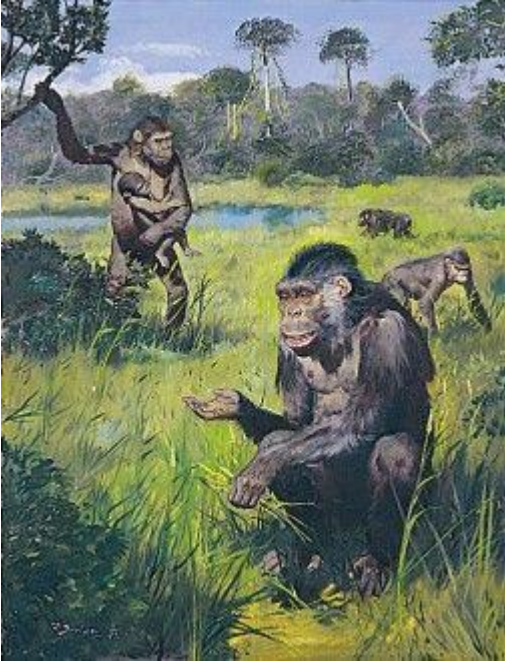


Jak starý vesmír je?

31. prosinec

14:30 - první předchůdci člověka

23:00 - začátek doby kamenné



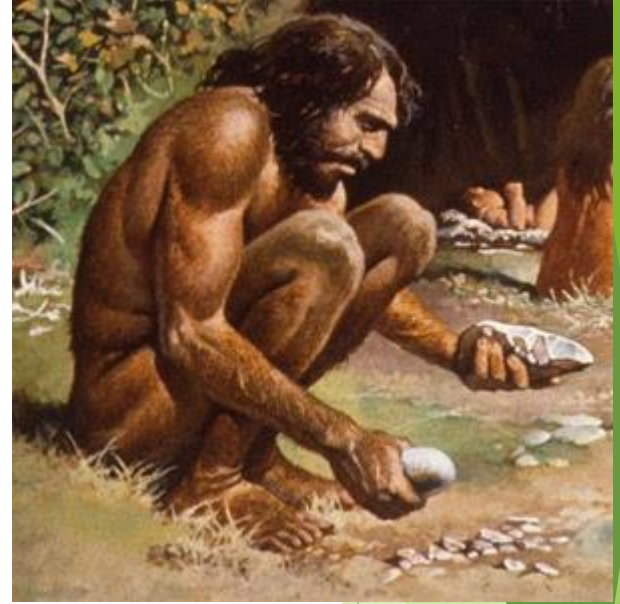
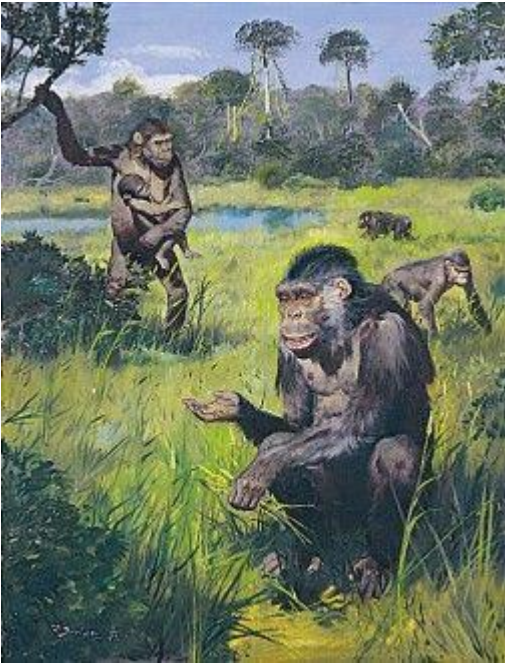
Jak starý vesmír je?

31. prosinec

14:30 - první předchůdci člověka

23:00 - začátek doby kamenné

23:59:50 - pyramidy v Egyptě



Jak starý vesmír je?

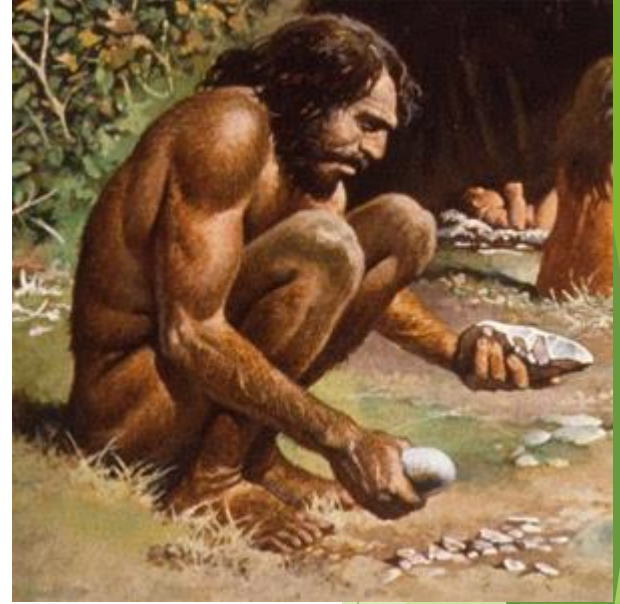
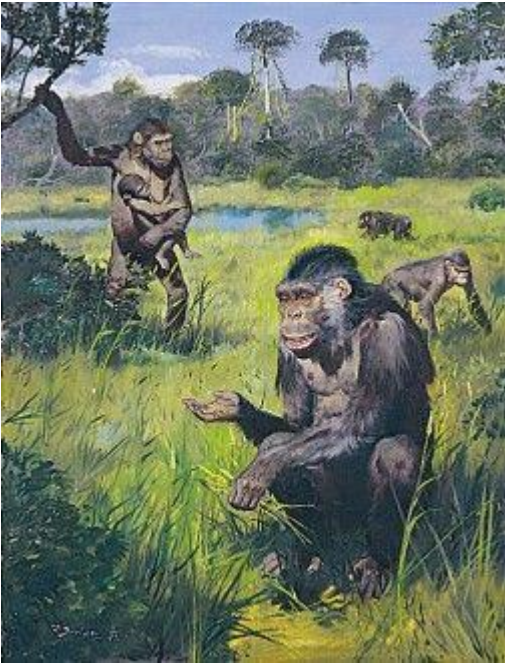
31. prosinec

14:30 - první předchůdci člověka

23:00 - začátek doby kamenné

23:59:50 - pyramidy v Egyptě

23:59:59 - objevení Ameriky



Jak starý vesmír je?

31. prosinec

14:30 - první předchůdci člověka

23:00 - začátek doby kamenné

23:59:50 - pyramidy v Egyptě

23:59:59 - objevení Ameriky

00:00:00 Nového roku - TEĎ

Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Z gigantického prachoplynového mezihvězdného oblaku
- ▶ Před 4568.2 mil. lety
- ▶ Složení - 98 % prvků z prvotní syntézy, zbytek těžších z hvězd předchozí generace
- ▶ Proč?



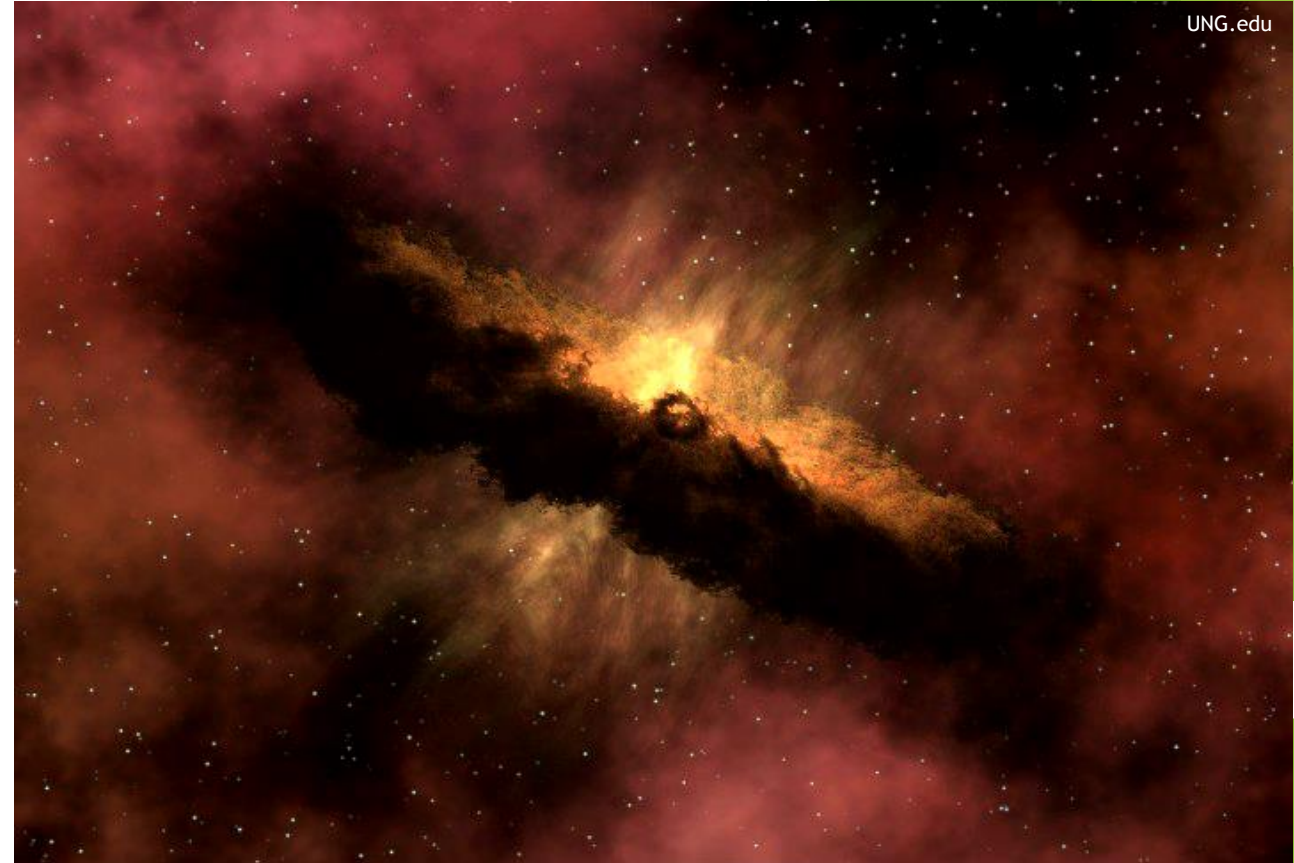
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Výbuch blízké supernovy (rázová vlna) narušil gravitační rovnováhu v prachoplynovém oblaku



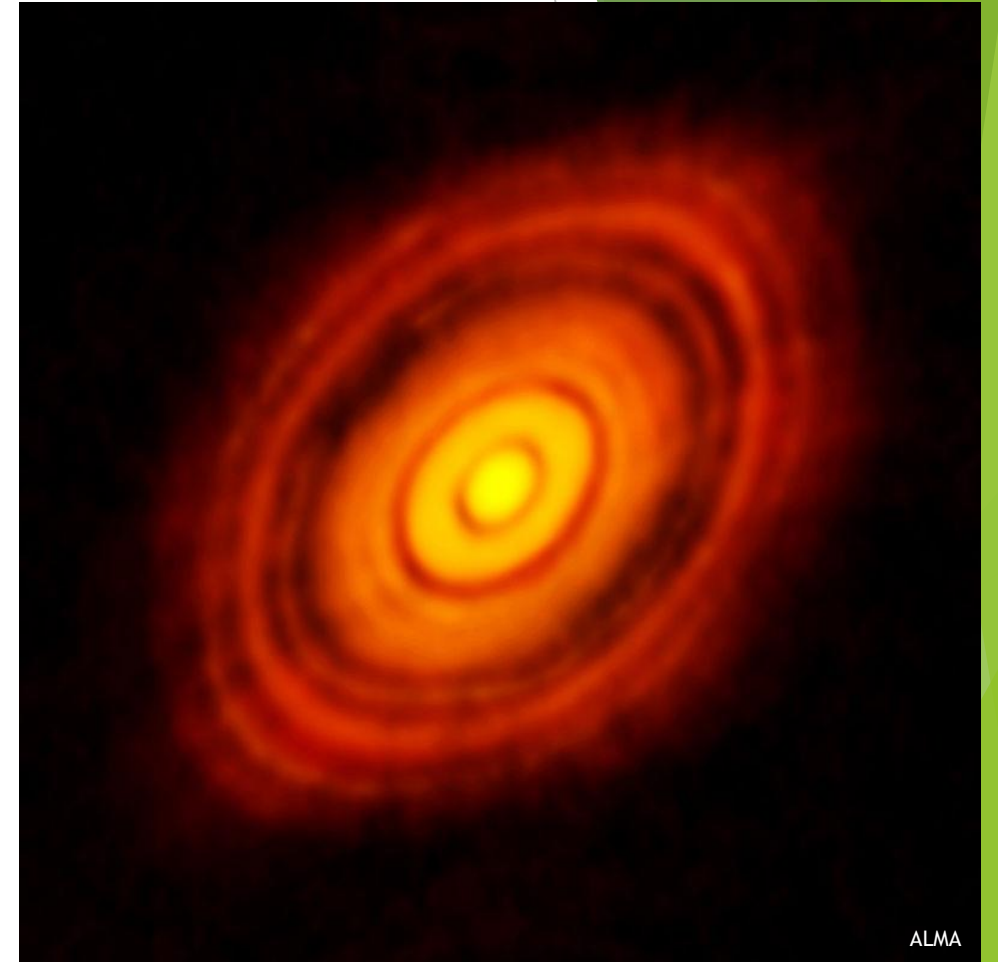
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Výbuch blízké supernovy (rázová vlna) narušil gravitační rovnováhu v prachoplynovém oblaku
- ▶ Utvořilo se centrum, do kterého se naakumulovala většina hmoty z okolí



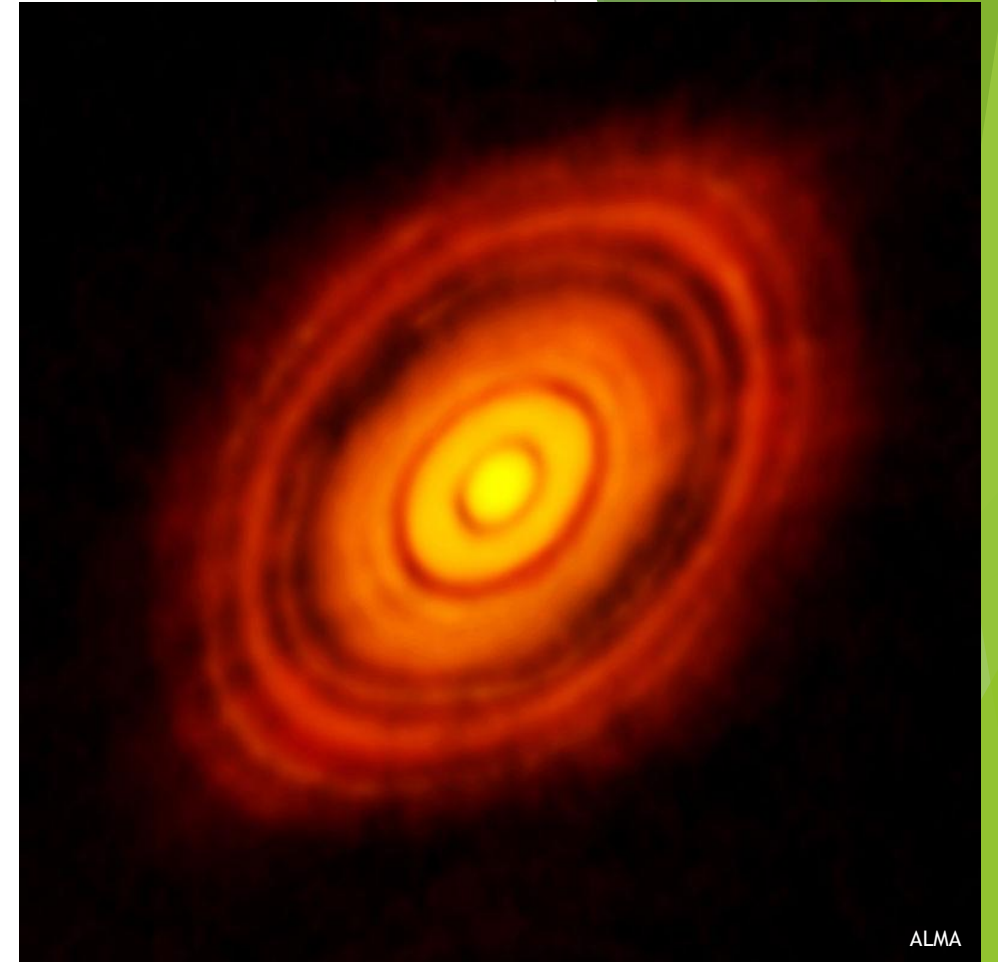
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Výbuch blízké supernovy (rázová vlna) narušil gravitační rovnováhu v prachoplynovém oblaku
- ▶ Utvořilo se centrum, do kterého se naakumulovala většina hmoty z okolí
- ▶ Zákon zachování hybnosti - růst rychlosti rotace a zpoždění do protoplanetárního disku



Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Výbuch blízké supernovy (rázová vlna) narušil gravitační rovnováhu v prachoplynovém oblaku
- ▶ Utvořilo se centrum, do kterého se naakumulovala většina hmoty z okolí
- ▶ Zákon zachování hybnosti - růst rychlosti rotace a zpoždění do protoplanetárního disku
- ▶ Výsledná teplota a hustota v centru protoplanetárního disku způsobila zažehnutí termonukleární reakce a z dvou vodíků se začalo vyrábět helium za vzniku obrovského tepla a světla - zrodilo se protoSlunce



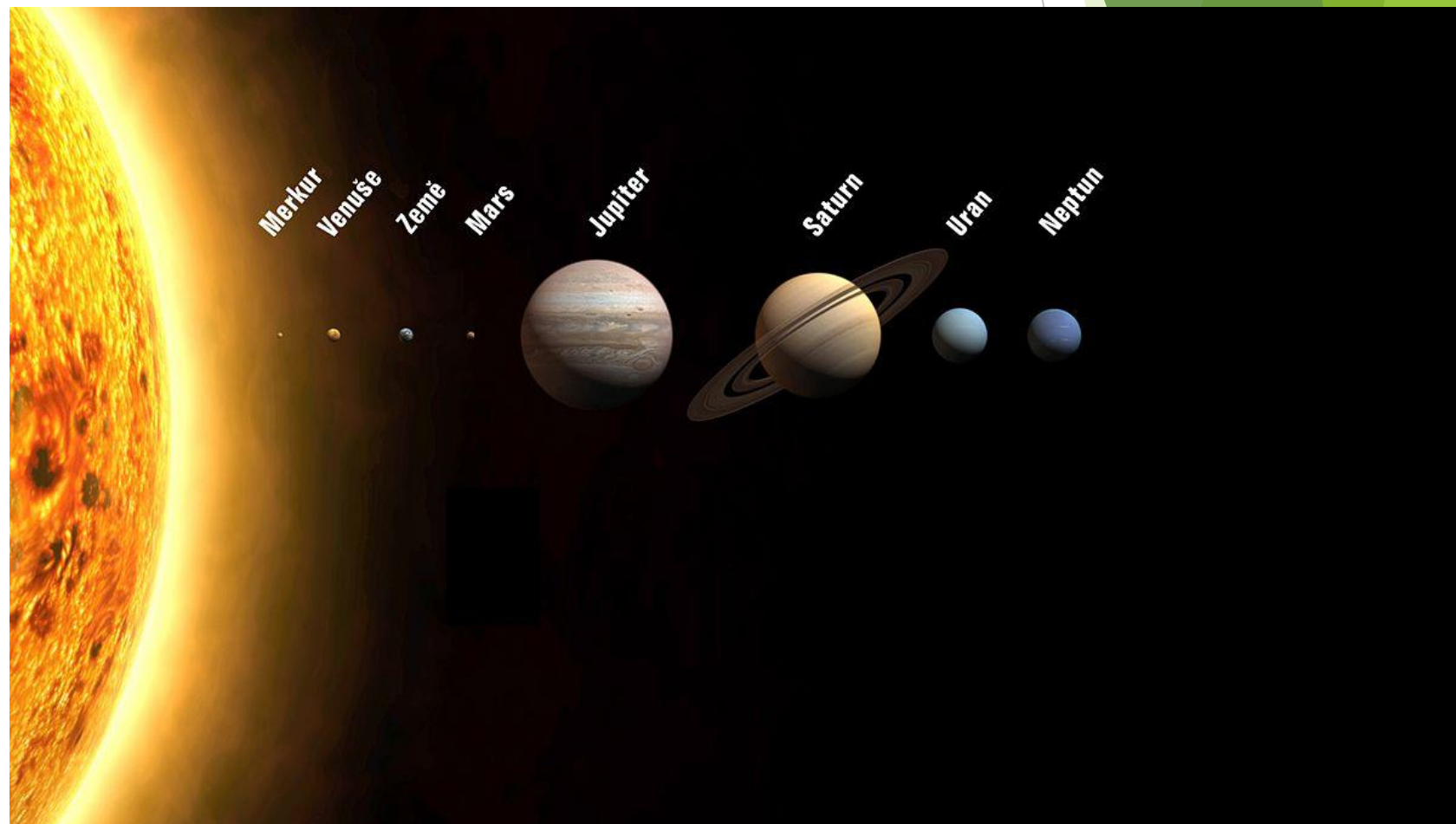
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Výbuch blízké supernovy (rázová vlna) narušil gravitační rovnováhu v prachoplynovém oblaku
- ▶ Utvořilo se centrum, do kterého se naakumulovala většina hmoty z okolí
- ▶ Zákon zachování hybnosti - růst rychlosti rotace a zpoždění do protoplanetárního disku
- ▶ Výsledná teplota a hustota v centru protoplanetárního disku způsobila zažehnutí termonukleární reakce a z dvou vodíků se začalo vyrábět helium za vzniku obrovského tepla a světla - zrodilo se protoSlunce
- ▶ Jednotlivé prachové částičky se postupně zvětšovaly tzv. akrecí - planetisimály jako vysavače!



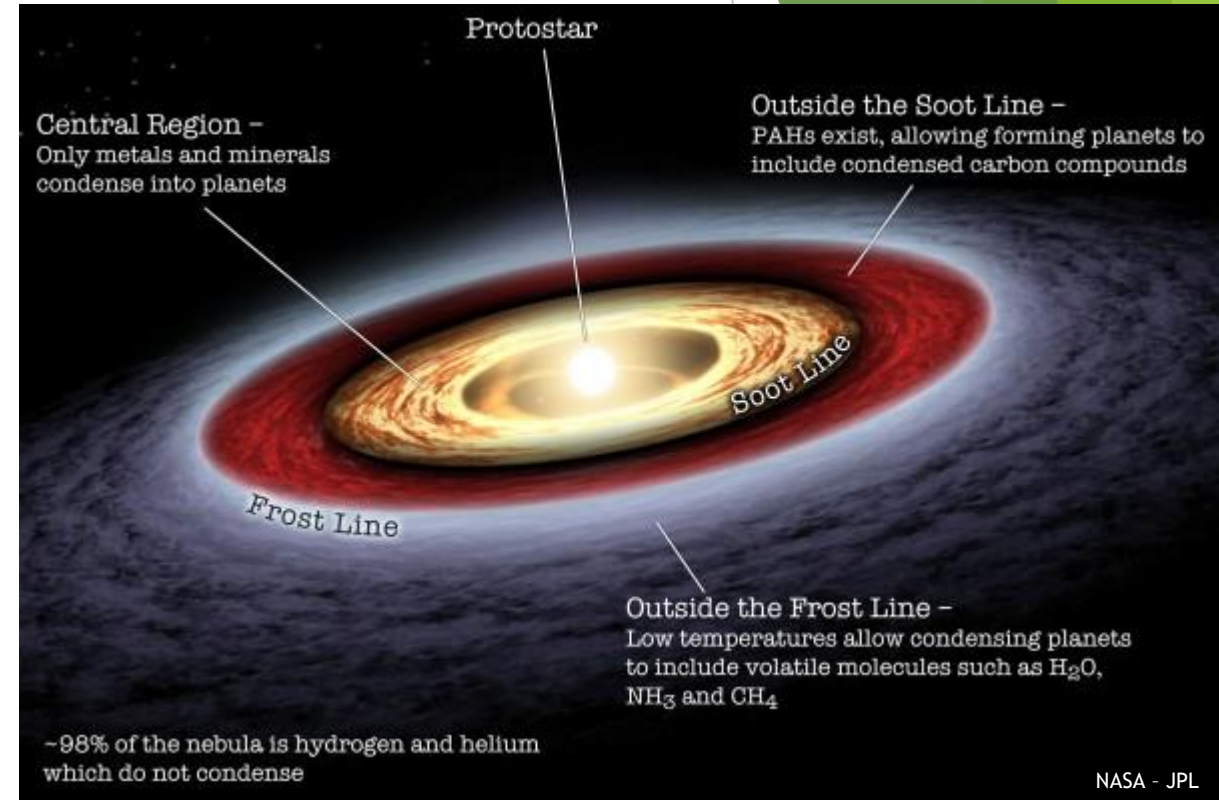
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Terestrické planety vs. plynní obři - proč jsou tam kde jsou?



Vznik a formování sluneční soustavy

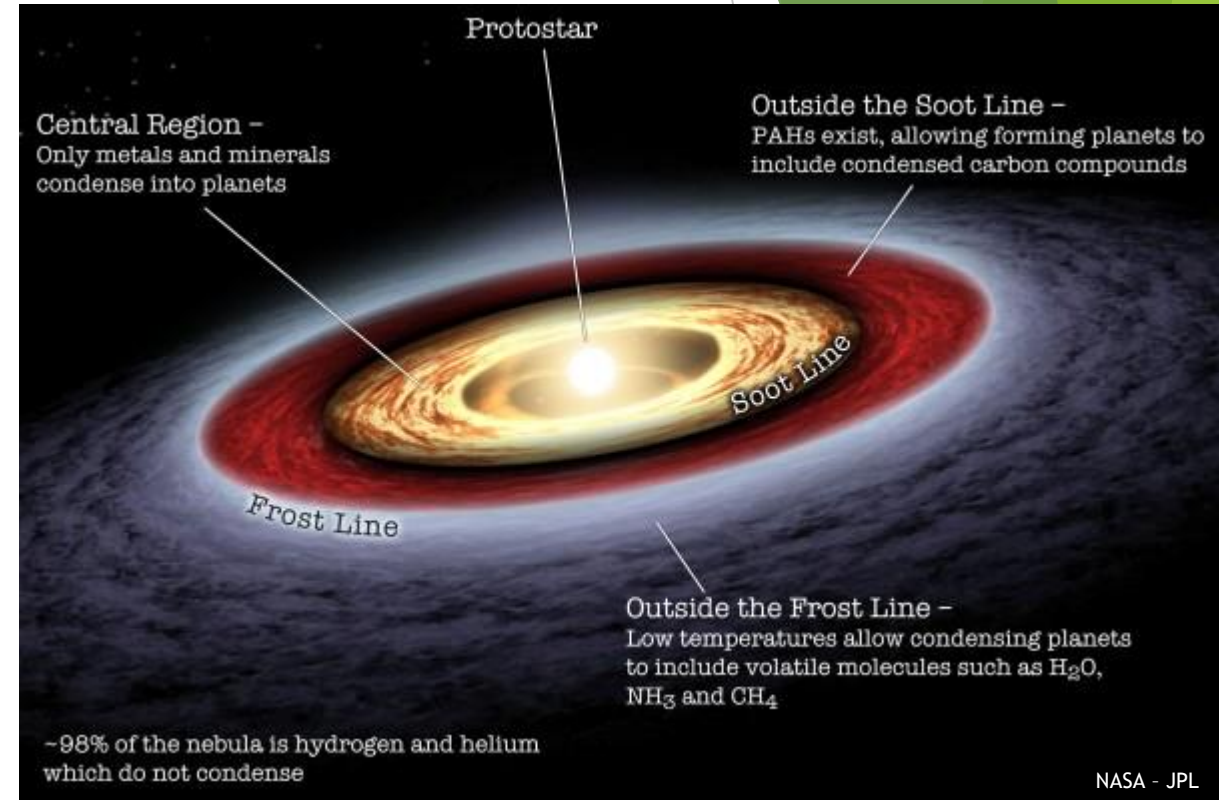
- ▶ Terestrické planety vs. plynní obři - proč jsou tam kde jsou?
- ▶ Volatilní sloučeniny jako plyny, vodní pára atd. byly vyhnány/vypařeny slunečním větrem a planetisimály je na sebe mohly koncentrovat dále od Slunce (cca 4 AU a dál)



1 AU - cca 150 000 000 km
1 AU = vzdálenost Země - Slunce

Vznik a formování sluneční soustavy

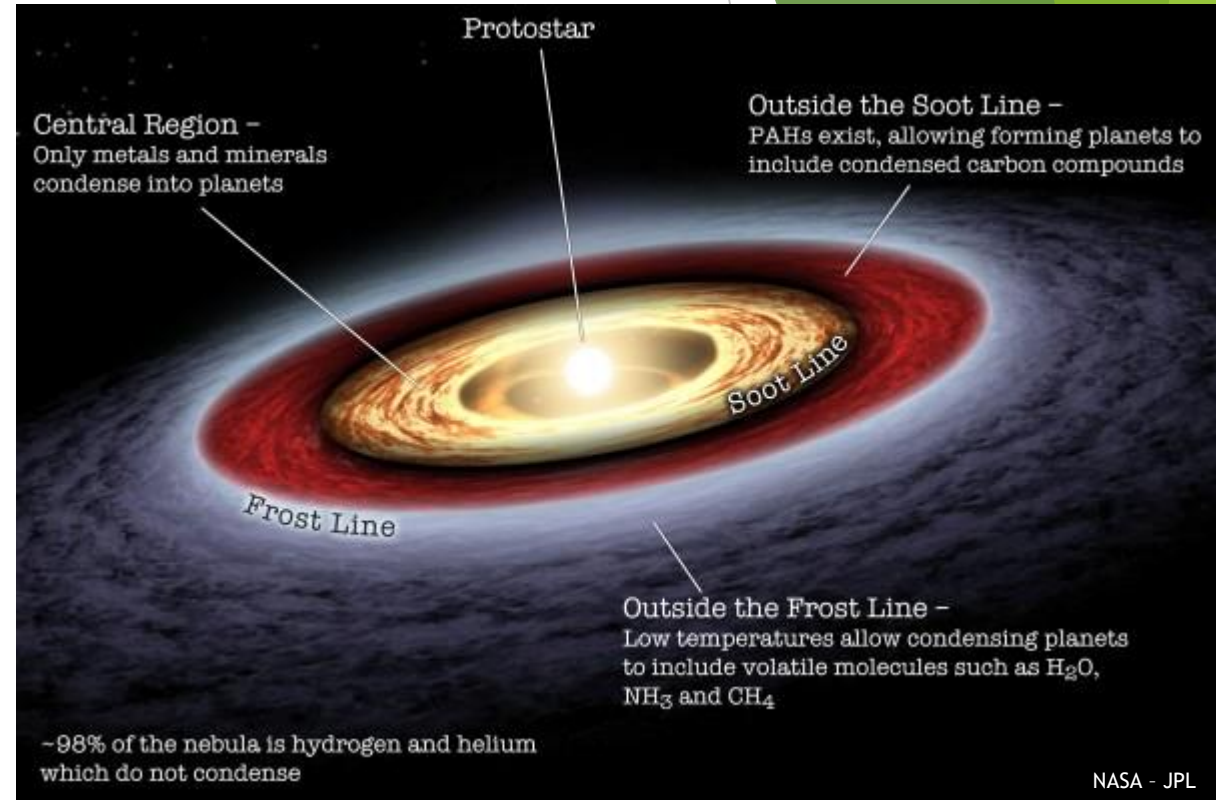
- ▶ Terestrické planety vs. plynní obři - proč jsou tam kde jsou?
- ▶ Volatilní sloučeniny jako plyny, vodní pára atd. byly vyhnány/vypařeny slunečním větrem a planetisimály je na sebe mohly koncentrovat dále od Slunce (cca 4 AU a dál)
- ▶ Celý tento proces zabral „jen“ několik desítek milionů let a tedy chvíli po vzniku sluneční soustavy jsme měli hotové zárodky všech planet tak jak je známe



1 AU - cca 150 000 000 km
1 AU = vzdálenost Země - Slunce

Vznik a formování sluneční soustavy

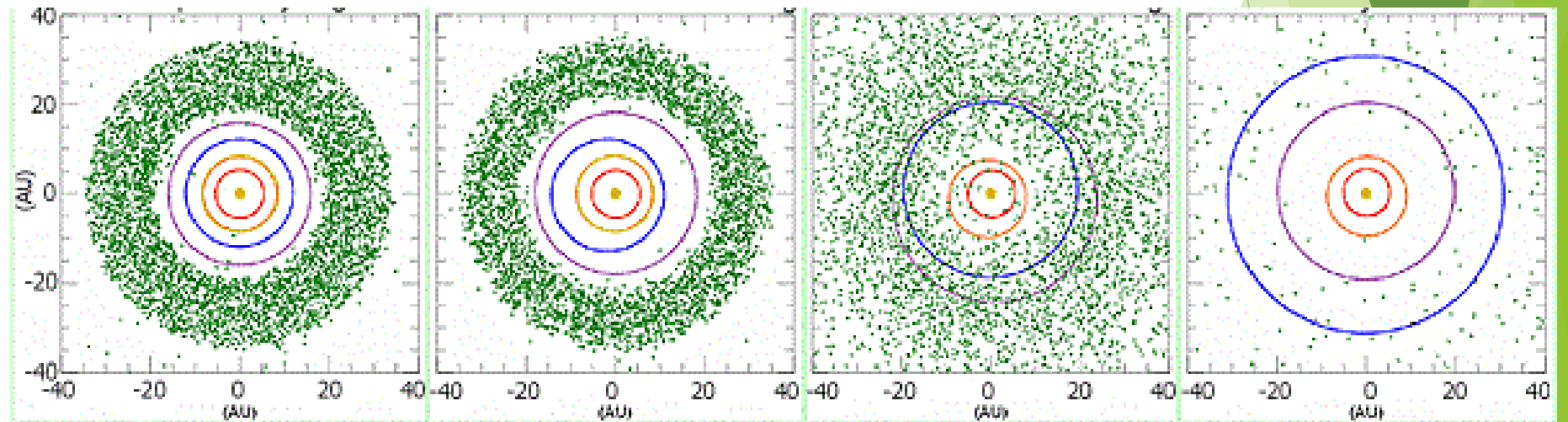
- ▶ Terestrické planety vs. plynní obři - proč jsou tam kde jsou?
- ▶ Volatilní sloučeniny jako plyny, vodní pára atd. byly vyhnány/vypařeny slunečním větrem a planetisimály je na sebe mohly koncentrovat dále od Slunce (cca 4 AU a dál)
- ▶ Celý tento proces zabral „jen“ několik desítek milionů let a tedy chvíli po vzniku sluneční soustavy jsme měli hotové zárodky všech planet tak jak je známe
- ▶ Mladé Slunce vytvářelo mnohem víc slunečního větru než dnes - zbytky prachu a plynu po zformování tak byly odfouknuty do mezihvězdného prostoru a planety přestaly růst



1 AU - cca 150 000 000 km
1 AU = vzdálenost Země - Slunce

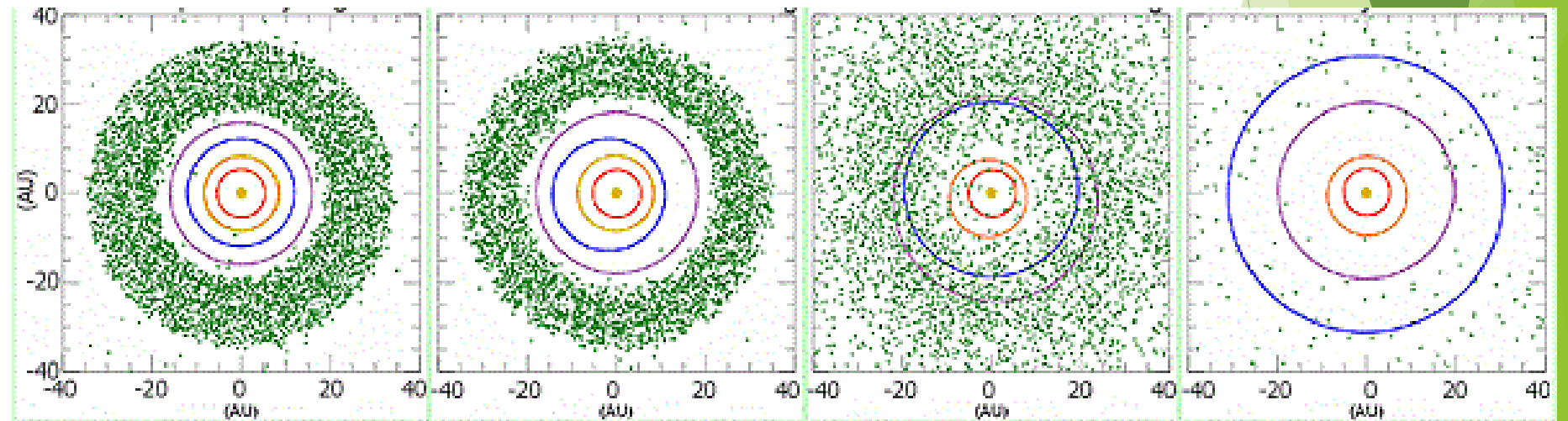
Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Další významné události během vývoje sluneční soustavy?
- ▶ Pozdní velké bombardování (LHB) - před 4.1 až 3.8 mld lety



Vznik a formování sluneční soustavy

- ▶ Další významné události během vývoje sluneční soustavy?
- ▶ Pozdní velké bombardování (LHB) - před 4.1 až 3.8 mld lety
- ▶ Gravitační rezonance Jupiteru a Saturnu 2:1 - vyhnání Uranu a Neptunu na vzdálenější orbity a rozmetání zbytků po zformování sluneční soustavy po celé soustavě

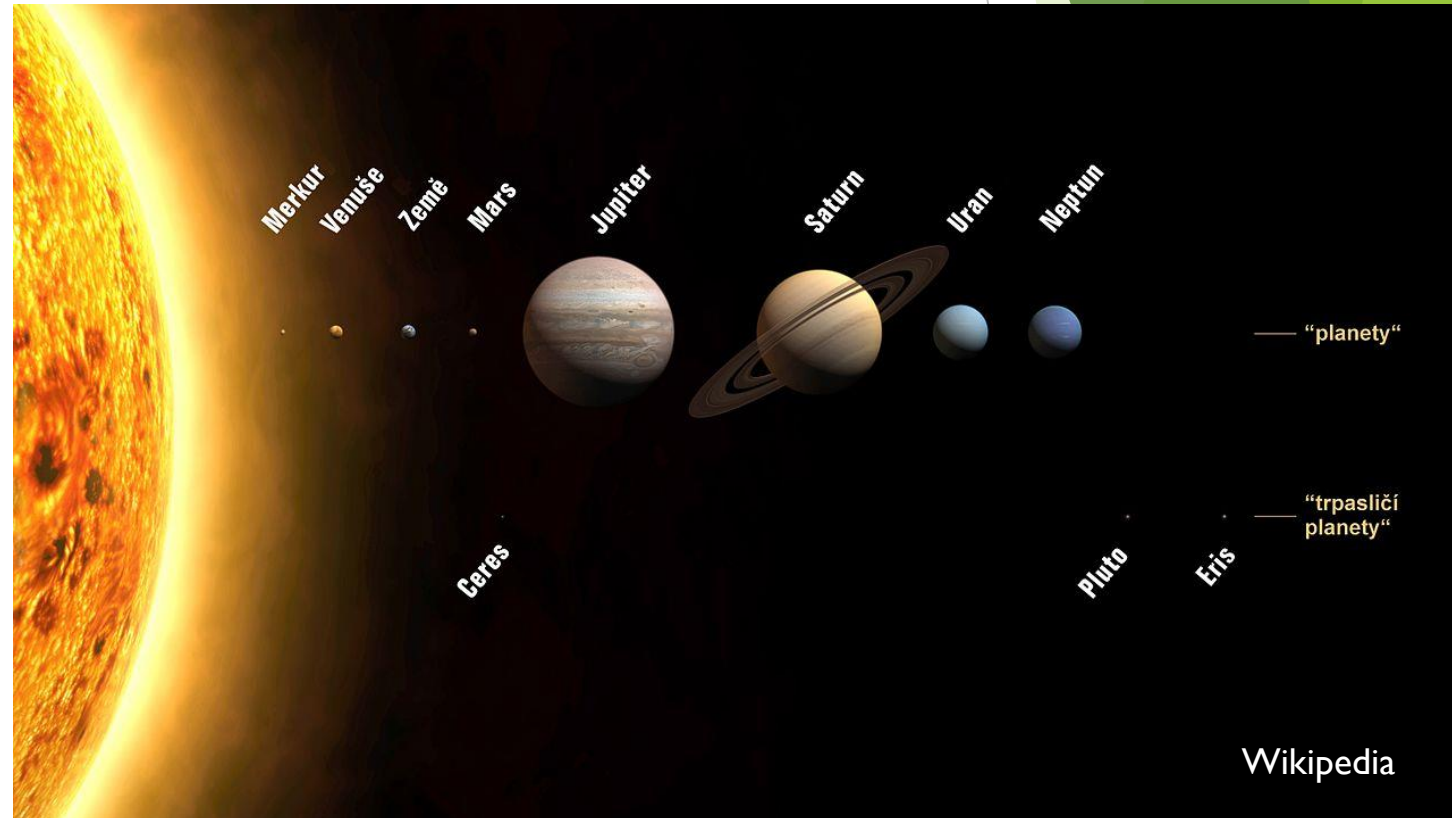


Členění těles sluneční soustavy

- ▶ Slunce
- ▶ Terestrické planety
- ▶ Plynní giganti
- ▶ Trpasličí planety
- ▶ Planetky
- ▶ Komety

- ▶ Kuiperův pás

- ▶ Oortův oblak

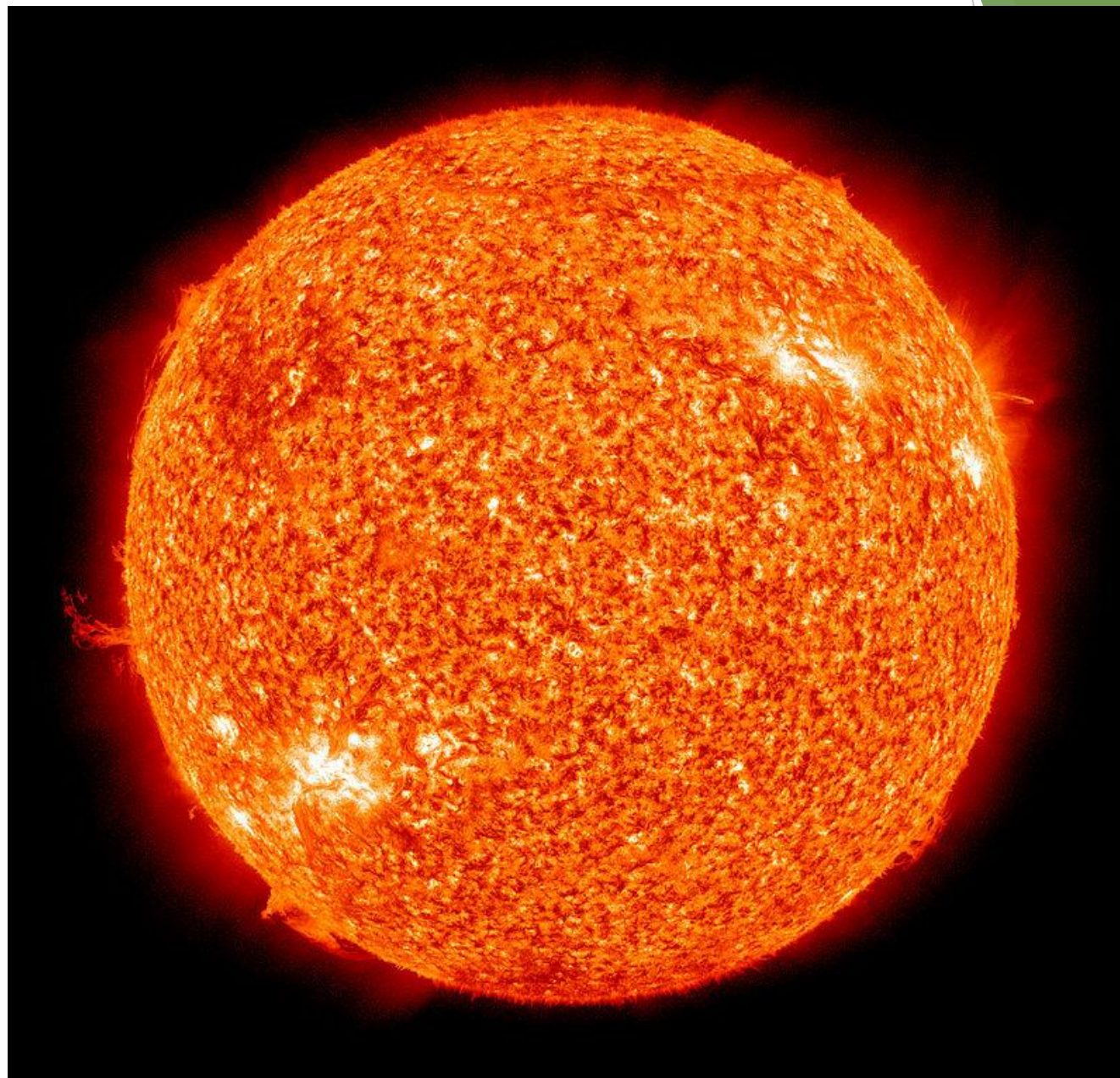


Slunce

- ▶ 109x větší než Země
- ▶ Hvězda hlavní posloupnosti
- ▶ Stabilní ještě cca 4 mld let

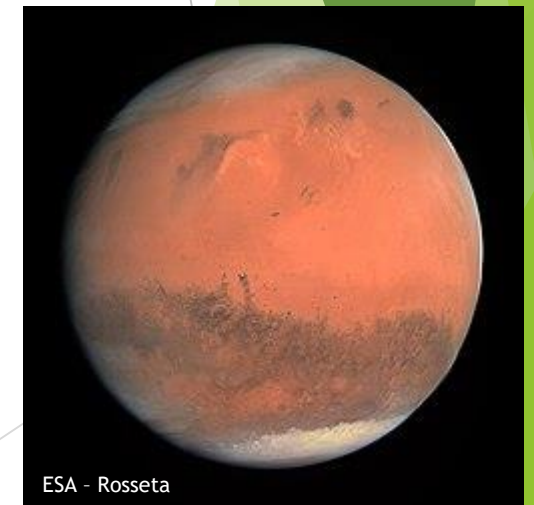
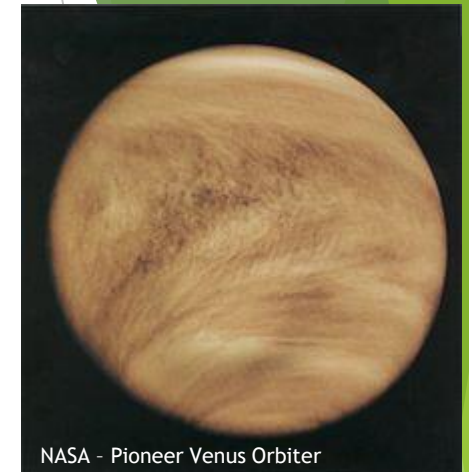
- ▶ Geologicky poměrně nezajímavé :-)

- ▶ Na povrchu 6000 °C!
- ▶ Uvnitř 10 milionů...



