

Ledové měsíce velkých planet a možnost života na nich

Ondřej Čadek
Katedra geofyziky MFF UK

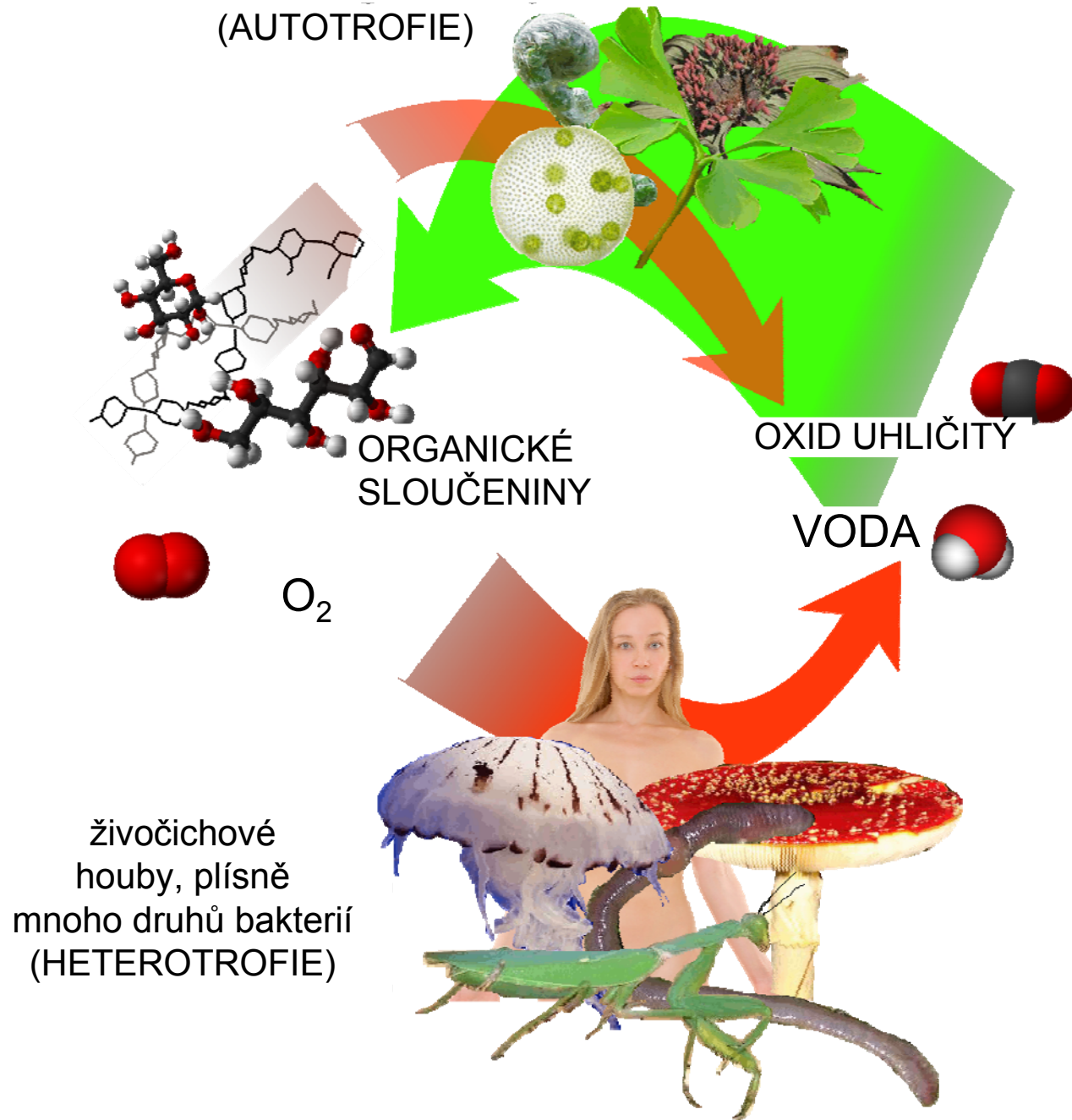


Obrázek: NASA

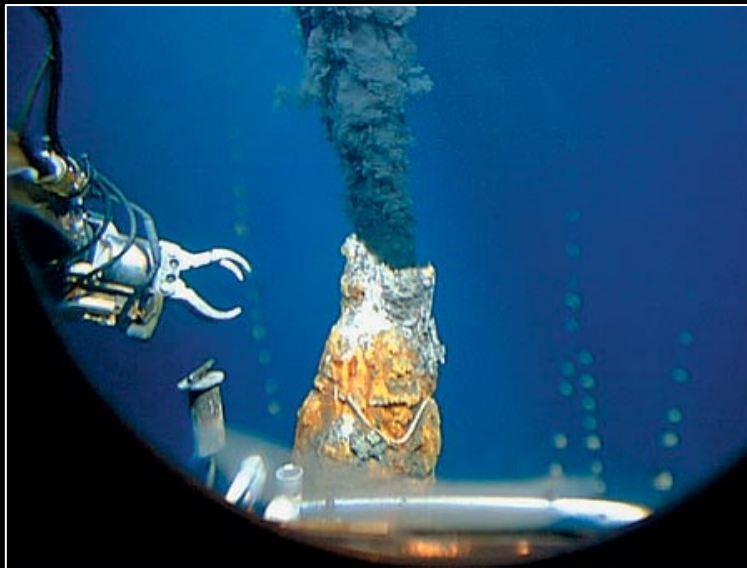
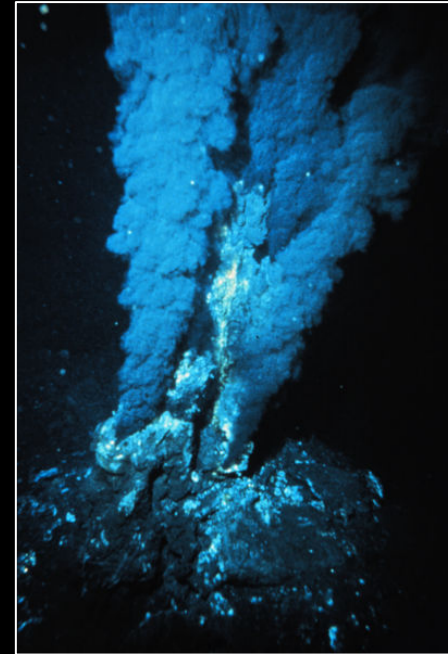
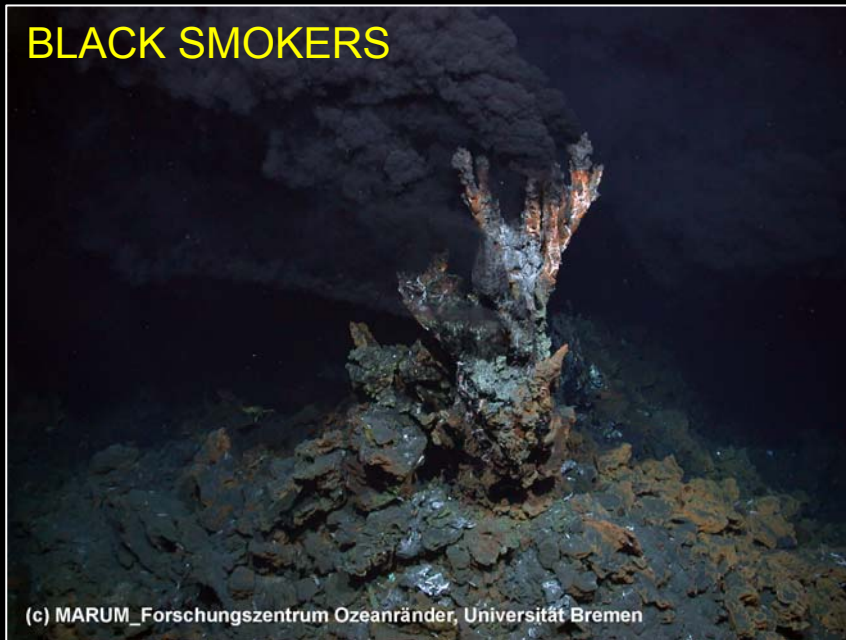
Život na Zemi