Terestrické planety

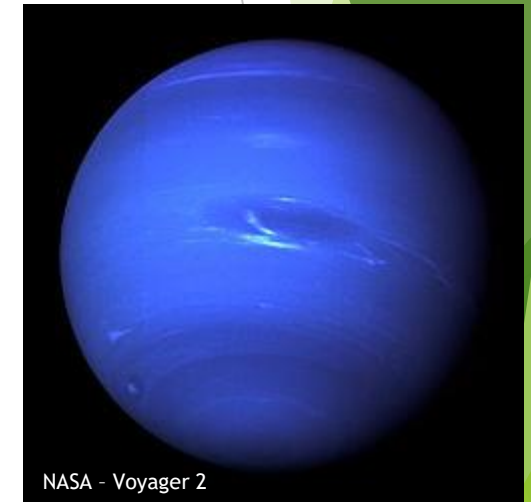
- ▶ Merkur
 - ▶ Venuše
 - ▶ Země
 - ▶ Mars
-
- ▶ 0,4 - 1 rozměru Země
 - ▶ Podobné Zemi - terestrické
 - ▶ Pevný povrch - přítomnost geologie - Hurá! :-)
 - ▶ Hustotní diferenciacce



Plynní obři

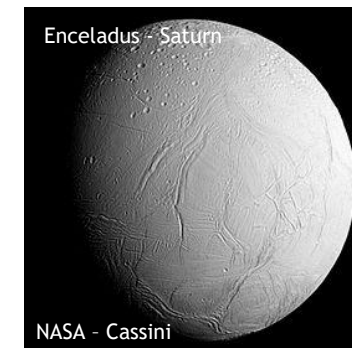
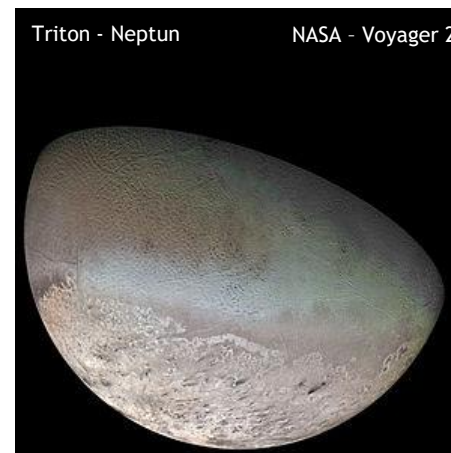
- ▶ Jupiter
- ▶ Saturn
- ▶ Uran
- ▶ Neptun

- ▶ Chybí pevný povrch... :-)
- ▶ Nízká hustota
- ▶ Rychlá rotace
- ▶ Prstence
- ▶ Velké množství měsíců (s geologií!!!)



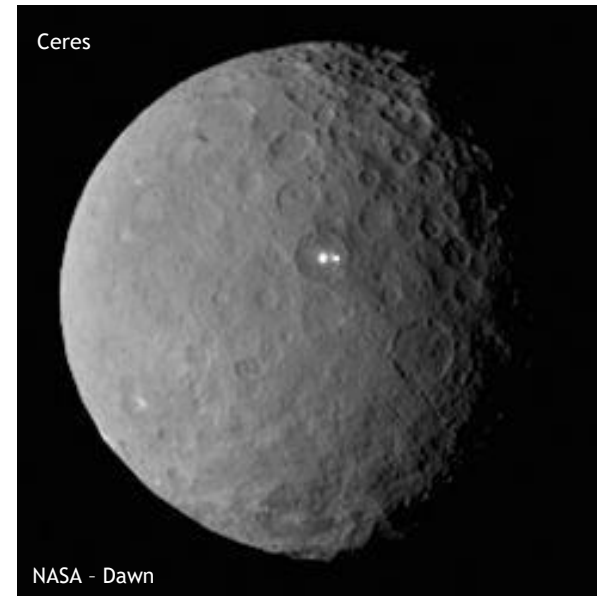
Měsíce (satelity)

- ▶ Od Země dál má každá planeta nejmíň jeden měsíc
- ▶ Můžou být i větší, než planeta Merkur (Ganymed, Titan)
- ▶ Obrovsky rozmanité (od zachycených planetek až po samostatné světy s atmosférou)



Trpasličí planety

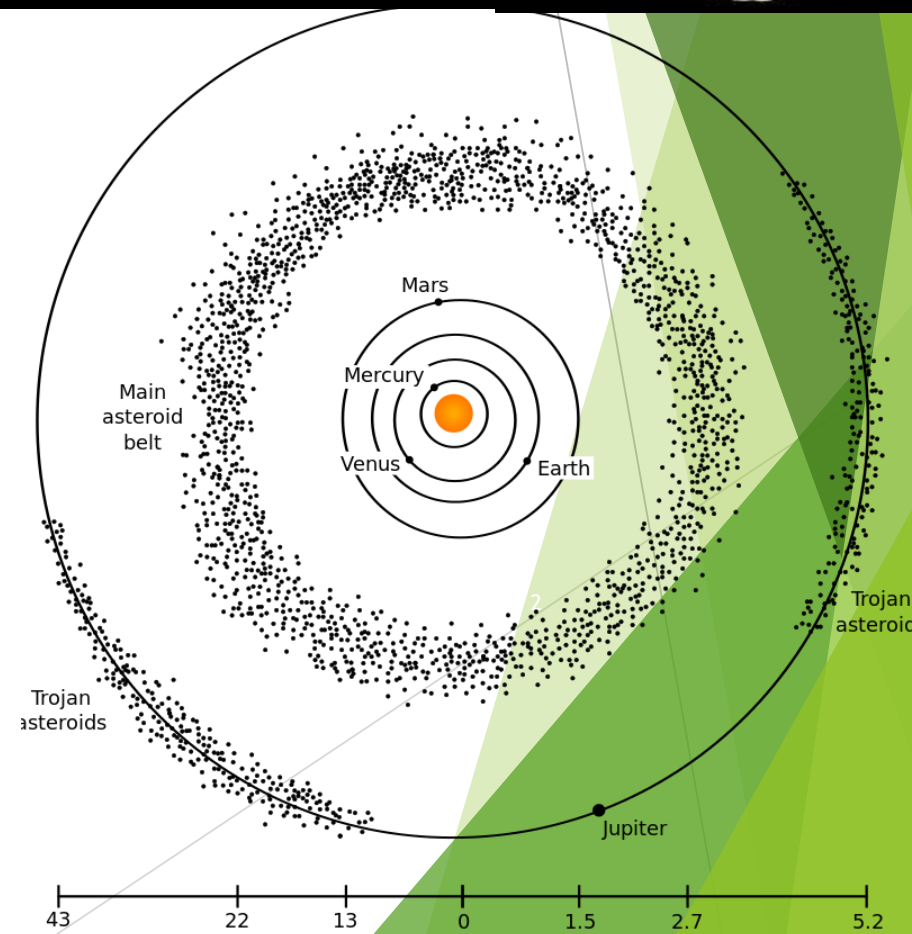
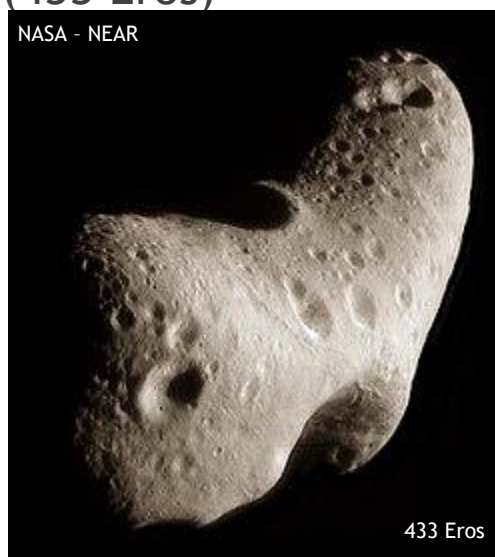
- ▶ 1 Ceres - největší těleso mezi Jupiterem a Marsem
 - ▶ Pluto - bývalá 9. planeta
 - ▶ Eris
 - ▶ a další „plutoidy“
-
- ▶ Nesplňují definici planety, která musí splňovat:
 1. Obíhat okolo Slunce
 2. Být v hydrostatické rovnováze
 3. Mít vyčištěné své okolí
 4. Nebýt satelitem



Planetky (asteroidy)

- ▶ Hlavně mezi Marsem a Jupiterem (hlavní pás)
- ▶ Celková M hlavního pásu jen 0,005 % Země
- ▶ Bez hydrostatické rovnováhy
- ▶ C (75 %), S (15 %) nebo M (10 %) typ složení
- ▶ Velké množství také tzv. NEA (Near Earth Asteroids - potenciálně nebezpečné pro Zemi (433 Eros)

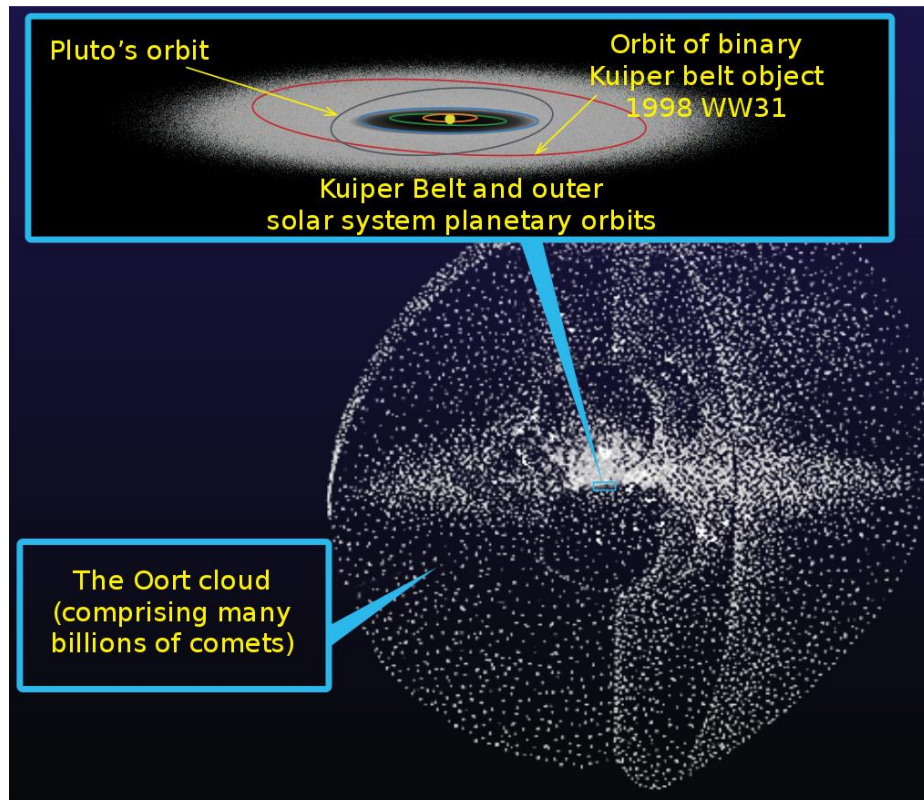
- ▶ 4 Vesta
- ▶ 433 Eros
- ▶ 243 Ida + Dactyl



Kupierův pás a Oortův oblak

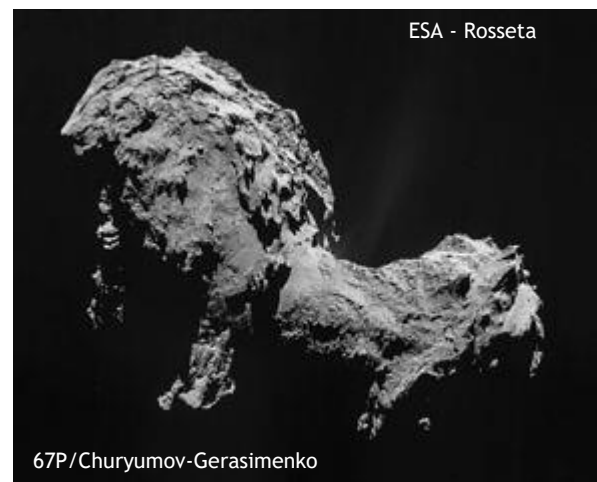
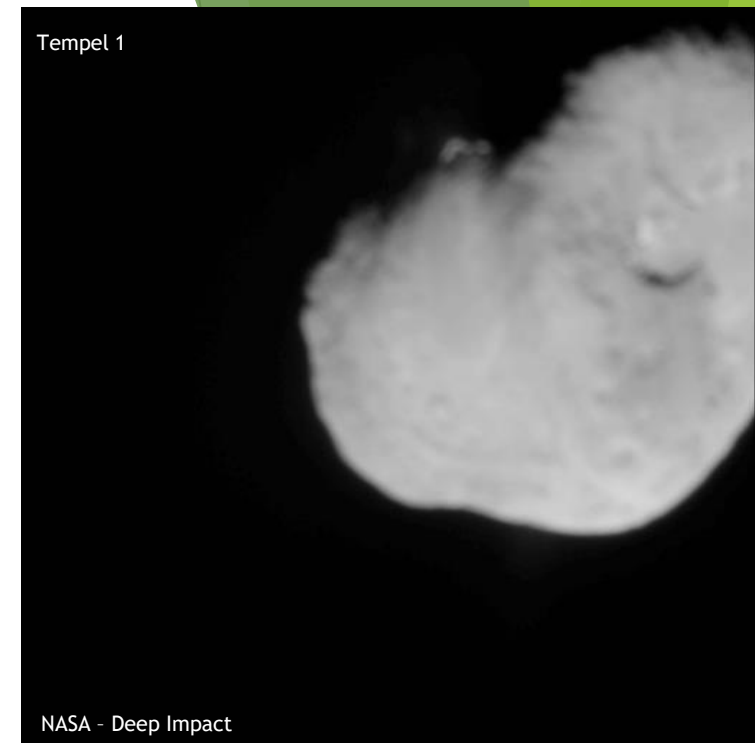
- ▶ Kupier - od dráhy Neptunu po cca 50 AU
- ▶ Oort - 2000 po 200 000 AU - rodiště komet
- ▶ Malá tělesa primárně z volatilních sloučenin

- ▶ (486958) 2014 MU₆₉ - Ultima Thule



Komety

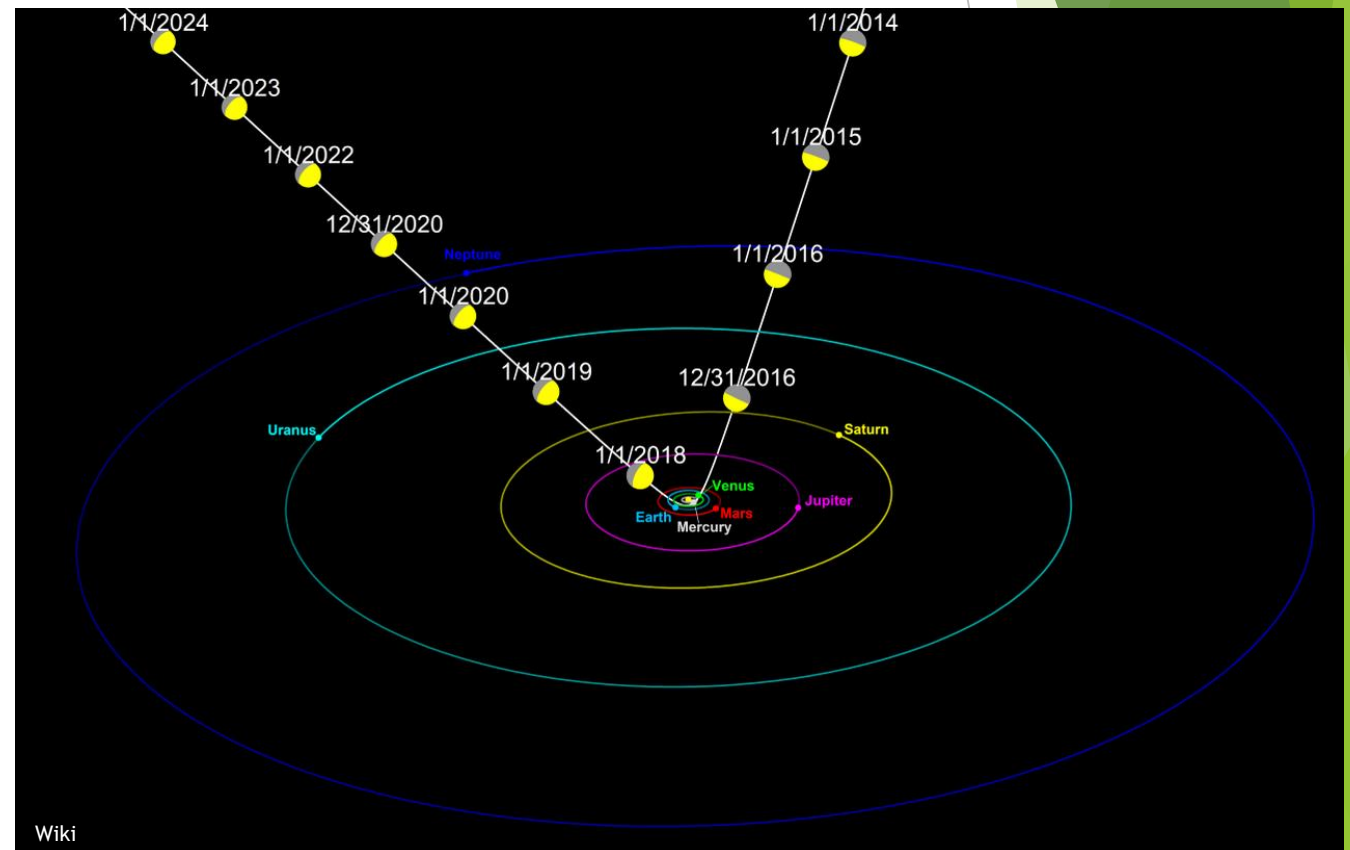
- ▶ Velmi malé (desítky km max) - bramboroidy
 - ▶ Extrémně výstřední dráhy (dlouhá elipsa = dlouhá oběžná doba)
 - ▶ Složení z volatilních sloučenin - kometární koma a ohon blízko Slunce
 - ▶ Původ v Kupierově pásu a Oortově oblaku
-
- ▶ Halleyova kometa
 - ▶ Tempel 1
 - ▶ 67P/Churyumov-Gerasimenko
 - ▶ 81P/Wild



Interstelární objekty

- ▶ Zatím máme pouze 2 potvrzené případy
- ▶ Těleso, které má prokazatelně původ mimo sluneční soustavu - neobíhá Slunce

- ▶ 1I/2017 U1 Oumuamua
- ▶ C/2019 Q4 (Borisov)

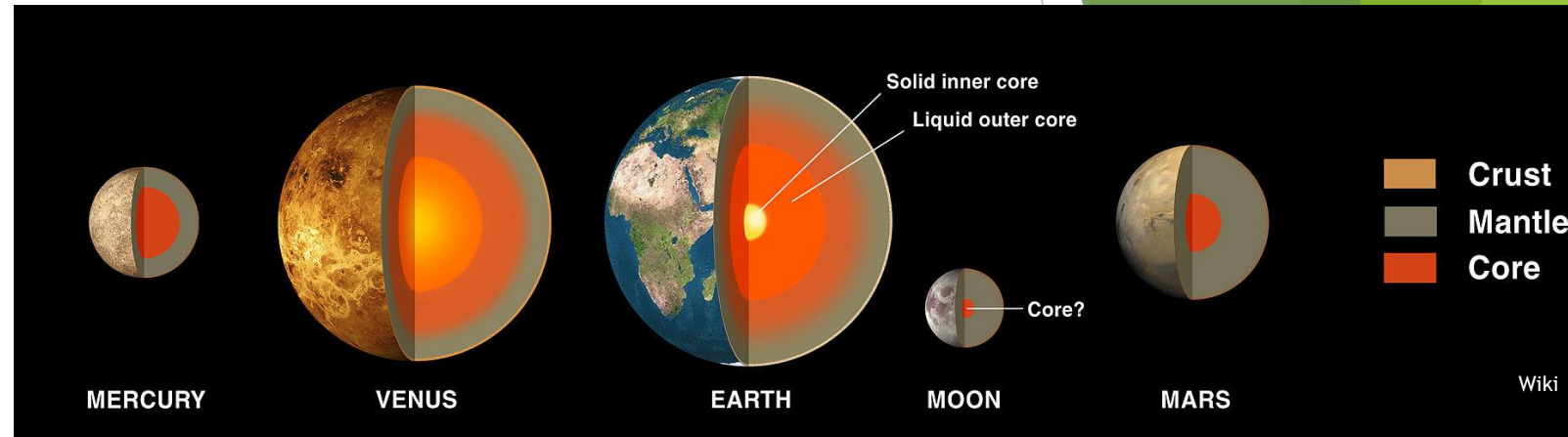


Vnitřní stavba planet

► Terestrické planety

► Jádro - plášť - kůra

Hustotní diferenciace!



► Merkur - obrovské kovové jádro

► Venuše - chybí magnetické pole = není přítomá rotace pevného jádra vůči tekutému jako u Země

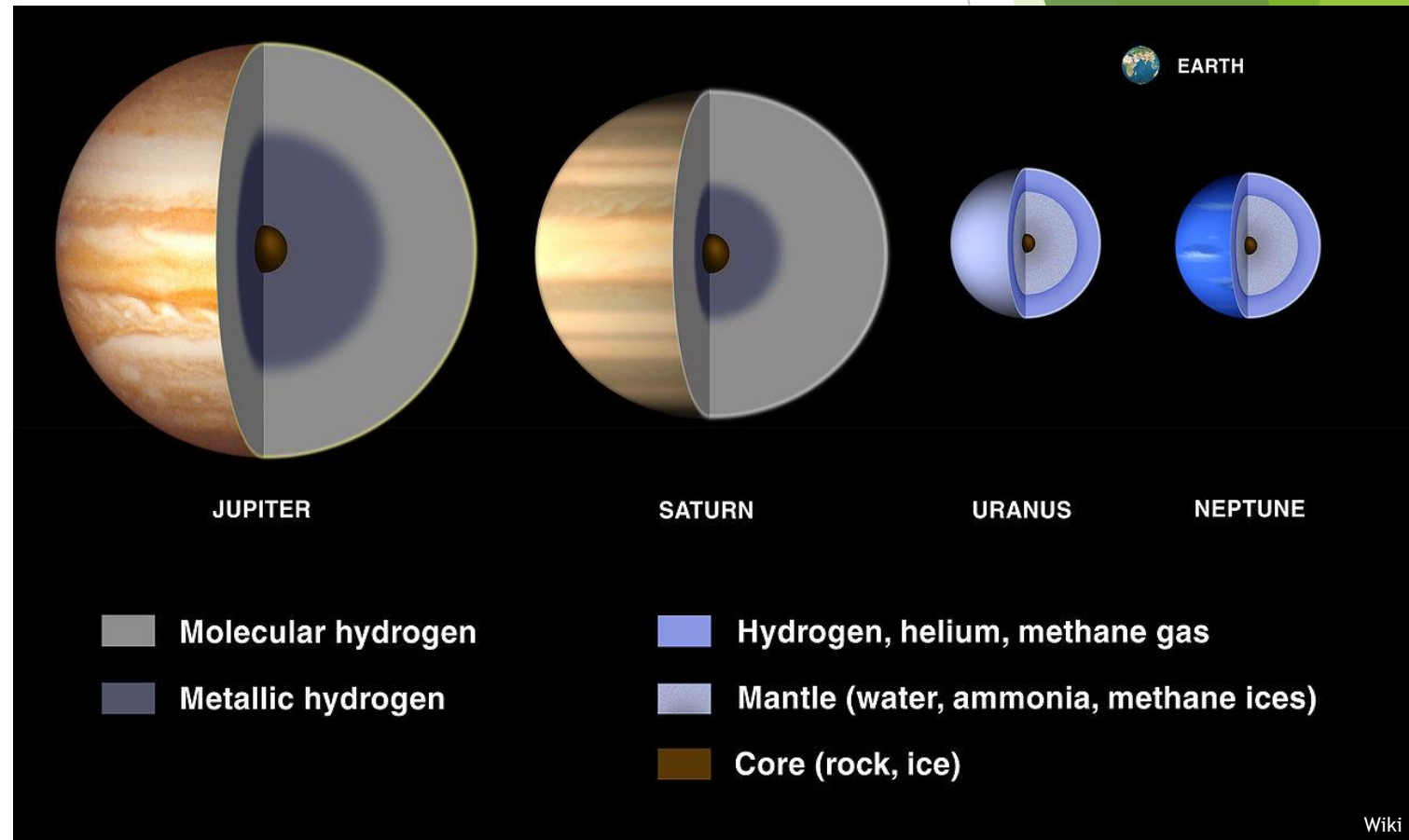
► Země - víc v přednášce Martina H. později - přítomnost magnetického pole (!!!)

► Mars - moc malý = už chladný - nyní už omezená vulkanická aktivita

► Měsíc - mocná kůra (4-6x mocnější než u Země)

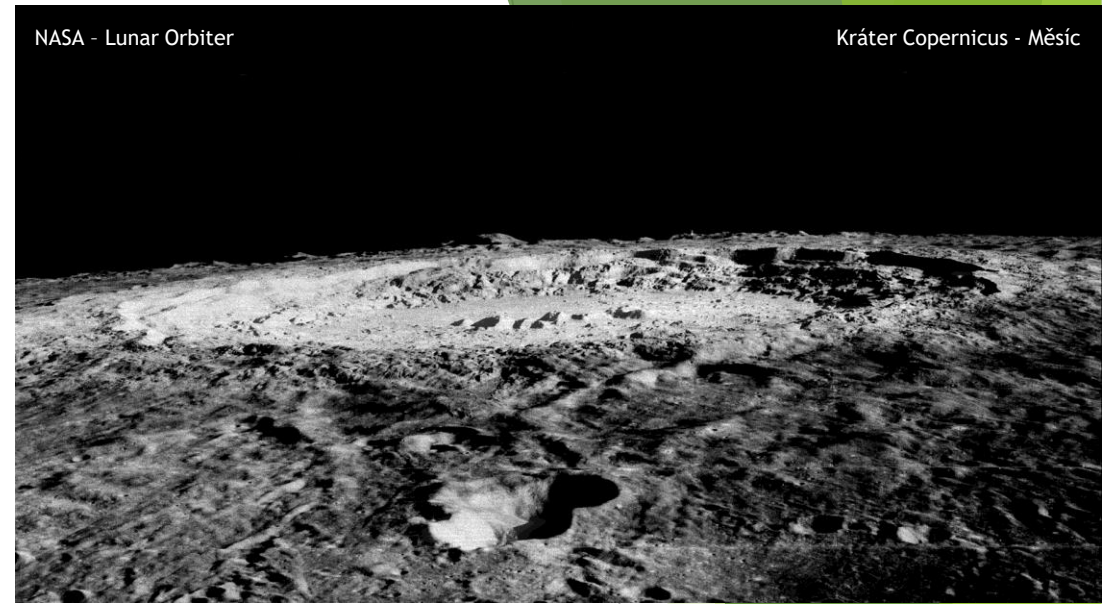
Vnitřní stavba planet

- ▶ Plynní obři
- ▶ Plynný vodík - kovový vodík - malé jádro
- ▶ Vnitřní stavba - stále moc nevíme!
- ▶ Spekulace o diamantovém jádru
- ▶ Nakouknutí do atmosfér Jupiteru a Saturnu pomocí atmosférických sond

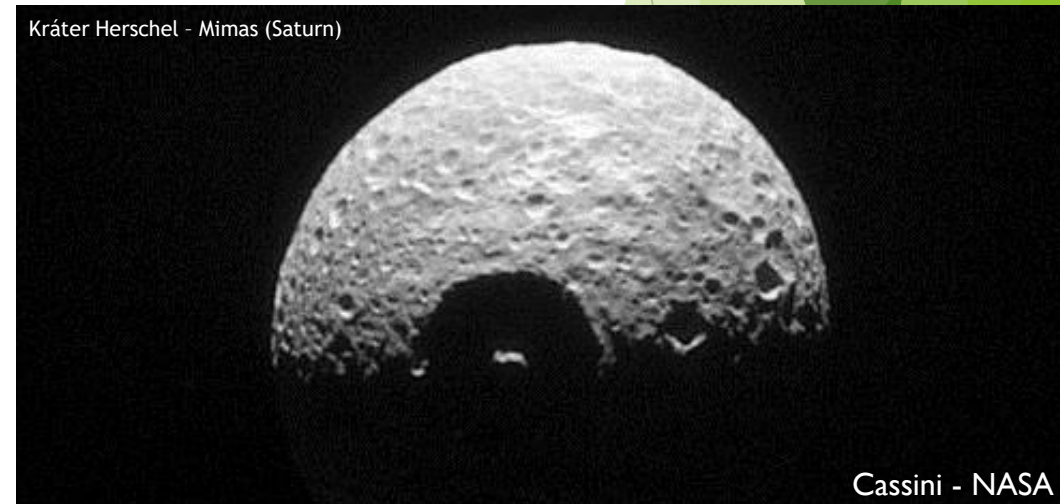


Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí



Kráter Herschel - Mimas (Saturn)

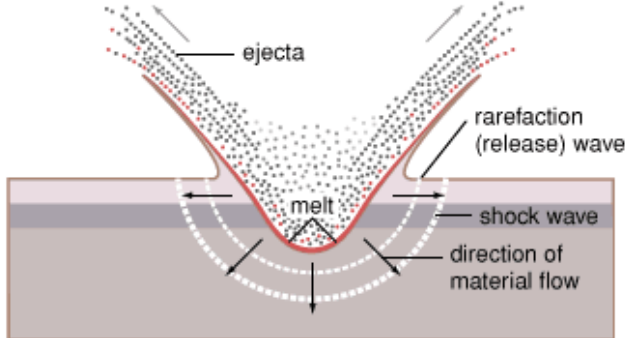


Primitivní planetární povrchy

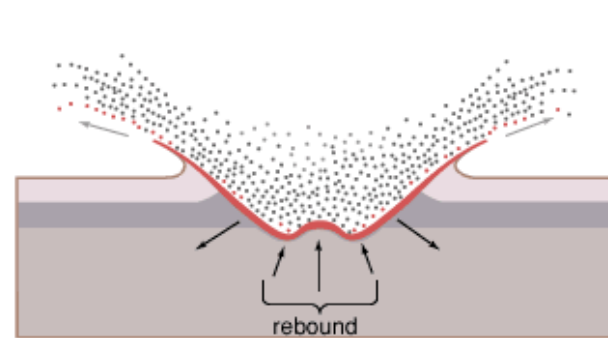
- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Jak vznikají?

Formation of a complex impact crater

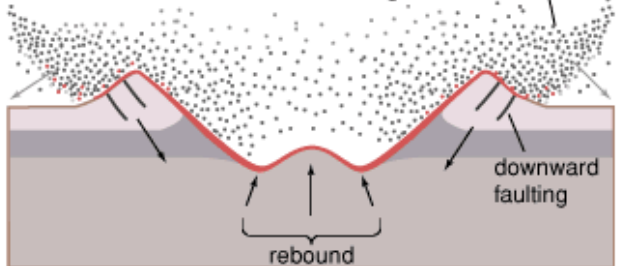
A. Excavation stage (the sole stage for a simple crater).



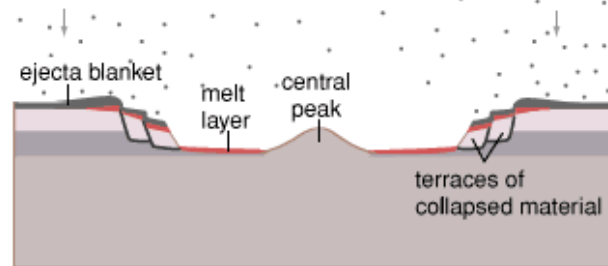
B. End of excavation stage; start of modification stage.



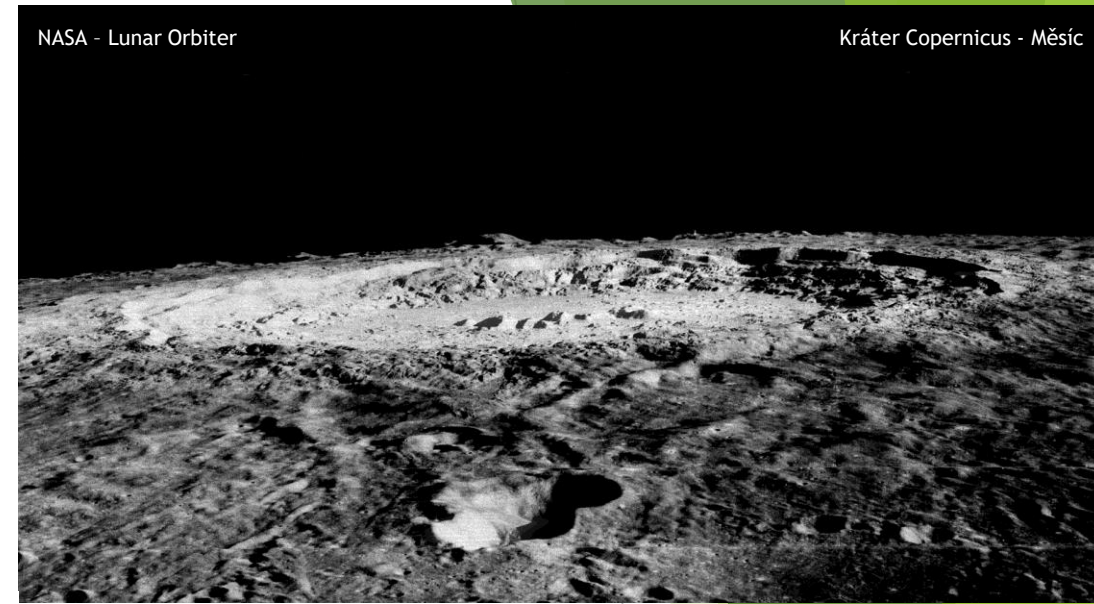
C. Continuation of modification stage.



D. Final structure.



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.



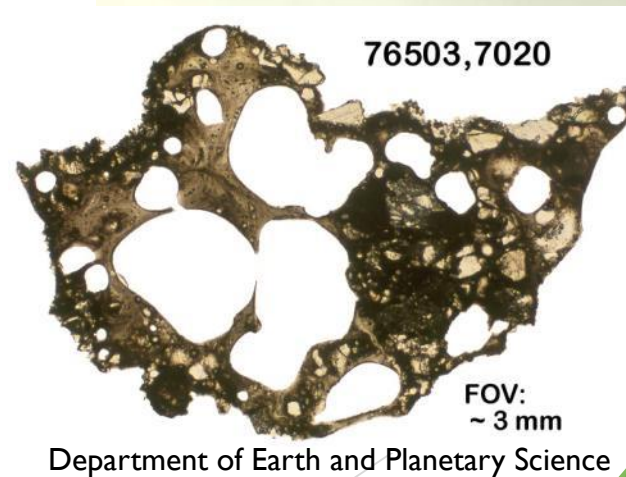
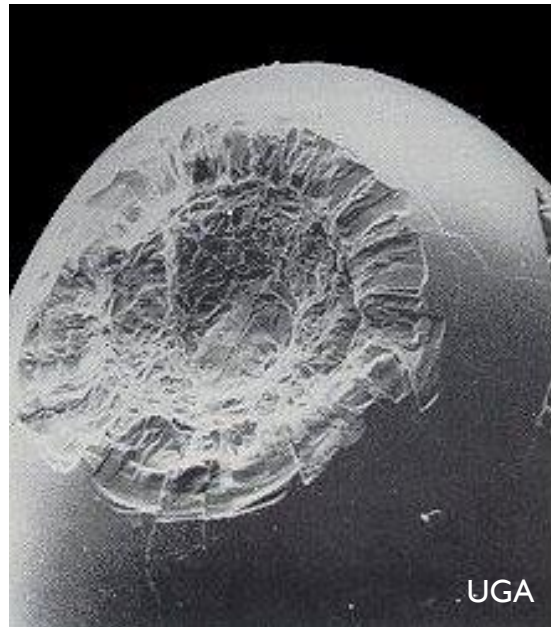
Kráter Herschel - Mimas (Saturn)



Cassini - NASA

Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
- ▶ Impaktní mikrokrátery



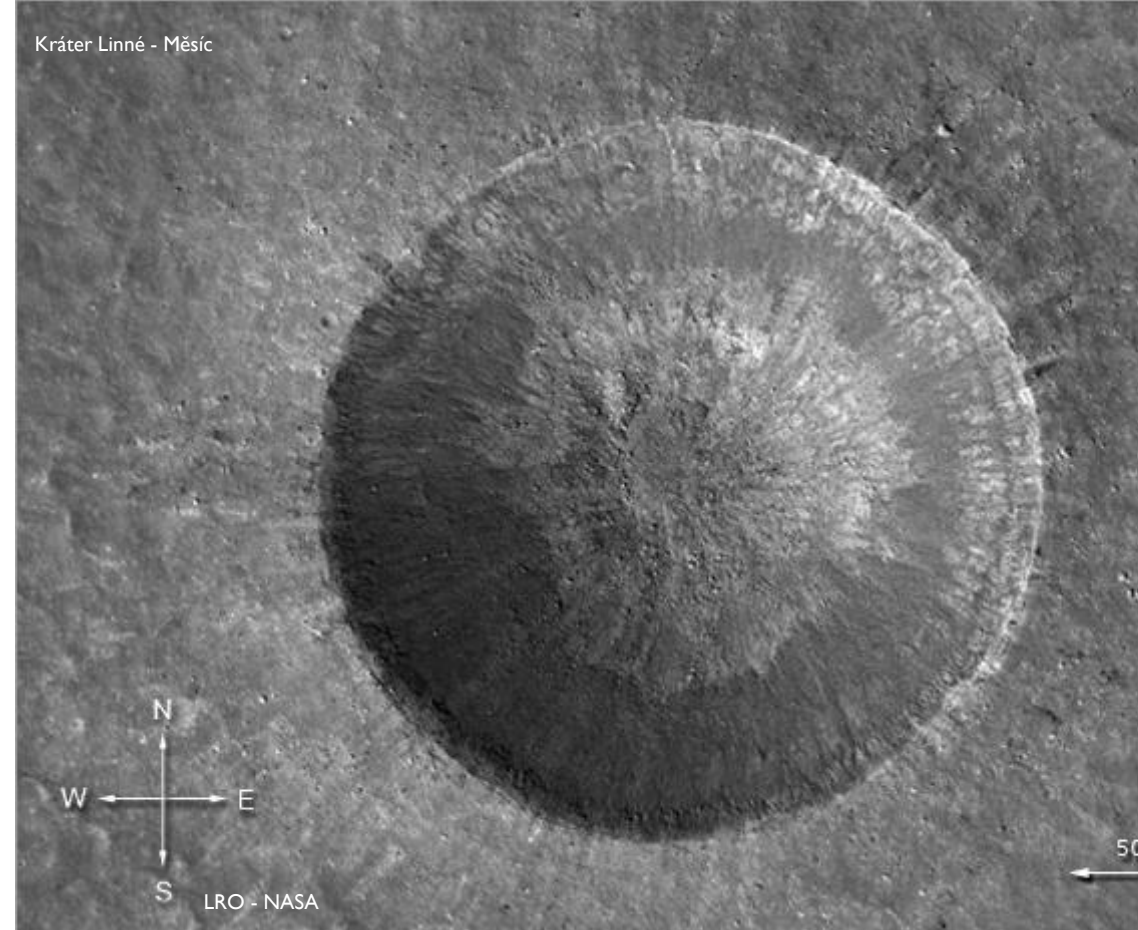
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
- ▶ **Impaktní mikrokrátery** - impaktní zvětrávání a „rozorávání“



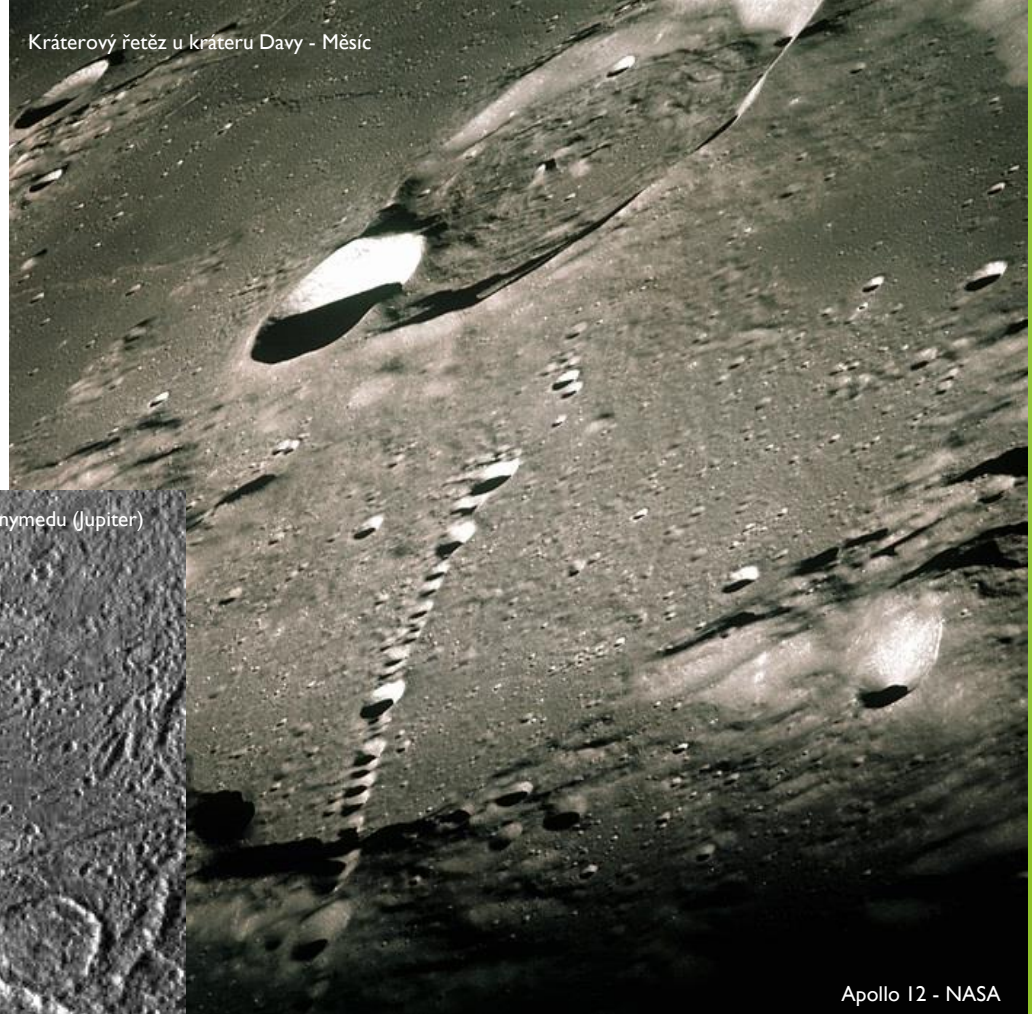
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ **Jednoduché impaktní krátery**



Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ **Kráterové řetezy**



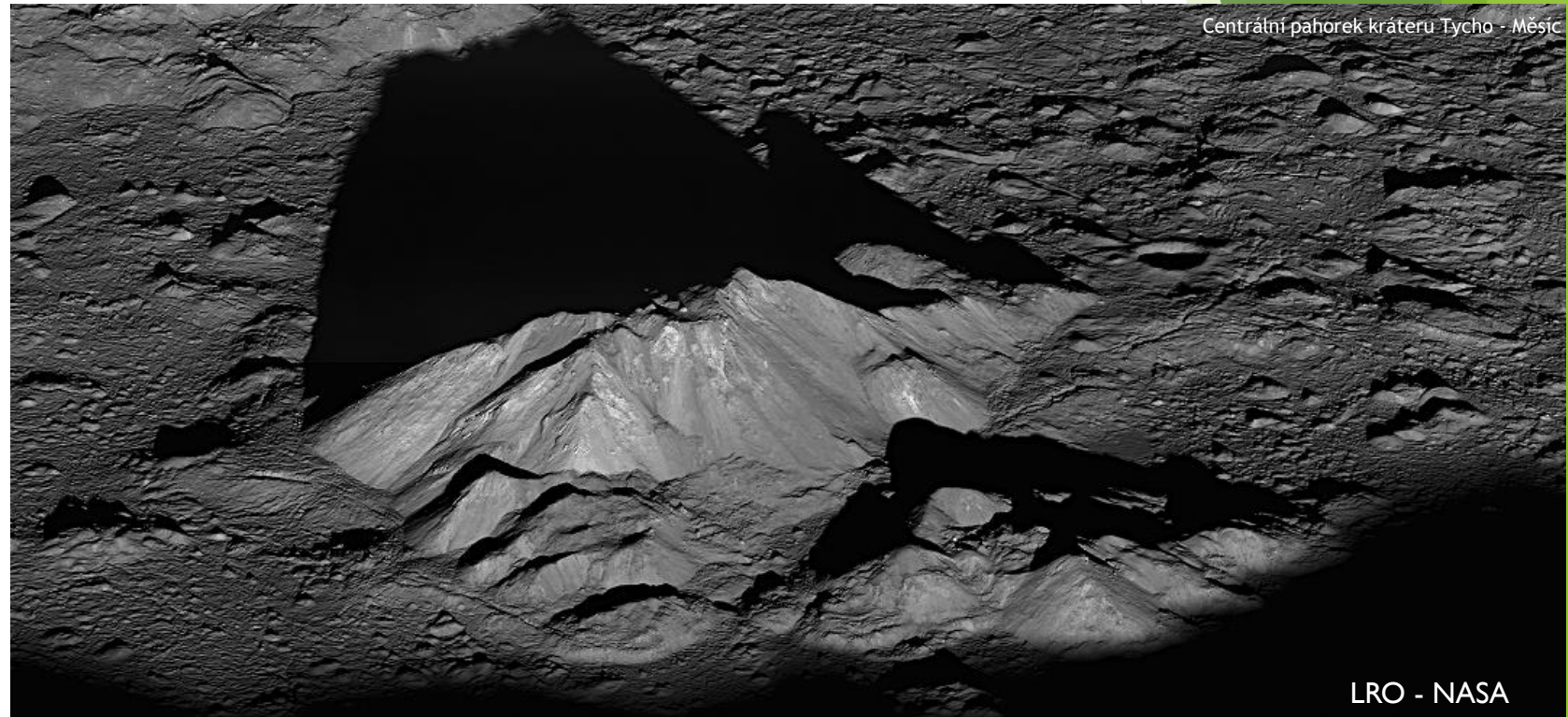
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery



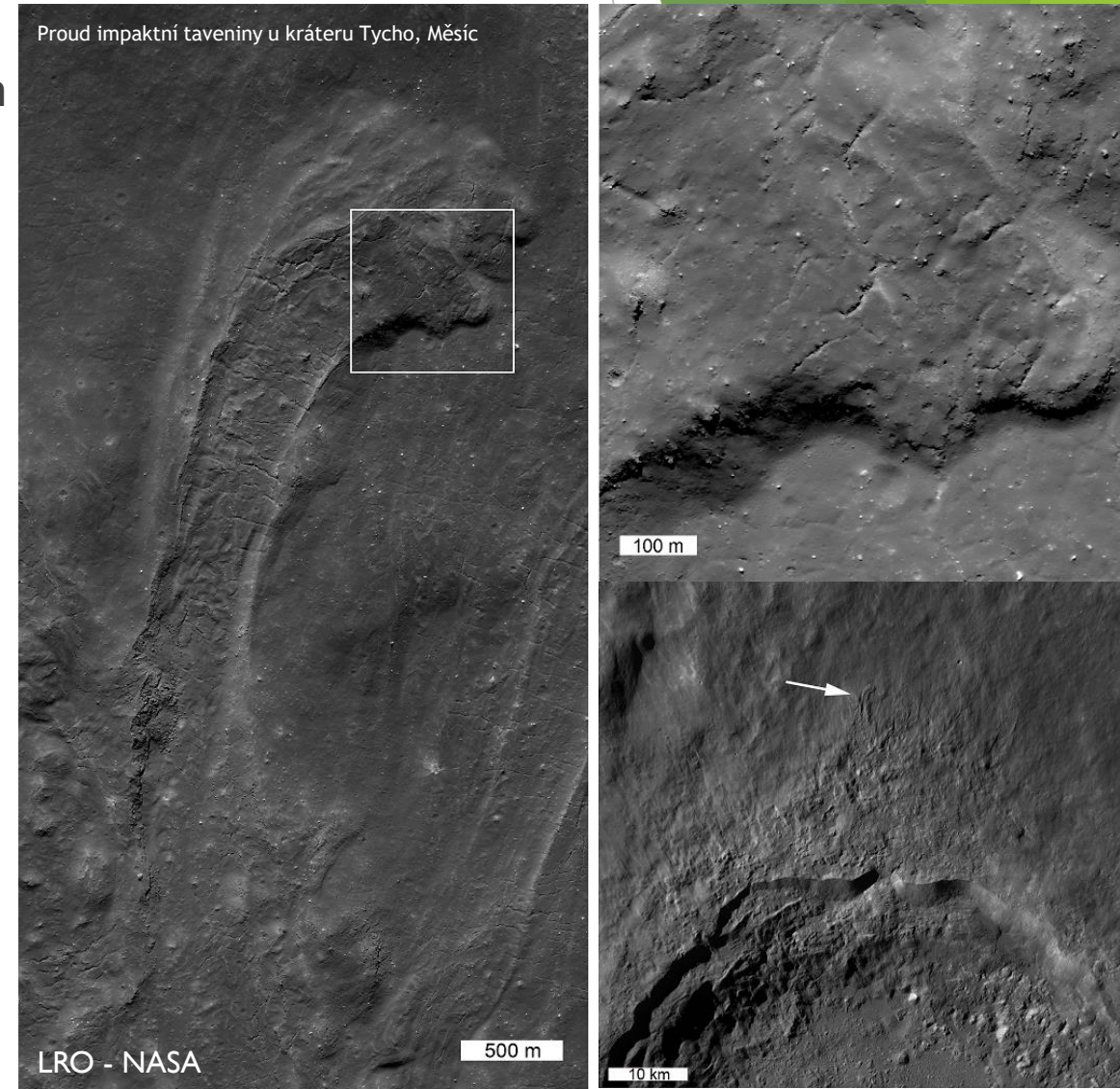
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery



Primitivní planetární povrchy

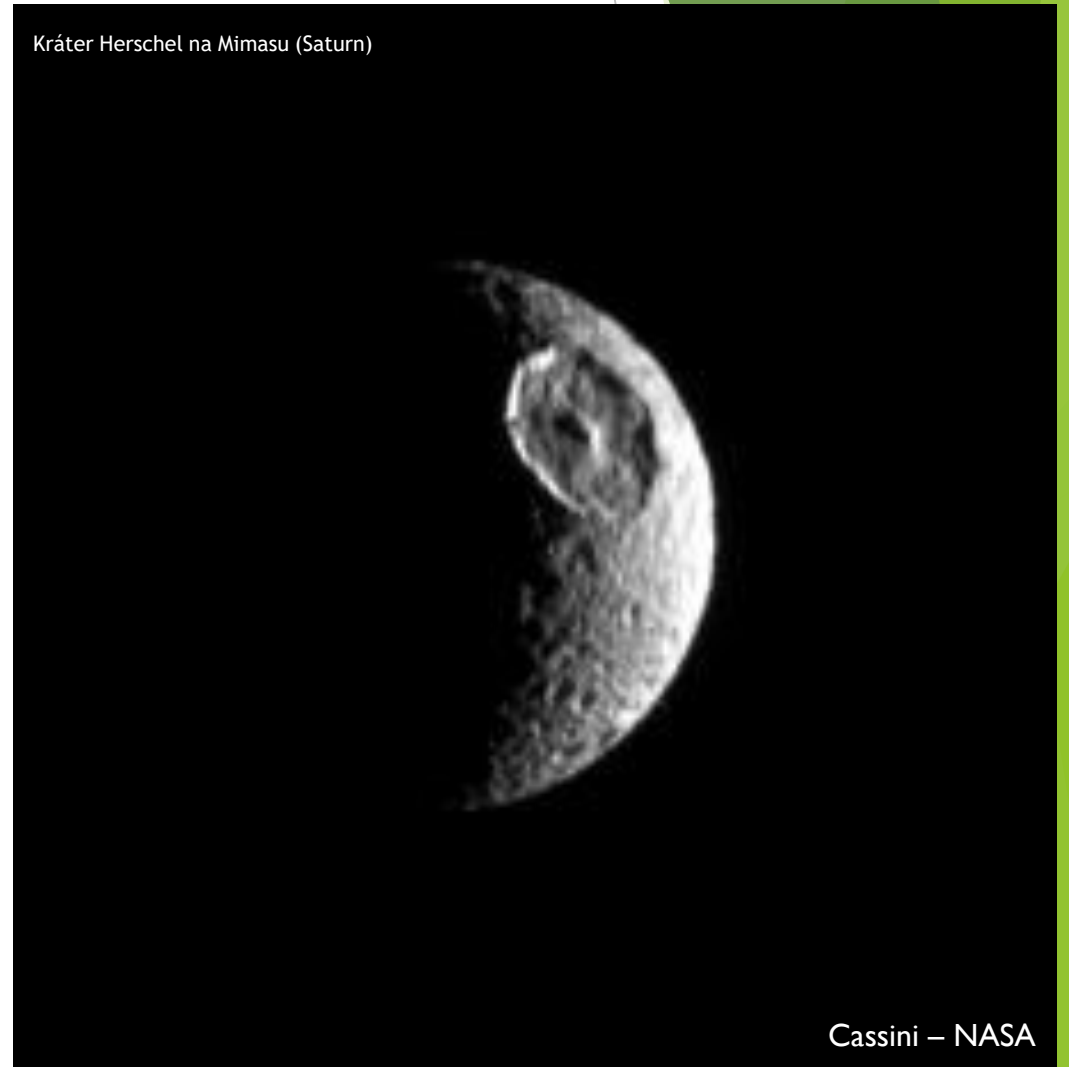
- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ **Členění:**
- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ Jednoduché impaktní krátery
- ▶ Kráterové řetězy
- ▶ Komplexní impaktní krátery



Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery

Kráter Herschel na Mimasu (Saturn)



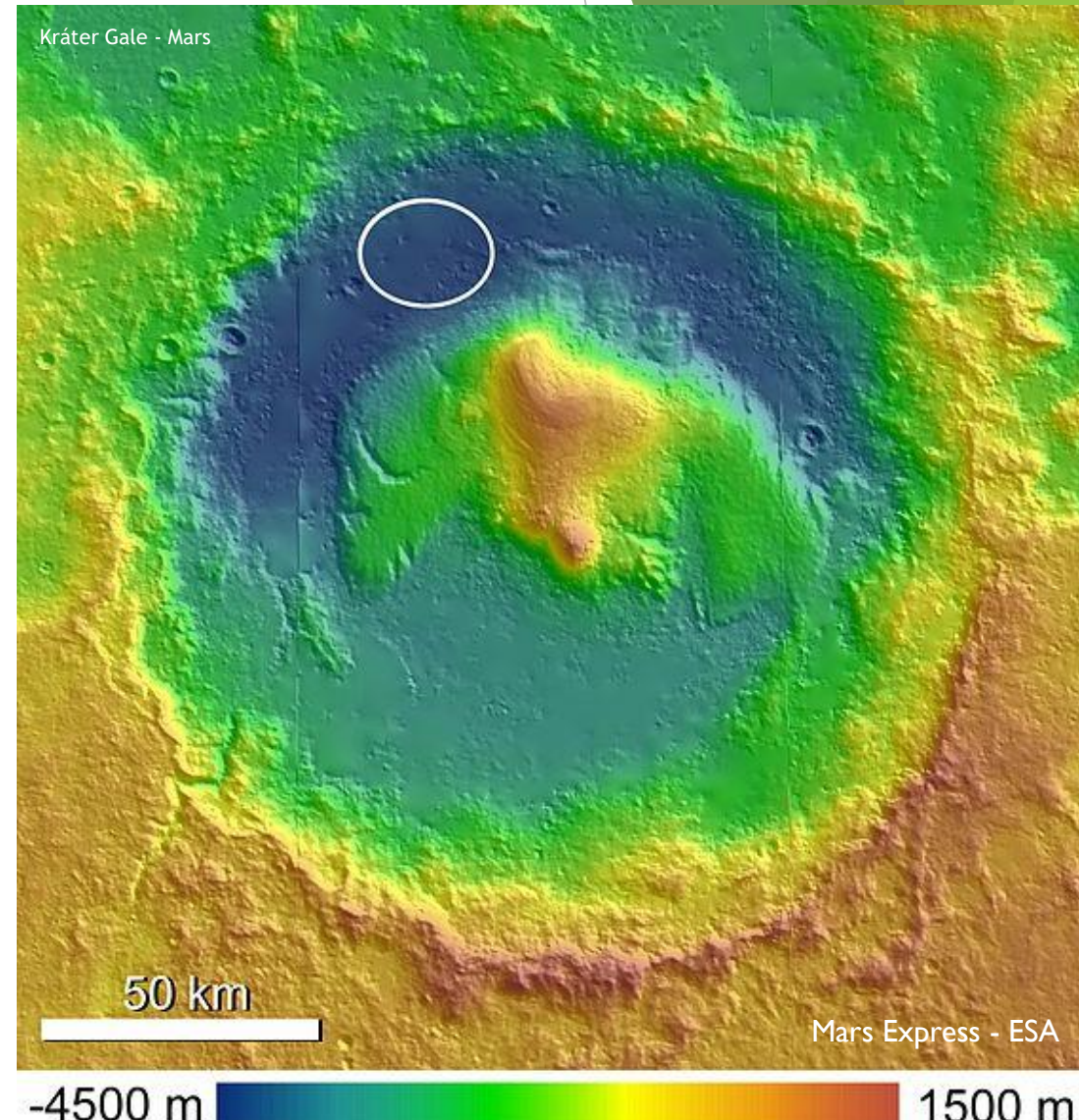
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ **Členění:**
- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ Jednoduché impaktní krátery
- ▶ Kráterové řetězy
- ▶ Komplexní impaktní krátery



Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ **Členění:**
- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ Jednoduché impaktní krátery
- ▶ Kráterové řetězy
- ▶ **Komplexní impaktní krátery**



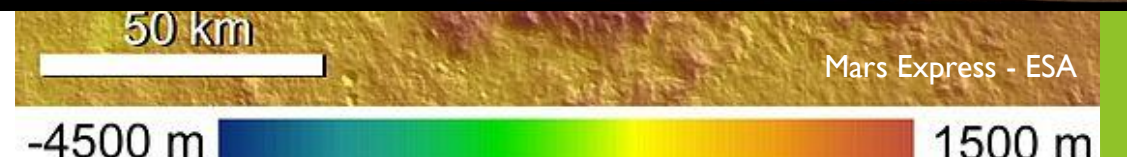
Primitivní planetární povrchy

Centrální pahorek kráteru Gale - Mars



Curiosity – NASA

uic - www.db-prods.net



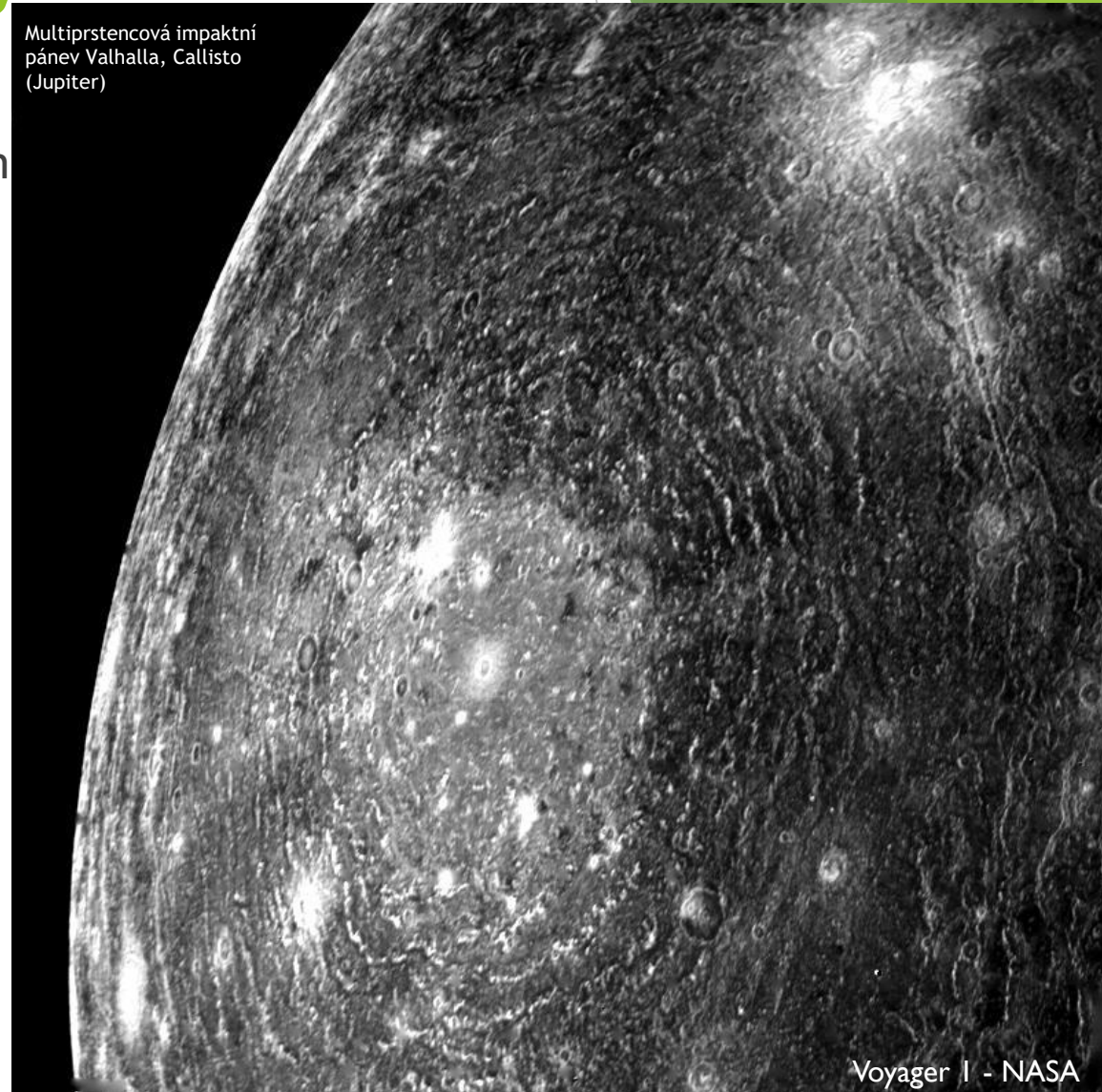
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery
 - ▶ **Multiprstencové impaktní pánve**



Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ **Členění:**
- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ Jednoduché impaktní krátery
- ▶ Kráterové řetězy
- ▶ Komplexní impaktní krátery
- ▶ **Multiprstencové impaktní pánve**

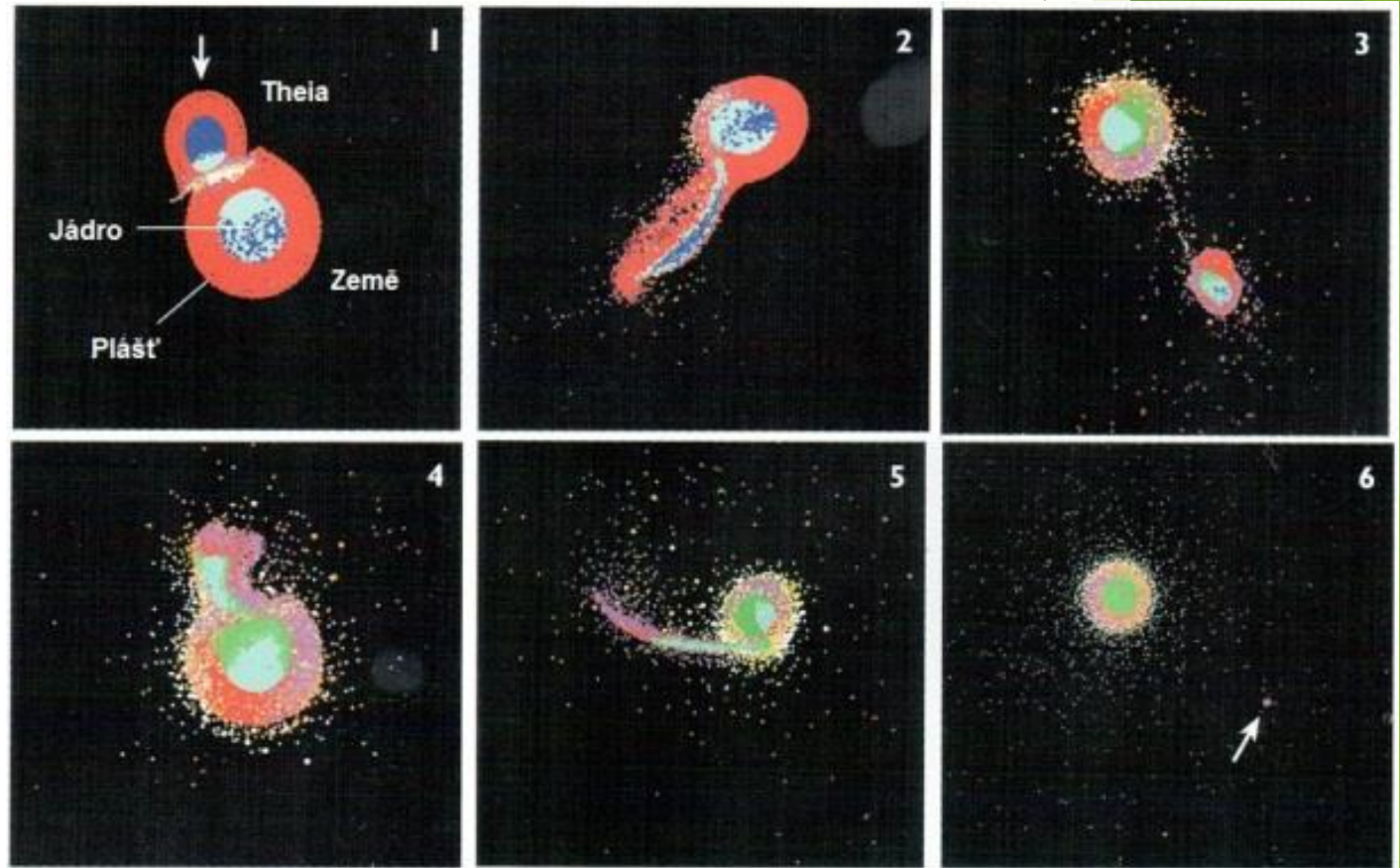


Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí

- ▶ **Členění:**

- ▶ Impaktní mikrokrátery
- ▶ Jednoduché impaktní krátery
- ▶ Kráterové řetězy
- ▶ Komplexní impaktní krátery
- ▶ Multiprstencové impaktní pánve
- ▶ **Megaimpakty - kolize**



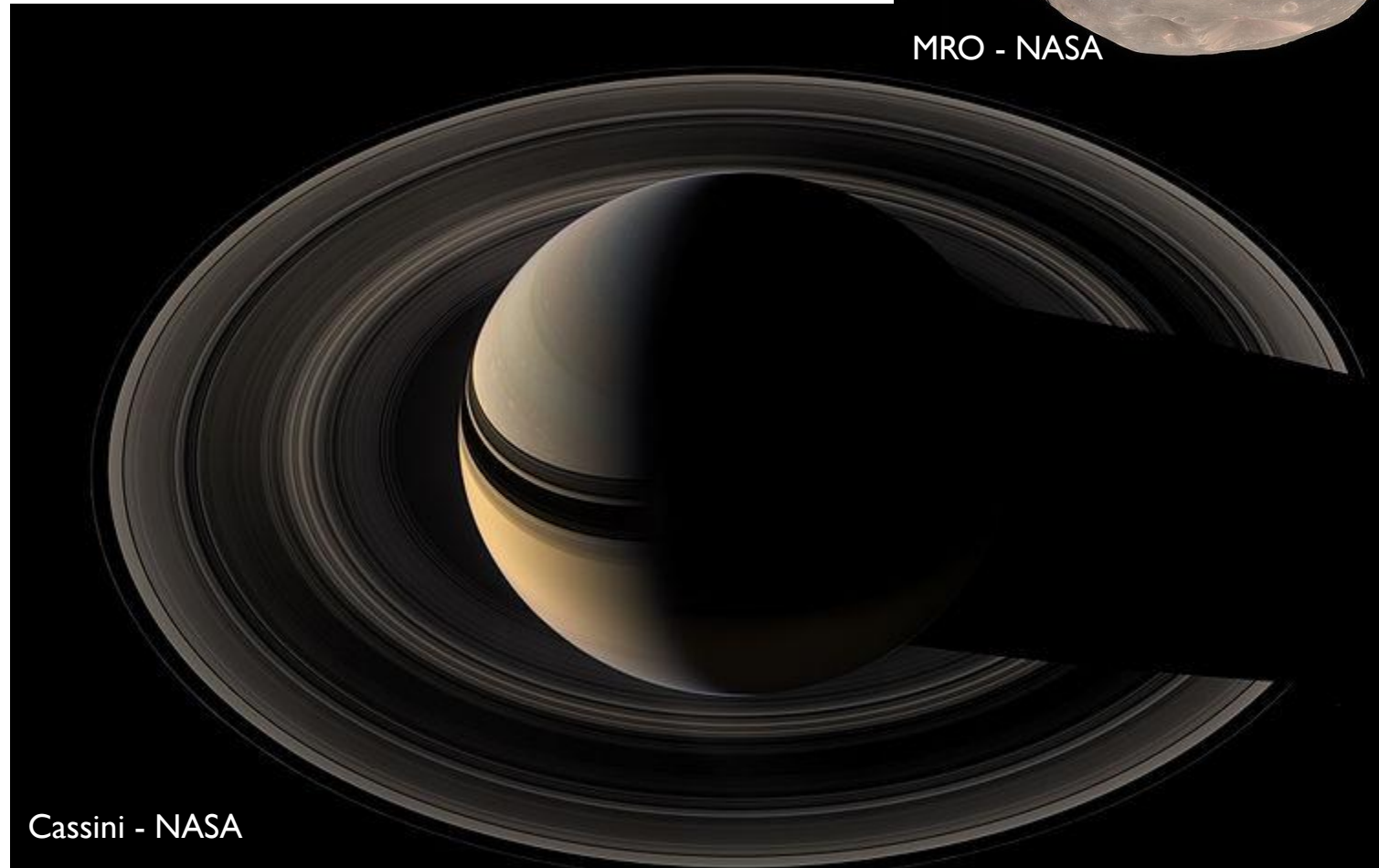
Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ Členění:
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery
 - ▶ Multiprstencové impaktní pánve
 - ▶ **Megaimpakty - kolize**

Phobos - Mars



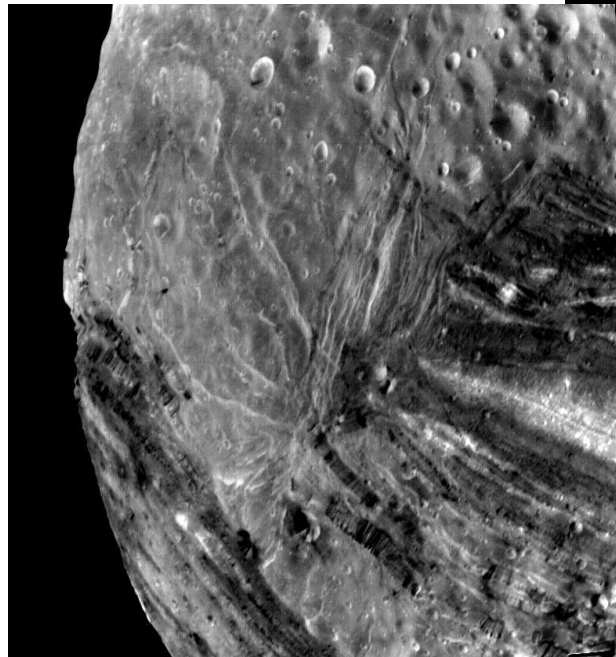
MRO - NASA



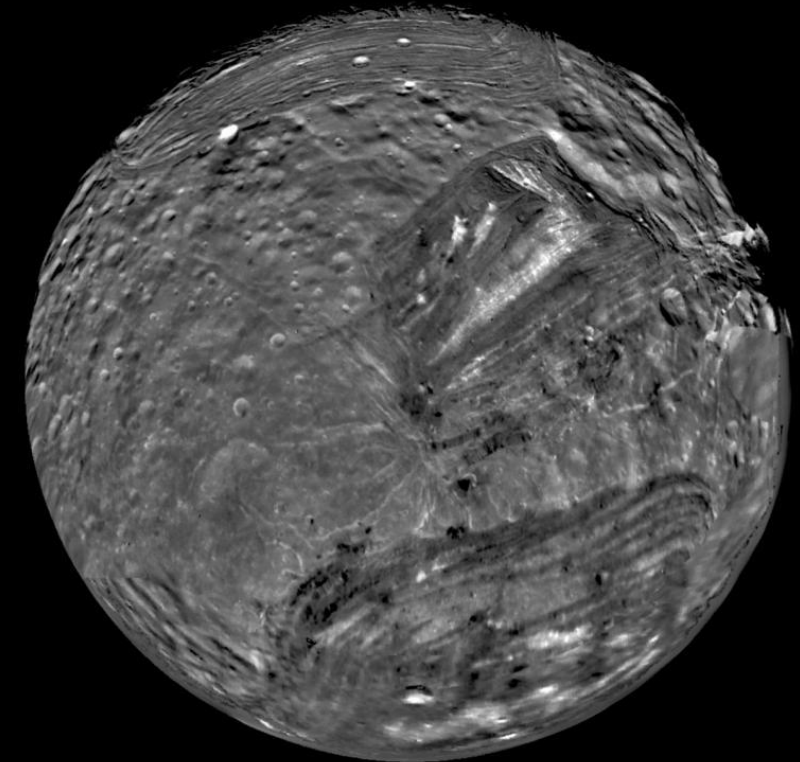
Cassini - NASA

Primitivní planetární povrchy

- ▶ Na všech tělesech sluneční soustavy s pevným povrchem jsou prominentní **impaktní krátery** všech velikostí
- ▶ **Členění:**
 - ▶ Impaktní mikrokrátery
 - ▶ Jednoduché impaktní krátery
 - ▶ Kráterové řetězy
 - ▶ Komplexní impaktní krátery
 - ▶ Multiprstencové impaktní pánve
 - ▶ **Megaimpakty - kolize**



Měsíc Miranda (Uran)

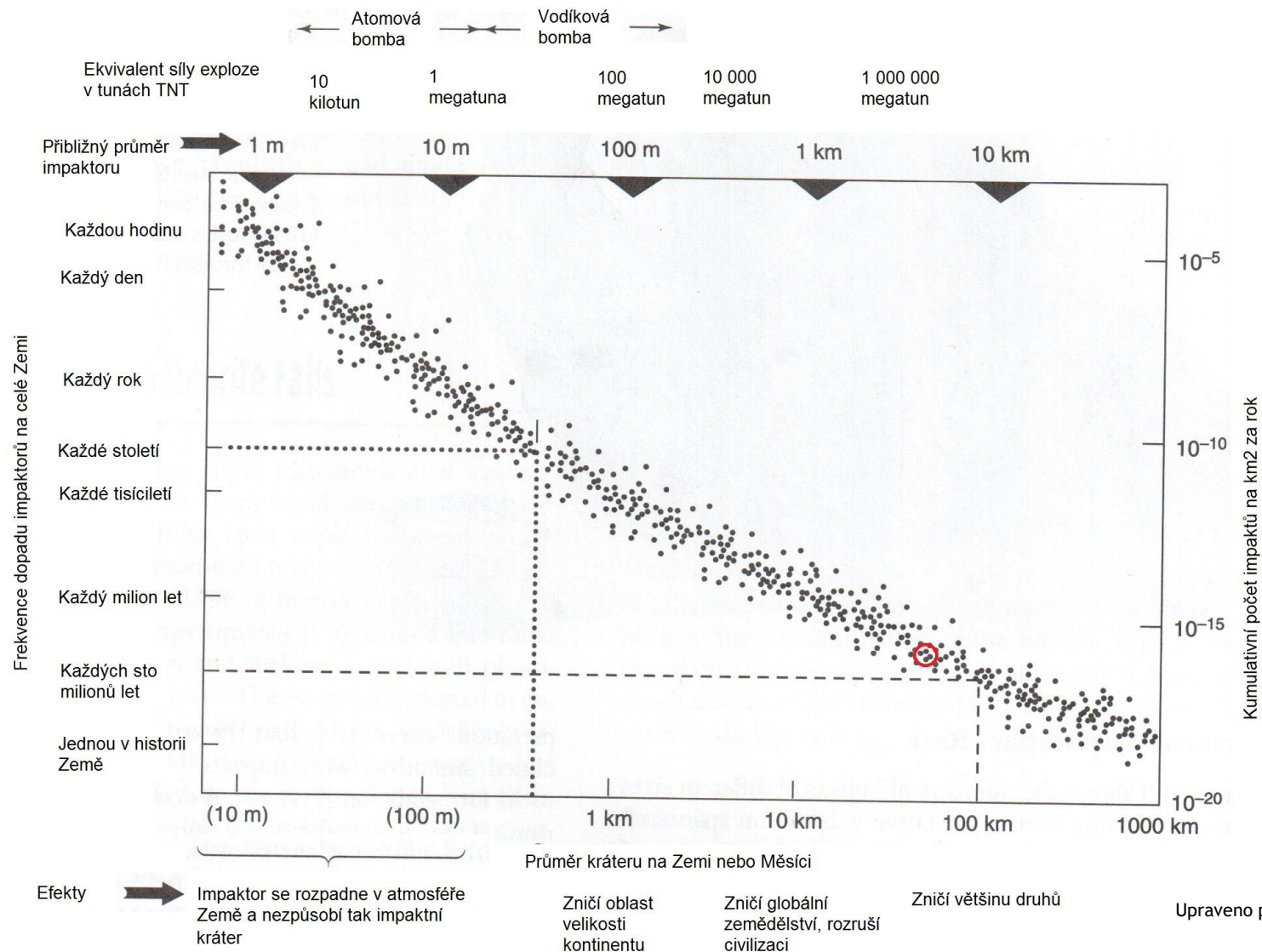


Voyager 2 - NASA

Jak často k impaktům dochází?

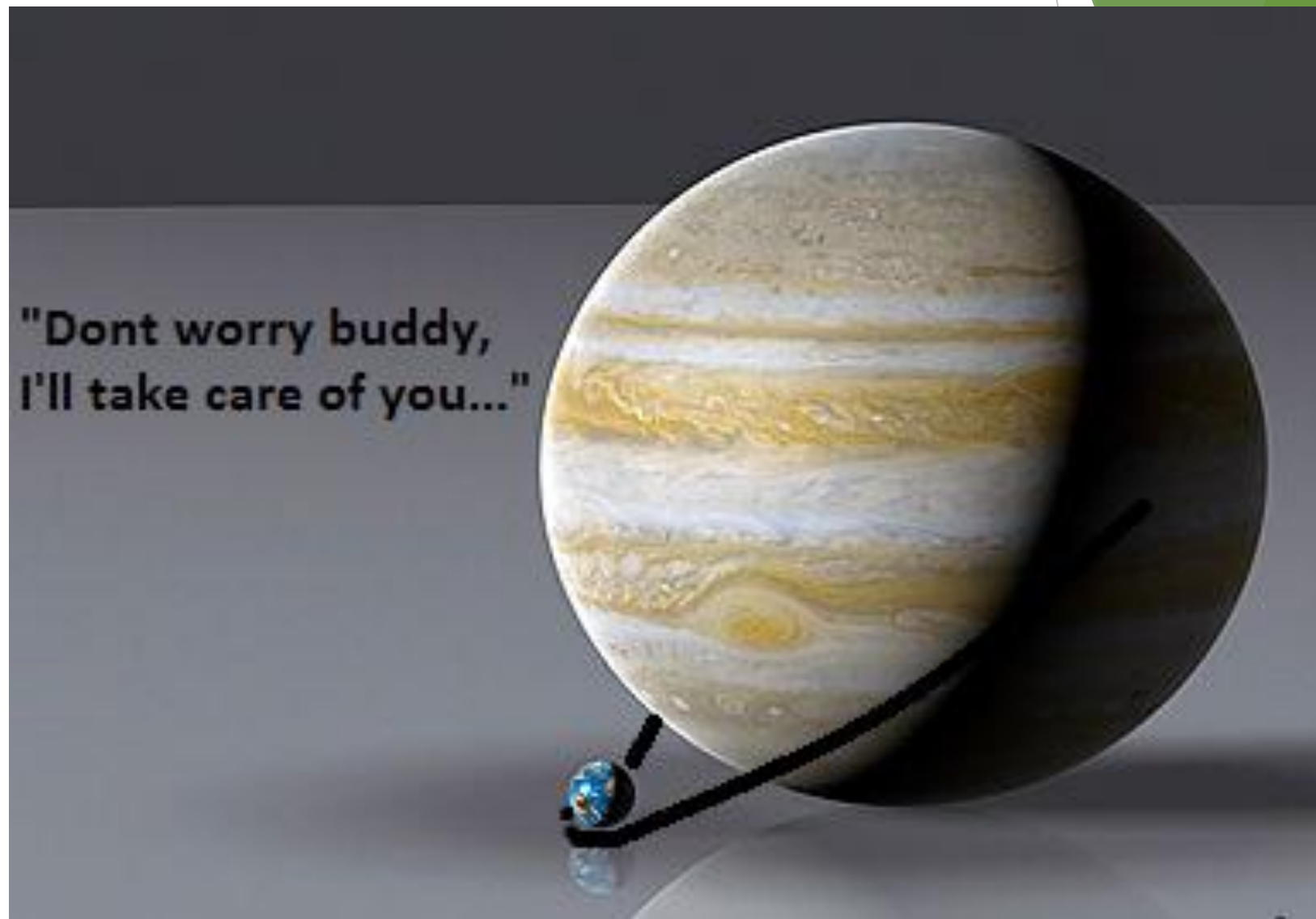


Jak často k impaktům dochází?

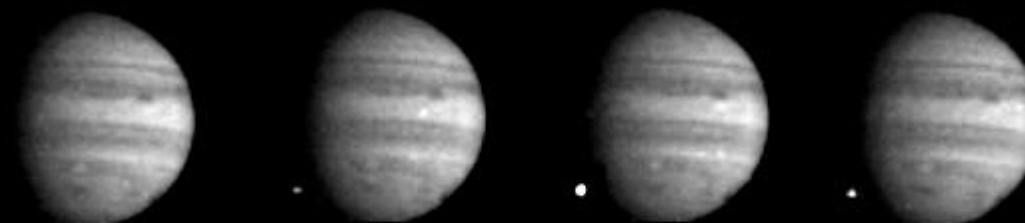
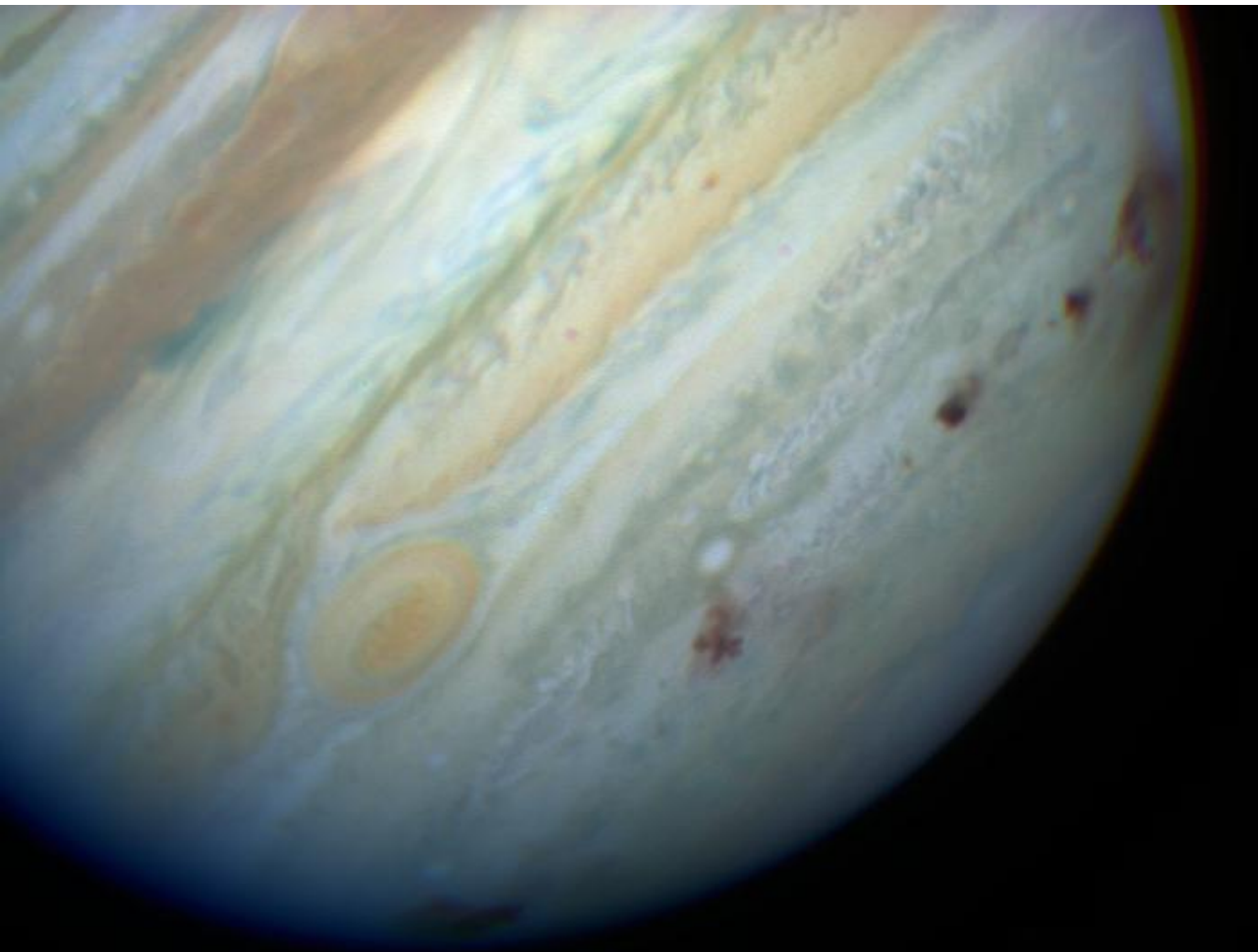


Upraveno podle Hartmann (2004): Moons & Planets

Jak často k impaktům dochází?



Jak často k impaktům dochází?