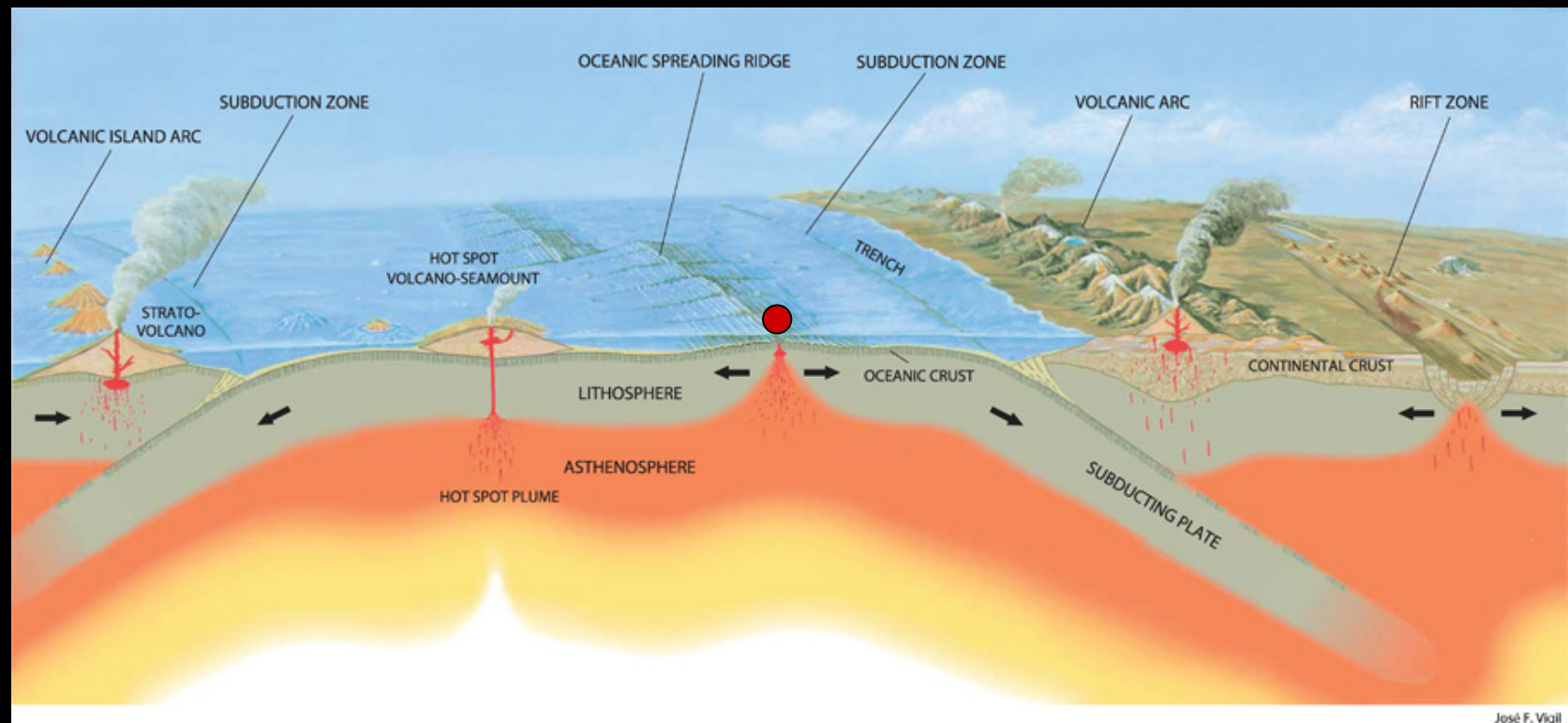
autotrofie na bázi fotosyntézy  heterotrofie