Využití impaktů v planetologii

- ▶ Relativní i absolutní datování povrchů a tvarů
- ▶ Možnost získání vzorků „zadarmo“



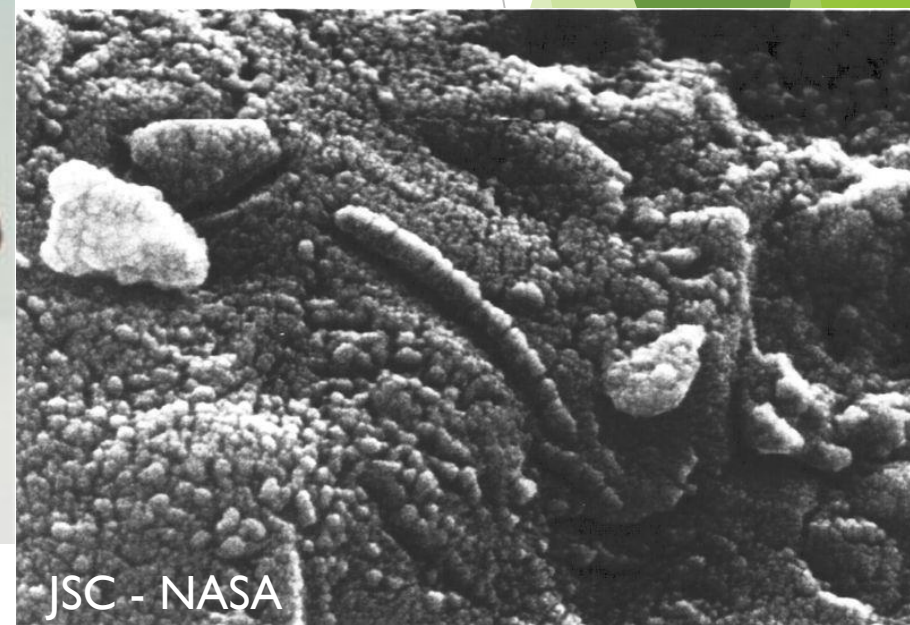
Meteorite · Fragment of Vesta

Lab Photograph · Russel Kempton, New England Meteoritical Services

PRC95-20B · ST Sci OPO · April 19, 1995 · B. Zellner (GA Southern Univ.), NASA

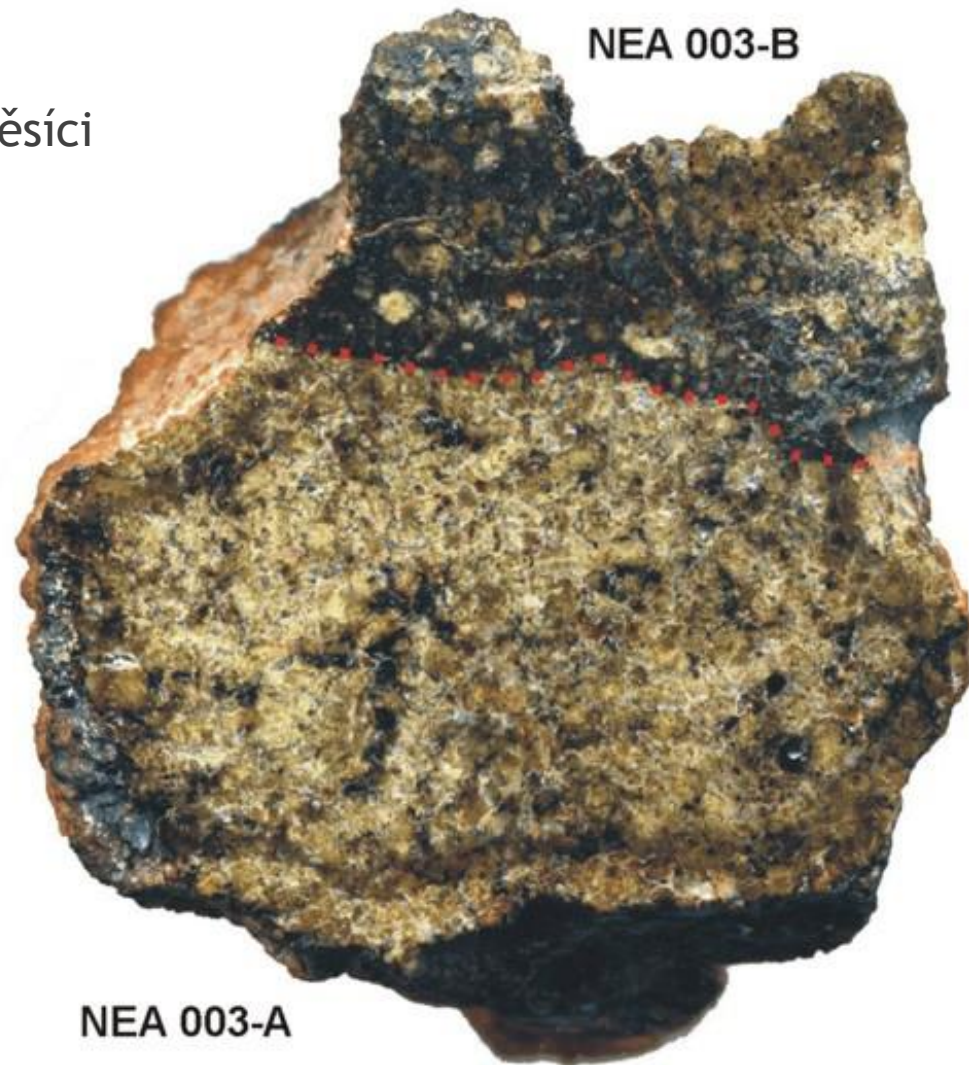
Vzorky zadarmo - ALH 84001 (Mars)

- Spekulace o mimozemských mikrofosíliích mikrobů z Marsu

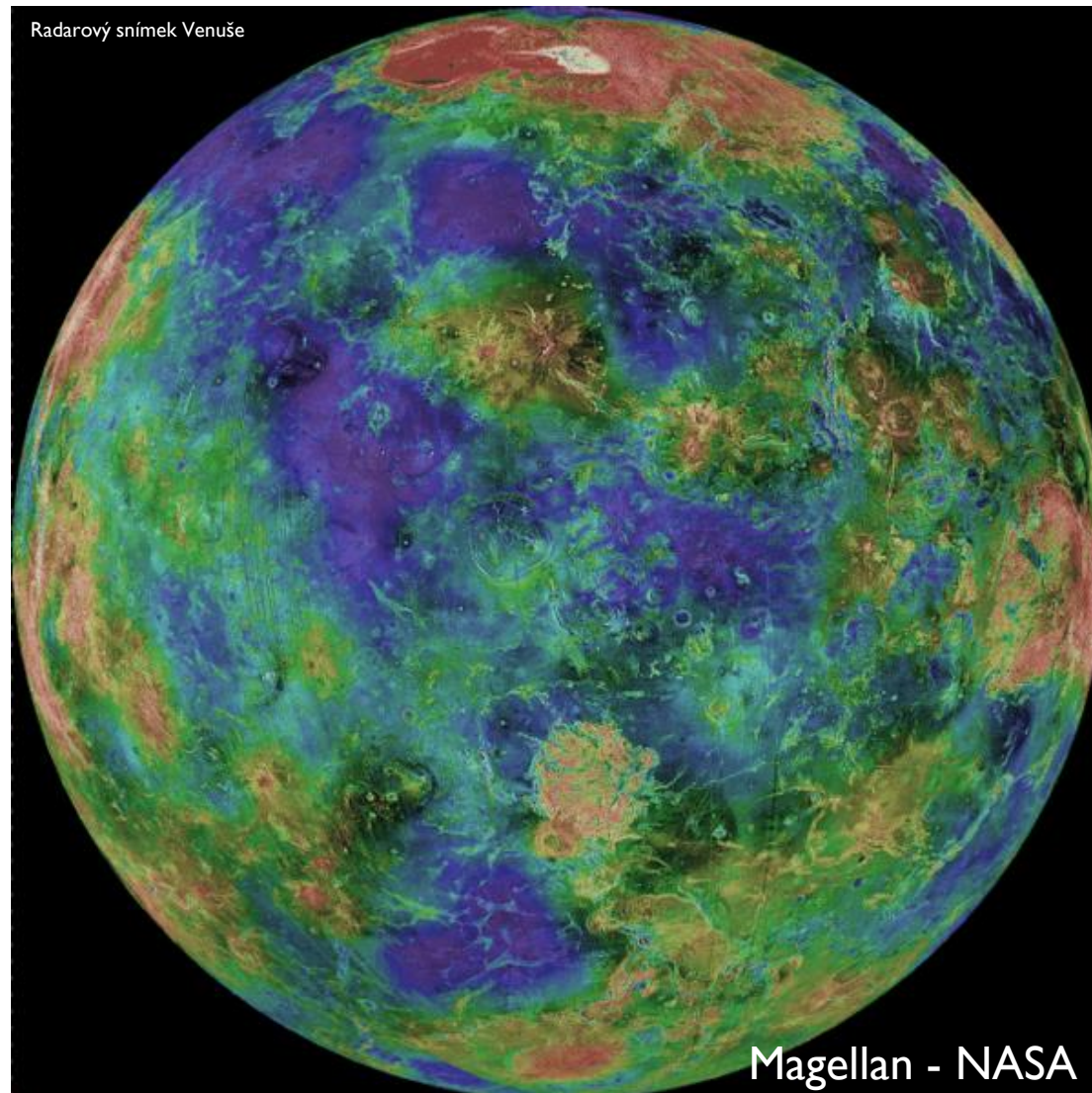


Vzorky zadarmo - NEA 003 (Měsíc)

- Potvrzení existence relativně mladého vulkanismu na Měsíci

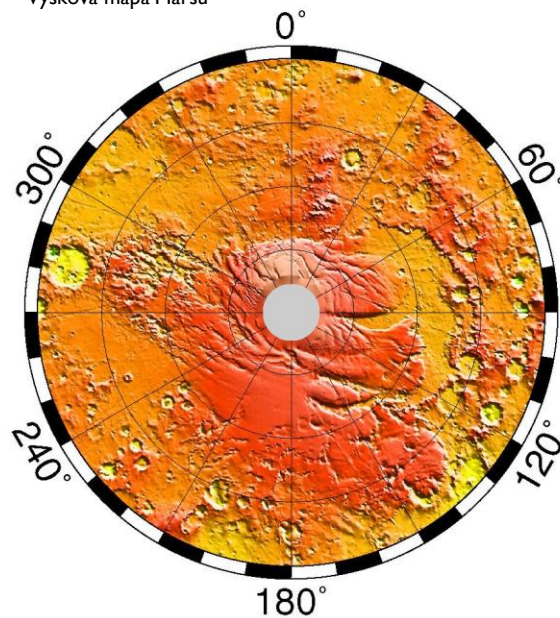


Sledování hustoty impaktů

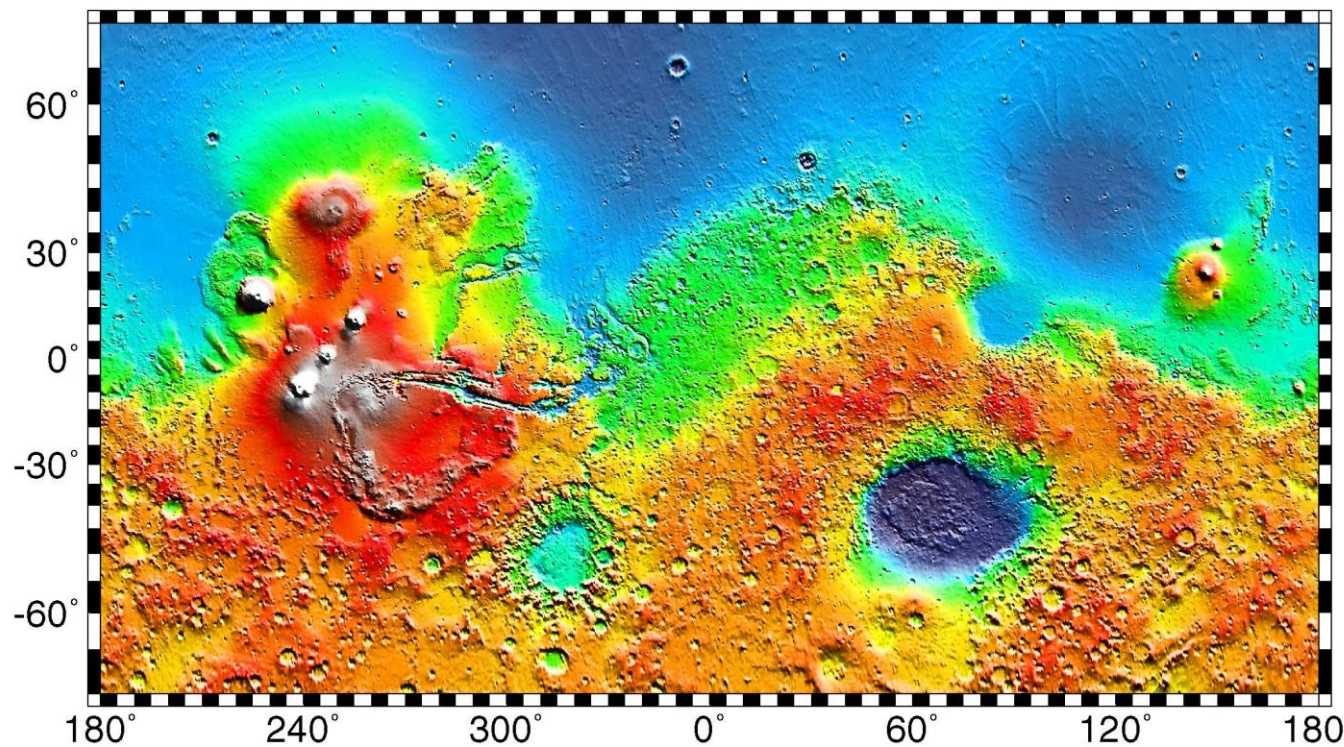
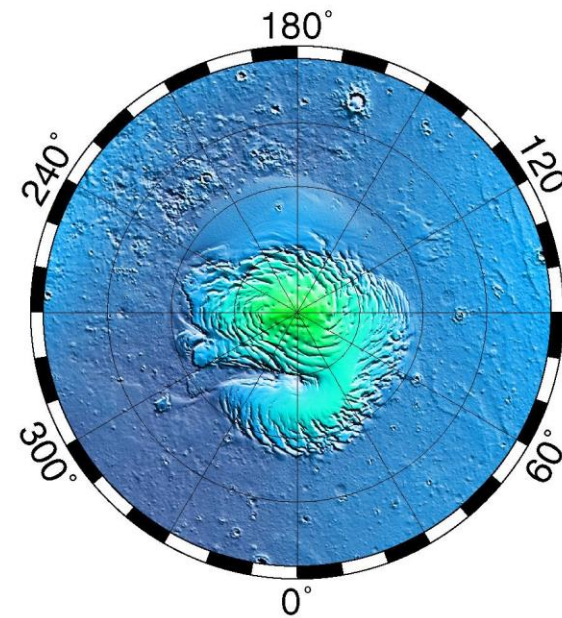


Sledování hustoty impaktů

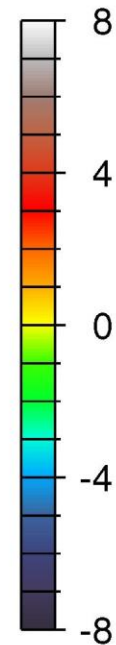
Výšková mapa Marsu



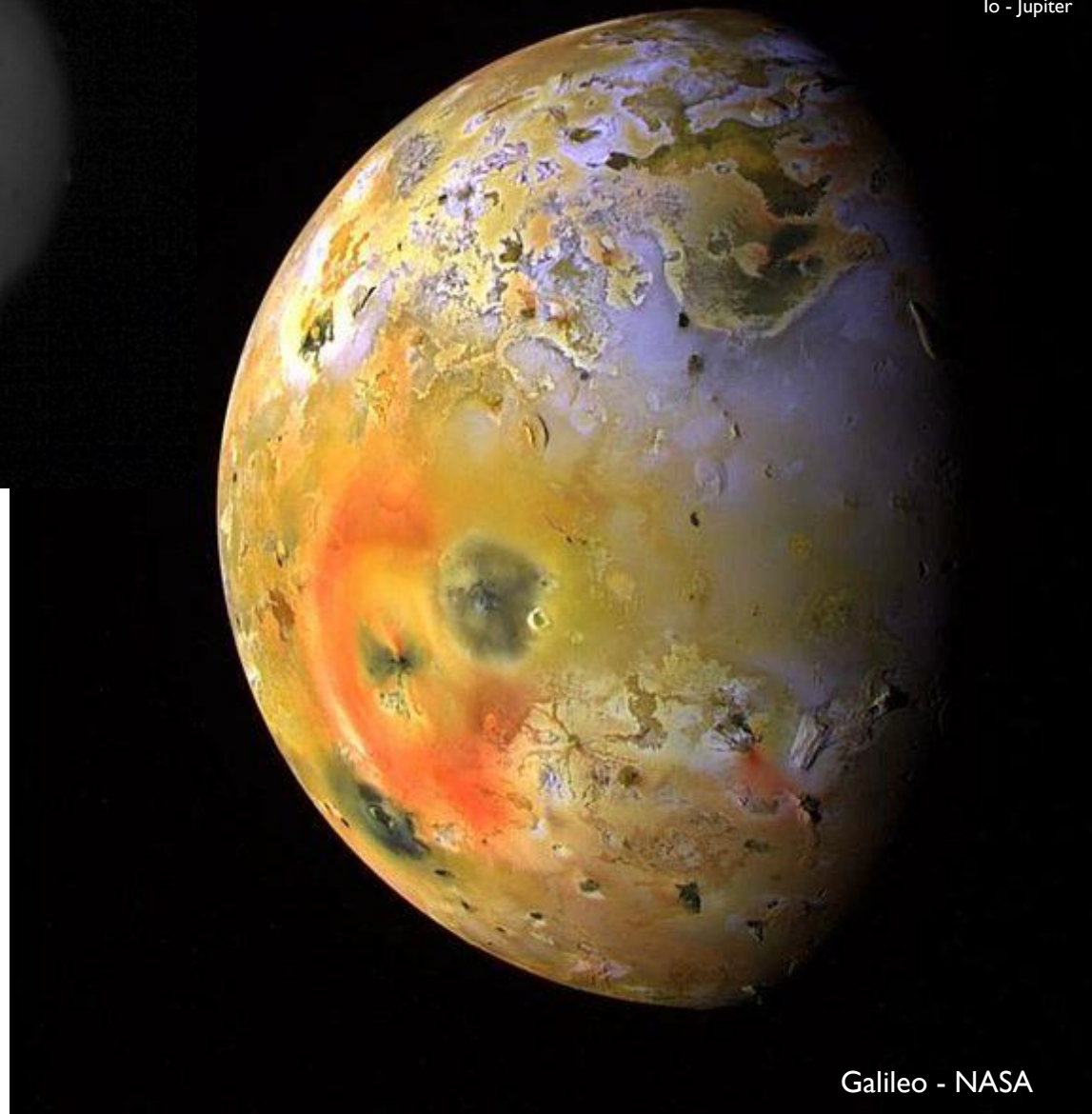
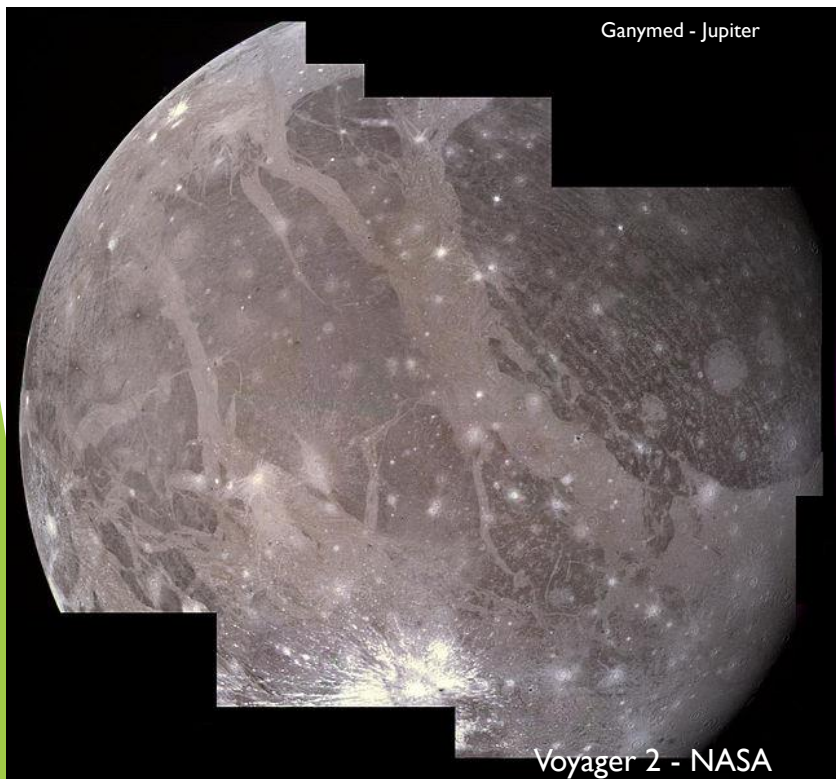
MGS - NASA



km



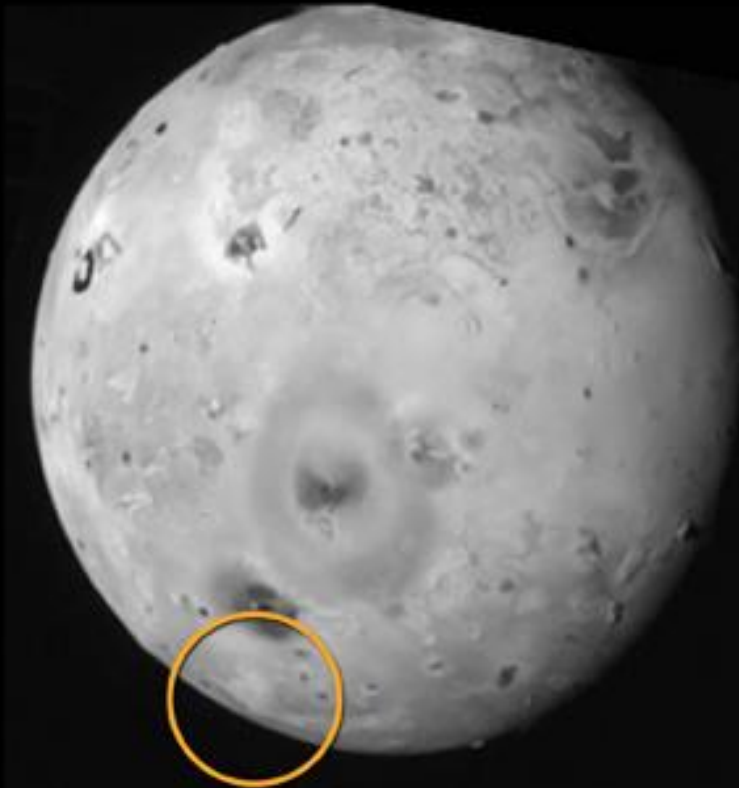
Sledování hustoty impaktů



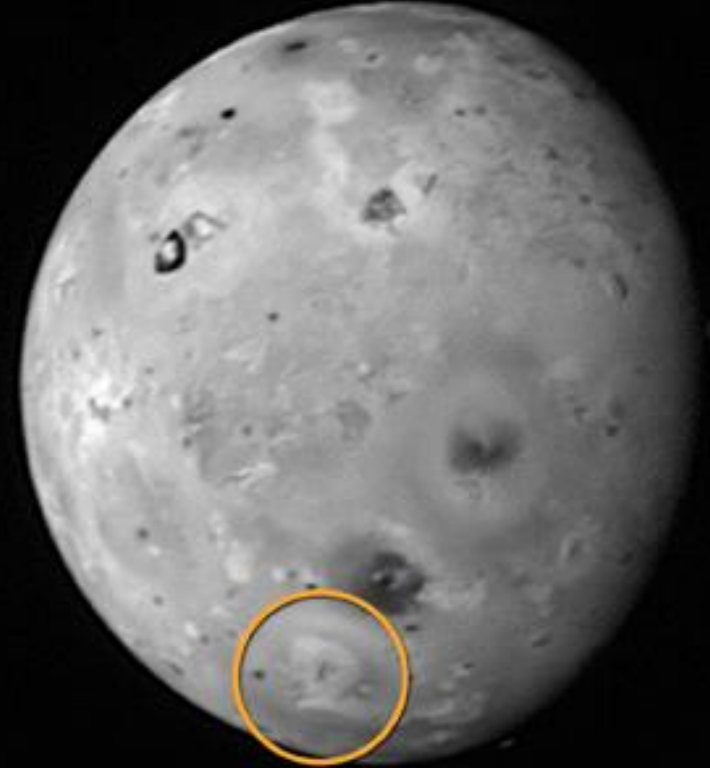
Sledování
hustoty
impaktů

Io Surface Changes

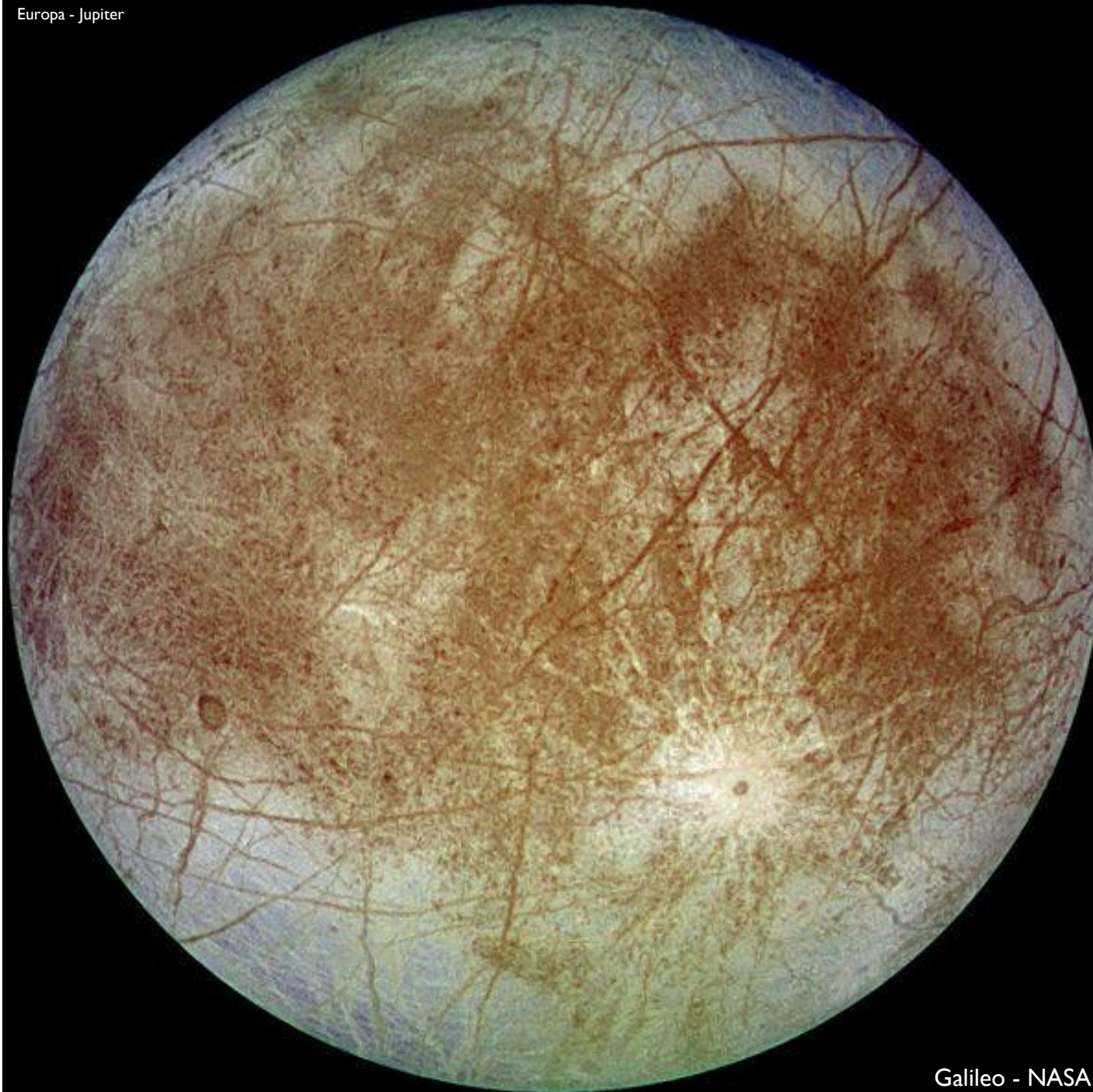
Galileo 1999



New Horizons 2007



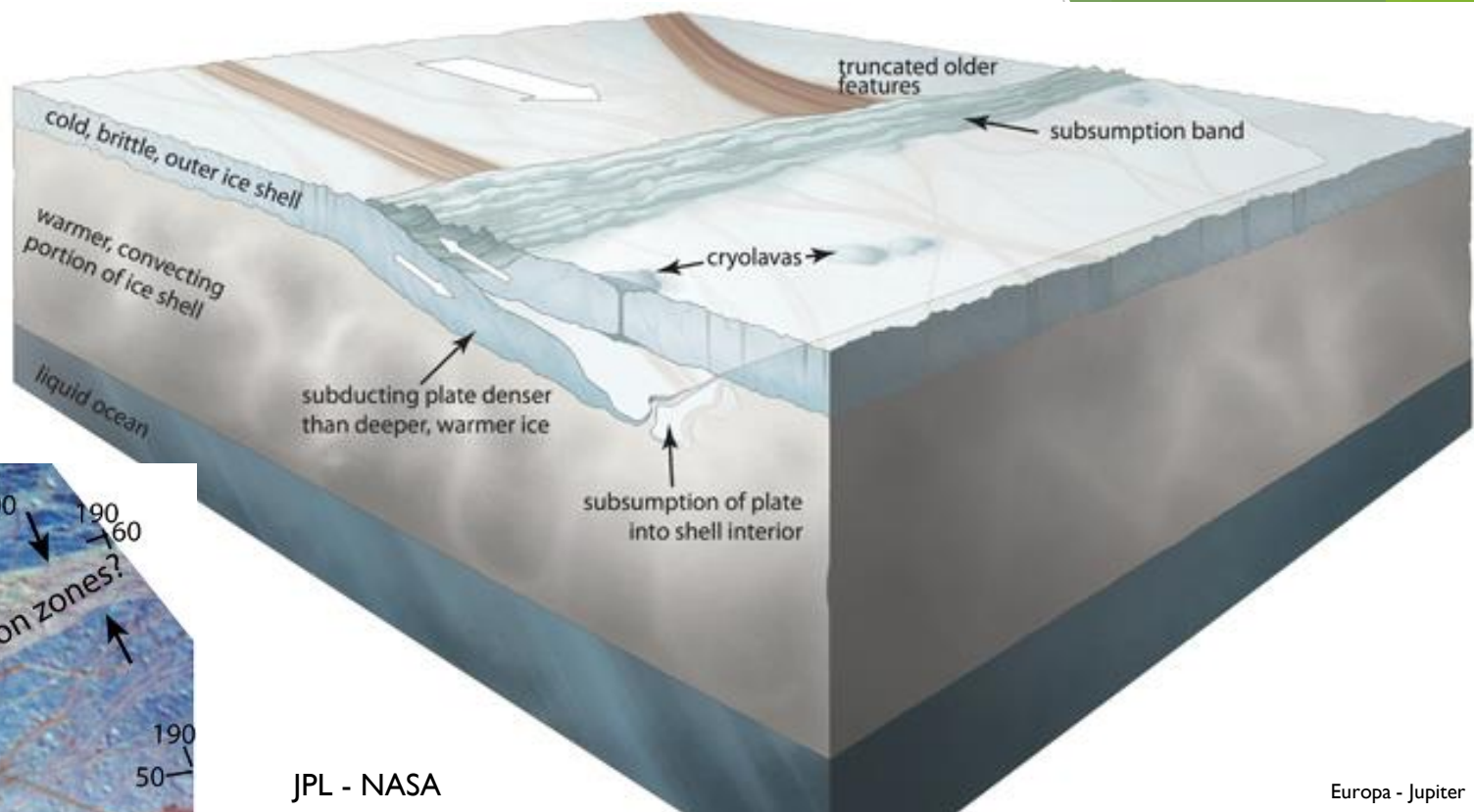
Sledování hustoty impaktů



Europa - Jupiter

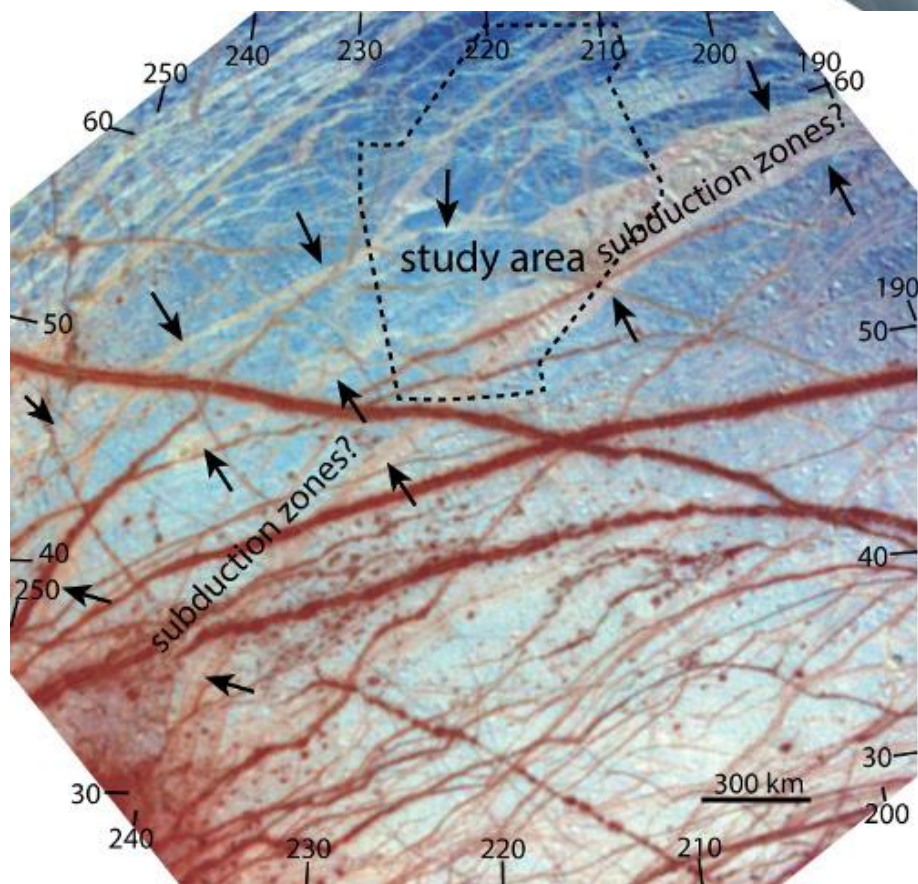
Galileo - NASA

Sledování hustoty impaktů

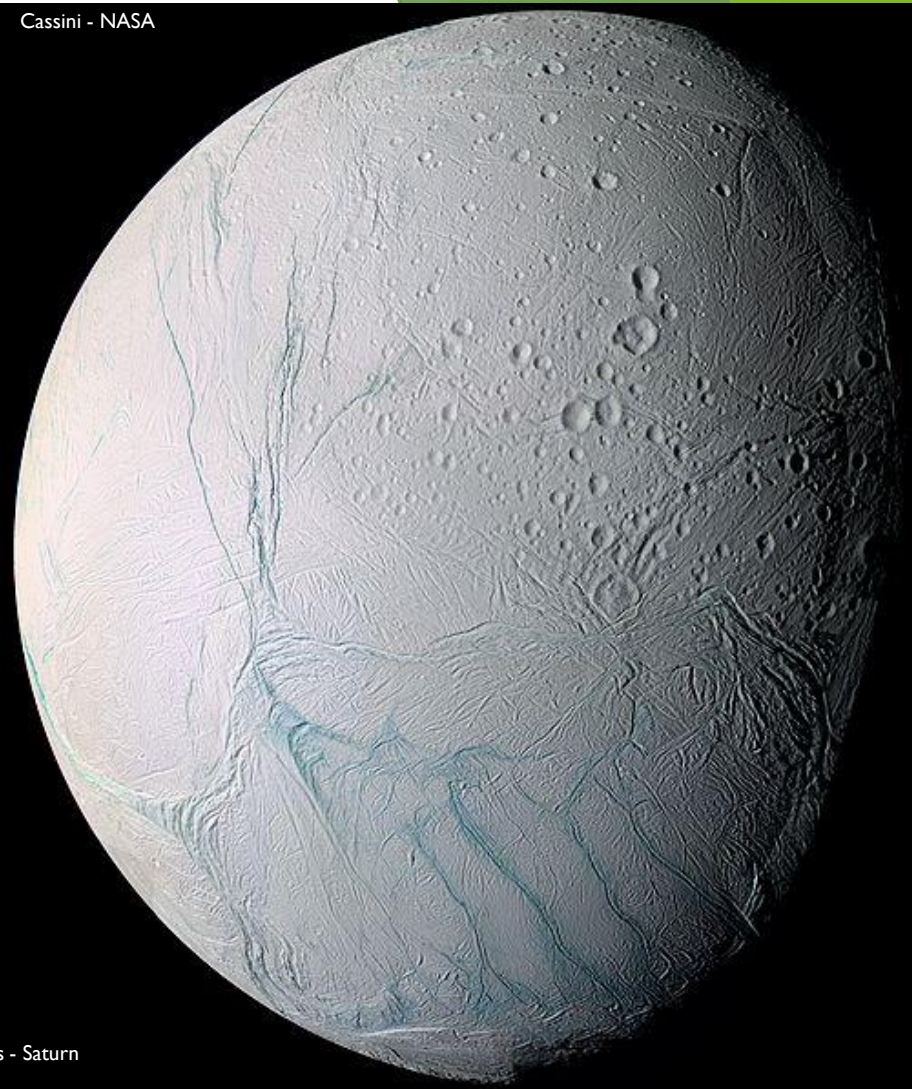
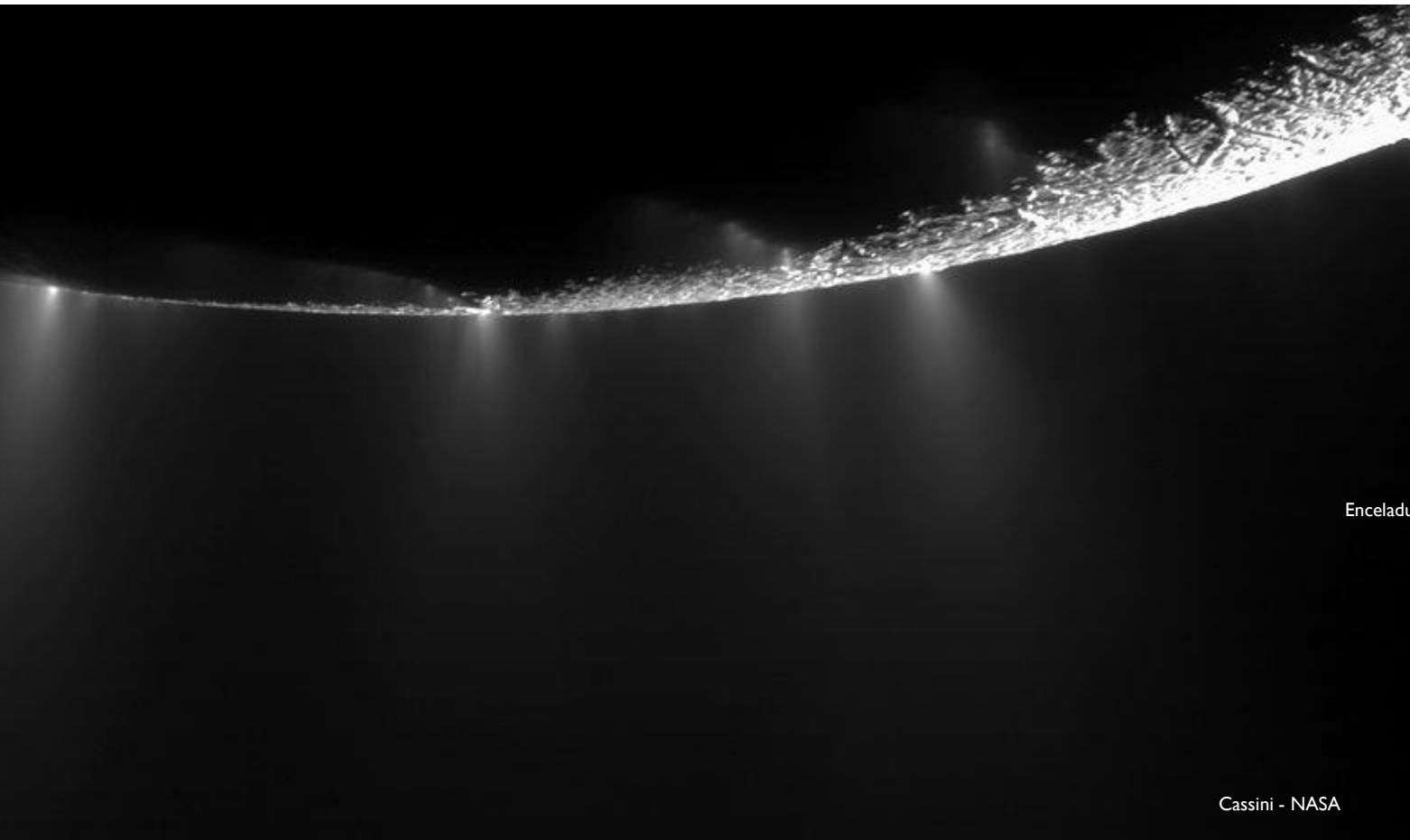


JPL - NASA

Europa - Jupiter



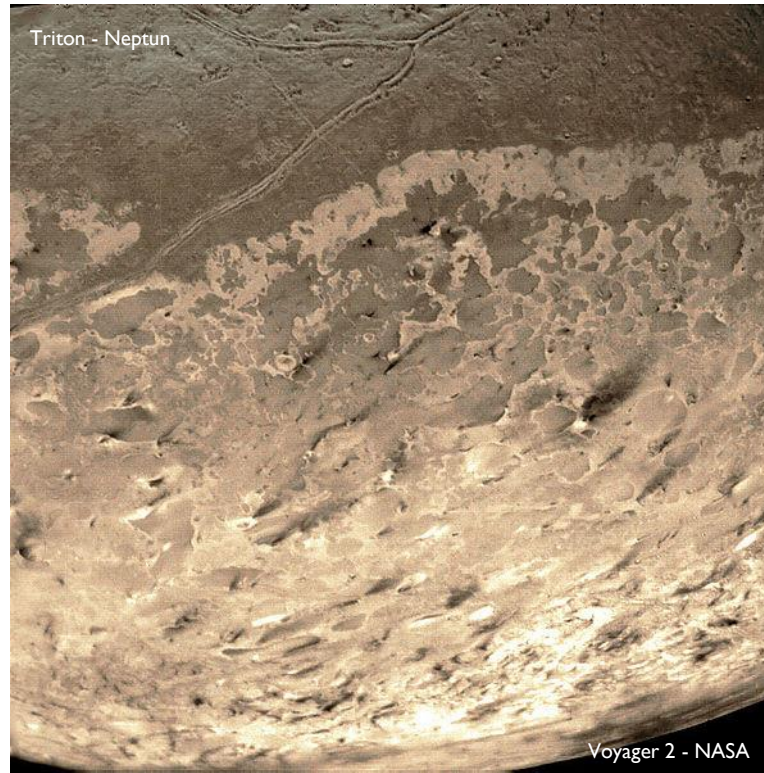
Sledování hustoty impaktů



Cassini - NASA

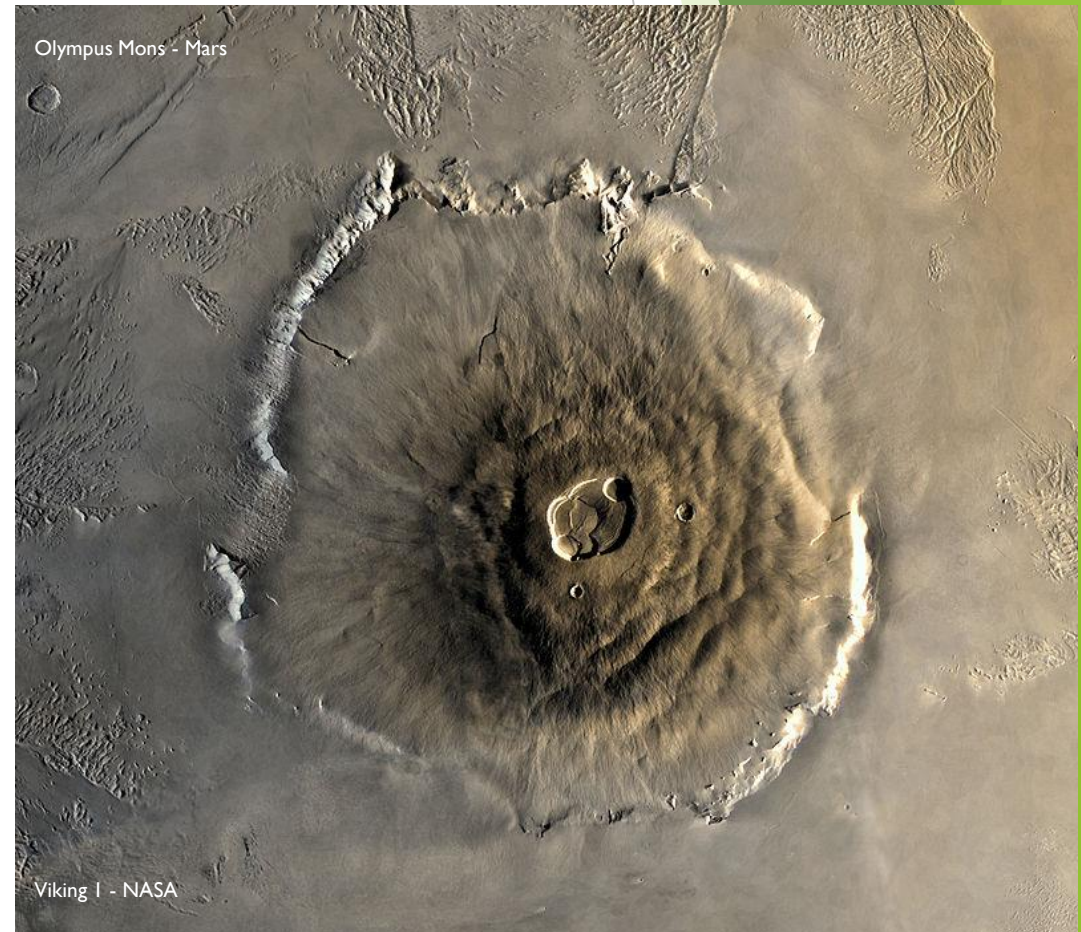
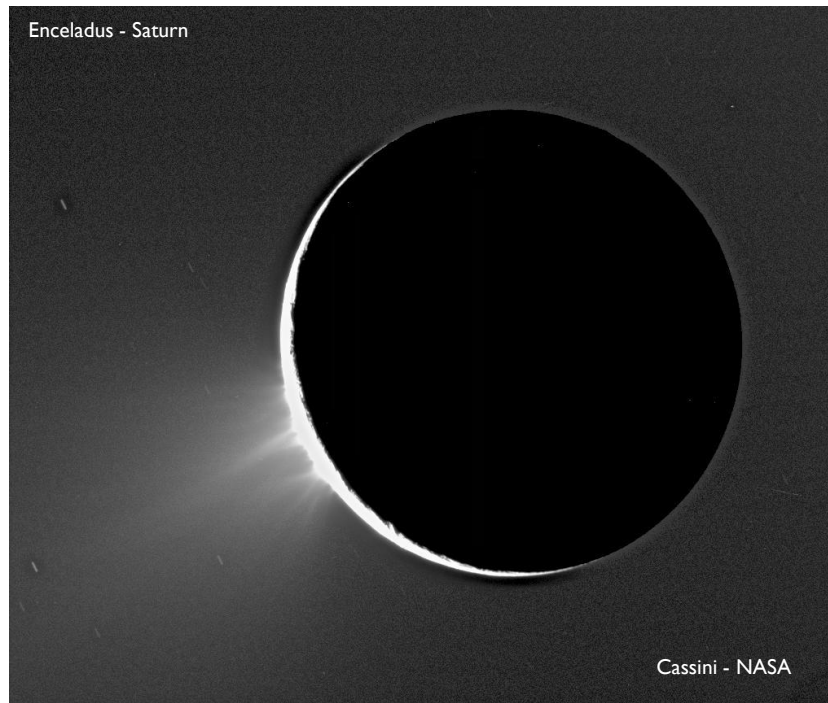
Enceladus - Saturn

Sledování hustoty impaktů



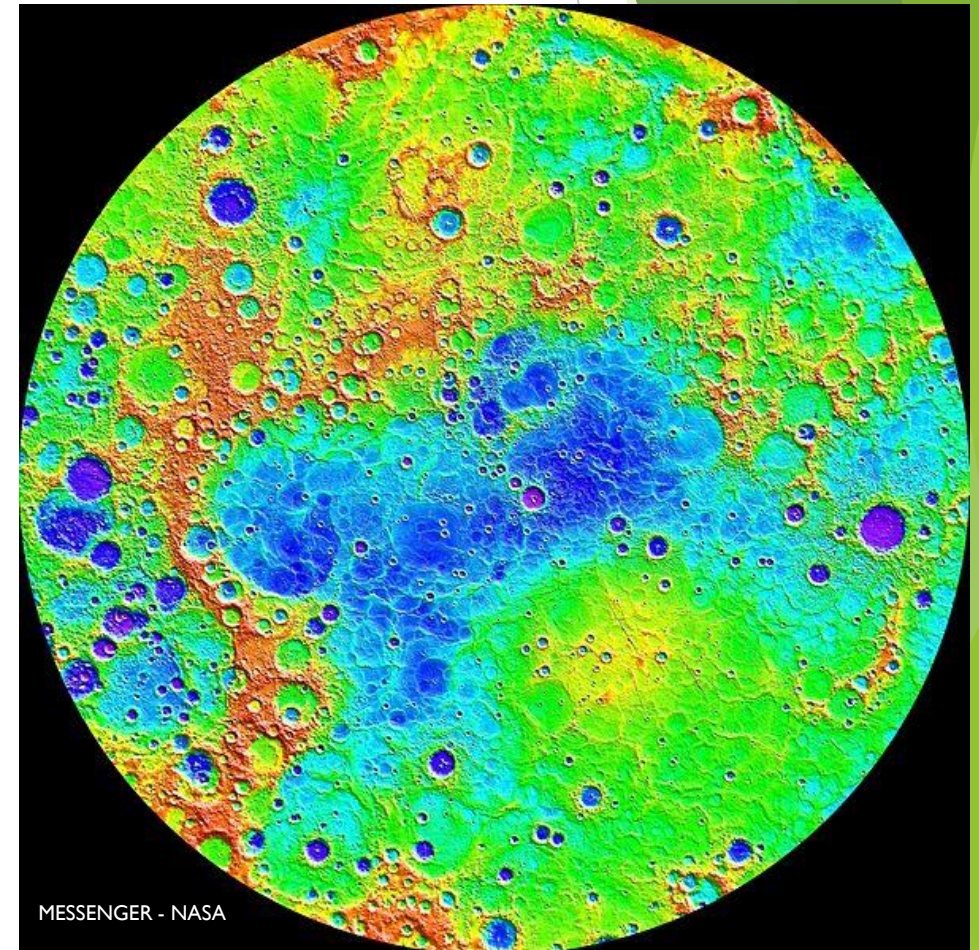
Endogenní procesy - vulkanismus

- ▶ Na vnitřní stavbu planet se vážou endogenní procesy
- ▶ „Klasický vulkanismus“ vs. kryovulkanismus na vzdálenějších tělesech



Endogenní procesy - Merkur

- ▶ Poměrně malé těleso - dávno vychladlé
- ▶ Merkur byl aktivní naposled cca před 1 mld. lety
- ▶ 99,9% povrch - primitivní planetární povrch s impaktními krátery



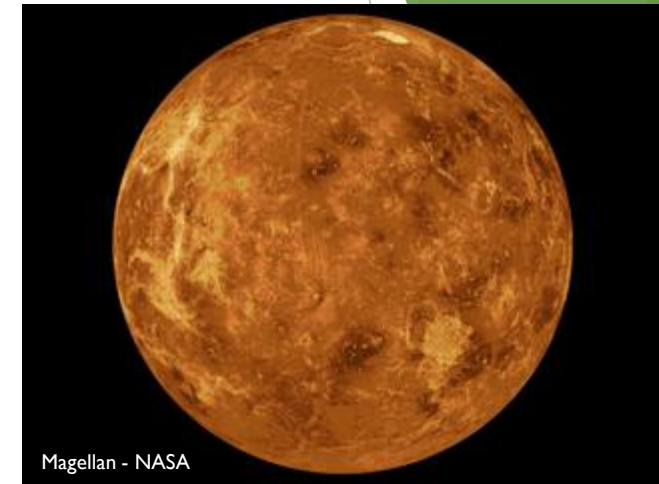
Endogenní procesy - Merkur

- ▶ Poměrně malé těleso - dávno vychladlé
- ▶ Merkur byl aktivní naposled cca před 1 mld. Lety
- ▶ 99,9% povrch - primitivní planetární povrch s impaktními krátery
- ▶ Důkazy o přítomnosti vulkanismu jsou, ale staré
- ▶ Podpovrchové kanály magmatu - nyní zkolabované



Endogenní procesy - Venuše

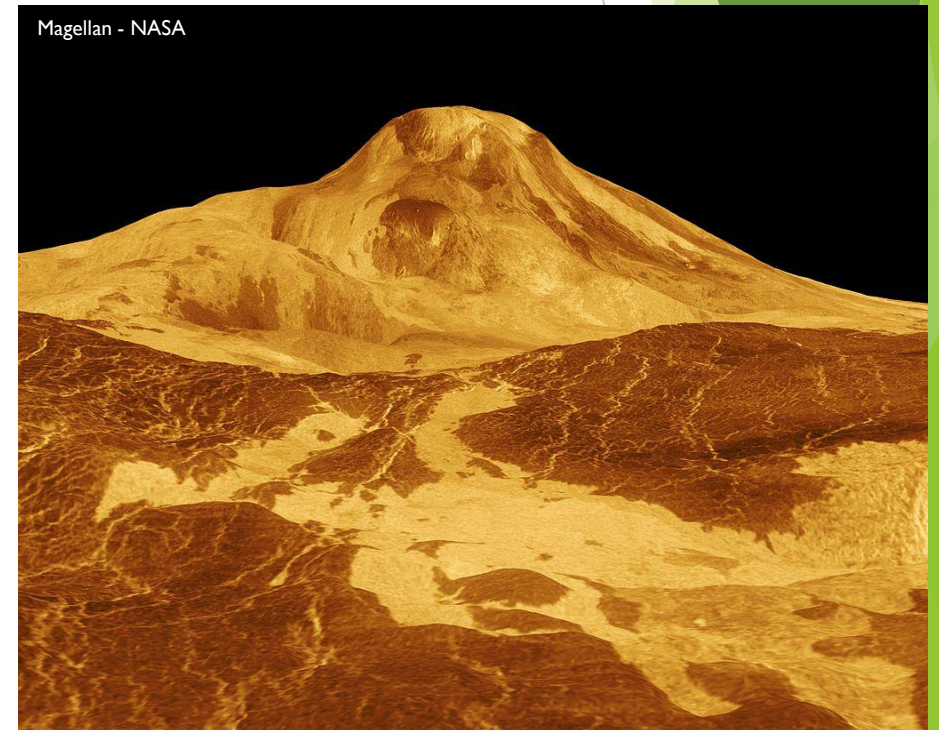
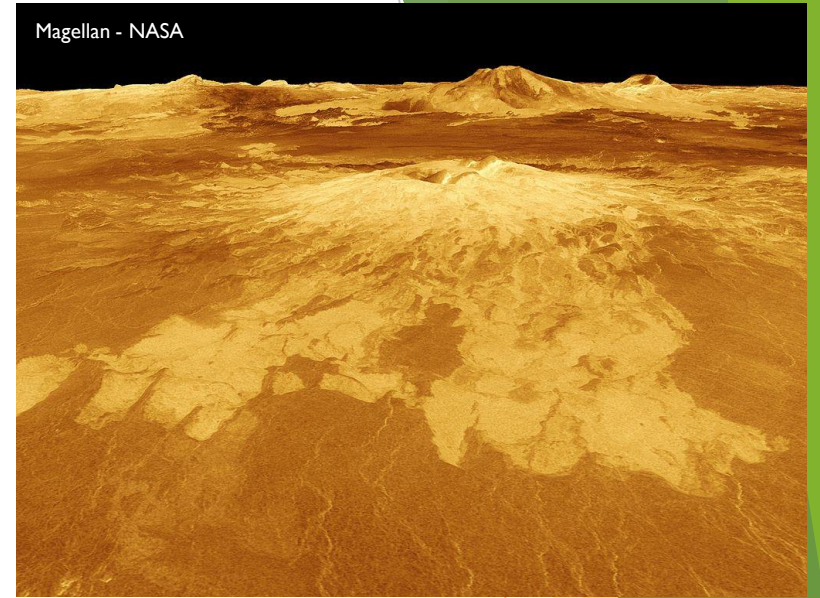
- ▶ Stejně velká jako Země
- ▶ Chybí desková tektonika - PROČ?!
- ▶ V současné době pravděpodobně neaktivní/velmi sporadicky aktivní - nárazové monstrózní eventy



Endogenní procesy - Venuše

- ▶ Stejně velká jako Země
- ▶ Chybí desková tektonika - PROČ?!

- ▶ Velké množství pozůstatků vulkanické aktivity - největší množství známých sopek v celé soustavě!



Endogenní procesy - Venuše

- ▶ Stejně velká jako Země
- ▶ Chybí desková tektonika - PROČ?!
- ▶ Velké množství pozůstatků vulkanické aktivity - největší množství známých sopek v celé soustavě!
- ▶ 90 % povrchu bazalty



Color as seen on the surface of Venus

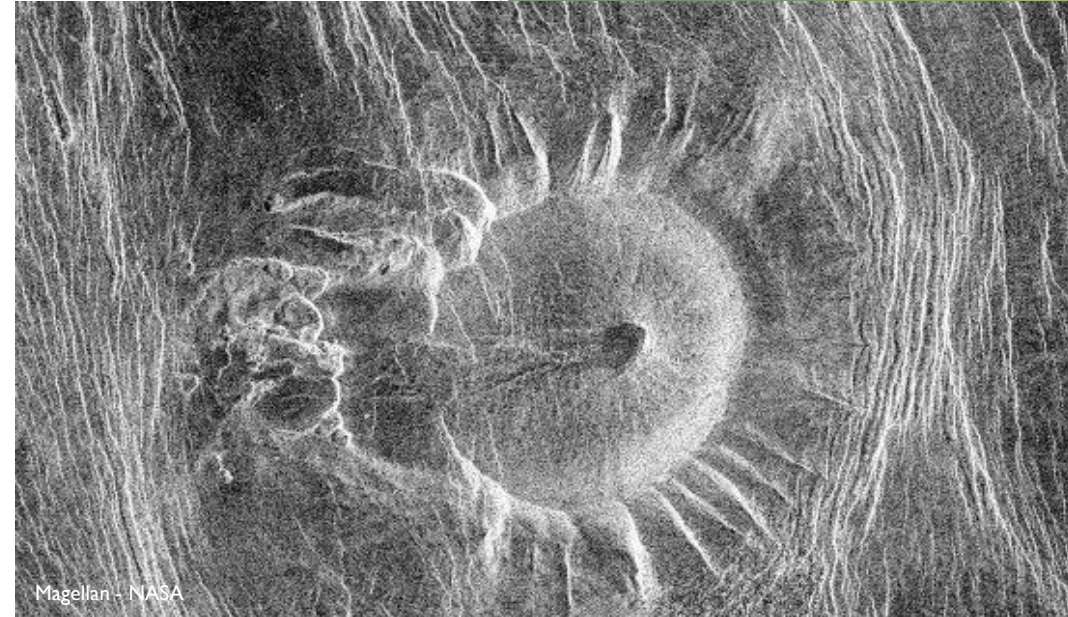
Venera 13

Color with atmospheric effects removed



Endogenní procesy - Venuše

- ▶ Stejně velká jako Země
- ▶ Chybí desková tektonika - PROČ?!
- ▶ Velké množství pozůstatků vulkanické aktivity - největší množství známých sopek v celé soustavě!
- ▶ 90 % povrchu bazalty
- ▶ Palačinkové dómy, arachnoidi :-)



Endogenní procesy - Měsíc

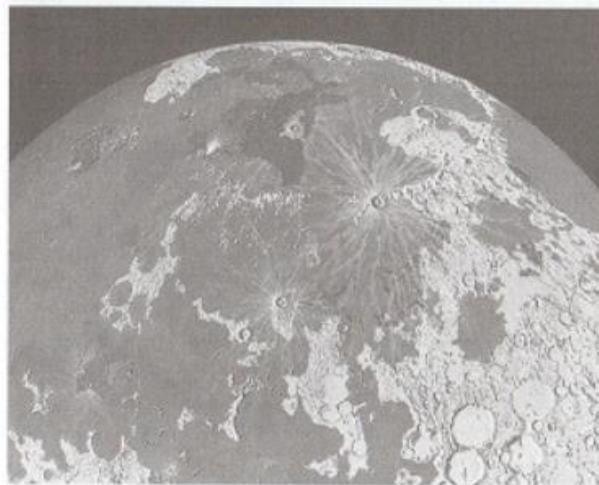
- ▶ Vulkanicky aktivní po LHB až do cca 3 mld let před současností
- ▶ Desítky km mocná kůra znesnadňuje vulkanismus



a



b



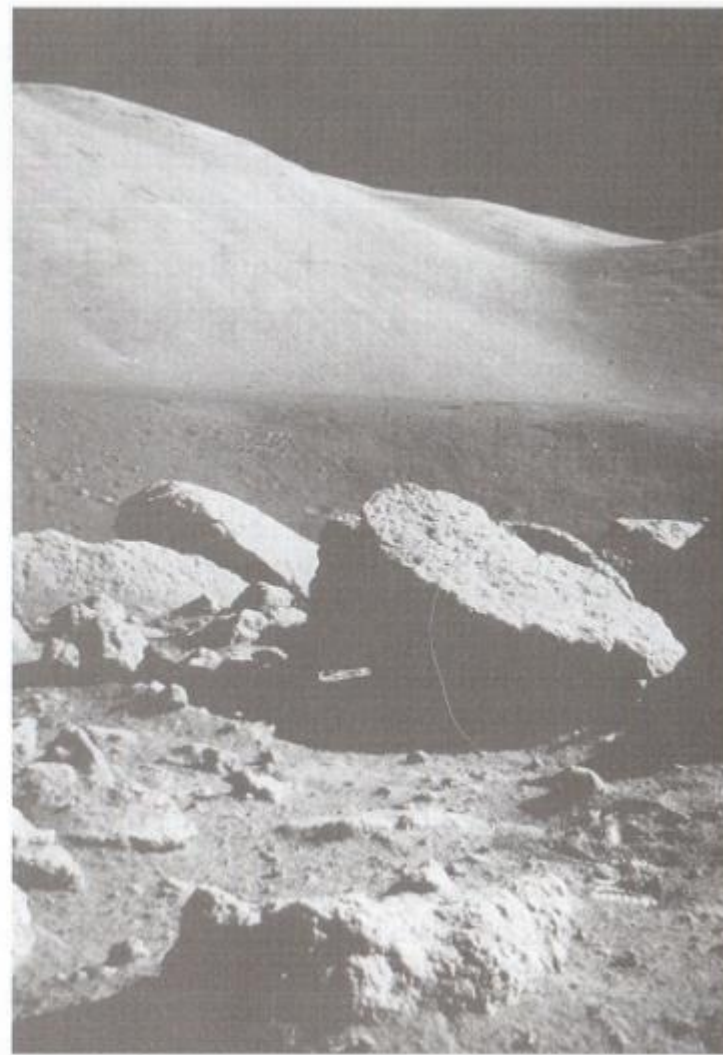
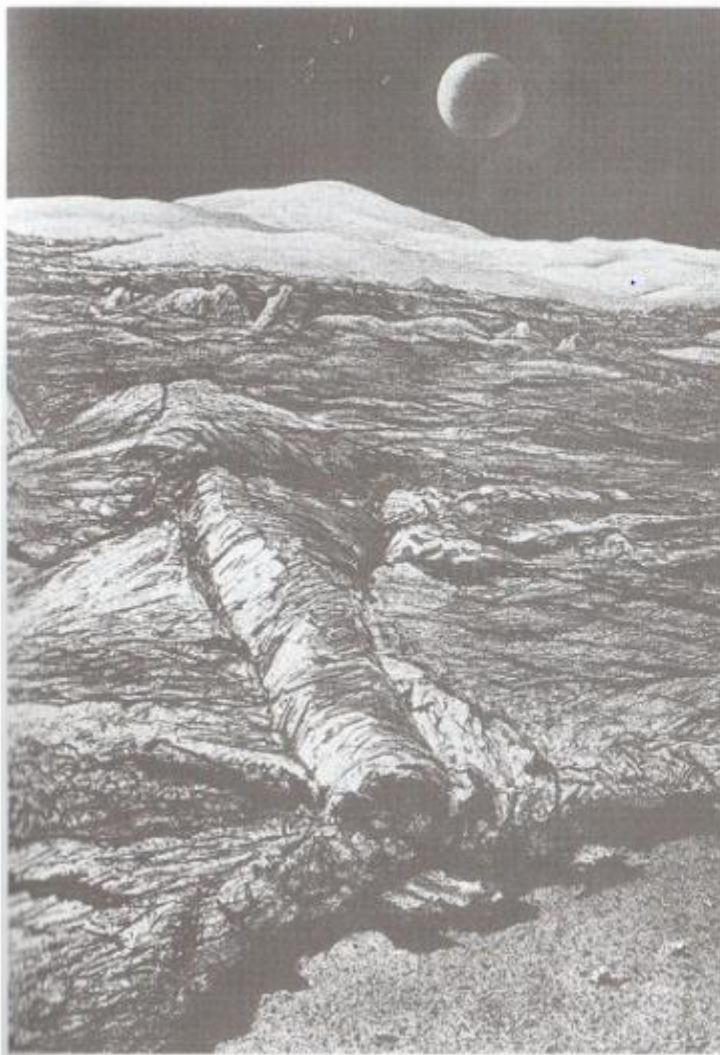
c

Hartmann (2004): Moons & Planets

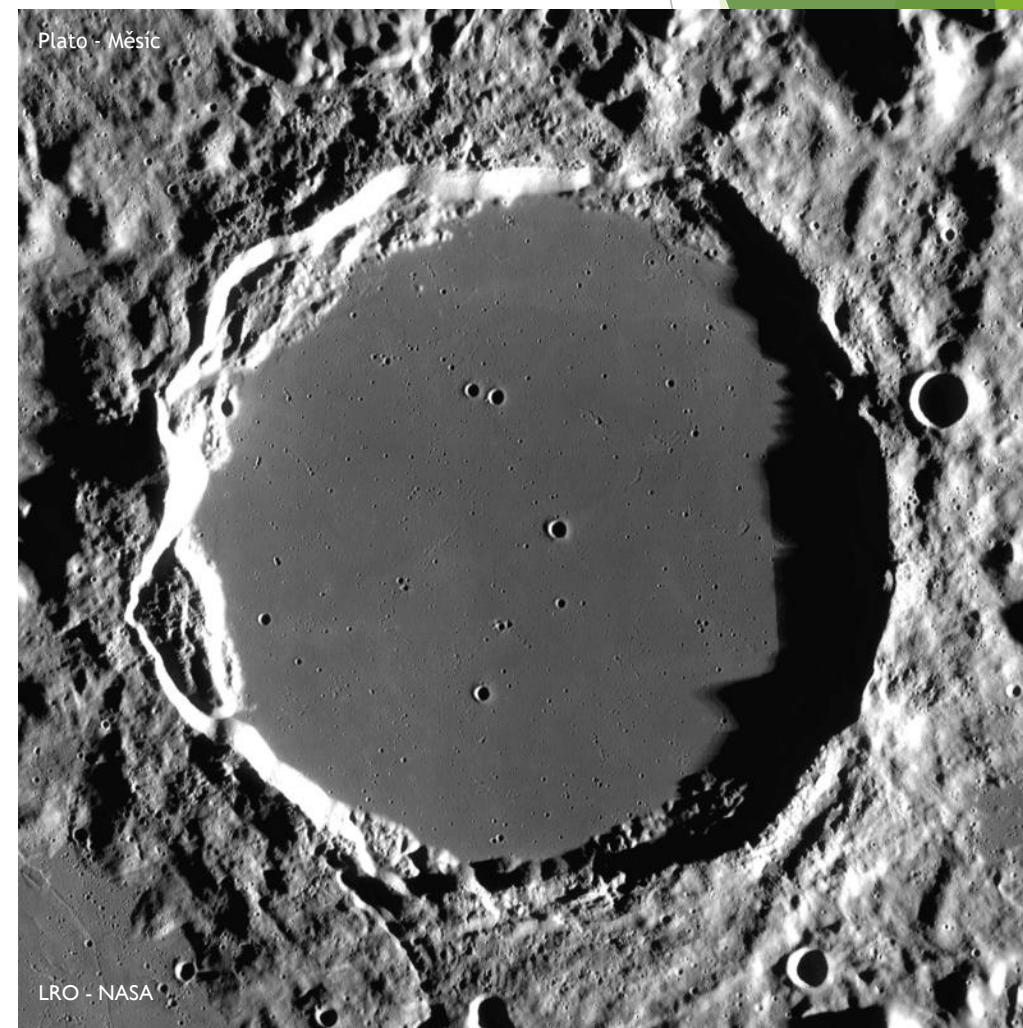
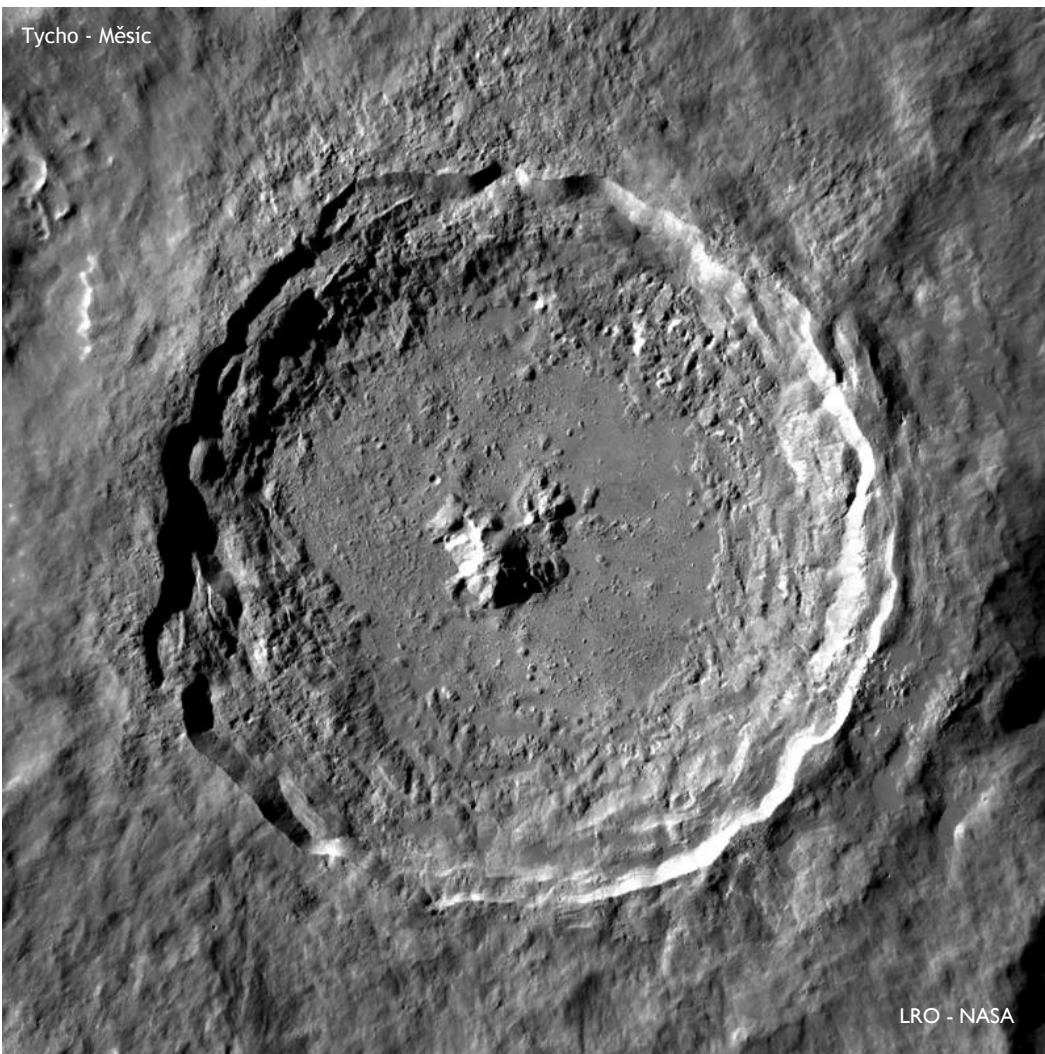


d

Endogenní procesy - Měsíc

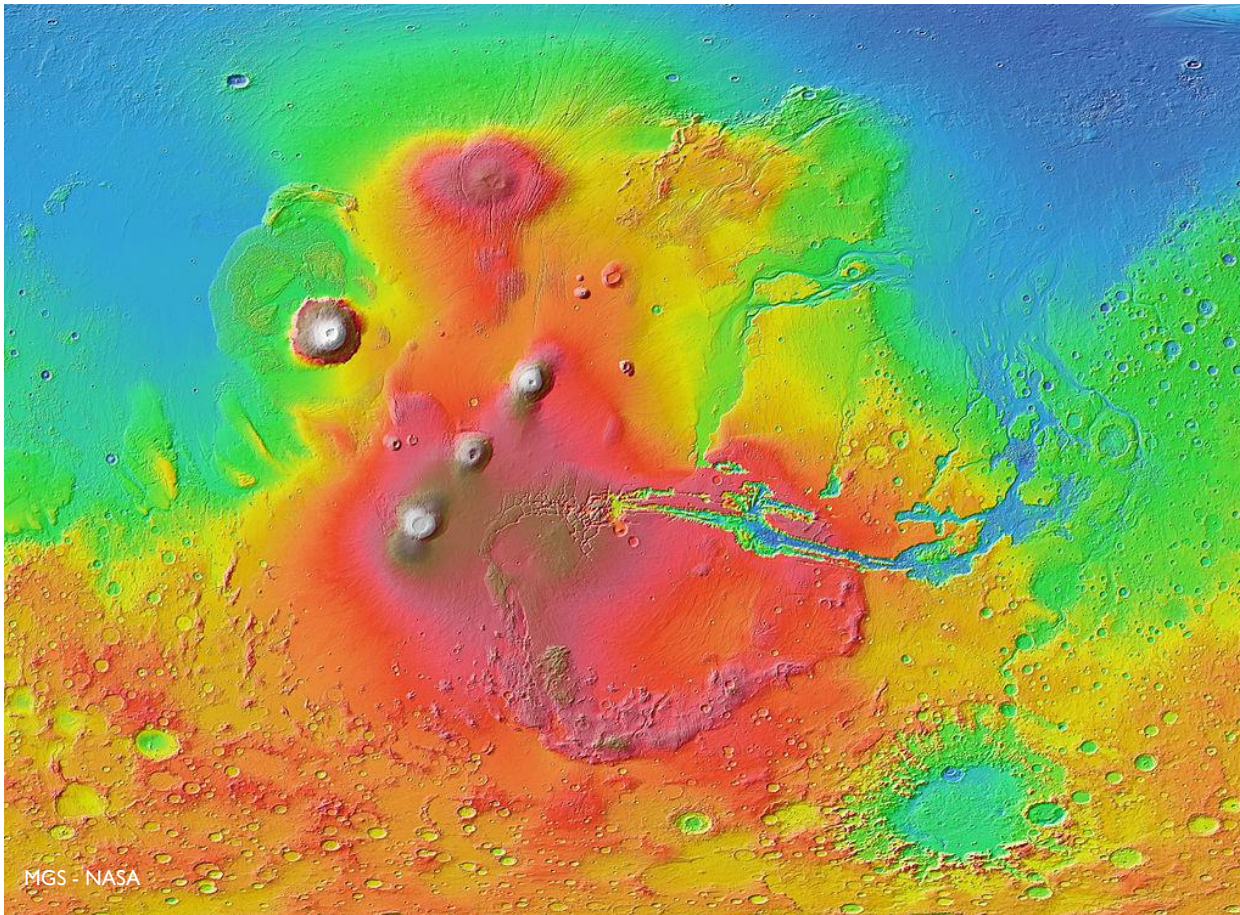


Endogenní procesy - Měsíc



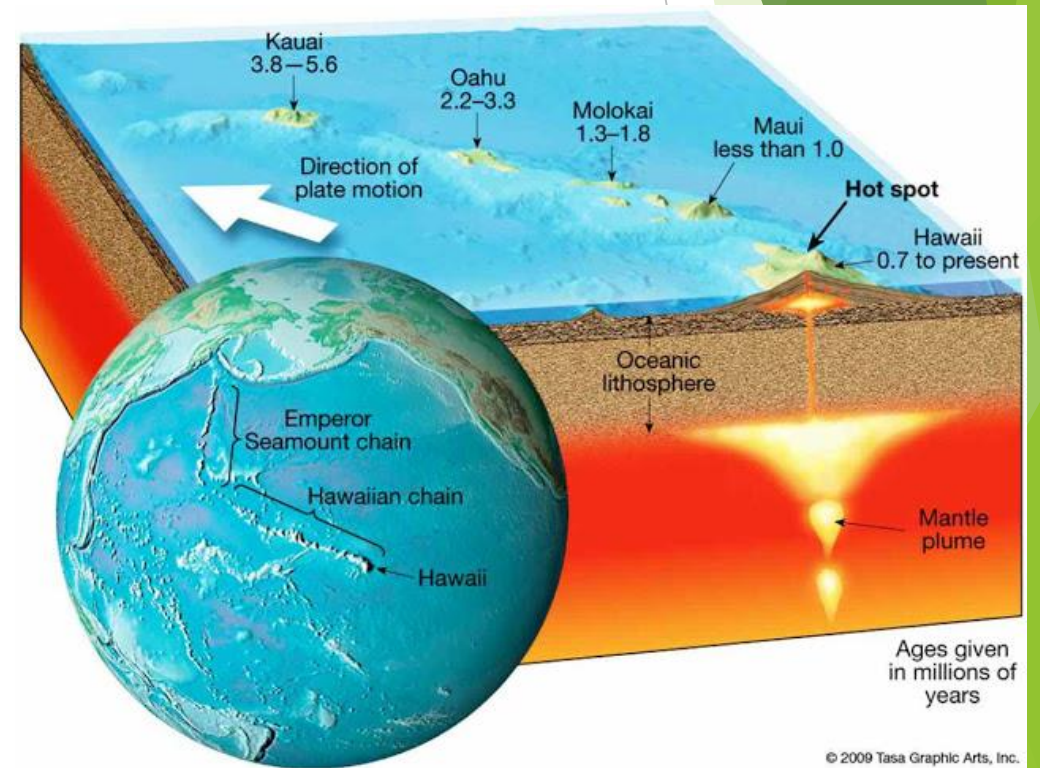
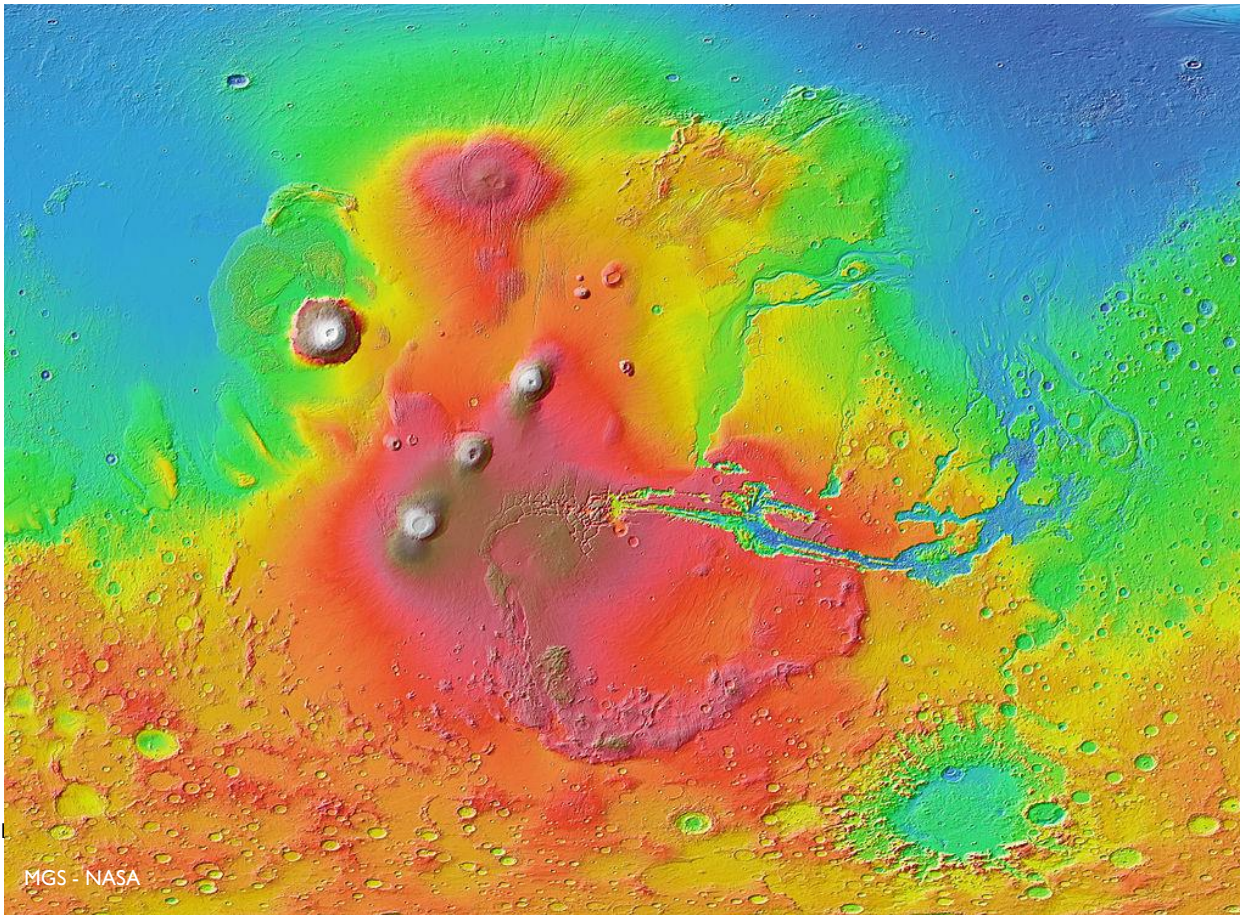
Endogenní procesy - Mars

- ▶ Jako Merkur - malý, tedy už chladný
- ▶ Obrovské štítové sopky patrně „sedící“ na hot spotech - **oblast Tharsis**



Endogenní procesy - Mars

- ▶ Jako Merkur - malý, tedy už chladný
- ▶ Obrovské štítové sopky patrně „sedící“ na hot spotech - oblast Tharsis

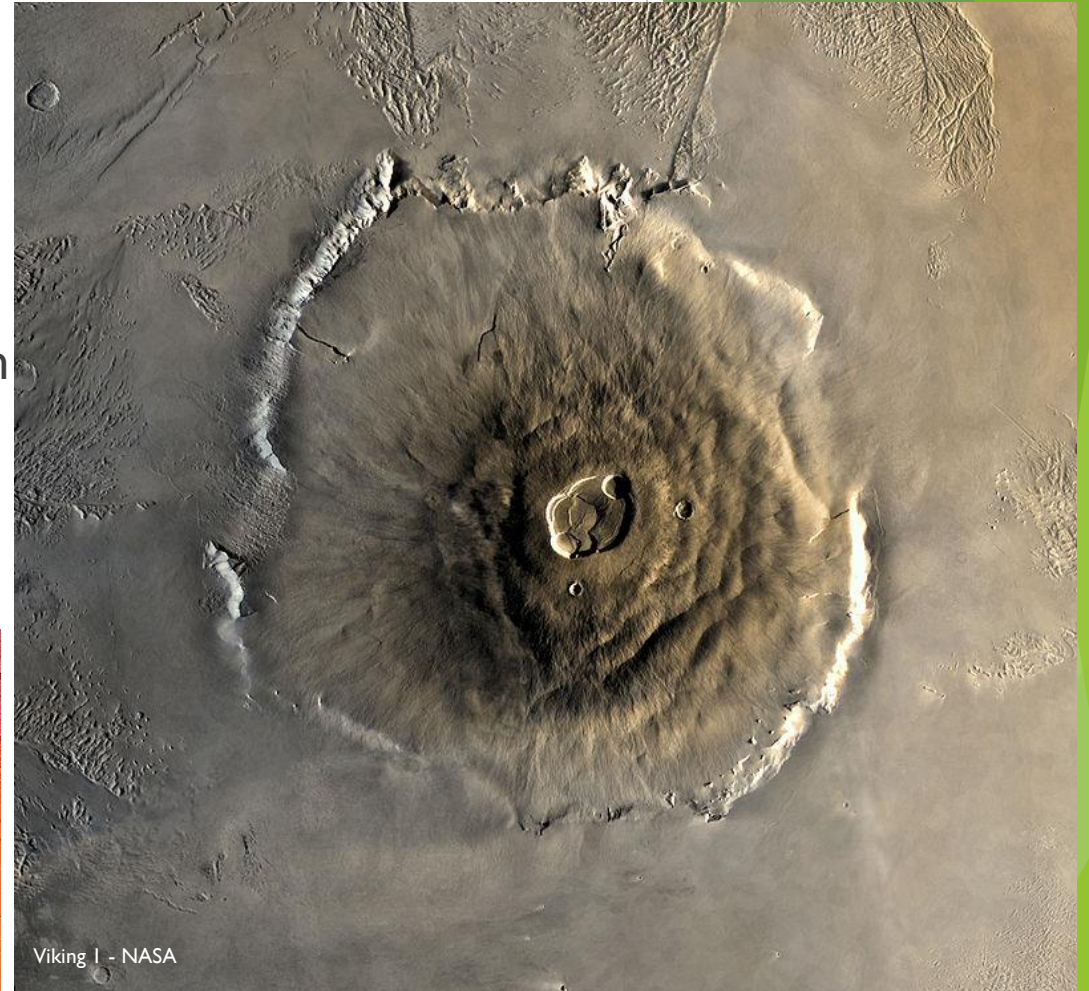
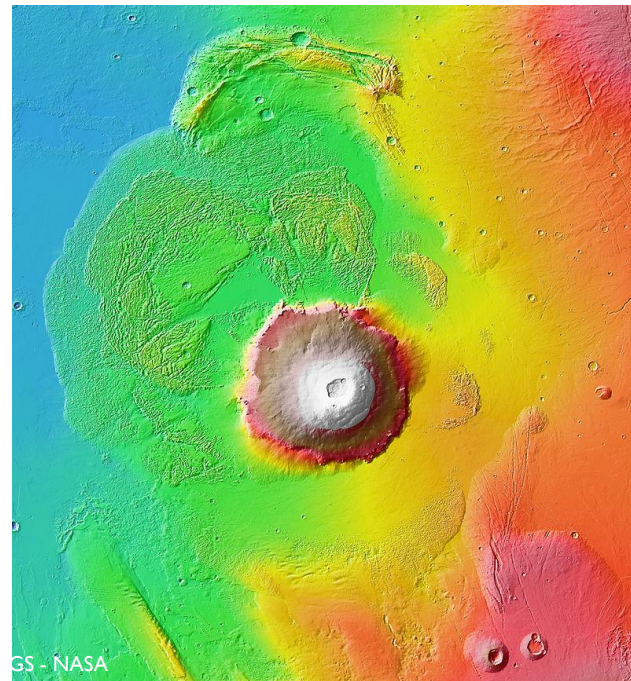


Endogenní procesy - Mars

- ▶ Jako Merkur - malý, tedy už chladný
- ▶ Obrovské štítové sopky patrně „sedící“ na hot spotech

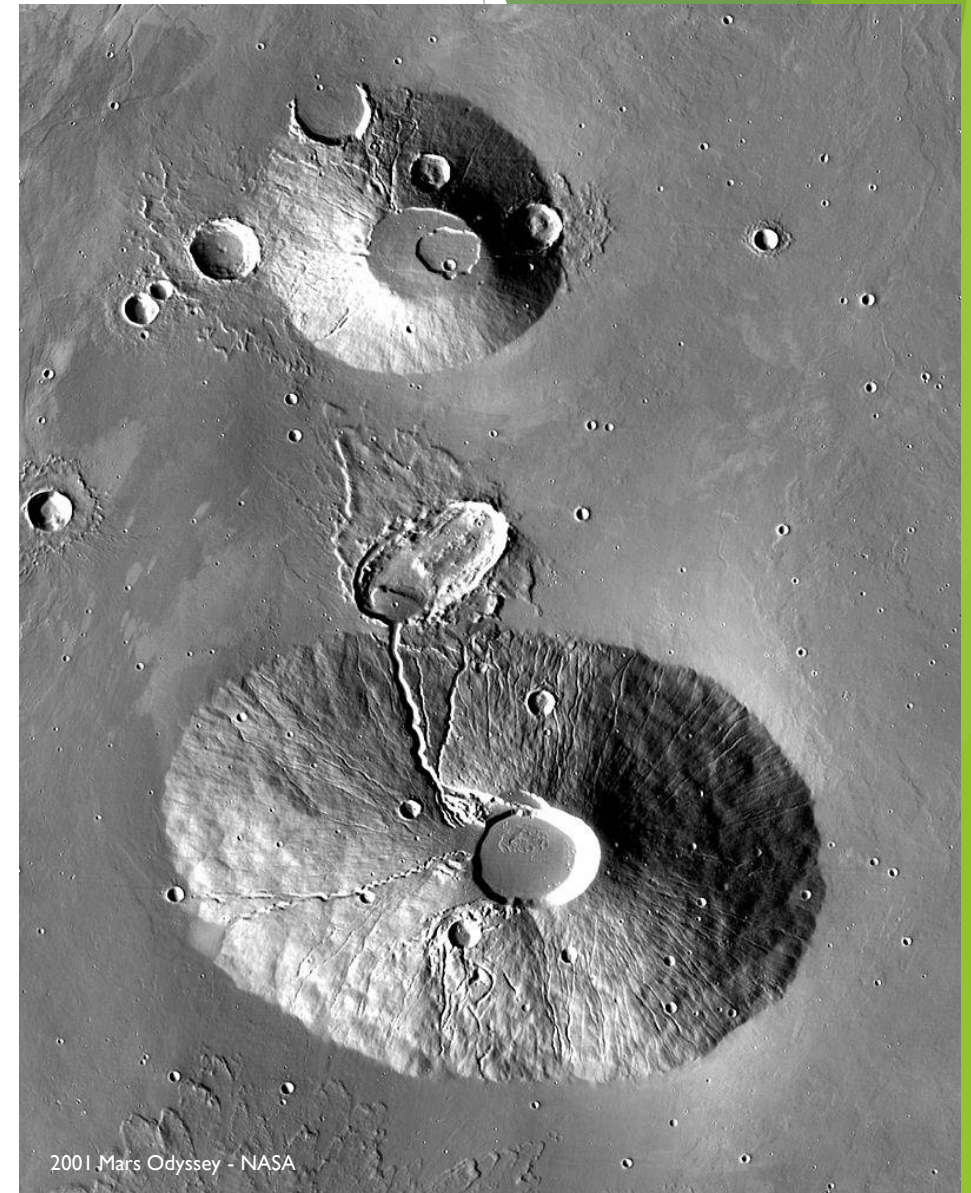
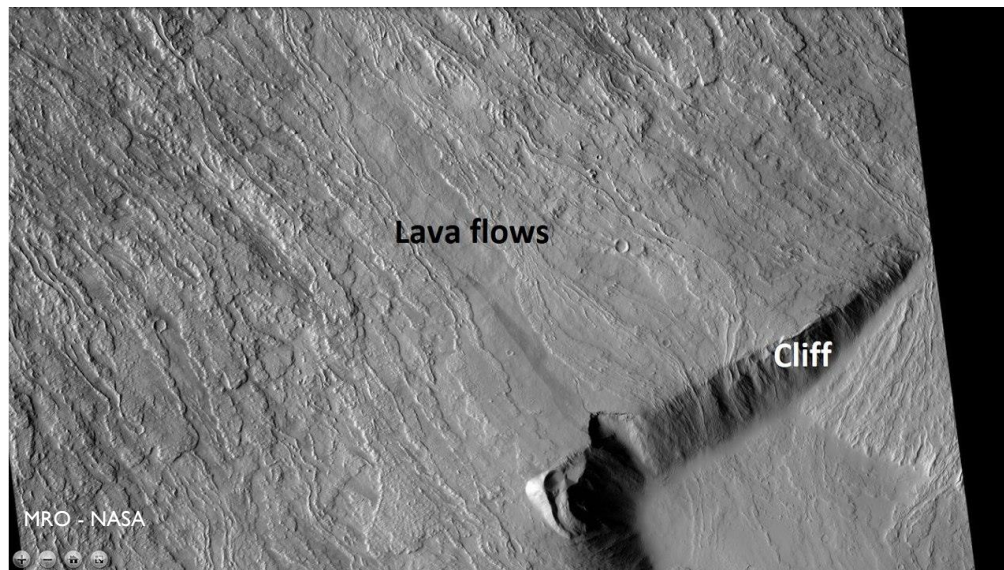
Oblast Tharsis

- ▶ Olympus Mons - největší vulkanická struktura ve sluneční soustavě (26 km)



Endogenní procesy - Mars

- ▶ Jako Merkur - malý, tedy už chladný
- ▶ Obrovské štítové sopky patrně „sedící“ na hot spotech

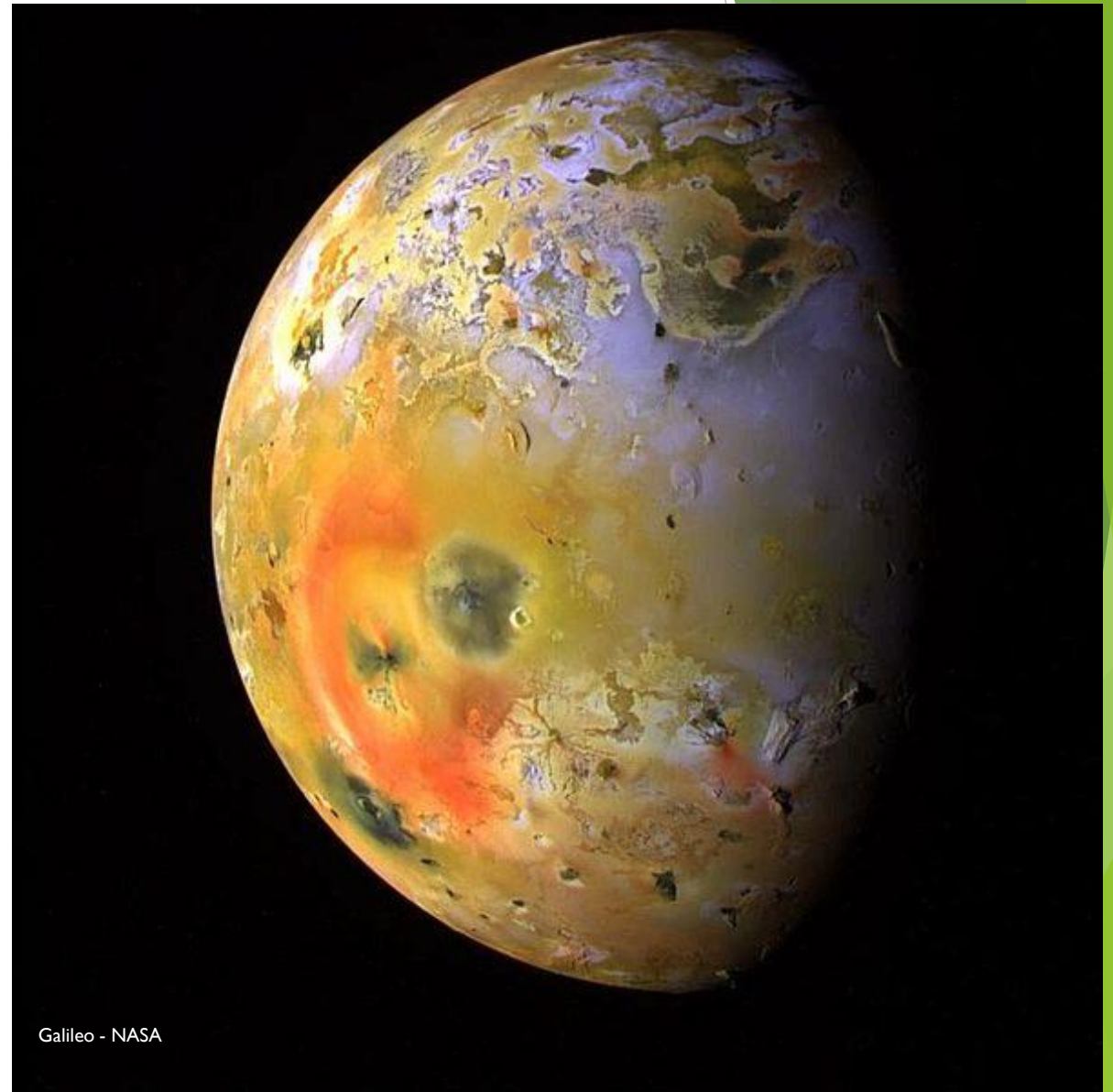


Endogenní procesy - Mars

- ▶ Jako Merkur - malý, tedy už chladný
- ▶ Obrovské štítové sopky patrně „sedící“ na hot spotech
- ▶ Interakce vulkanismu s vodou!