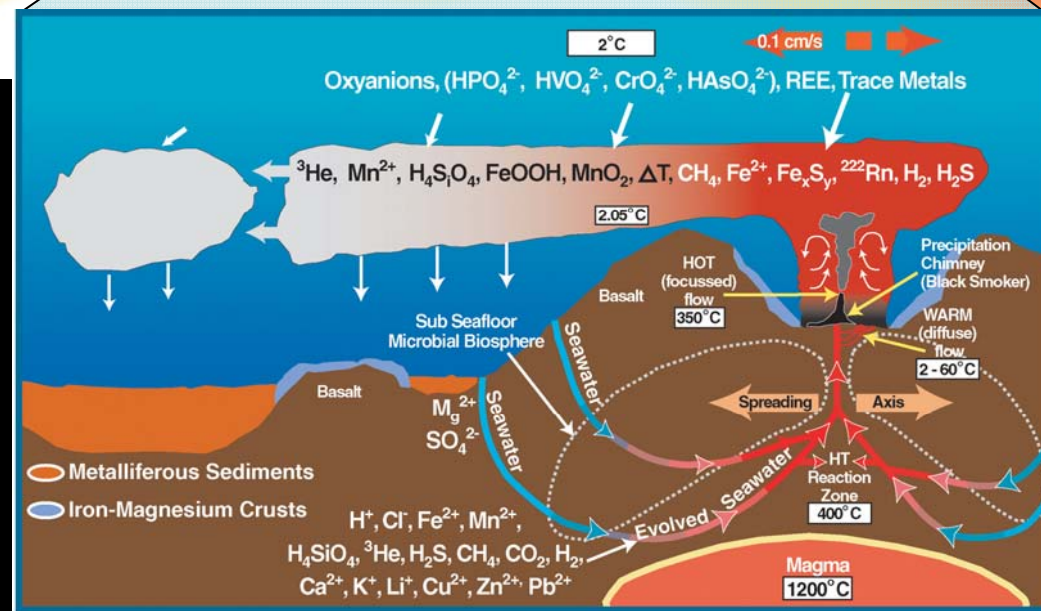
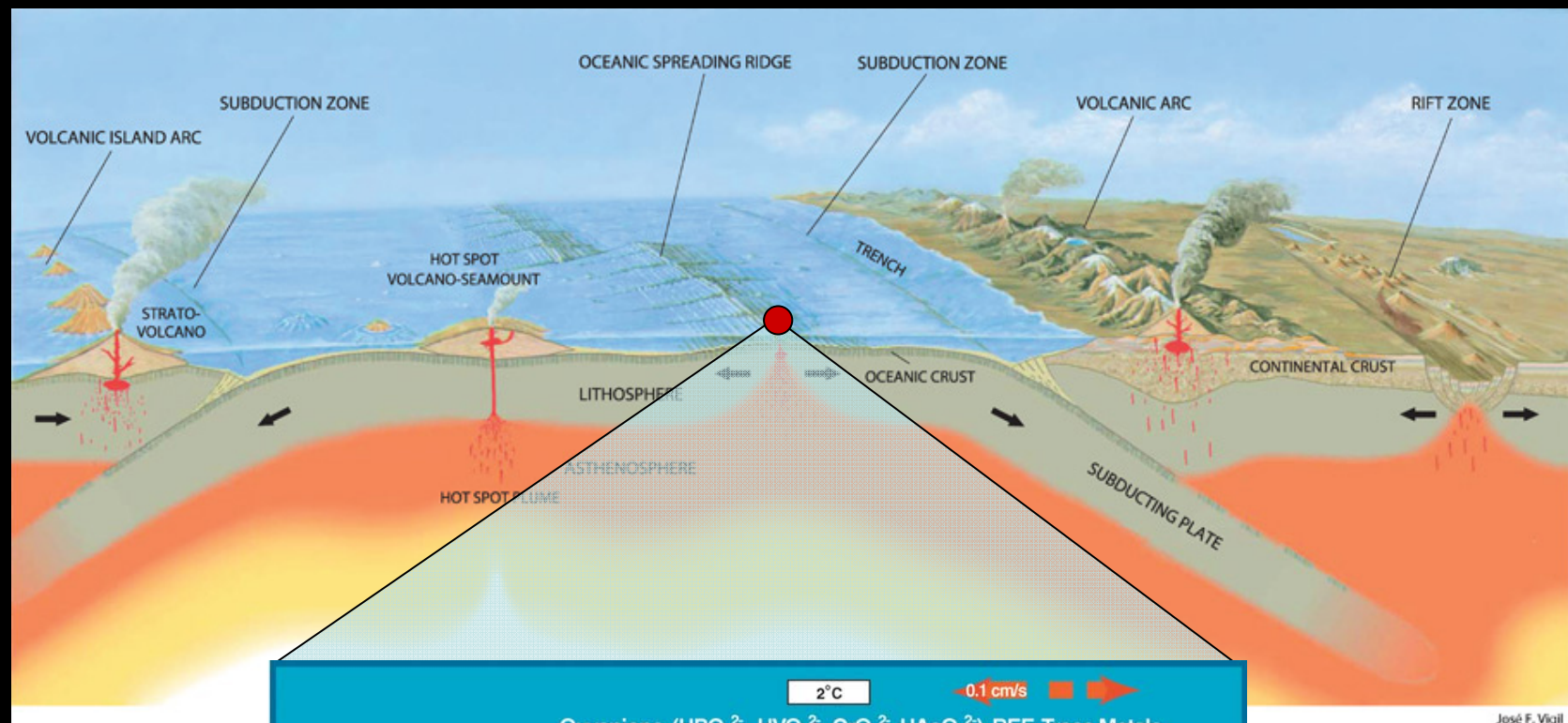
rostliny, řasy, mnoho druhů bakterií
(AUTOTROFIE)



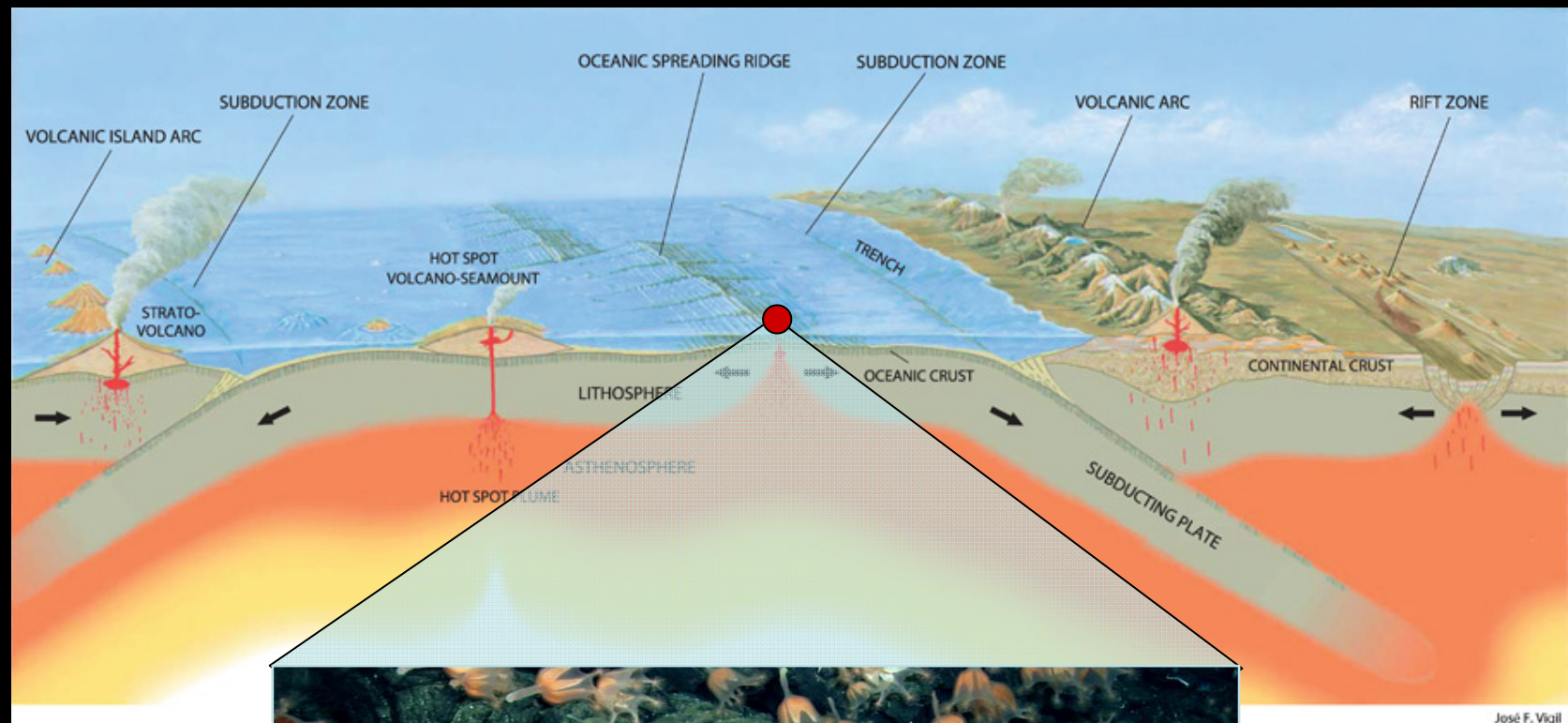
BLACK SMOKERS







José F. Vigil



Život na Zemi

- autotrofie na bázi fotosyntézy  heterotrofie

Život na Zemi

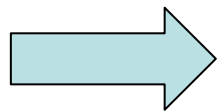
- autotrofie na bázi fotosyntézy  heterotrofie
- autotrofie na chemotrofní bázi (nevyžaduje světlo)

Život na Zemi

- autotrofie na bázi fotosyntézy  heterotrofie
- autotrofie na chemotrofní bázi (nevyžaduje světlo)
- později objeveny ekosystémy zcela nezávislé na O₂

Život na Zemi

- autotrofie na bázi fotosyntézy  heterotrofie
- autotrofie na chemotrofní bázi (nevyžaduje světlo)
- později objeveny ekosystémy zcela nezávislé na O₂



šance pro Mars a ledové měsíce

Vznik života

Teorie chemické polévky a její novější varianty
(Darwin, Oparin 1924, Millerův-Ureyův experiment 1952)

Teorie hlubokomořských sopouchů

Teorie panspermie

Vznik života

Teorie chemické polévky a její novější varianty
(Darwin, Oparin 1924, Millerův-Ureyův experiment 1952)

Teorie hlubokomořských sopouchů

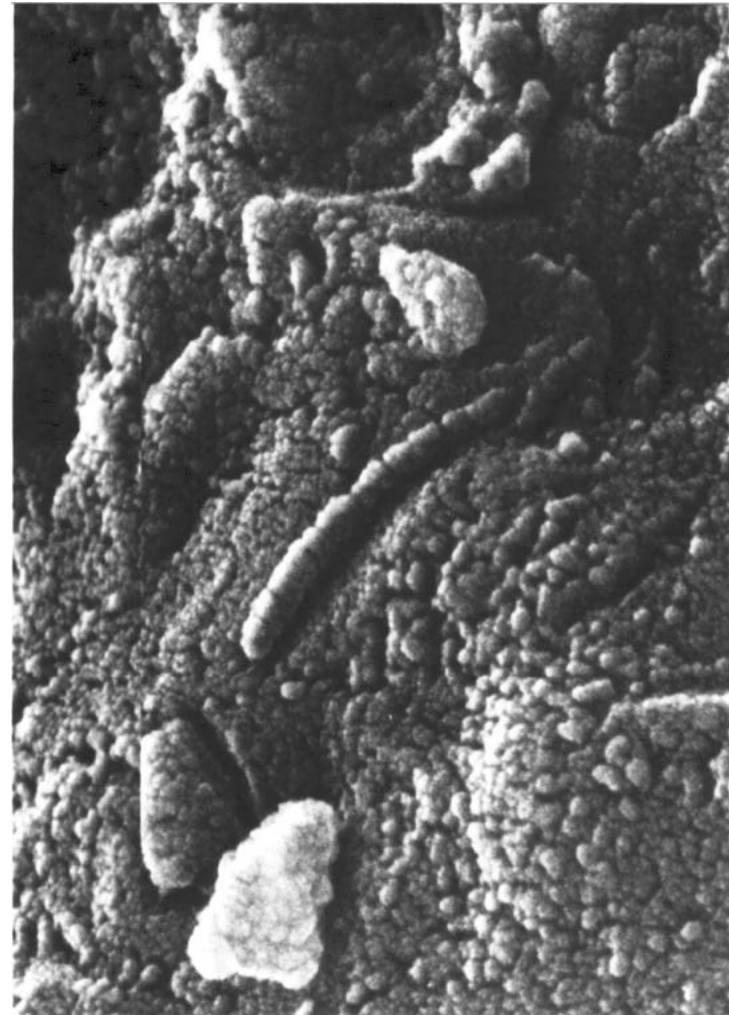
Teorie panspermie

Berzelius (1834), Kelvin (1871), Helmholtz (1879), Arrhenius (1903)
Fred Hoyle, Chandra Wickramasinghe, Stephen Hawking, Sheldon Cooper

*“Life could spread from planet to planet
or from stellar system to stellar system,
carried on meteors.”*



Black Lady

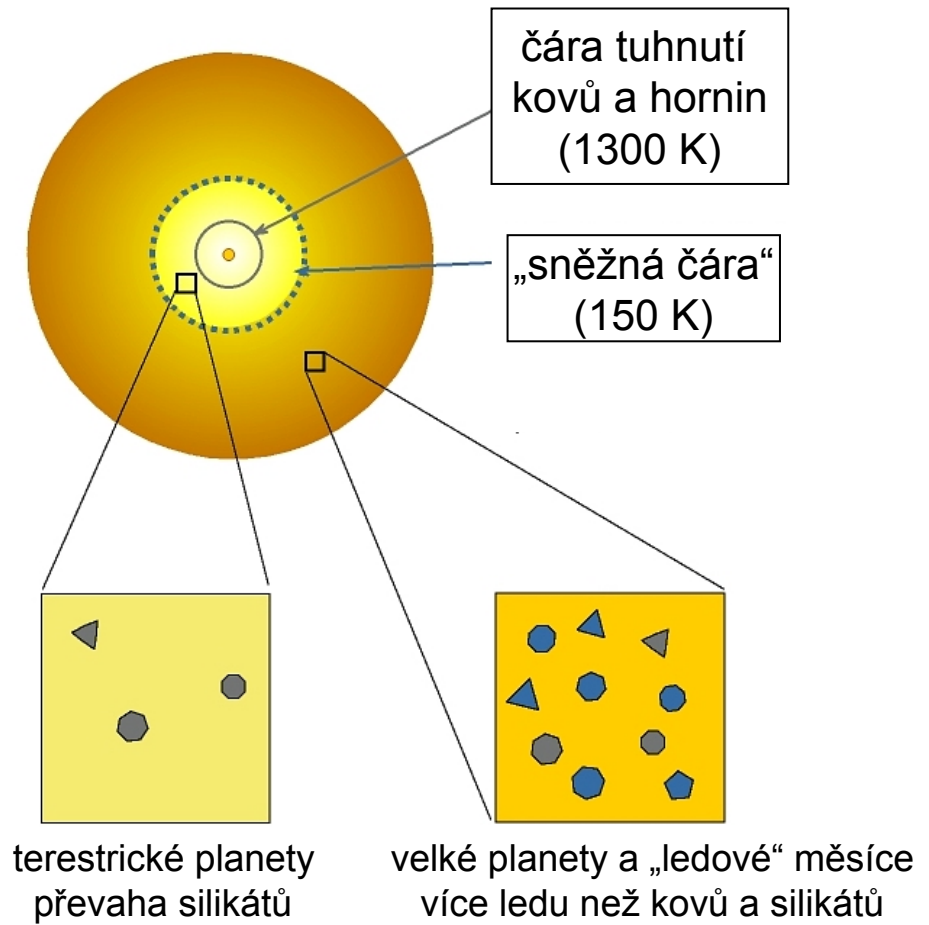
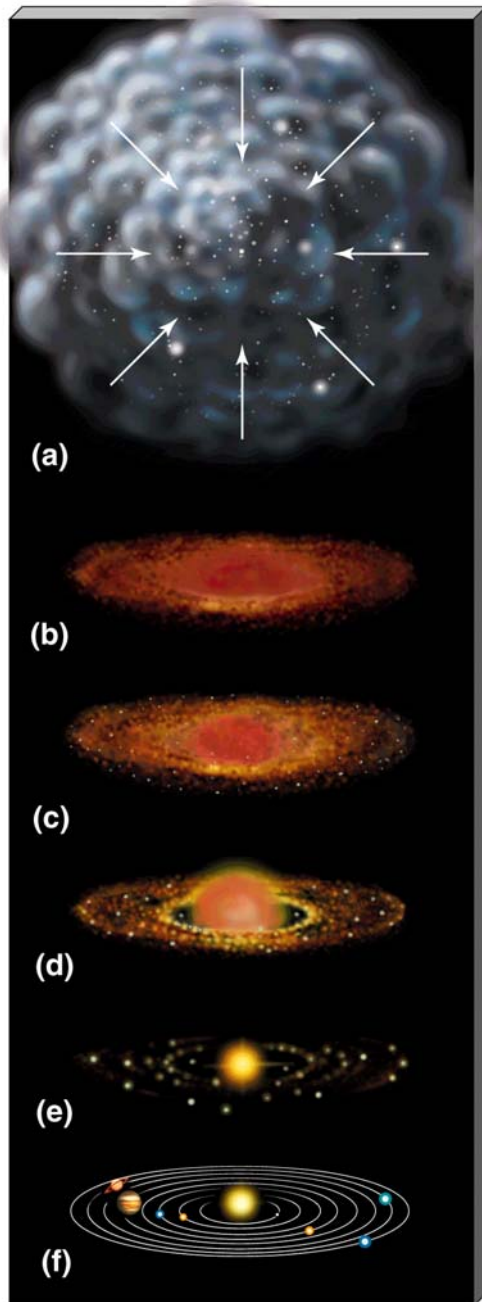