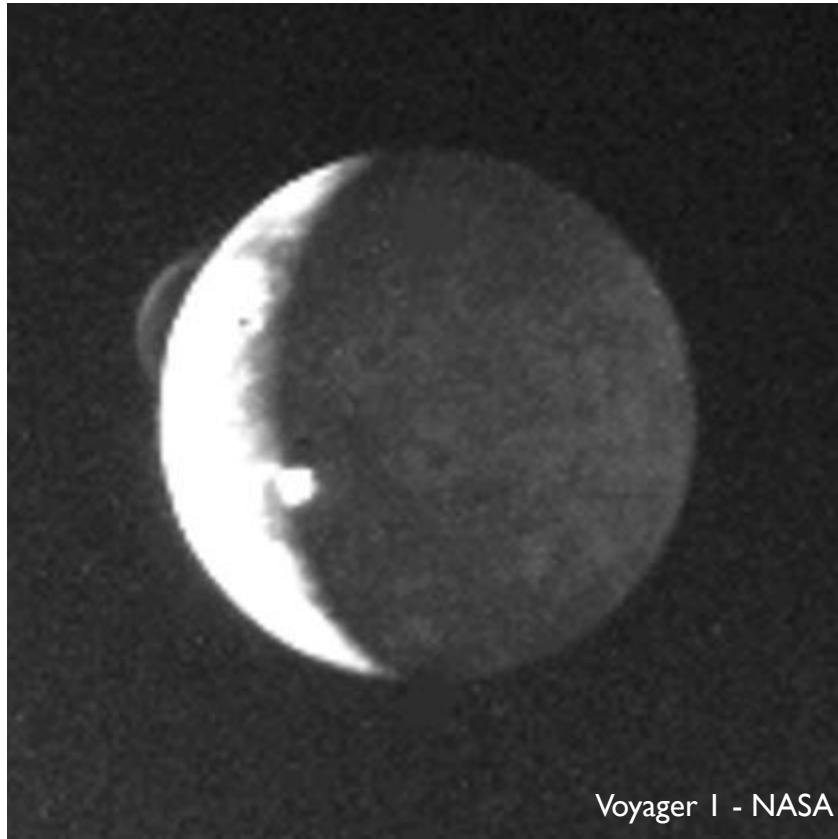


Endogenní procesy - Io



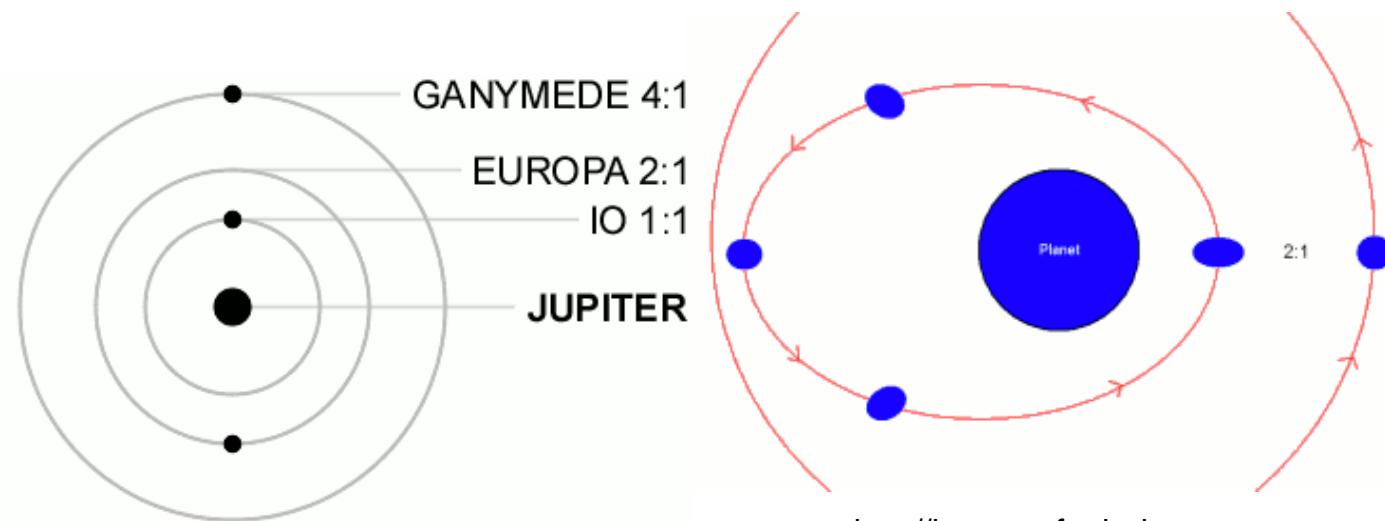
Endogenní procesy - Io

- ▶ Měsíc Jupiteru Io - nejaktivnější těleso sluneční soustavy!
- ▶ PROČ?



Endogenní procesy - Io

- ▶ Měsíc Jupiteru Io - nejaktivnější těleso sluneční soustavy!
- ▶ PROČ?



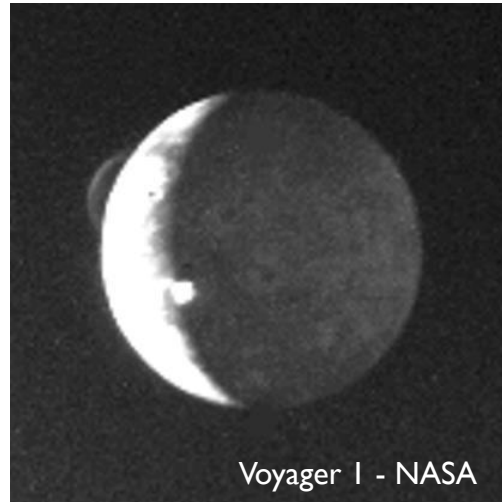
<http://large.stanford.edu>



Galileo - NASA

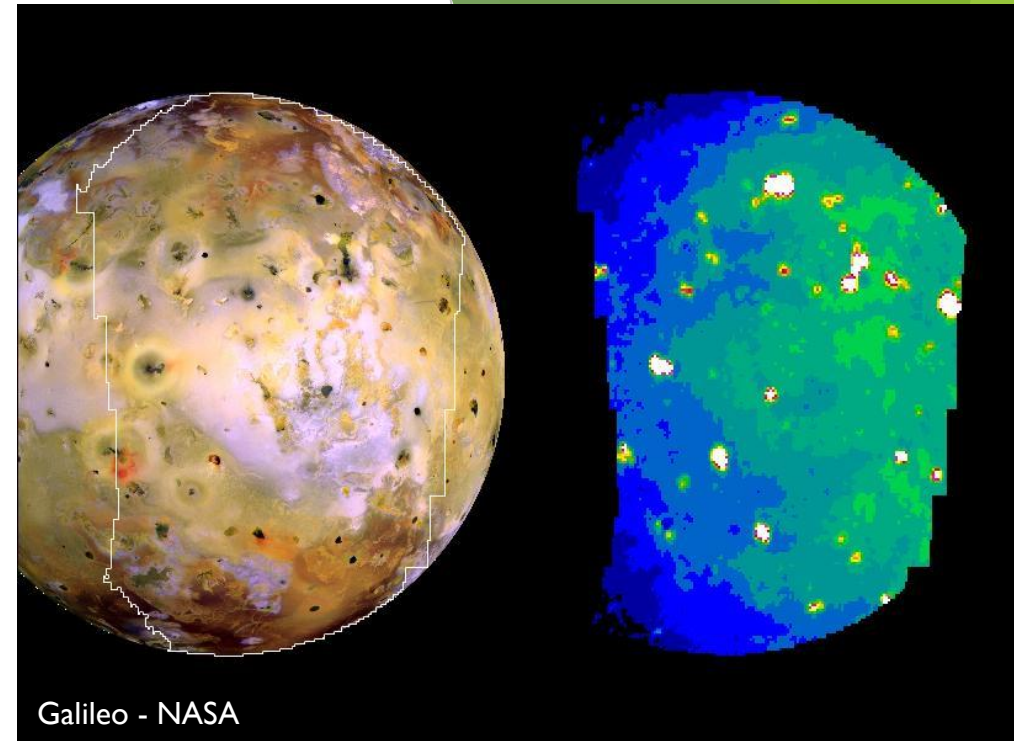
Endogenní procesy - Io

- ▶ Měsíc Jupiteru Io - nejaktivnější těleso sluneční soustavy!
- ▶ PROČ?
- ▶ Vulkanismus nepohání rozpad radioaktivních prvků a teplo z původní akrece materiálu ale slapové síly Jupitera, které Io „hnětou“



Endogenní procesy - Io

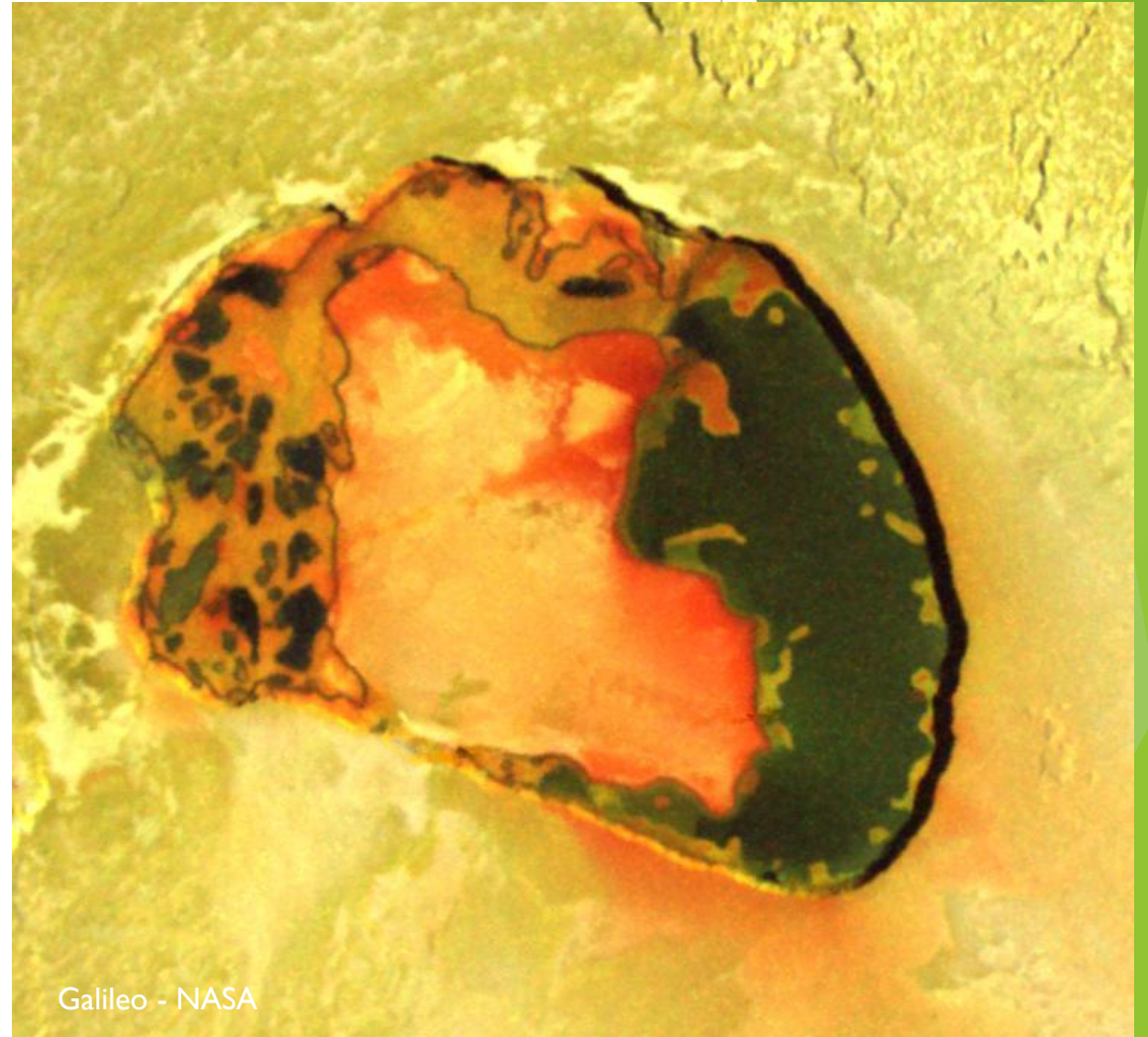
- ▶ Měsíc Jupiteru Io - nejaktivnější těleso sluneční soustavy!
- ▶ PROČ?
- ▶ Vulkanismus nepohání rozpad radioaktivních prvků a teplo z původní akrece materiálu ale slapové síly Jupitera, které Io „hnětou“
- ▶ Nejméně 150, možná až 400 aktivních vulkánů



Endogenní procesy - Io - typy erupcí

► Intra-patera erupce

Něco jako pozemské kaldery - kolaps magmatické komory poté, co láva odteče



Galileo - NASA

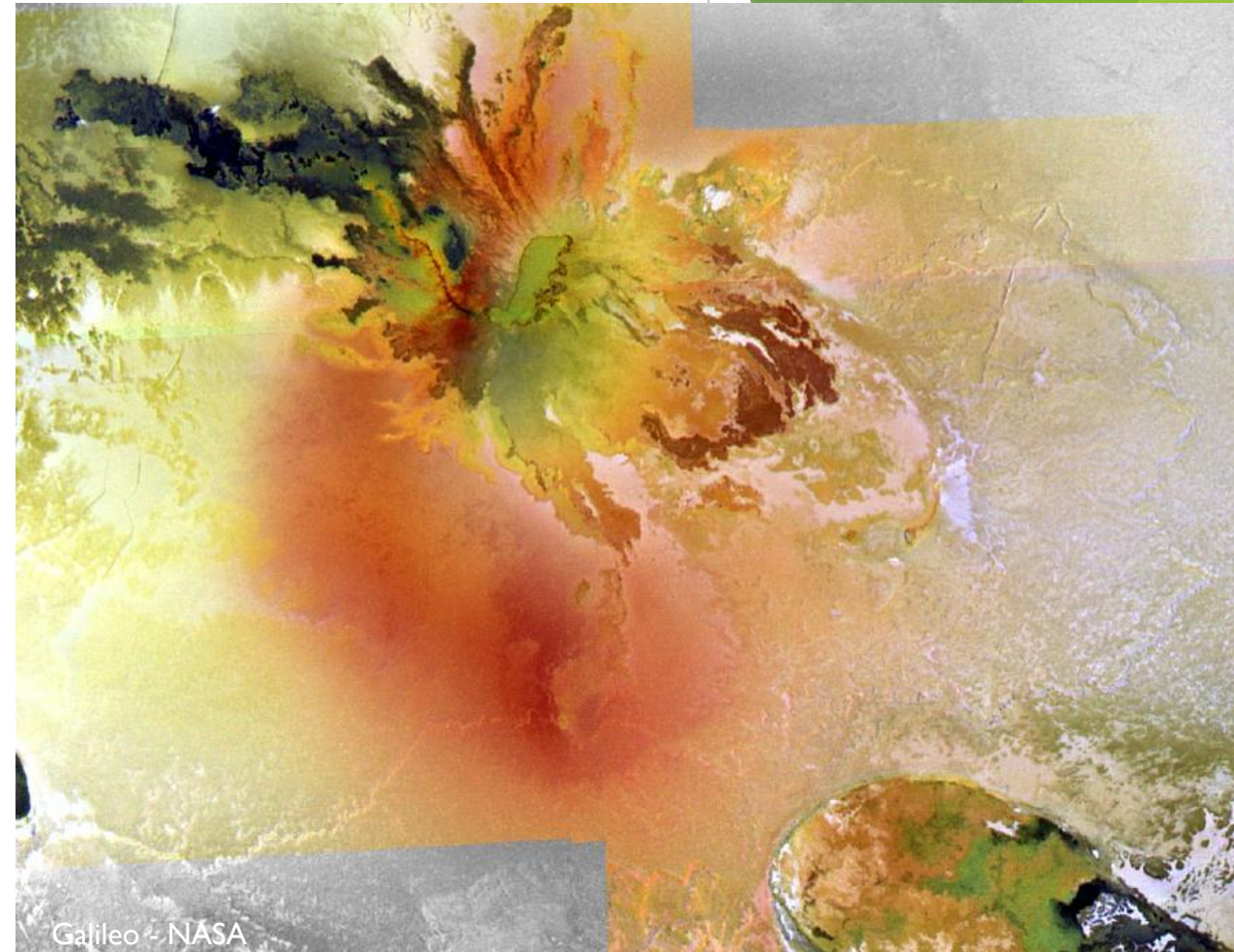
Endogenní procesy - Io - typy erupcí

- ▶ **Intra-patera erupce**

Něco jako pozemské kaldery - kolaps magmatické komory poté, co láva odteče

- ▶ **Erupce dominantní tečením**

Dlouhodobé erupce vytvářející velké lávové toky



Endogenní procesy - Io - typy erupcí

- ▶ **Intra-patera erupce**

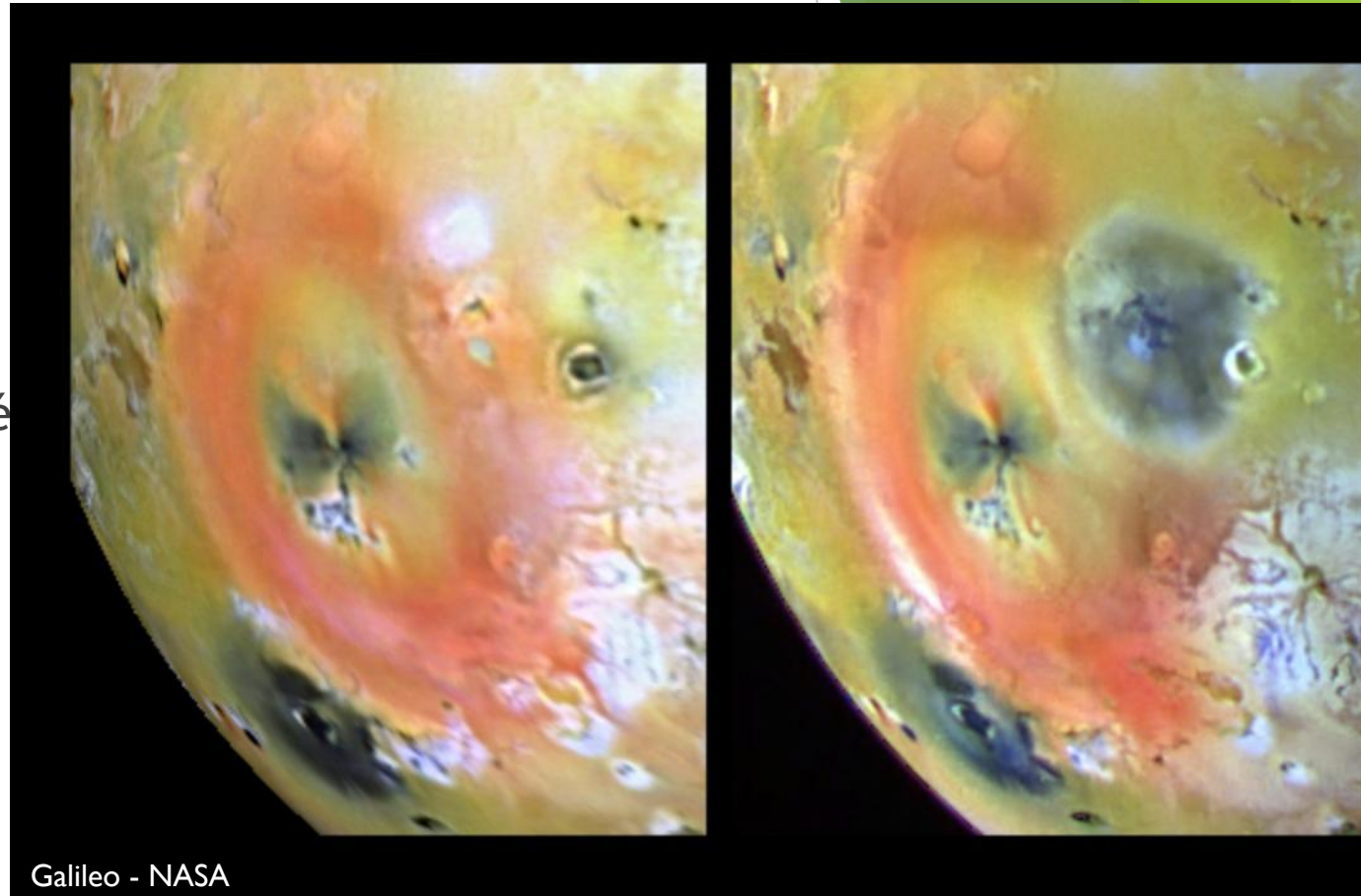
Něco jako pozemské kaldery - kolaps magmatické komory poté, co láva odteče

- ▶ **Erupce dominantní tečením**

Dlouhodobé erupce vytvářející velké lávové toky

- ▶ **Erupce dominantní explozemi**

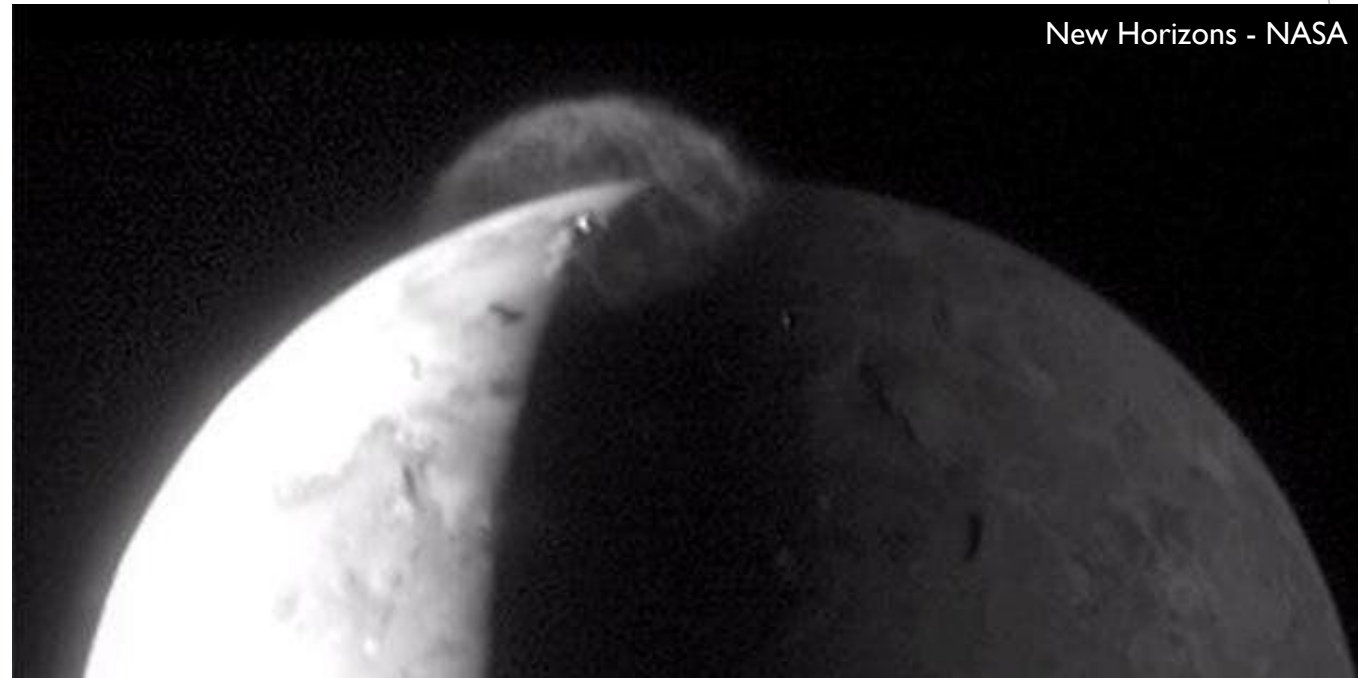
Nejhojnější. Krátkodobé, velké výbuchy s viditelnými chocholy a lávovými fontánami



Galileo - NASA

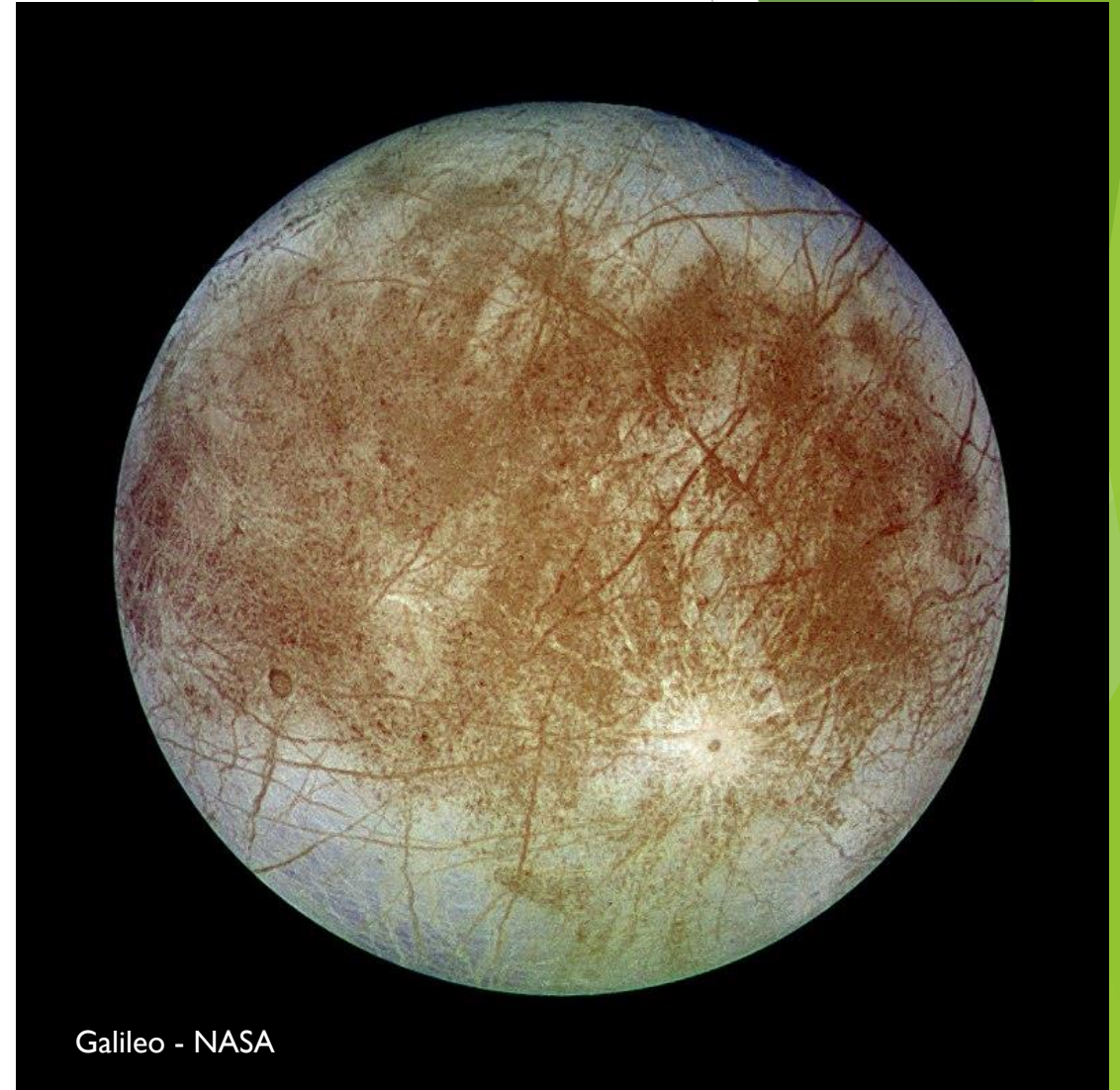
Endogenní procesy - Io

- ▶ Io ve zkratce - ráj vulkanologů a kartografů :-)



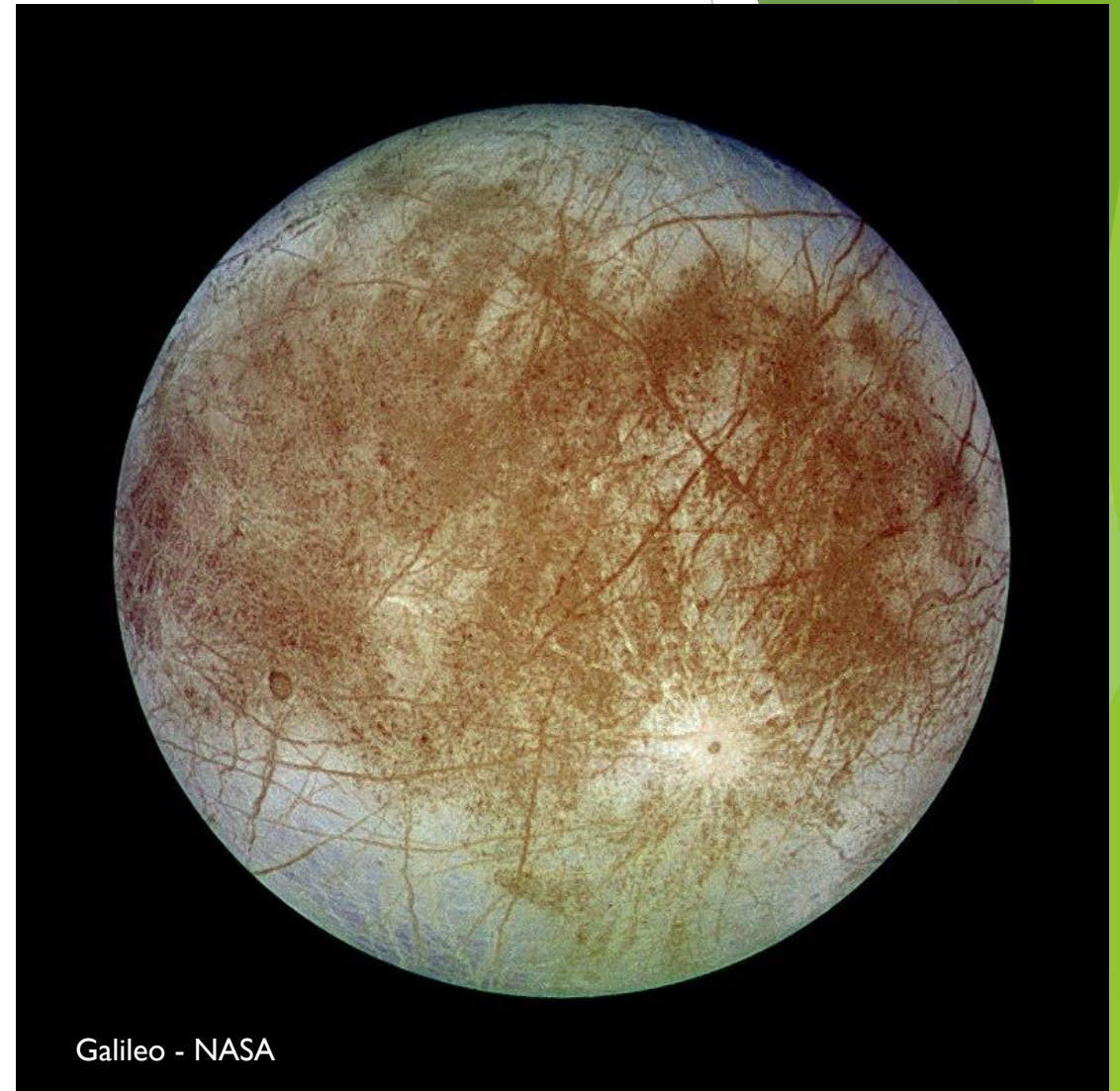
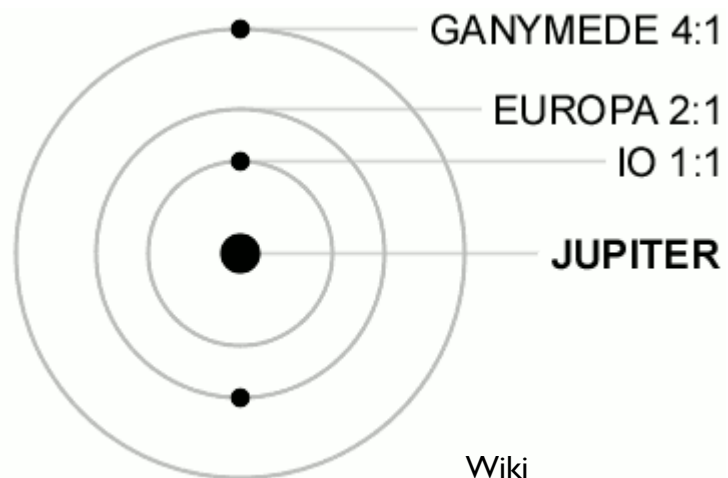
Endogenní procesy - Europa

- ▶ Není v současné době (asi?!) aktivní



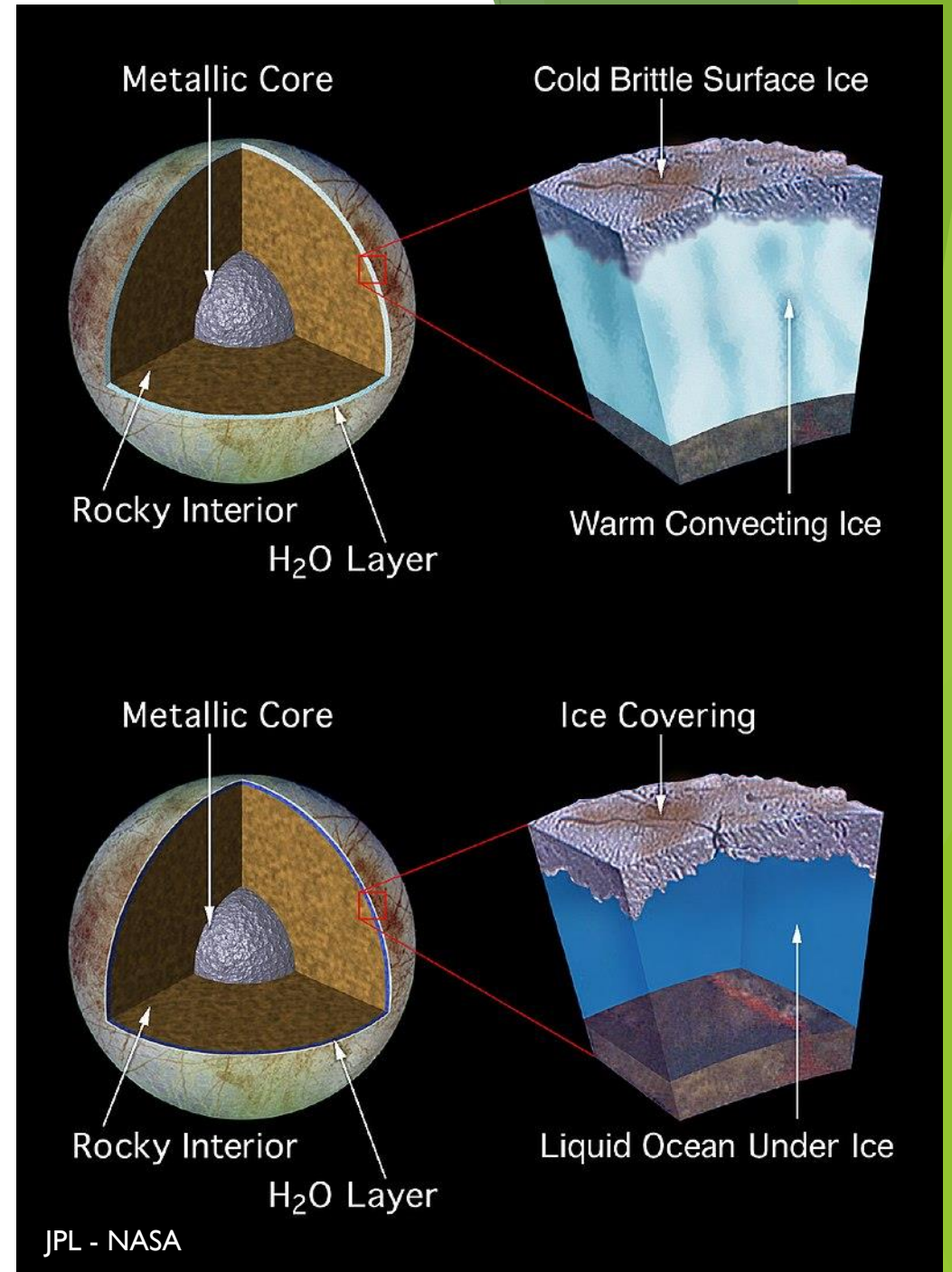
Endogenní procesy - Europa

- ▶ Není v současné době (asi?!) aktivní
- ▶ Slapové tření na 100% drží v tekutém stavu pod povrchový oceán slané vody!



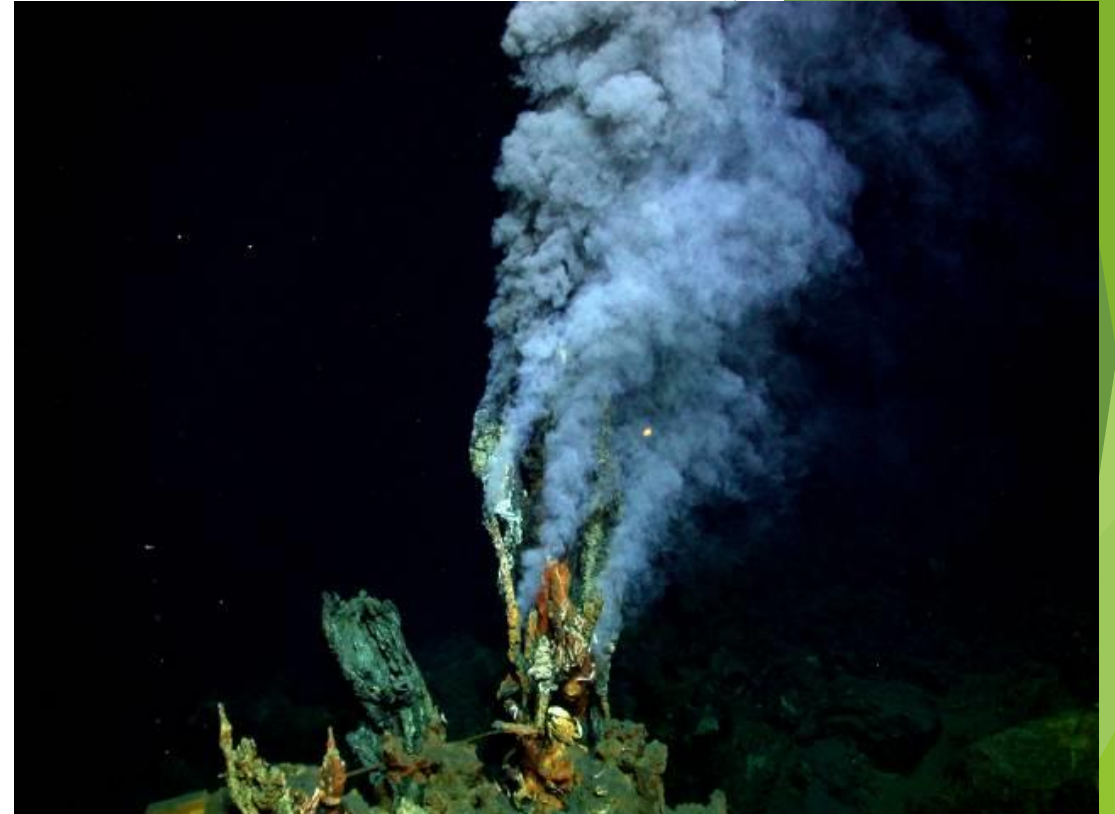
Endogenní procesy - Europa

- ▶ Není v současné době (asi?!) aktivní
- ▶ Slapové tření na 100% drží v tekutém stavu podpovrchový oceán slané vody!
- ▶ Důkaz - magnetický moment a povrchové tvary



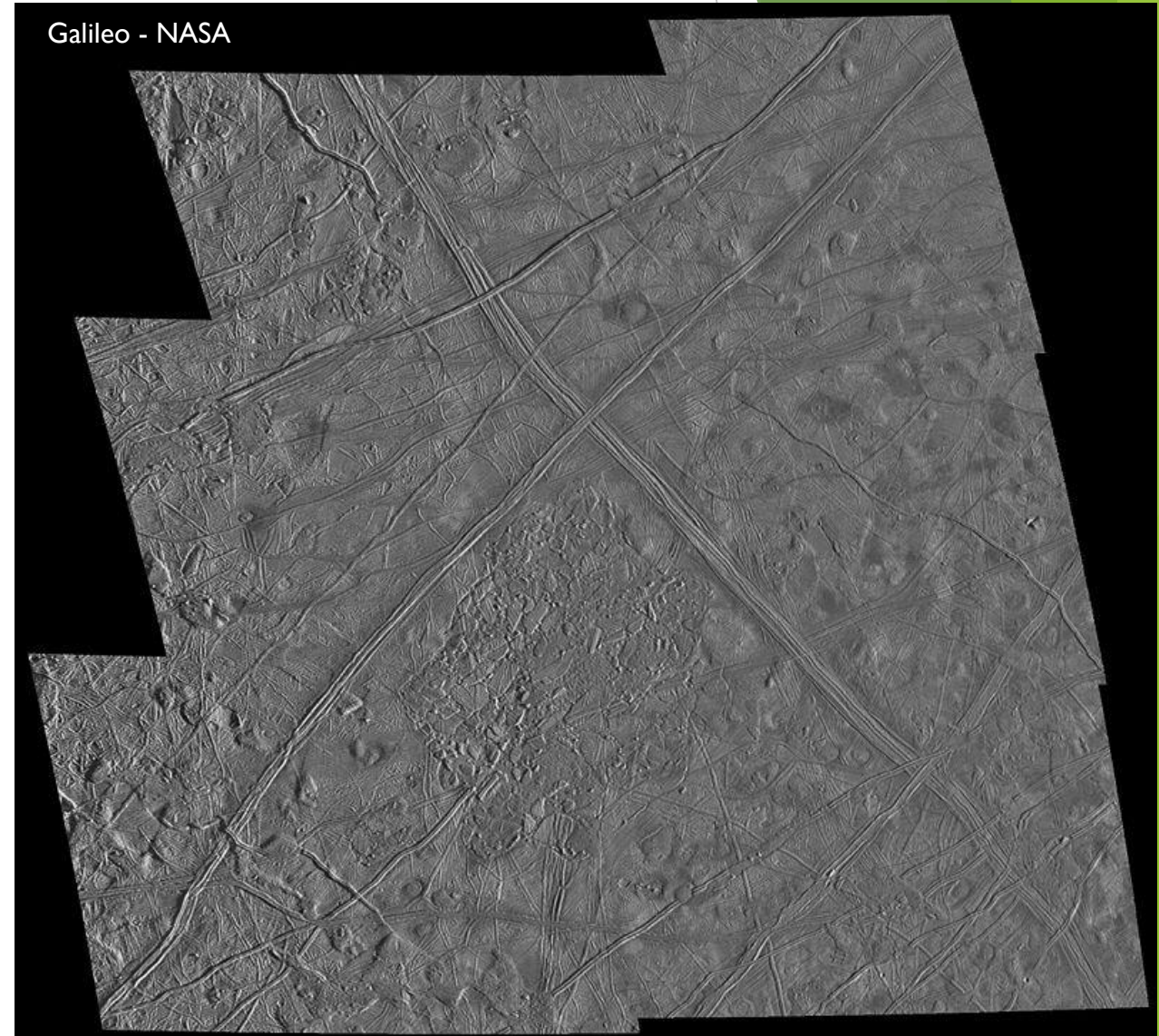
Endogenní procesy - Europa

- ▶ Není v současné době (asi?!) aktivní
- ▶ Slapové tření na 100% drží v tekutém stavu podpovrchový oceán slané vody!
- ▶ Důkaz - magnetický moment a povrchové tvary
- ▶ Jeden z nejžhavějších kandidátů na přítomnost mimozemského života!