Allan Hills 84001

OSNOVA

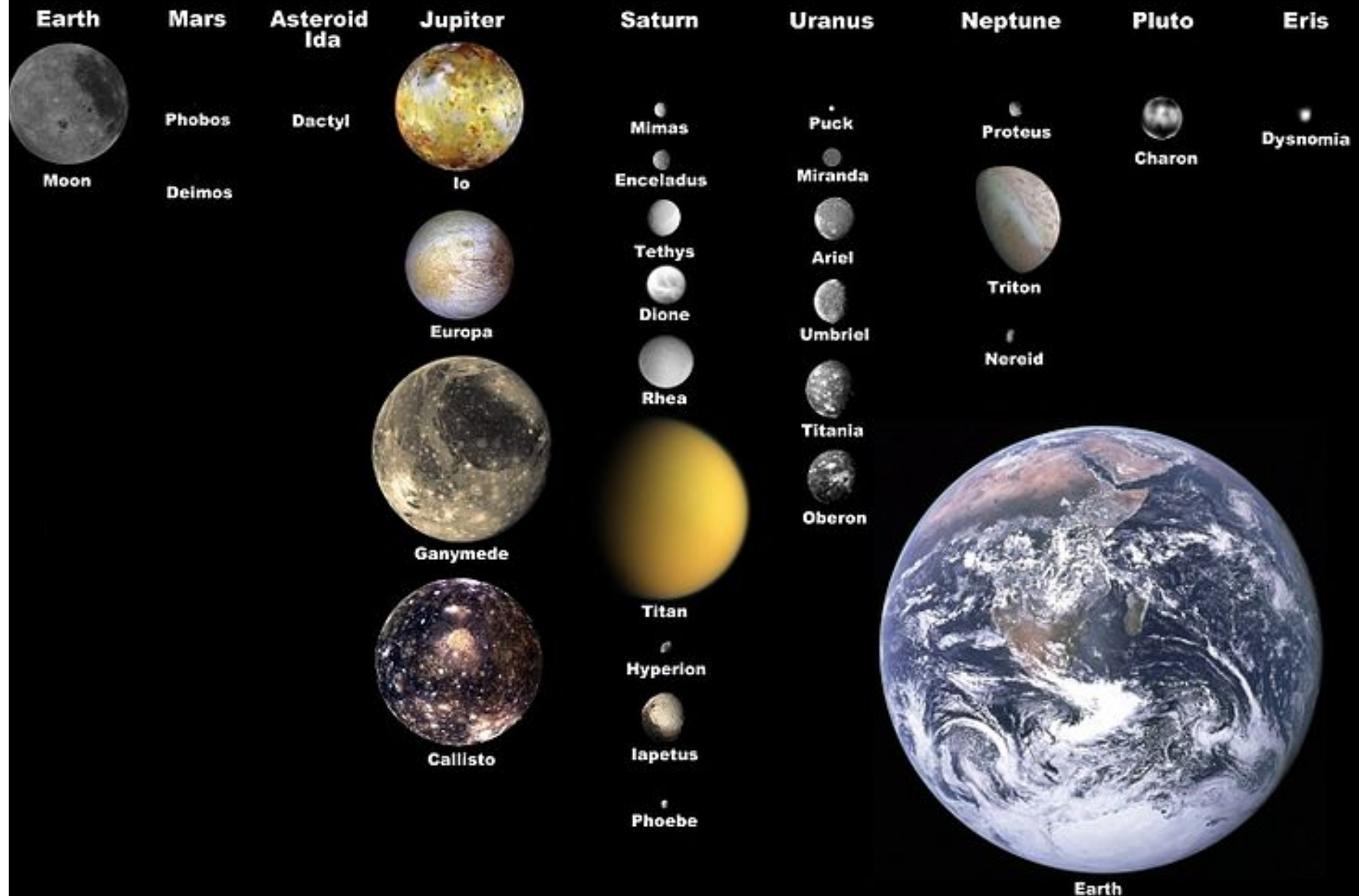
- Kapalná voda ve vnější sluneční soustavě: výjimka, nebo pravidlo?
- Příklady ledových měsíců a jejich „habitabilní potenciál“
- Problém č. 1
Odkud se bere teplo, které udržuje vodu v kapalném skupenství?
- Problém č. 2
Jsou vodní rezervoáry dlouhodobě stabilní?
- Problém č. 3
Proudění vody v tuhých slupkách ledových měsíců

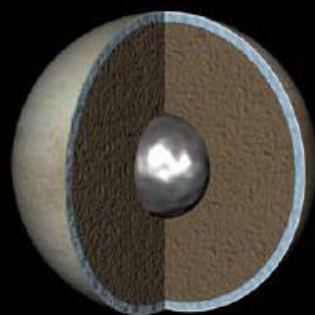
Voda a led ve sluneční soustavě



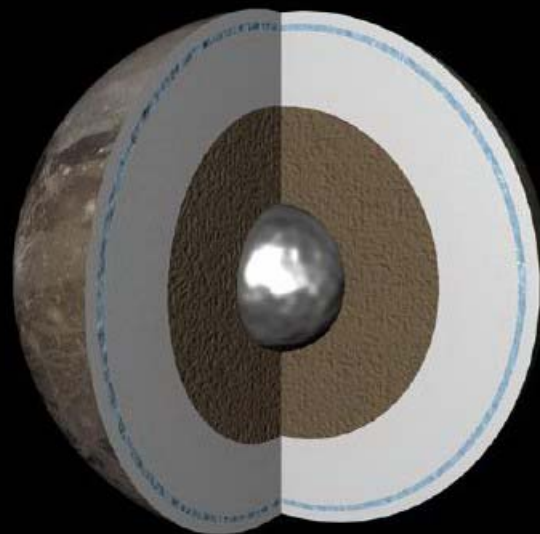
Zdroj: Nick Strobel

Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale





Europa

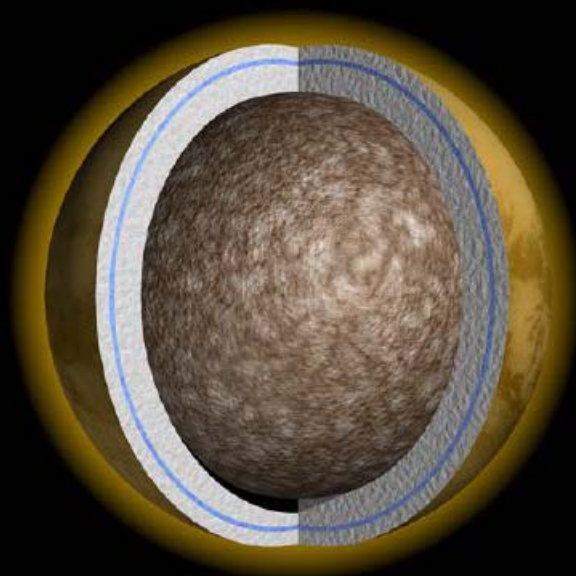


Ganymede

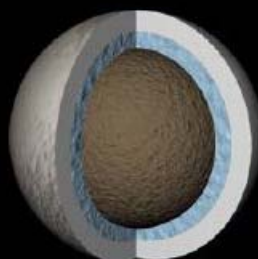


Callisto

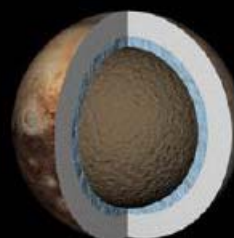
- Key**
- ice
 - water
 - rock
 - metal



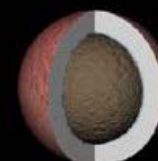
Titan



Eris



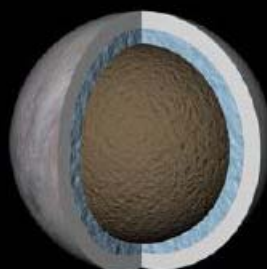