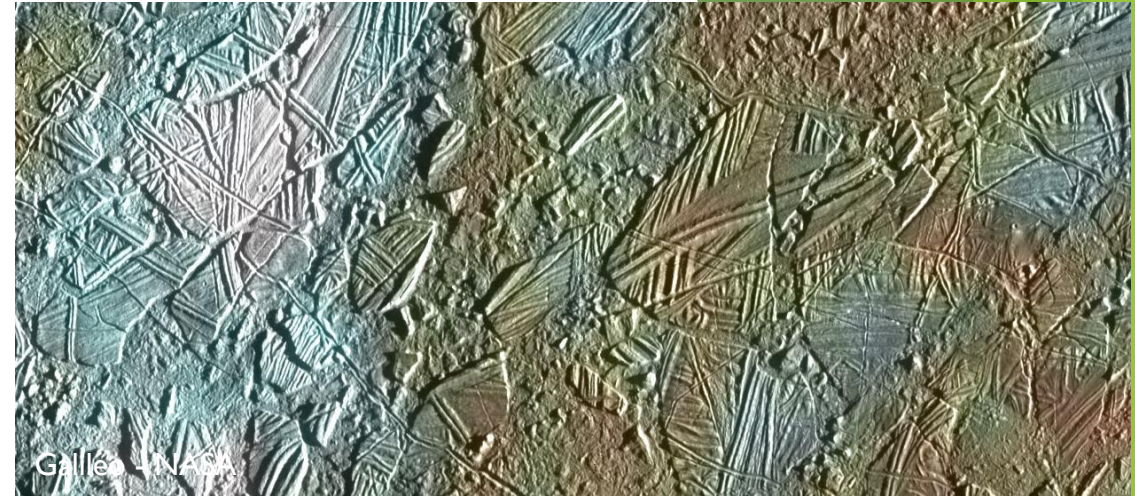
Endogenní procesy - Europa další povrchové tvary

- ▶ **Lineární praskliny** - výstupy teplejšího materiálu z nitra tělesa - možná podobně jako středooceánské hřbety na Zemi



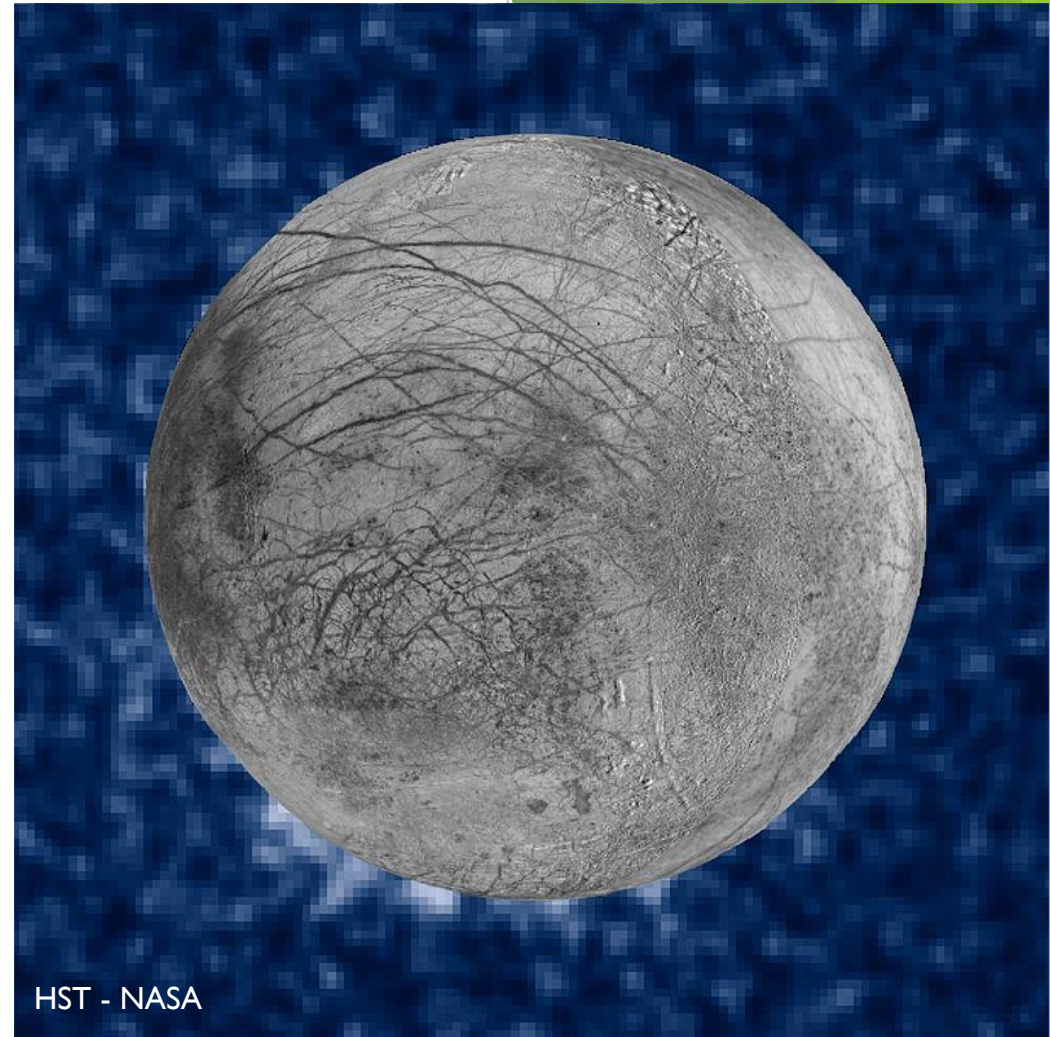
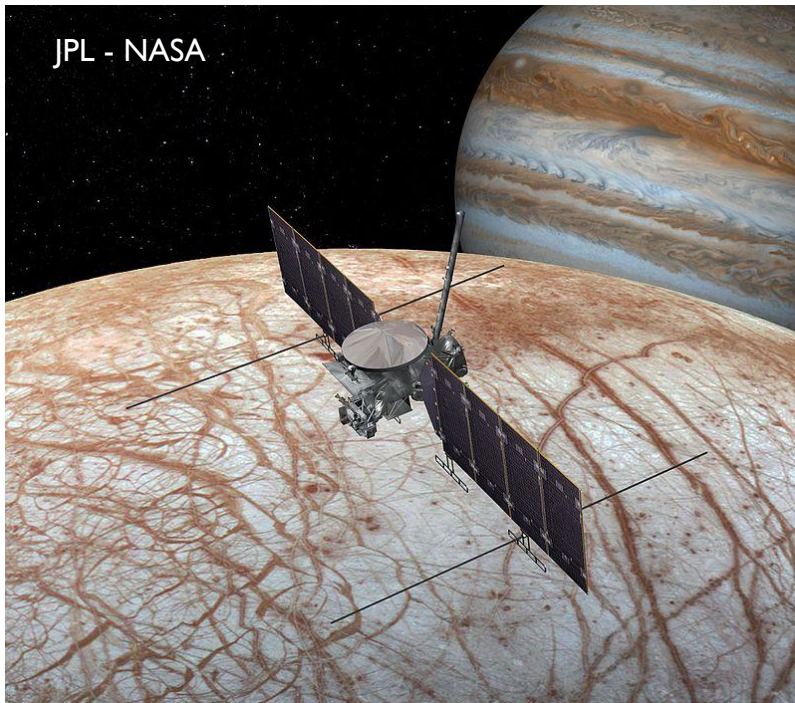
Endogenní procesy - Europa další povrchové tvary

- ▶ Lineární praskliny - výstupy teplejšího materiálu z nitra tělesa - možná podobně jako středooceánské hřbety na Zemi
- ▶ „Chaotické“ regiony a lentikuly - podobné magmatickým krbům na zemi - rozbití krusty a následné chaotické utuhnutí

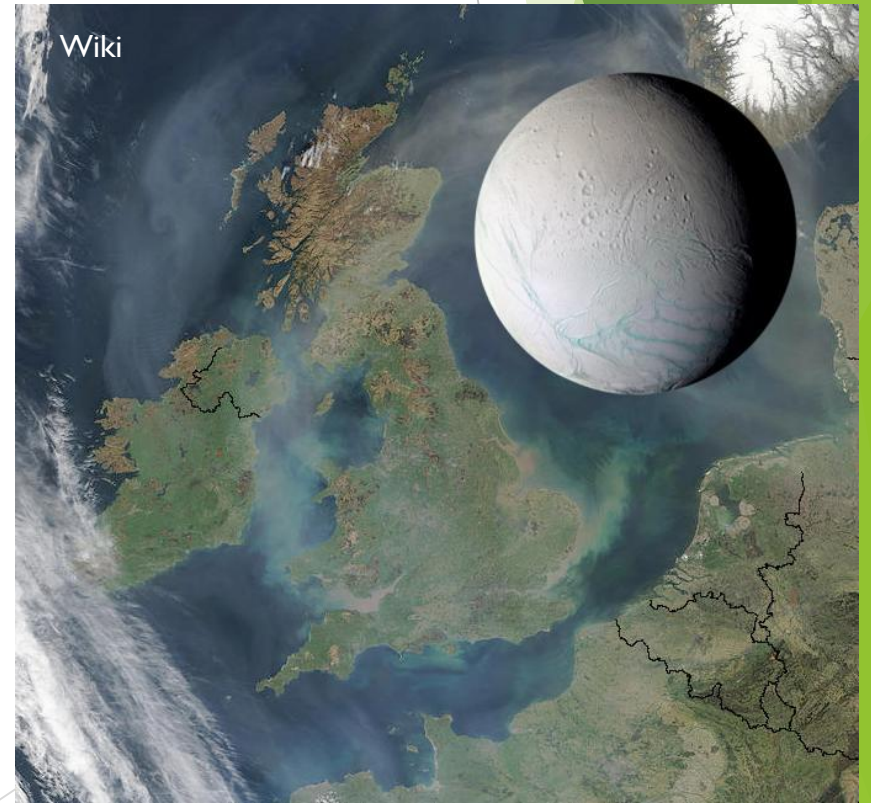
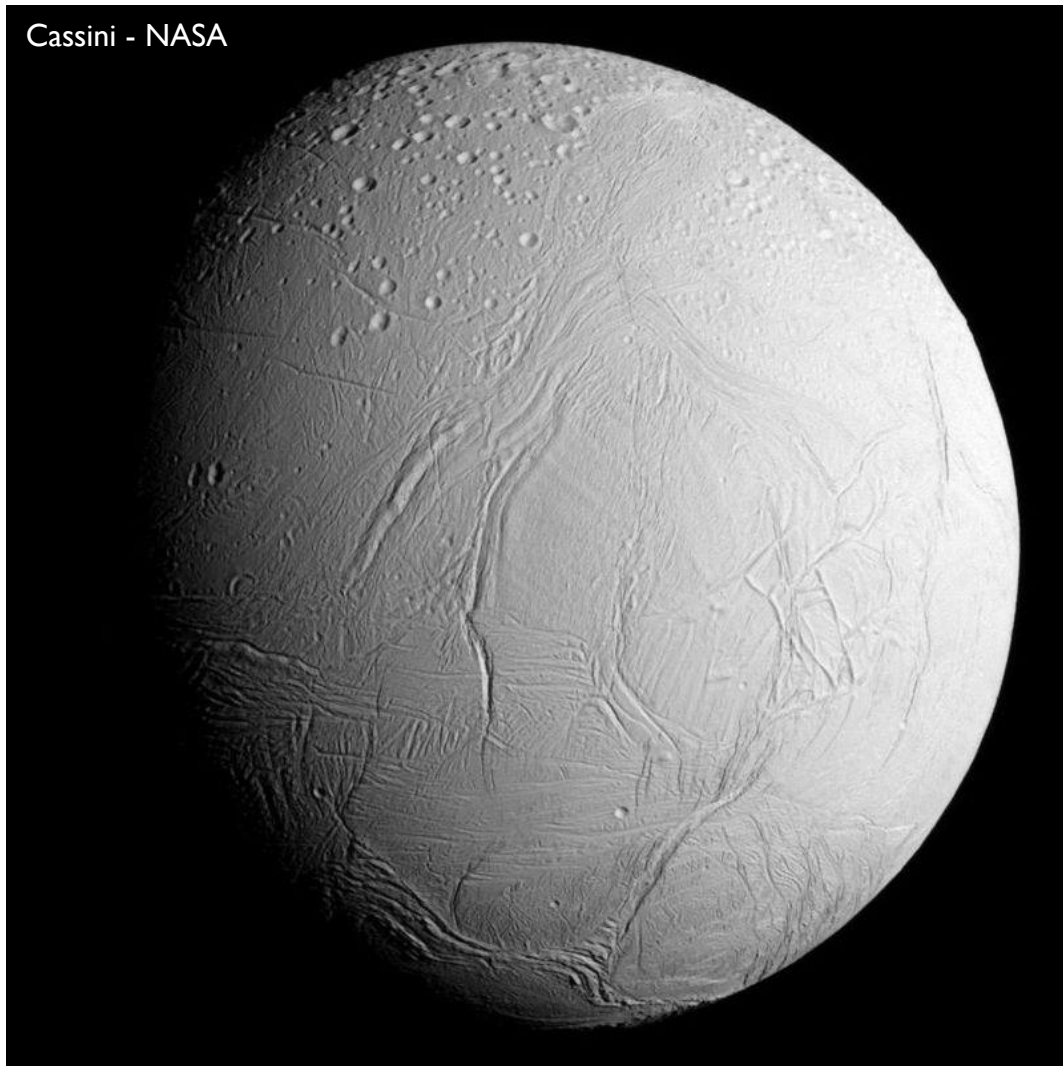


Endogenní procesy - Europa kryovulkanická aktivita?

- ▶ Galileo pozorovala zvláštní aktivitu
- ▶ HST - pozorování možného chocołu (jako na Io)

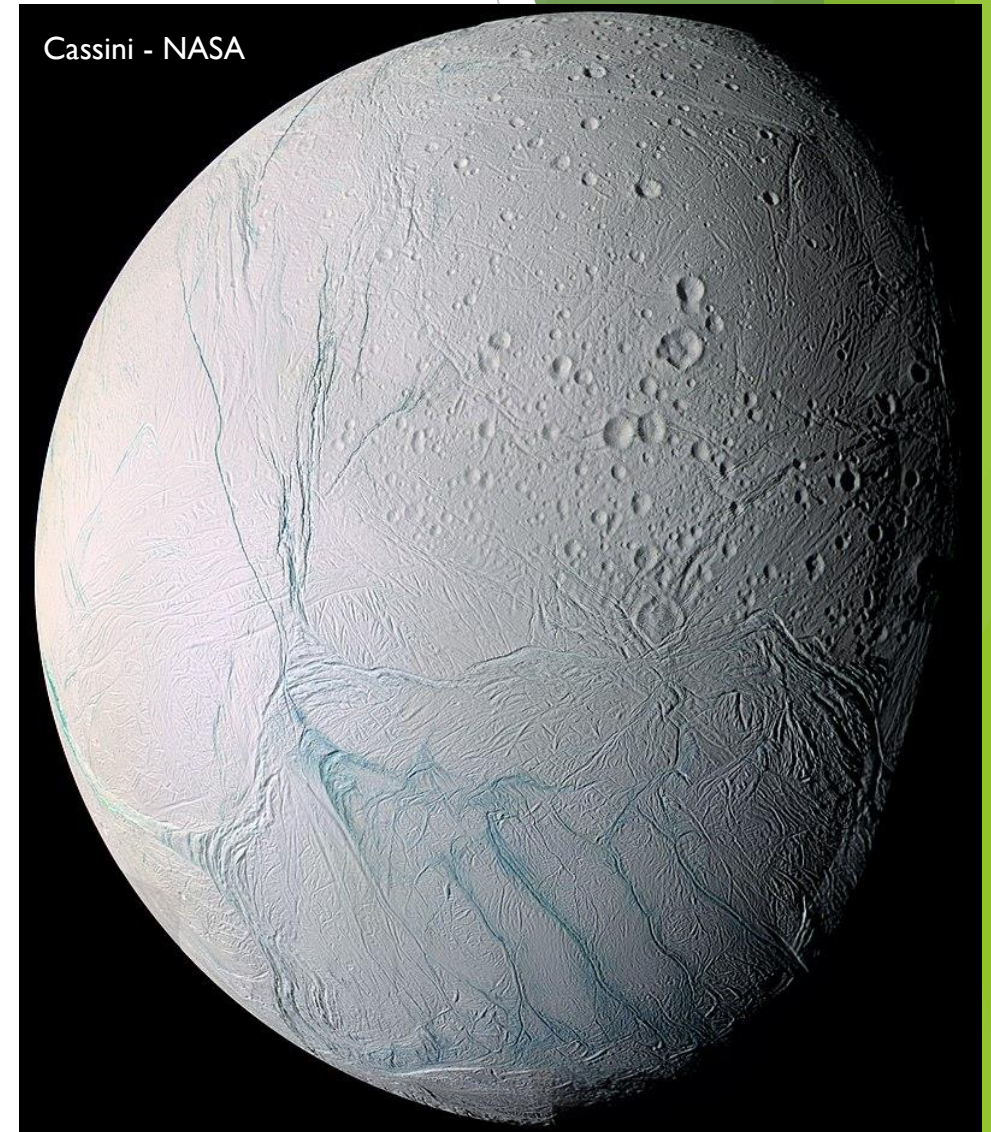


Endogenní procesy - Enceladus - kryovulkanismus



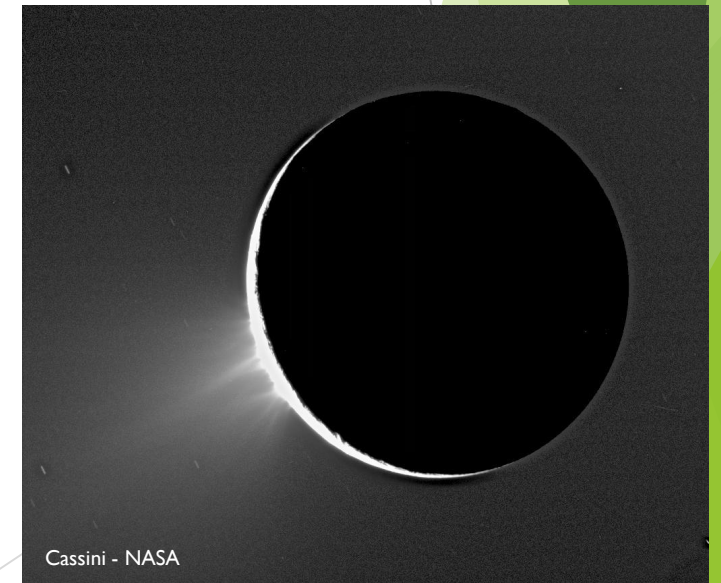
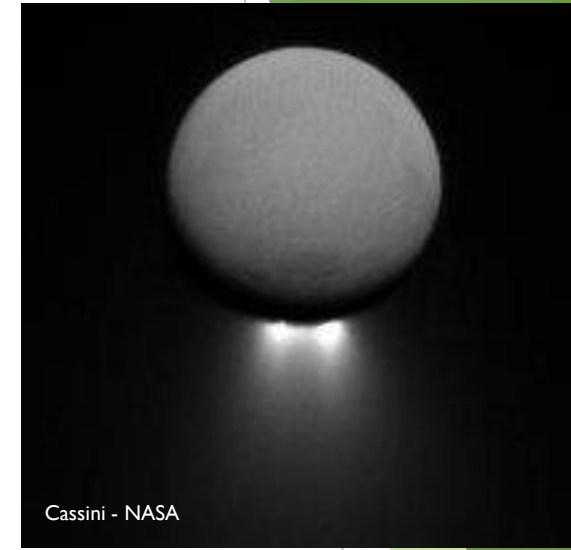
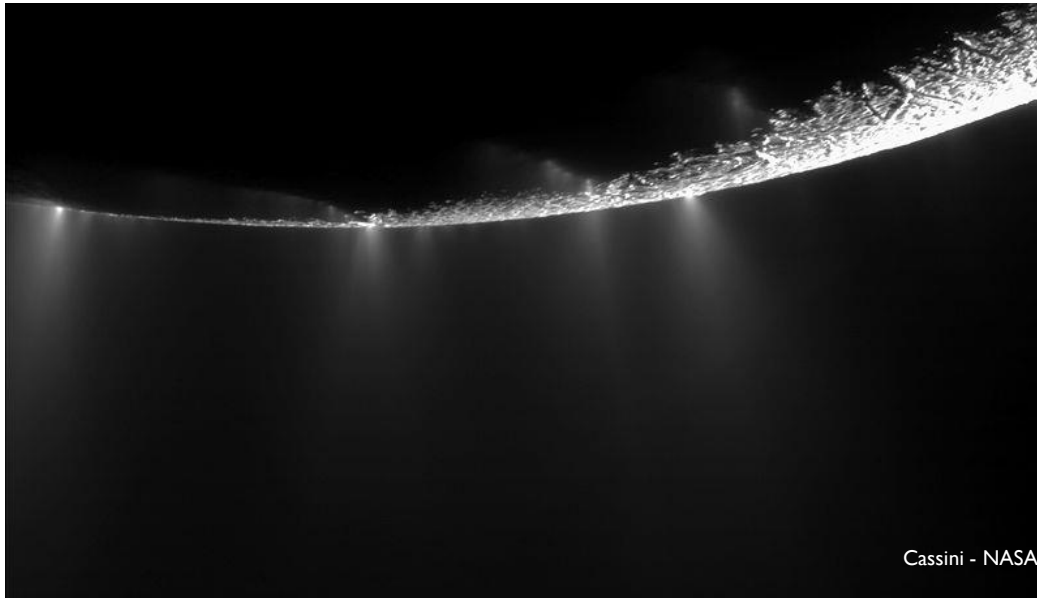
Endogenní procesy - Enceladus kryovulkanismus

- ▶ Potvrzená aktivita u „Tygřích pruhů“
- ▶ Pohon? Asi slapové tření, ale pořádně nevíme...



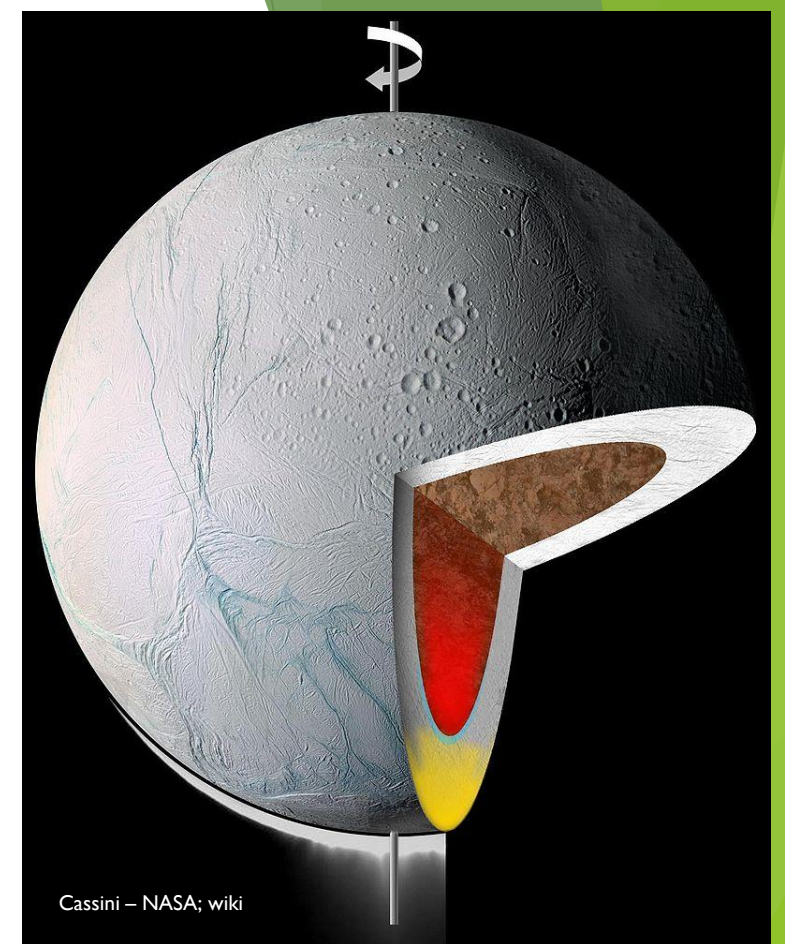
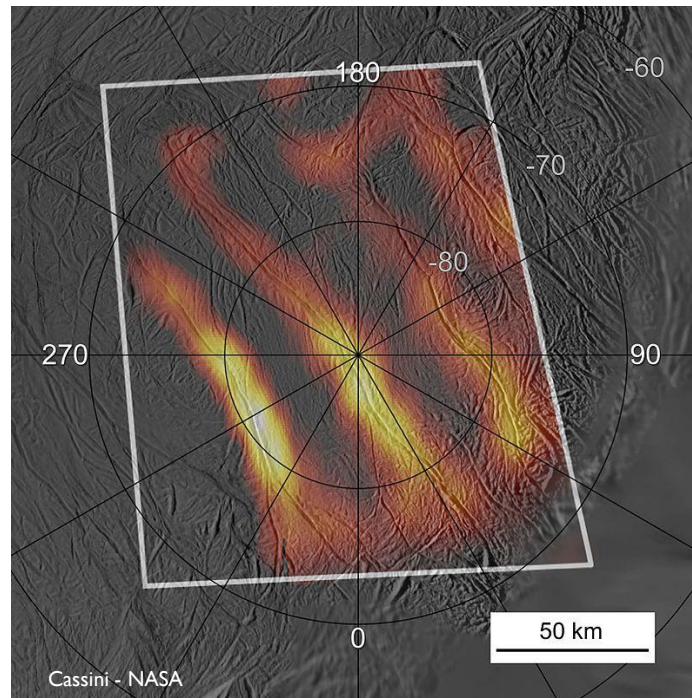
Endogenní procesy - Enceladus kryovulkanismus

- ▶ Potvrzená aktivita u „Tygřích pruhů“
- ▶ Pohon? Asi slapové tření, ale pořádně nevíme...



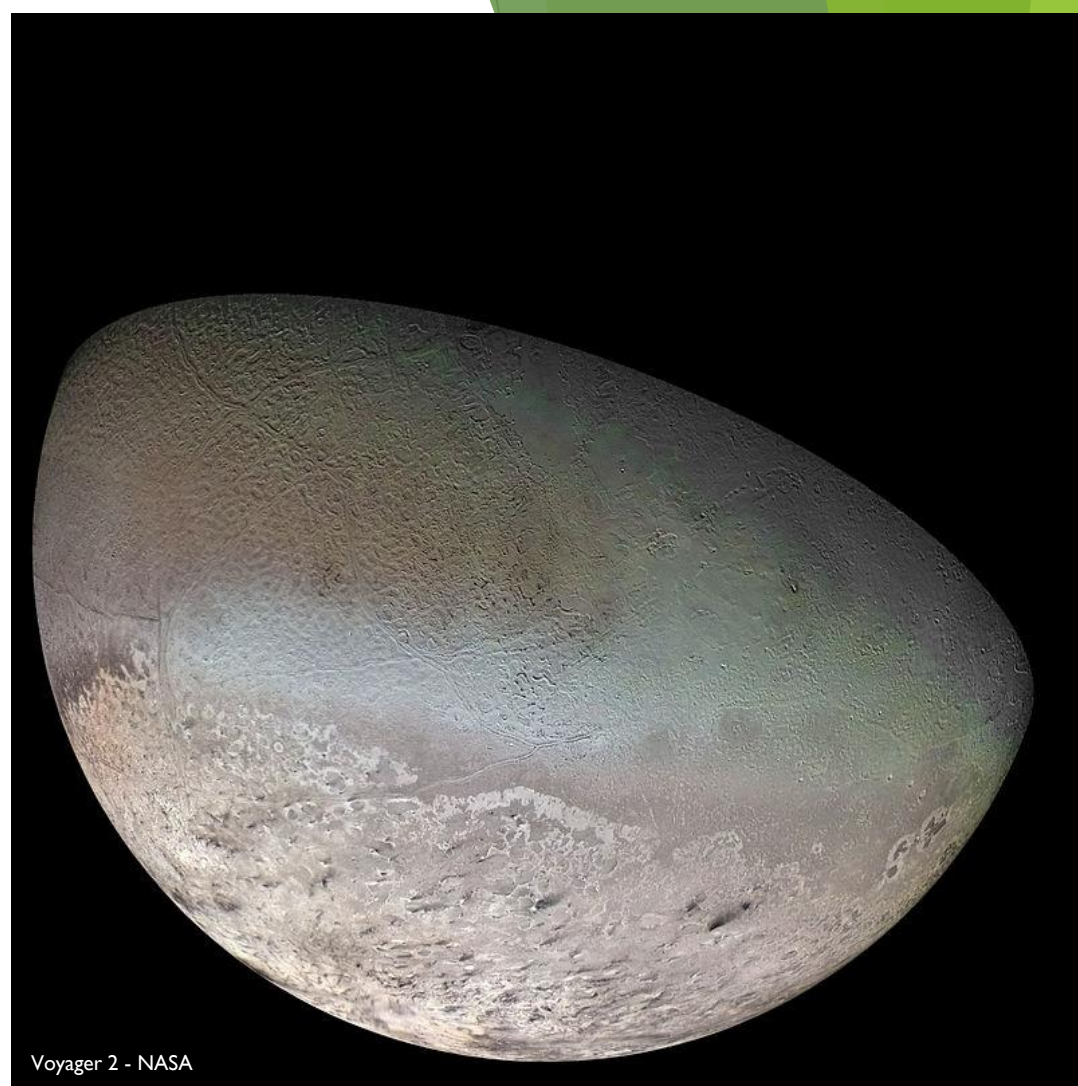
Endogenní procesy - Enceladus kryovulkanismus

- ▶ Potvrzená aktivita u „Tygrích pruhů“
- ▶ Pohon? Asi slapové tření, ale pořádně nevíme...



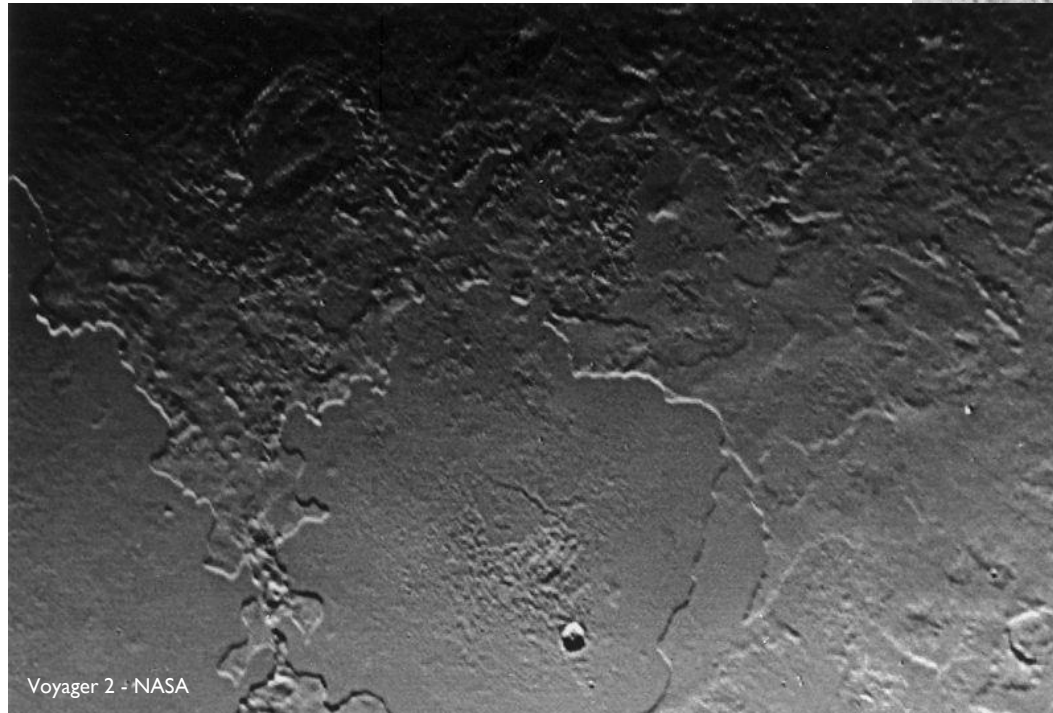
Endogenní procesy - Triton kryovulkanismus

- ▶ Měsíc Neptunu - pravděpodobně Neptunem zachycený KBO



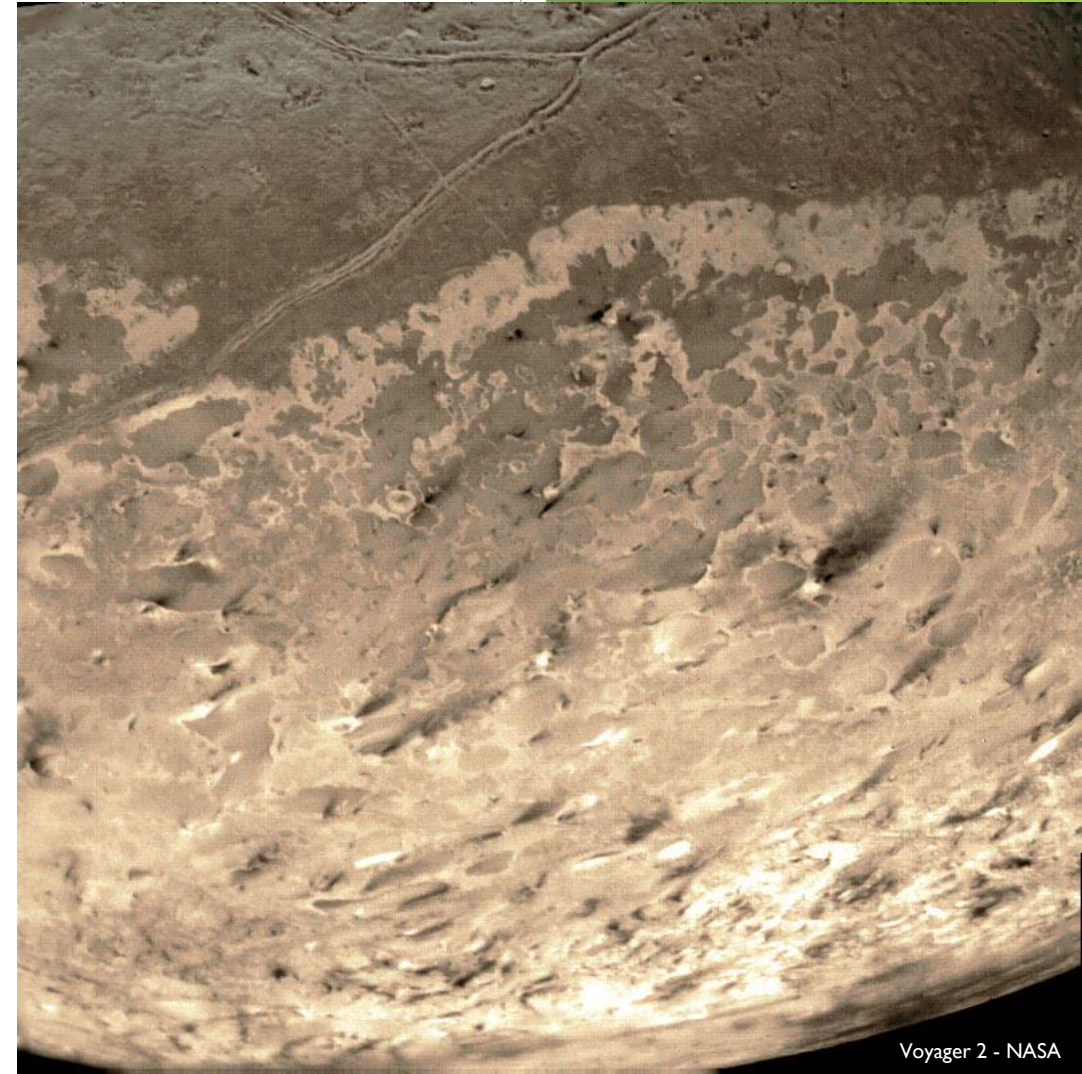
Endogenní procesy - Triton kryovulkanismus

- ▶ Měsíc Neptunu - pravděpodobně Neptunem zachycený KBO
- ▶ Minimum impaktních kráterů - povrch tvořen endogenně!



Endogenní procesy - Triton kryovulkanismus

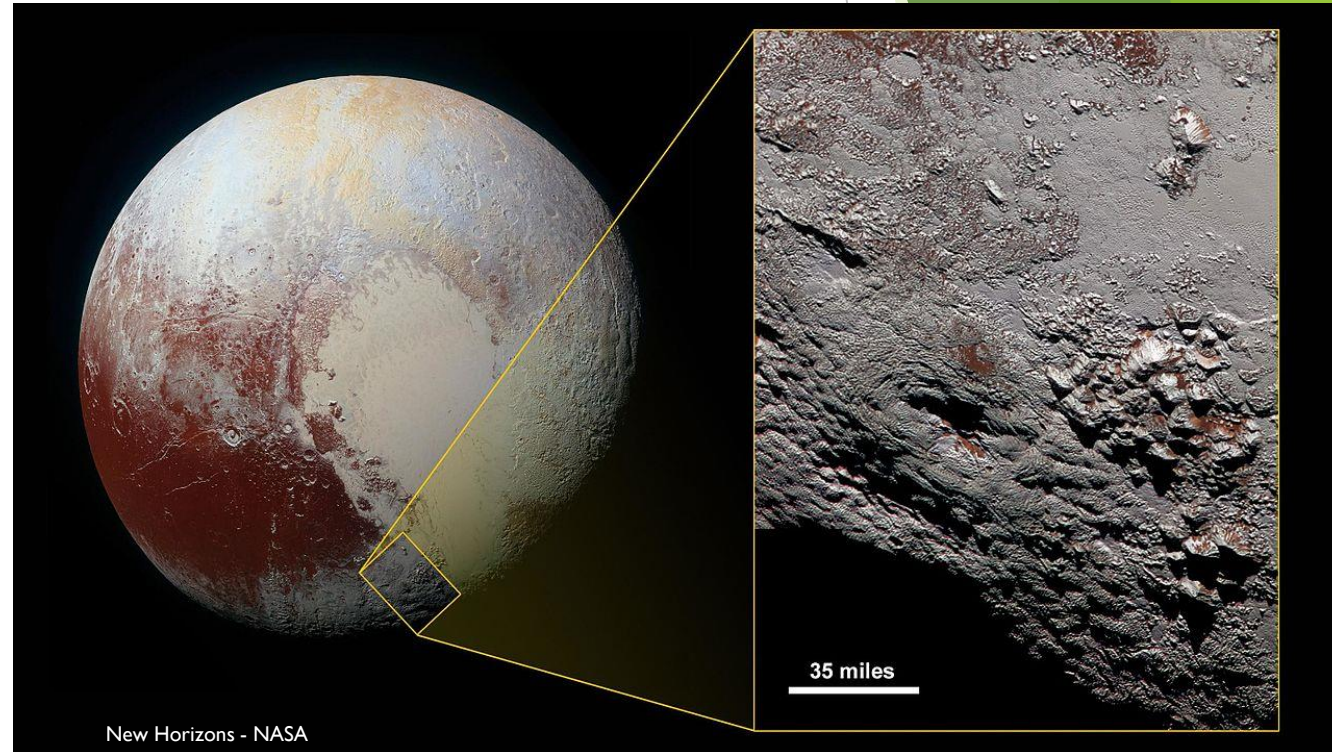
- ▶ Měsíc Neptunu - pravděpodobně Neptunem zachycený KBO
- ▶ Minimum impaktních kráterů - povrch tvořen endogenně!
- ▶ Kryovulkanismus v extrémně nízkých teplotách



Voyager 2 - NASA

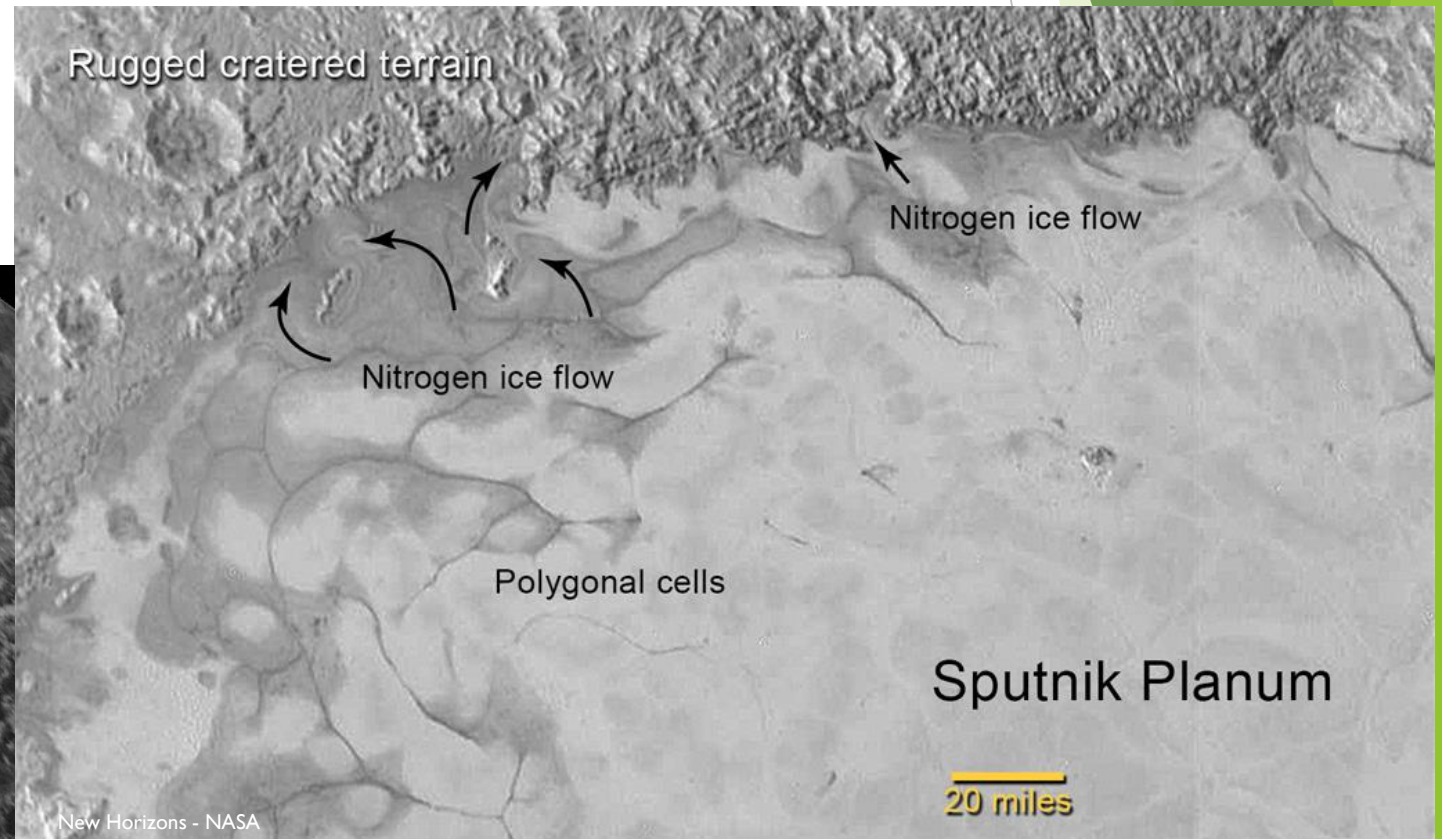
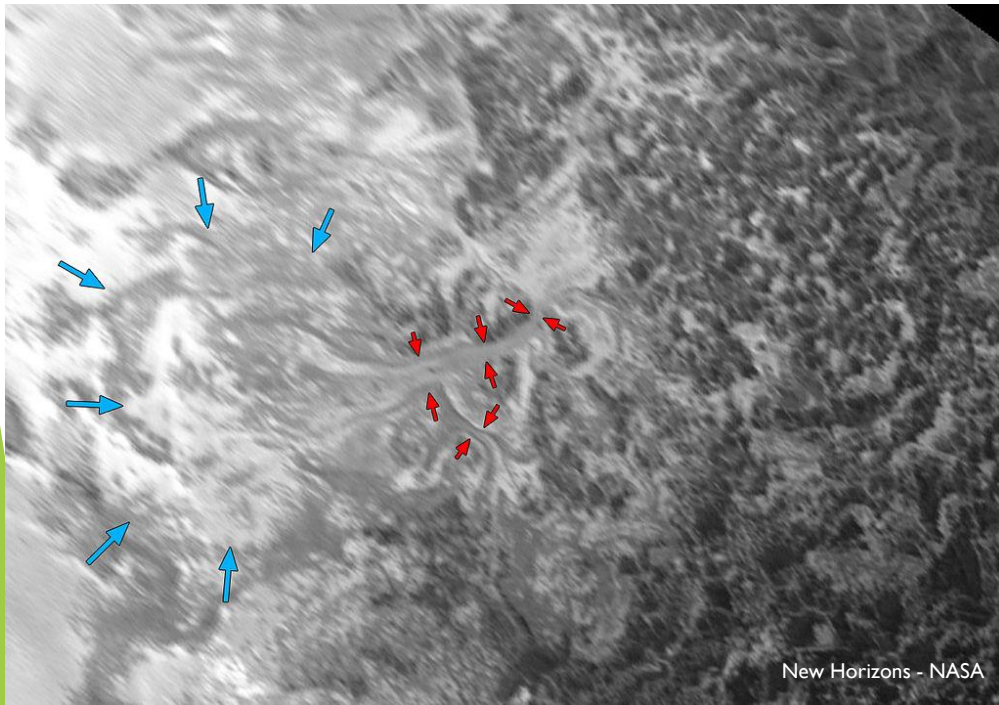
Endogenní procesy - Pluto možný kryovulkanismus?

- ▶ Některá místa na Plutu vypadají jako kryovulkány (obrovské!)



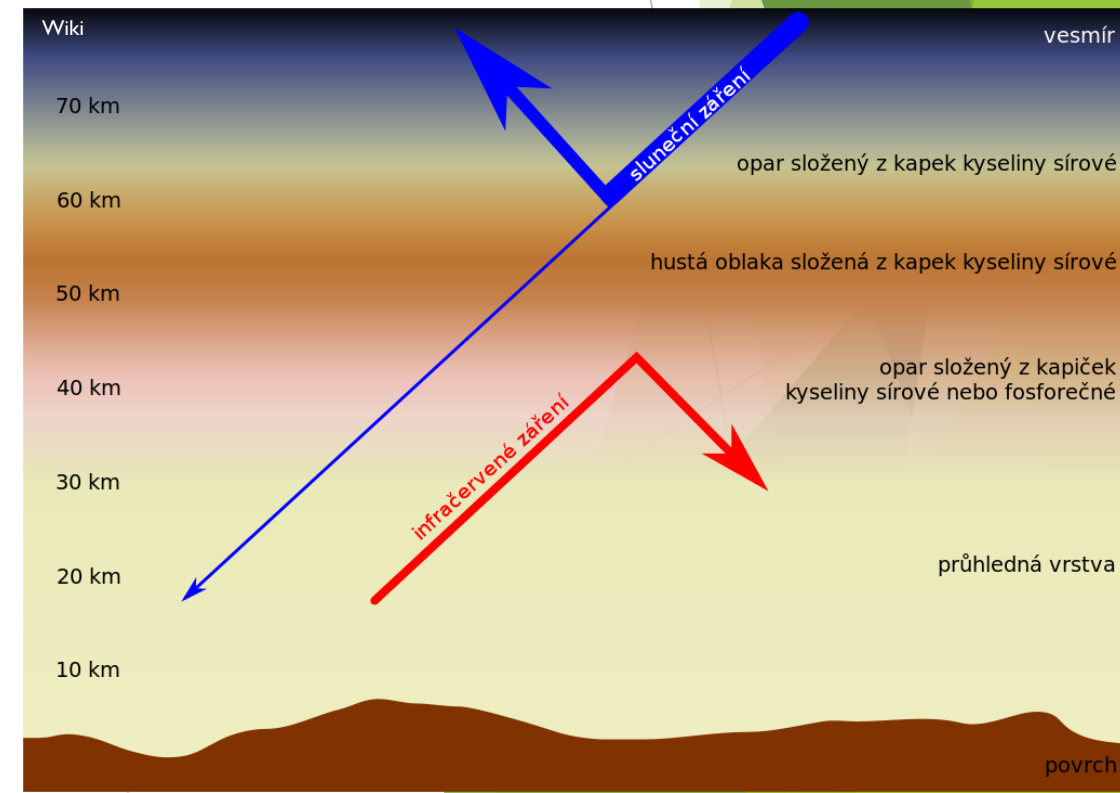
Endogenní procesy - Pluto možný kryovulkanismus?