Pluto



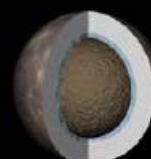
Sedna



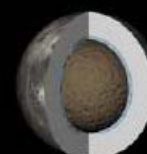
Enceladus



Triton



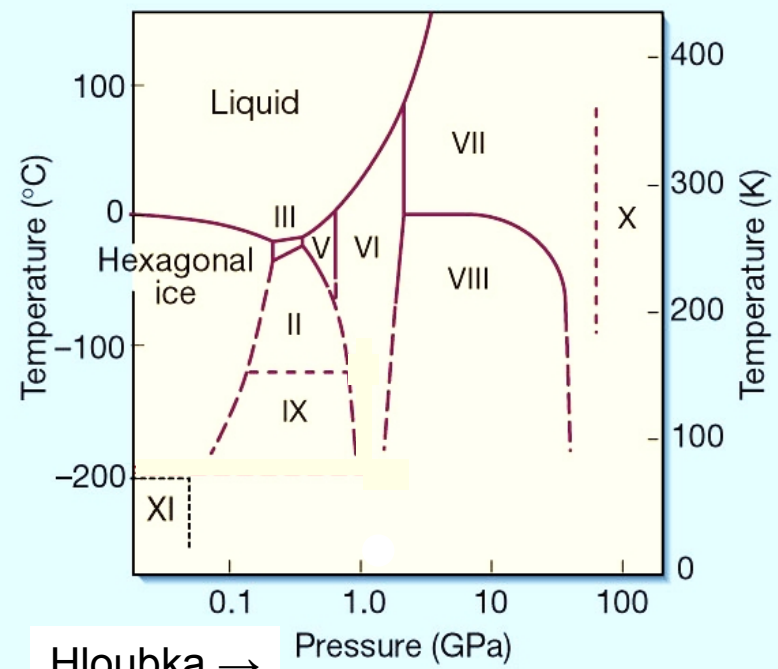
Titania



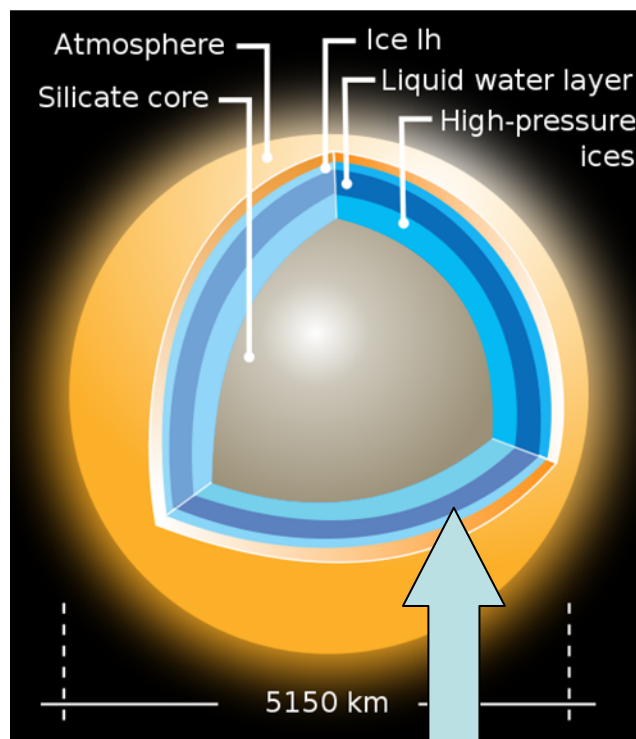
Oberon



Rhea

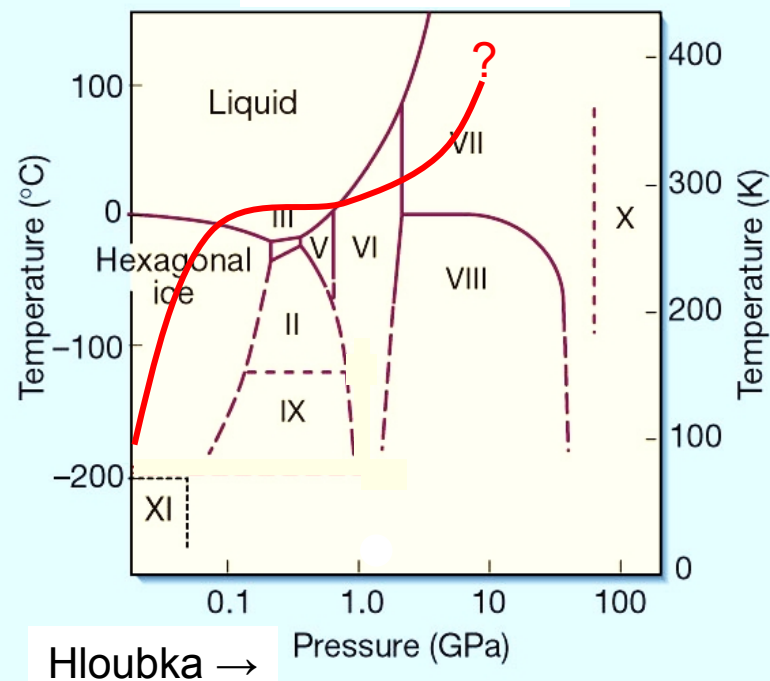


Titan

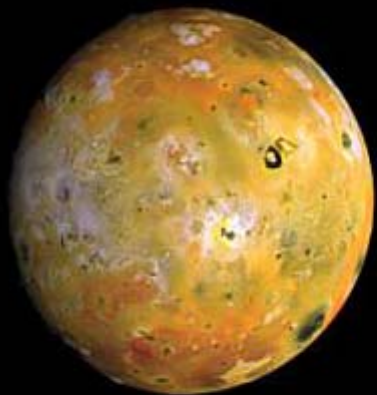


podpovrchový
oceán

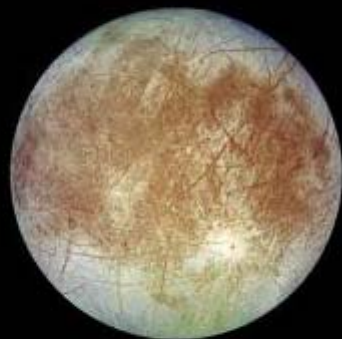
Teplotní profil







IO



EUROPA



GANYMED



CALLISTO

EUROPA

poloměr: 1561 km