- ▶ Některá místa na Plutu vypadají jako kryovulkány (obrovské!)
- ▶ Přítomnost tekoucích ledovců - není to cool? :-)



Exogenní procesy - atmosféry Venuše

- ▶ **Venuše** - nejhustější atmosféra ve sluneční soustavě (90x Země)
- ▶ Brutální skleníkový efekt - $\sim 475^{\circ}\text{C}$ (96,5 % CO_2)
- ▶ Vznik? - odplynění během vulkanických epizod
- ▶ Vliv na povrch - tvorba zvláštních vulkanických struktur (vliv tlaku na chladnutí)



Exogenní procesy - atmosféry Venuše

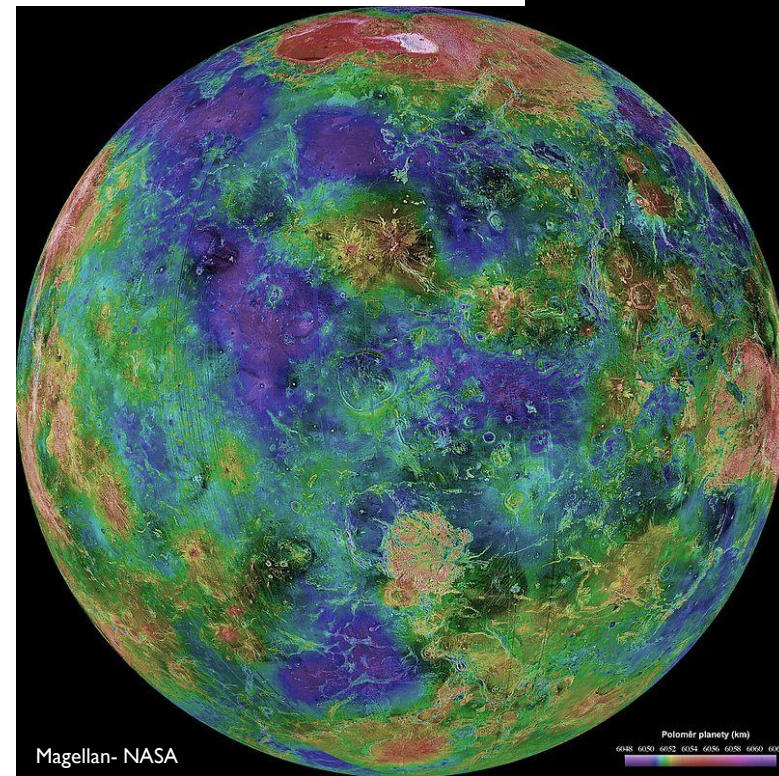
- ▶ **Venuše** - nejhustější atmosféra ve sluneční soustavě (90x Země)
- ▶ Brutální skleníkový efekt - $\sim 475^{\circ}\text{C}$
- ▶ Vznik? - odplynění během vulkanických epizod

- ▶ Vliv na povrch - tvorba zvláštních vulkanických struktur (vliv tlaku na chladnutí)

- ▶ Problematika studia povrchu - pouze pomocí radaru



Mariner 10 - NASA

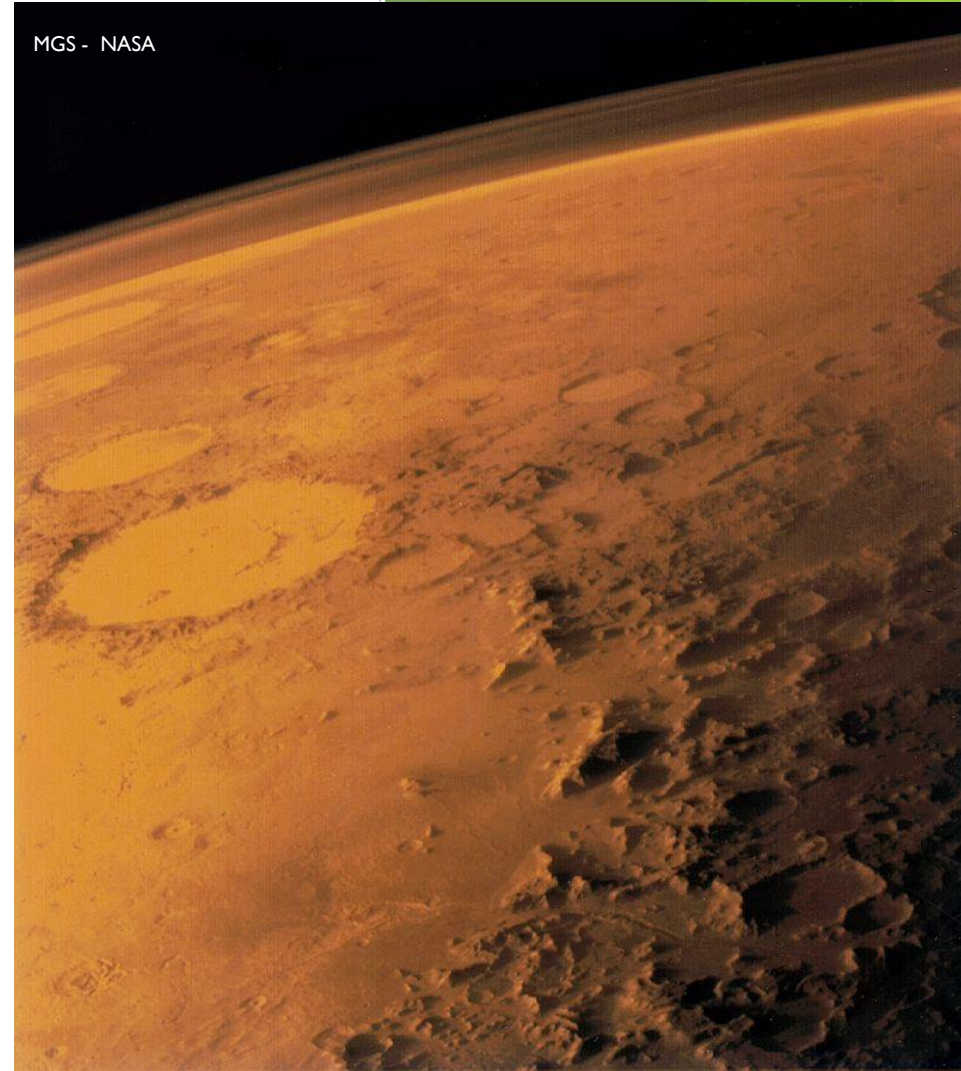


Magellan- NASA

Poloměr planety (km)
6038 6050 6062 6074 6086 6098 6100 6102

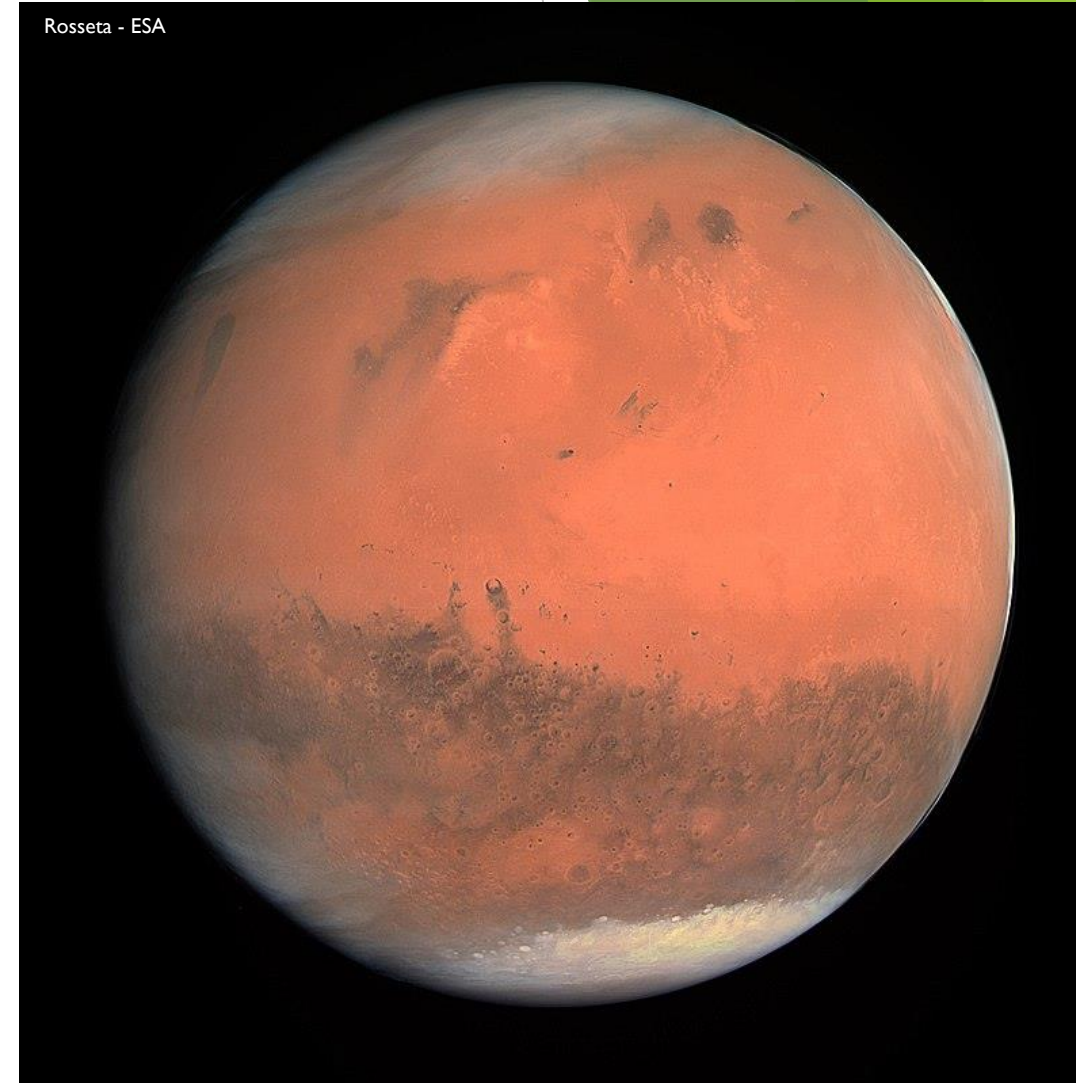
Exogenní procesy - atmosféry Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)



Exogenní procesy - atmosféry Mars

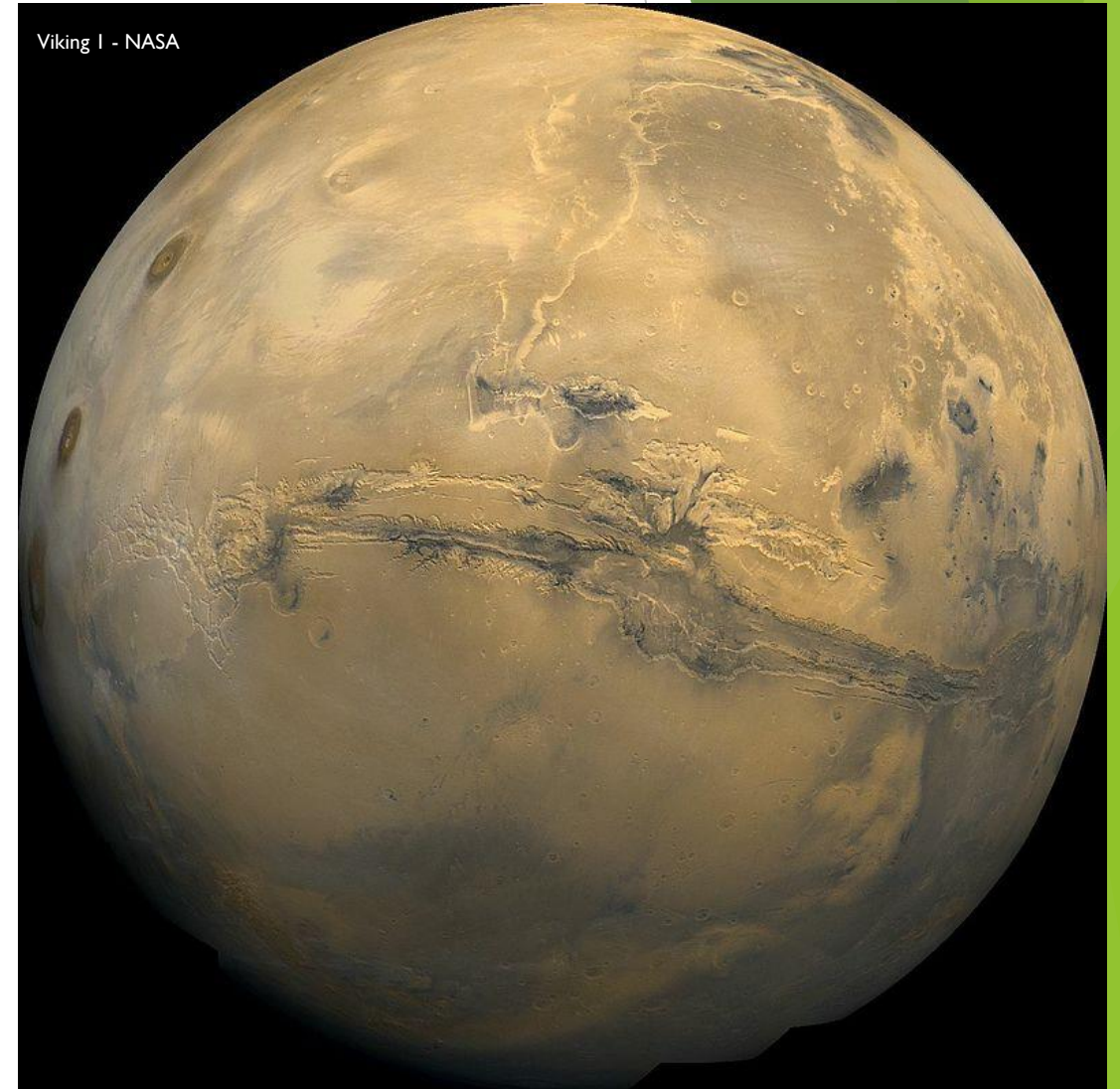
- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂



Exogenní procesy - atmosféry

Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂
- ▶ Voda v minulosti - bezpochyby



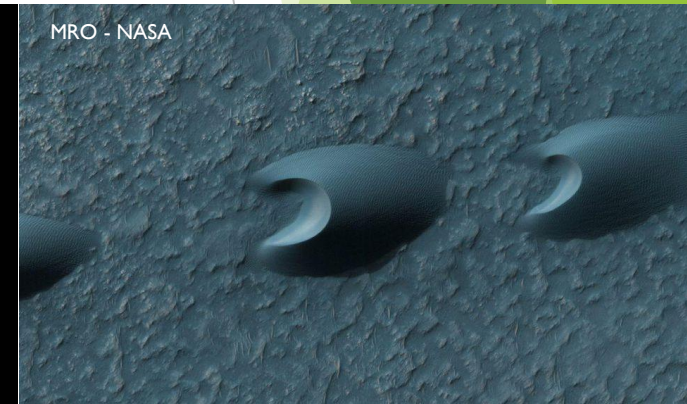
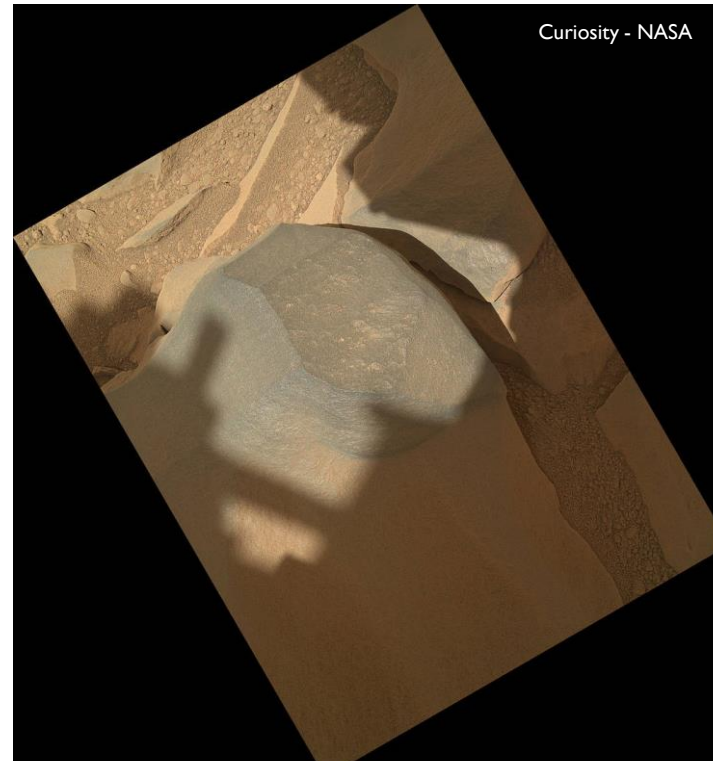
Exogenní procesy - atmosféry Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂
- ▶ Voda v minulosti - bezpochyby



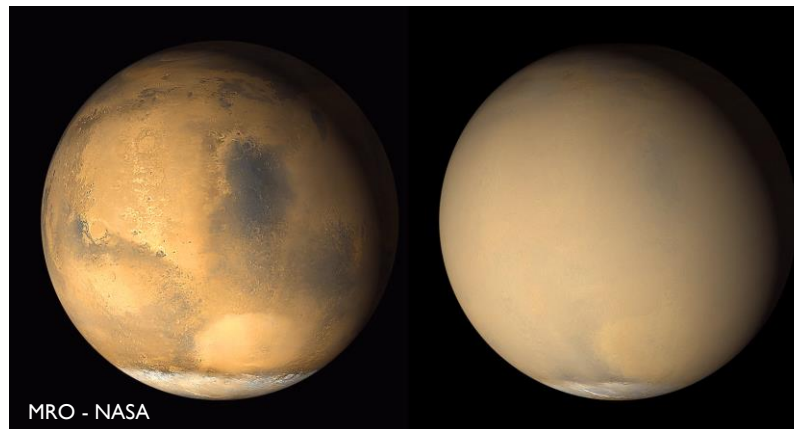
Exogenní procesy - atmosféry Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂
- ▶ Voda v minulosti - bezpochyby
- ▶ Eolické tvary - hojné! Duny, hrance, ...



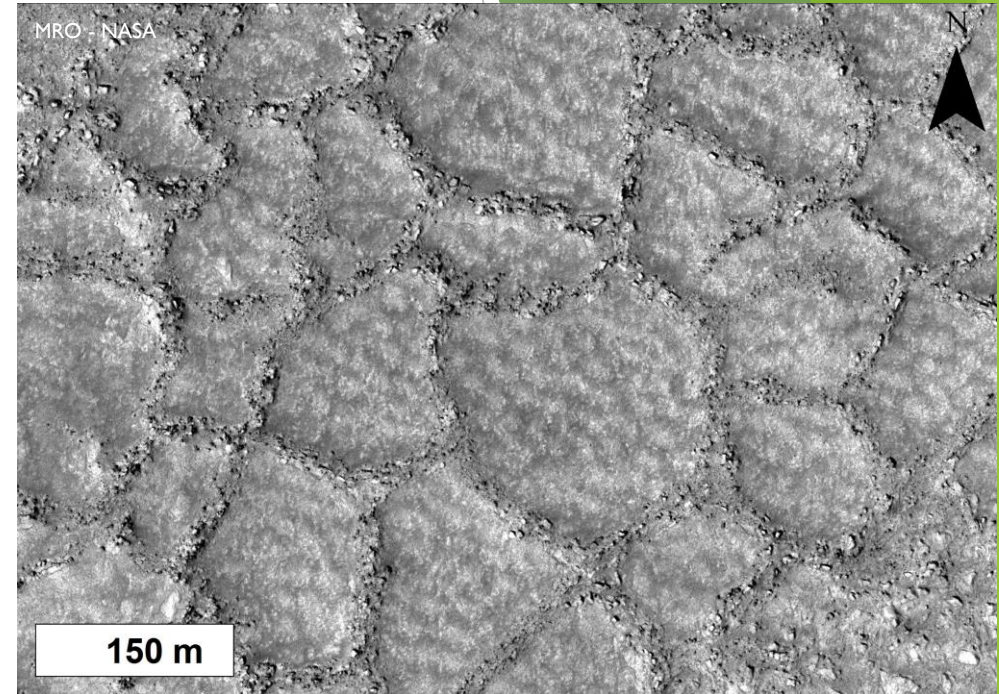
Exogenní procesy - atmosféry Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂
- ▶ Voda v minulosti - bezpochyby
- ▶ Eolické tvary - hojné! Duny, hrance, ...
- ▶ „Dust devils“ a prachové bouře



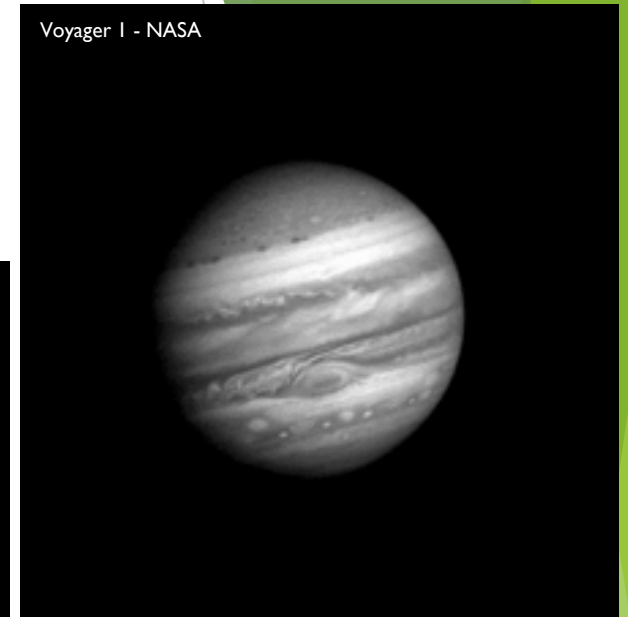
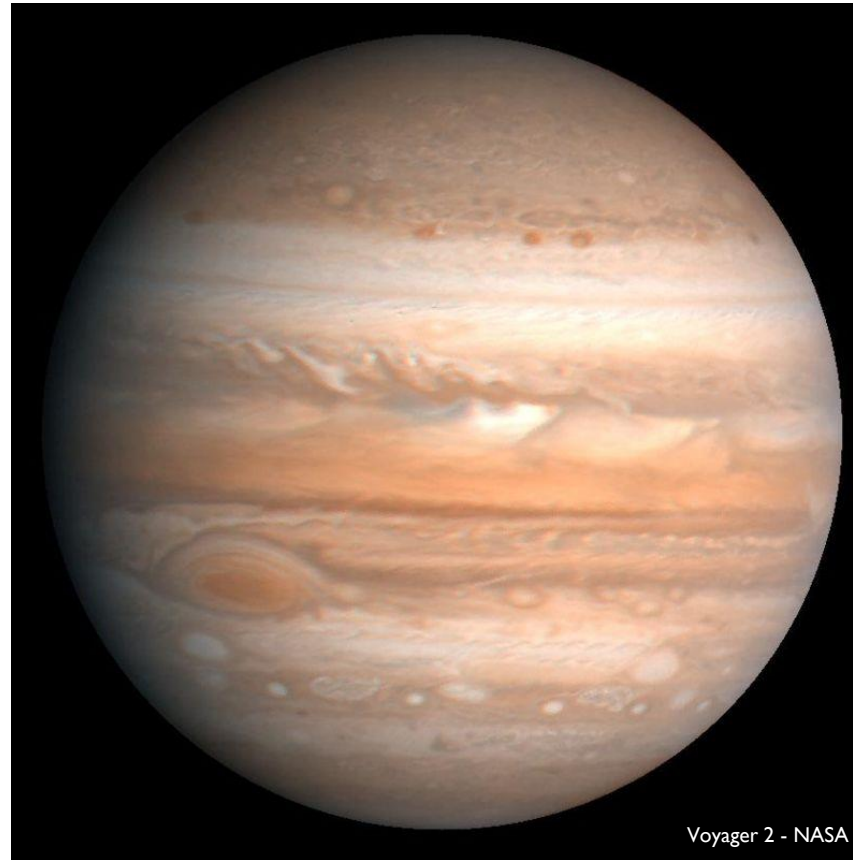
Exogenní procesy - atmosféry Mars

- ▶ Mars - 100-150x menší tlak než na Zemi
- ▶ 96 % CO₂
- ▶ Nízký tlak - voda nemůže být v tekuté podobě (led nebo vodní pára)
- ▶ Tvorba polárních čepiček z CO₂
- ▶ Voda v minulosti - bezpochyby
- ▶ Eolické tvary - hojné! Duny, hrance, ...
- ▶ „Dust devils“ a prachové bouře
- ▶ Periglaciální tvary!



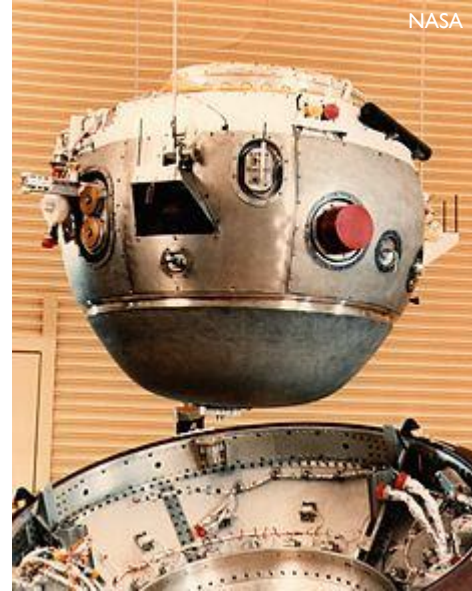
Exogenní procesy - atmosféry Jupiter

- ▶ **Jupiter** - není pevný povrch
- ▶ Složením podobná, jako Slunce
- ▶ Rychlá rotace
- ▶ Velké bouře



Exogenní procesy - atmosféry Jupiter

- ▶ **Jupiter** - není pevný povrch
- ▶ Složením podobná, jako Slunce
- ▶ Rychlá rotace
- ▶ Velké bouře
- ▶ Přímý průzkum pomocí atmosférické sondy Galileo



Exogenní procesy - atmosféry Jupiter

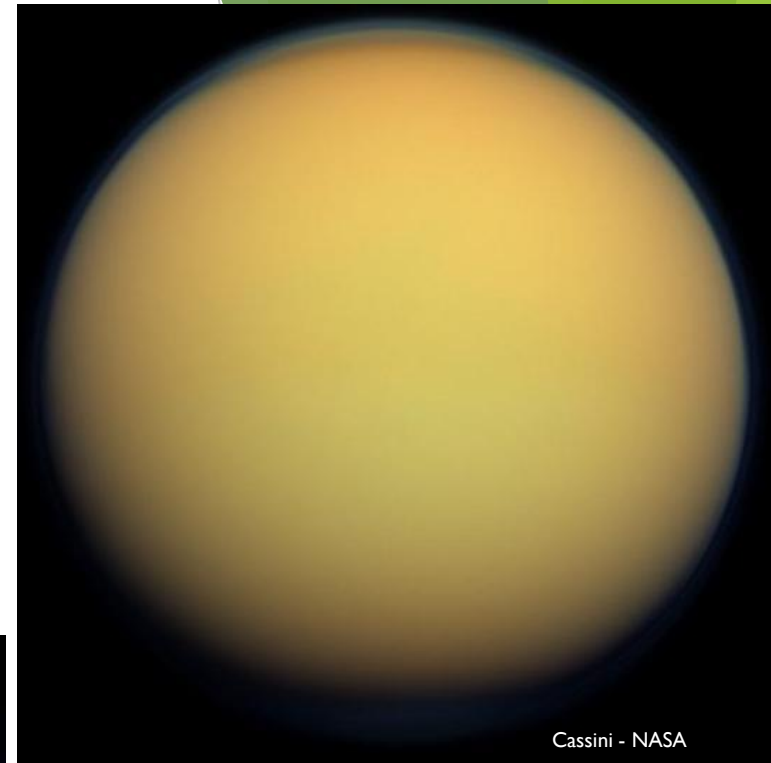
- ▶ Možný život v atmosféře Jupiteru?



Exogenní procesy - atmosféry Titan

- ▶ Titan - o polovinu větší, než náš Měsíc
- ▶ 1,5x hustější atmosféra, než na Zemi!
- ▶ Složení: Dusík (98 %) a uhlovodíky

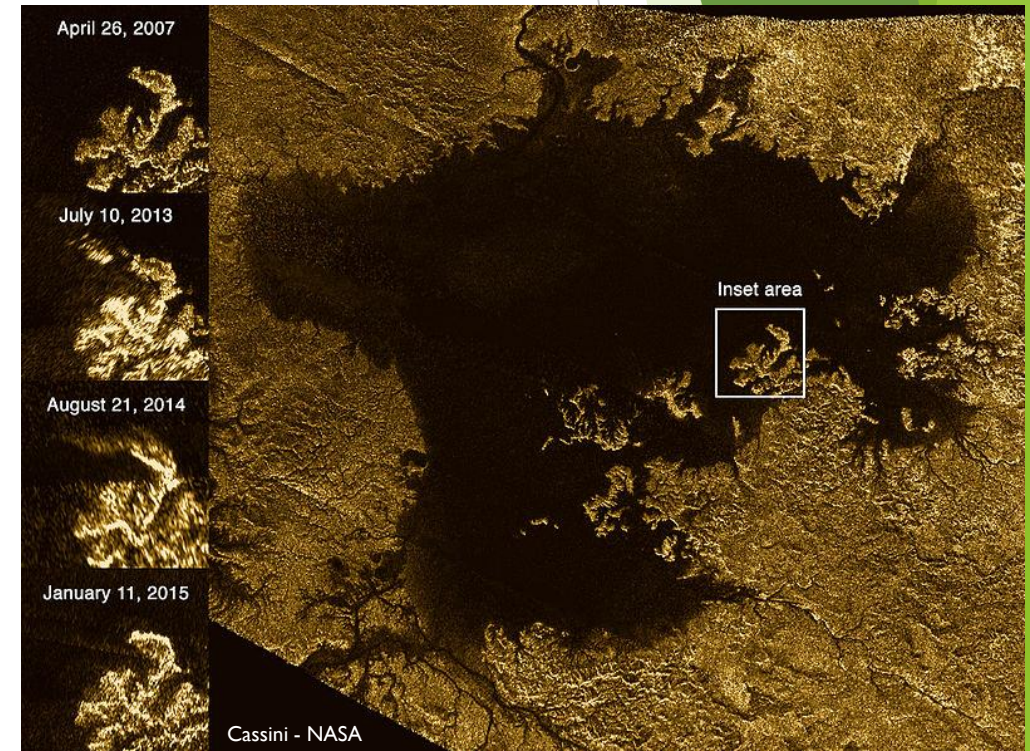
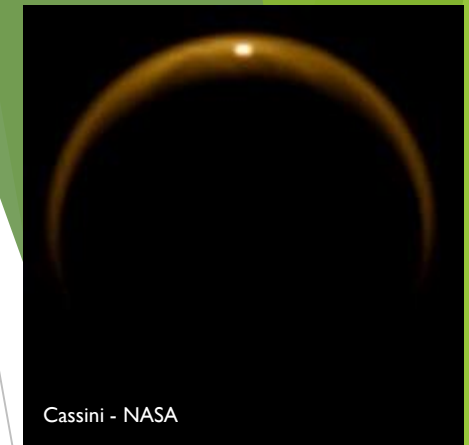
- ▶ Atmosféra neprůhledná - studium povrchu pomocí radaru



Exogenní procesy - atmosféry Titan

- ▶ Titan - o polovinu větší, než náš Měsíc
- ▶ 1,5x hustější atmosféra, než na Zemi!
- ▶ Složení: Dusík (98 %) a uhlovodíky

- ▶ Tlak a složení atmosféry umožňuje existenci uhlovodíkových jezer!



Exogenní procesy - atmosféry

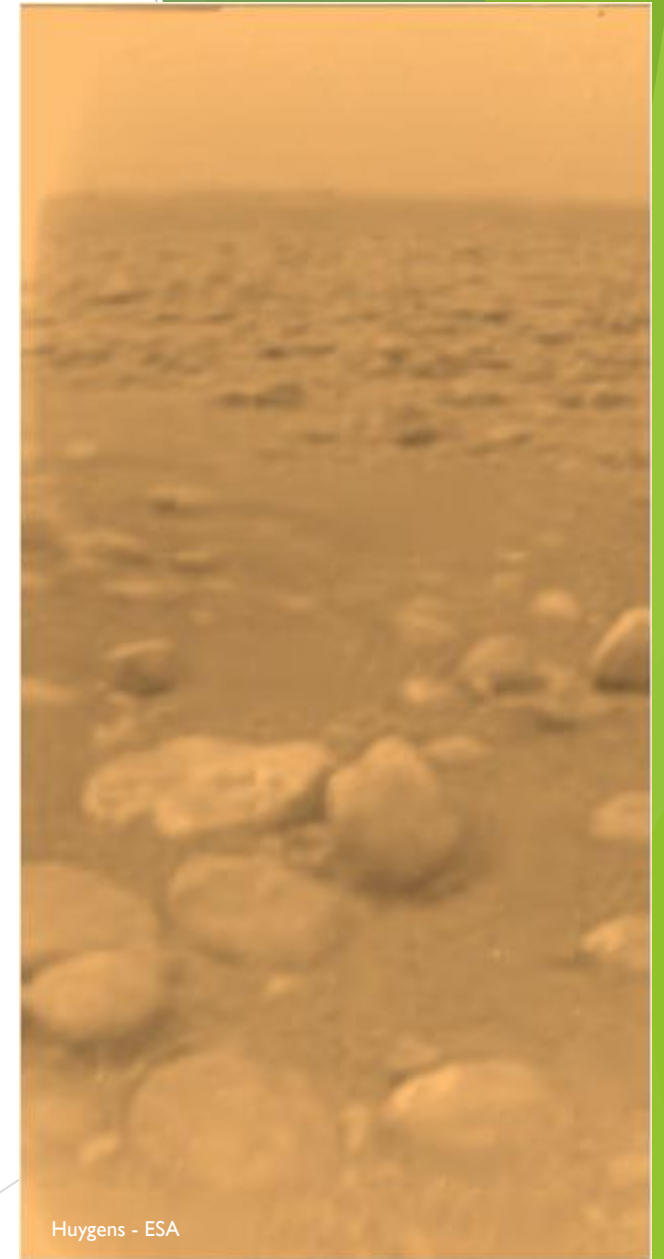
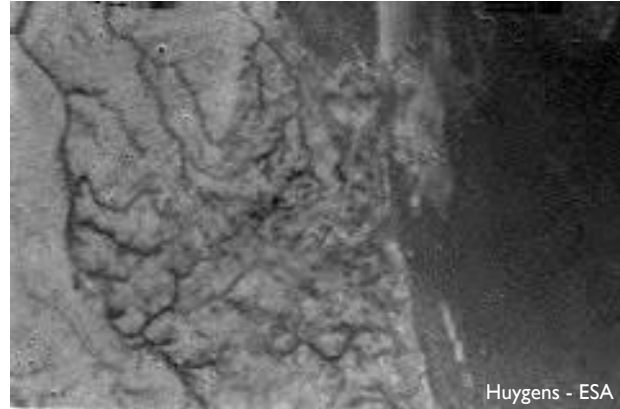
Titan

- ▶ Titan - o polovinu větší, než náš Měsíc
- ▶ 1,5x hustější atmosféra, než na Zemi!
- ▶ Složení: Dusík (98 %) a uhlovodíky

- ▶ Tlak a složení atmosféry umožňuje existenci uhlovodíkových jezer!

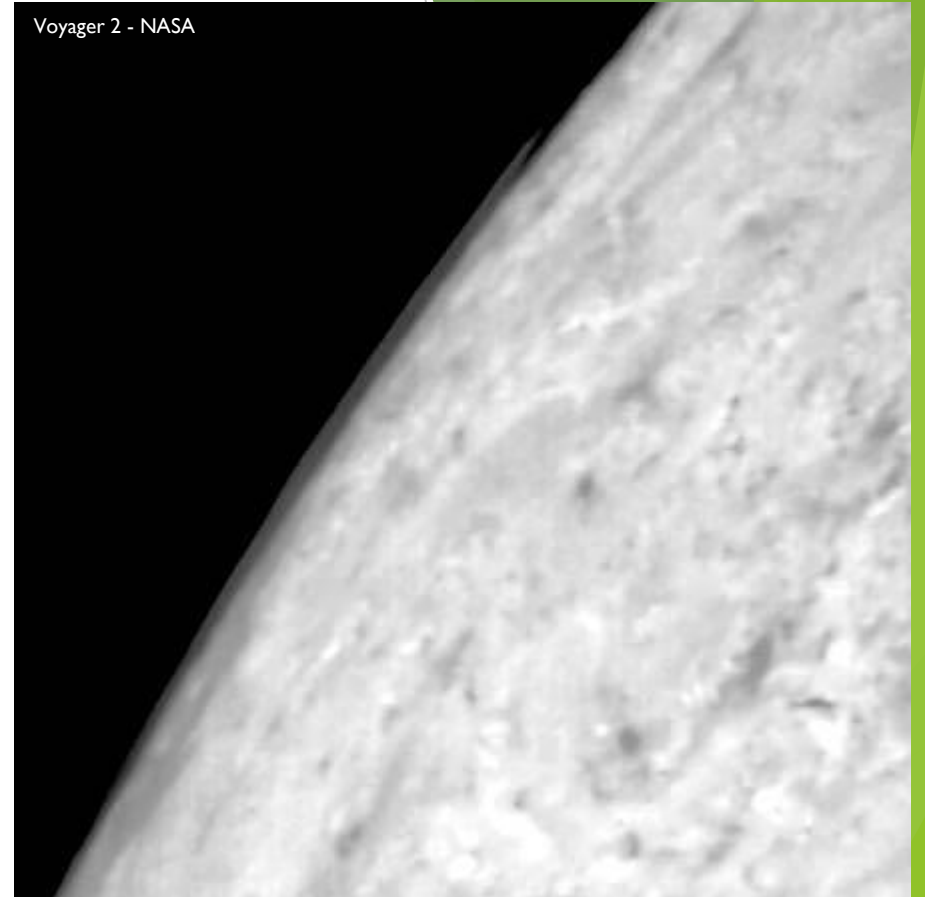
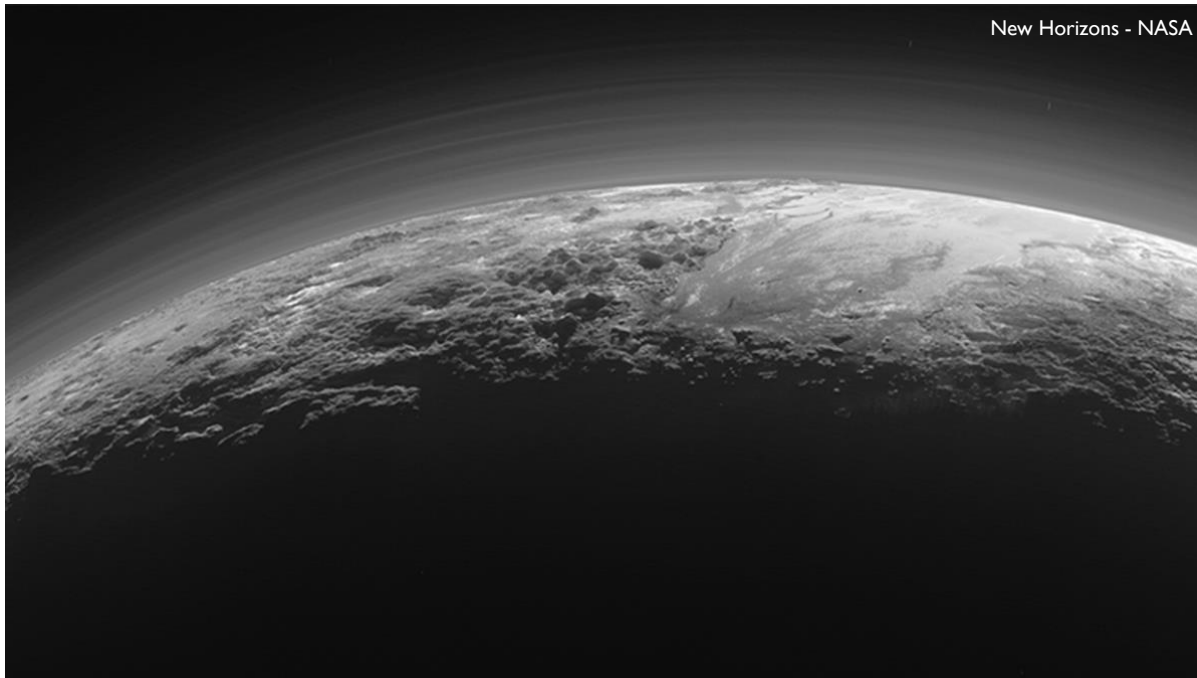
- ▶ Povrch z ledu, přítomnost fluviální aktivity, půda plná ledových a uhlovodíkových krystalků

- ▶ Nejvzdálenější těleso, na kterém se podařilo měkce přistát!



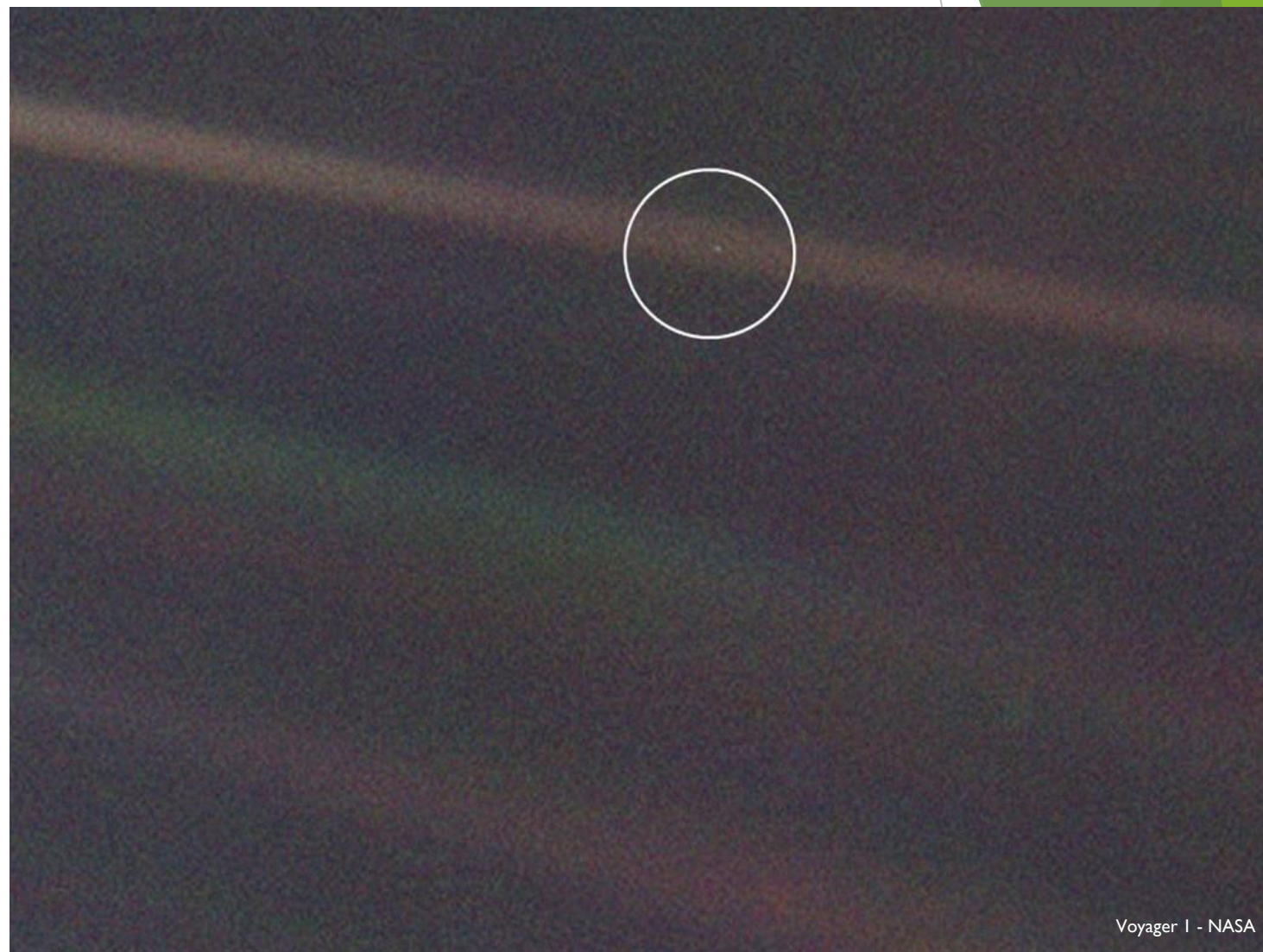
Exogenní procesy - atmosféry další tělesa

- ▶ Pluto, Triton
- ▶ Slaboučké, převážně dusík a uhlovodíky (sublimace zmrzlého povrchu, případně kryovulkanismus)



Take home message?

- ▶ Stále je co objevovat! :-)



Zdroje

Kosmologie:

- ▶ SINGH, S. (2007): Velký třesk, Argo/Dokořán, 550 s.

Planetologie:

- ▶ HARTMANN, W.K. (2004): Moons & Planets (fifth edition), Brooks/Cole, 456 s.

Planetologie a život ve vesmíru:

- ▶ PETRÁSEK, T., DUSZEK, I. (2009): Vzdálené světy I, Triton, 312 s.
- ▶ PETRÁSEK, T., DUSZEK, I. (2010): Vzdálené světy II, Triton, 496 s.