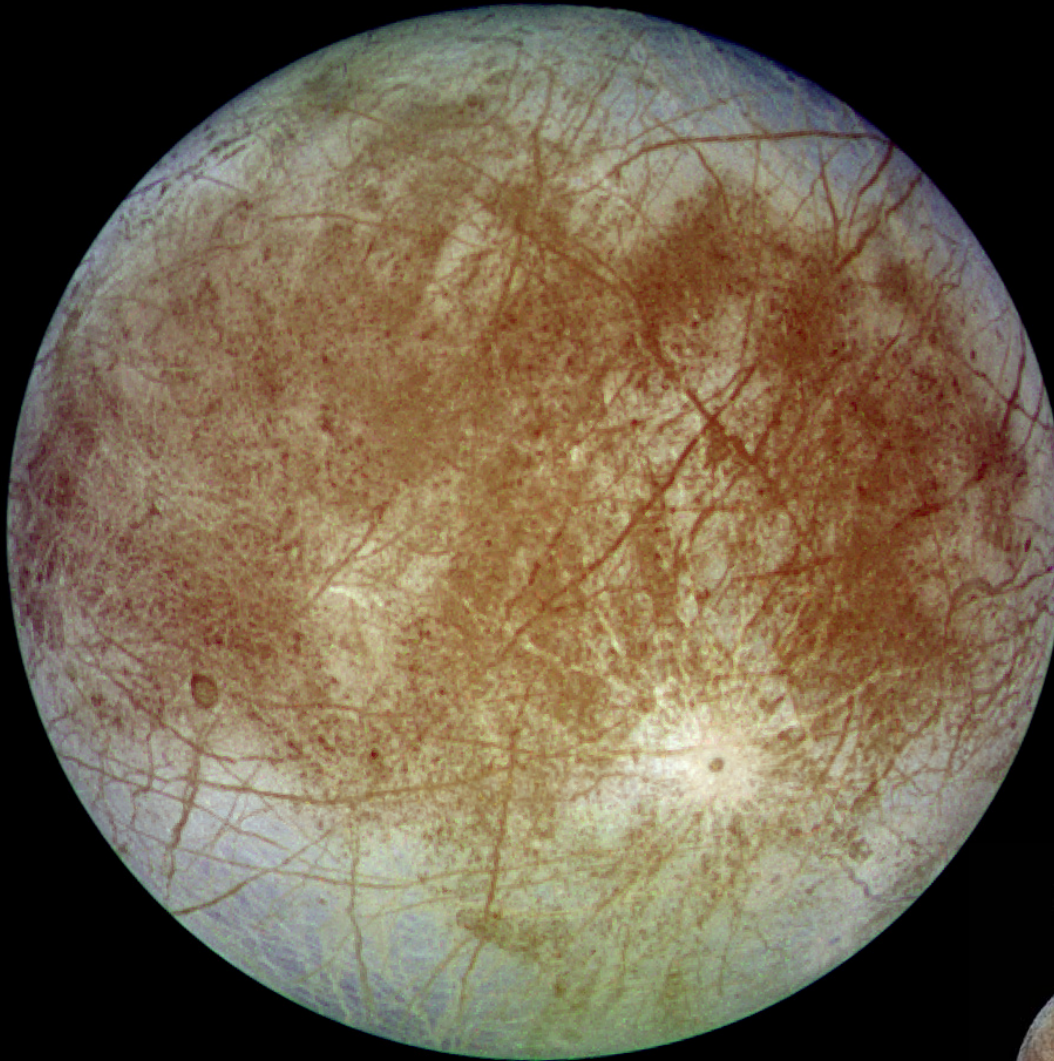
oběžná doba: 3.55 dne

excentricita: 0.009

střední hustota: 3010 kgm^{-3}

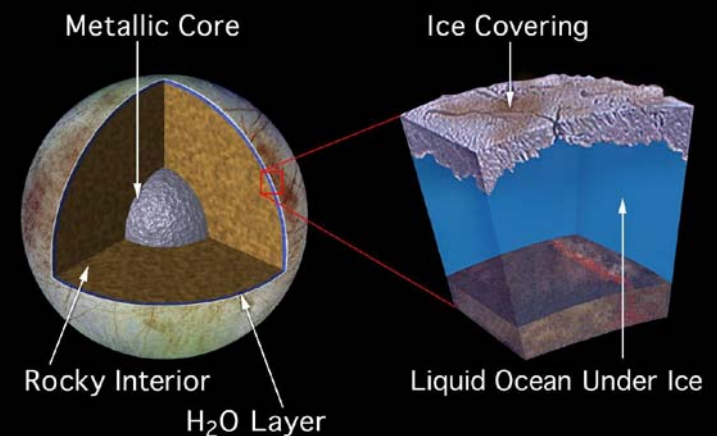
g: 1.3 ms^{-2}

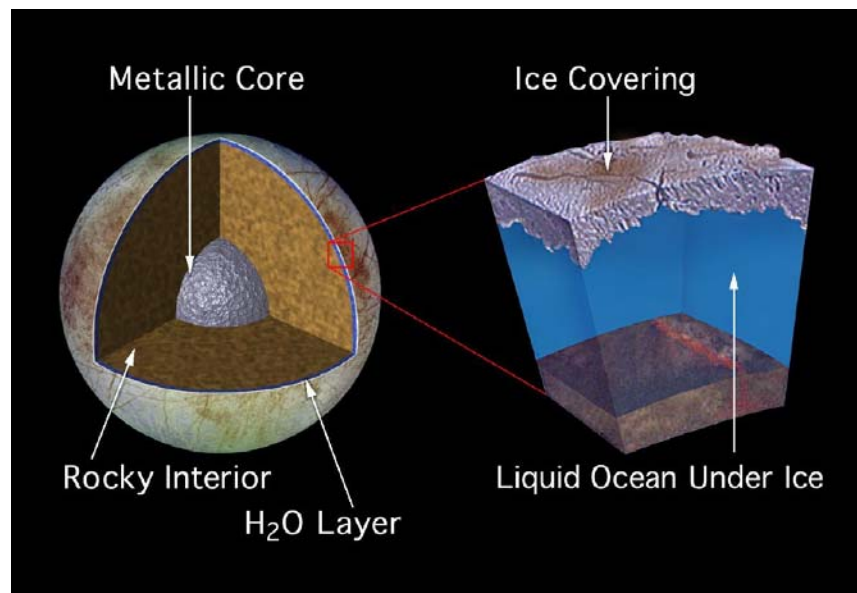
povrchová teplota: 50-125 K



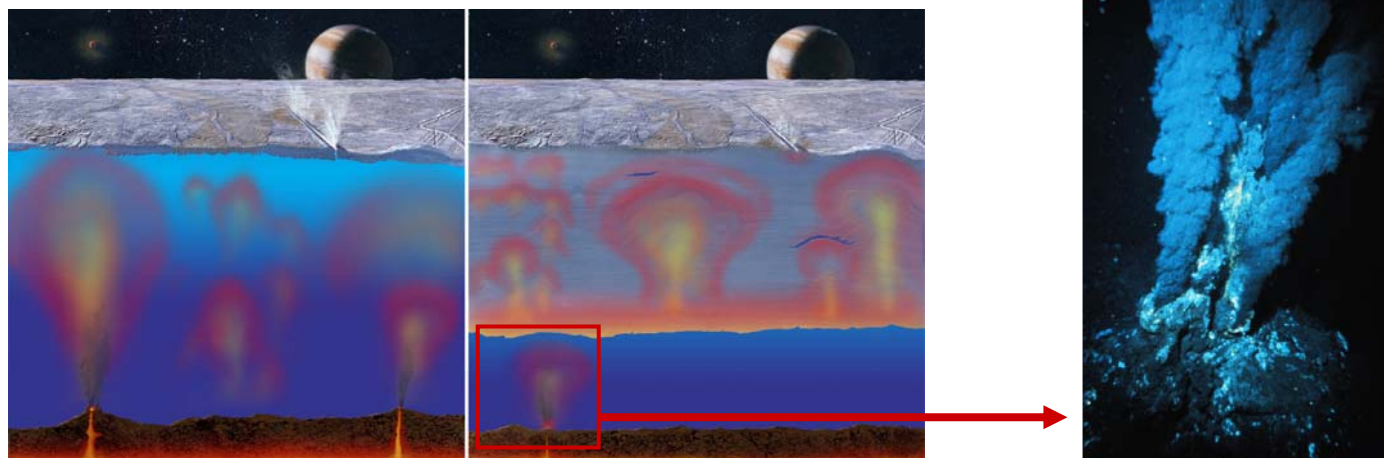
Tepelná produkce až 7 TW!

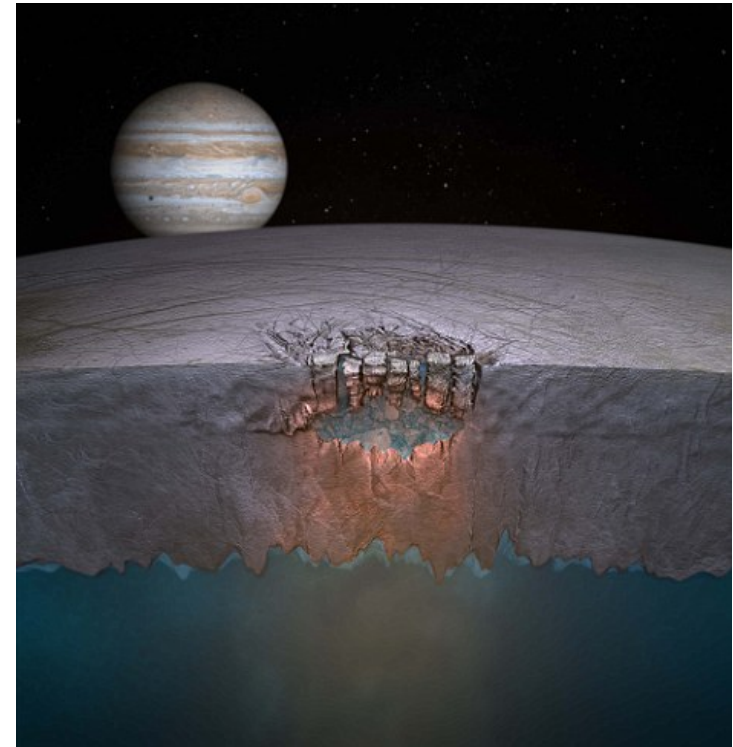
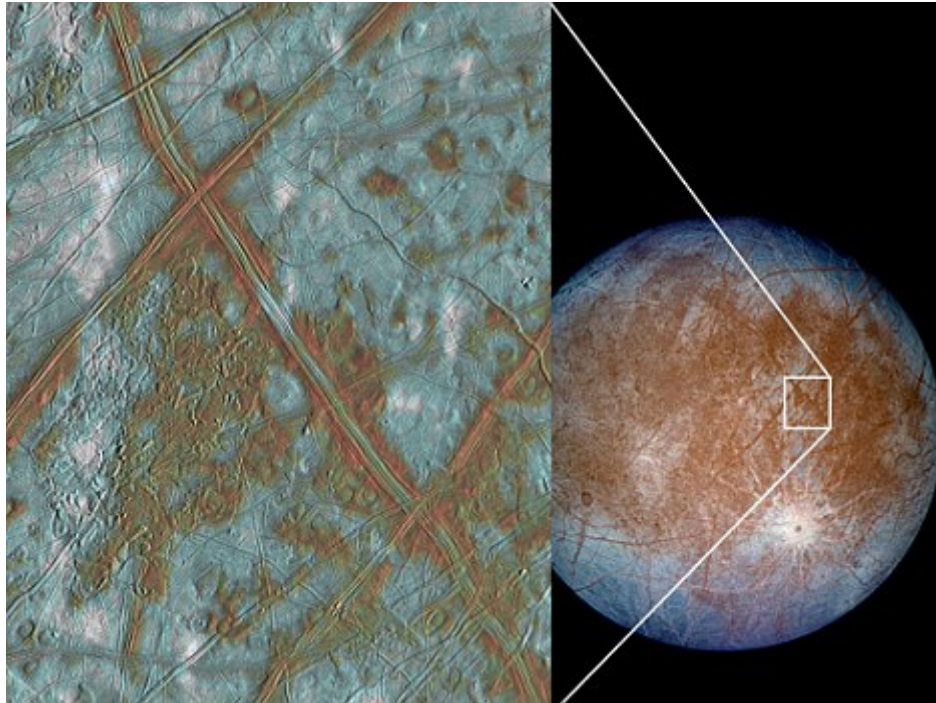
Nepřímé důkazy o existenci kapalné vody hlavně z magnetické pole a povrchové geologie.



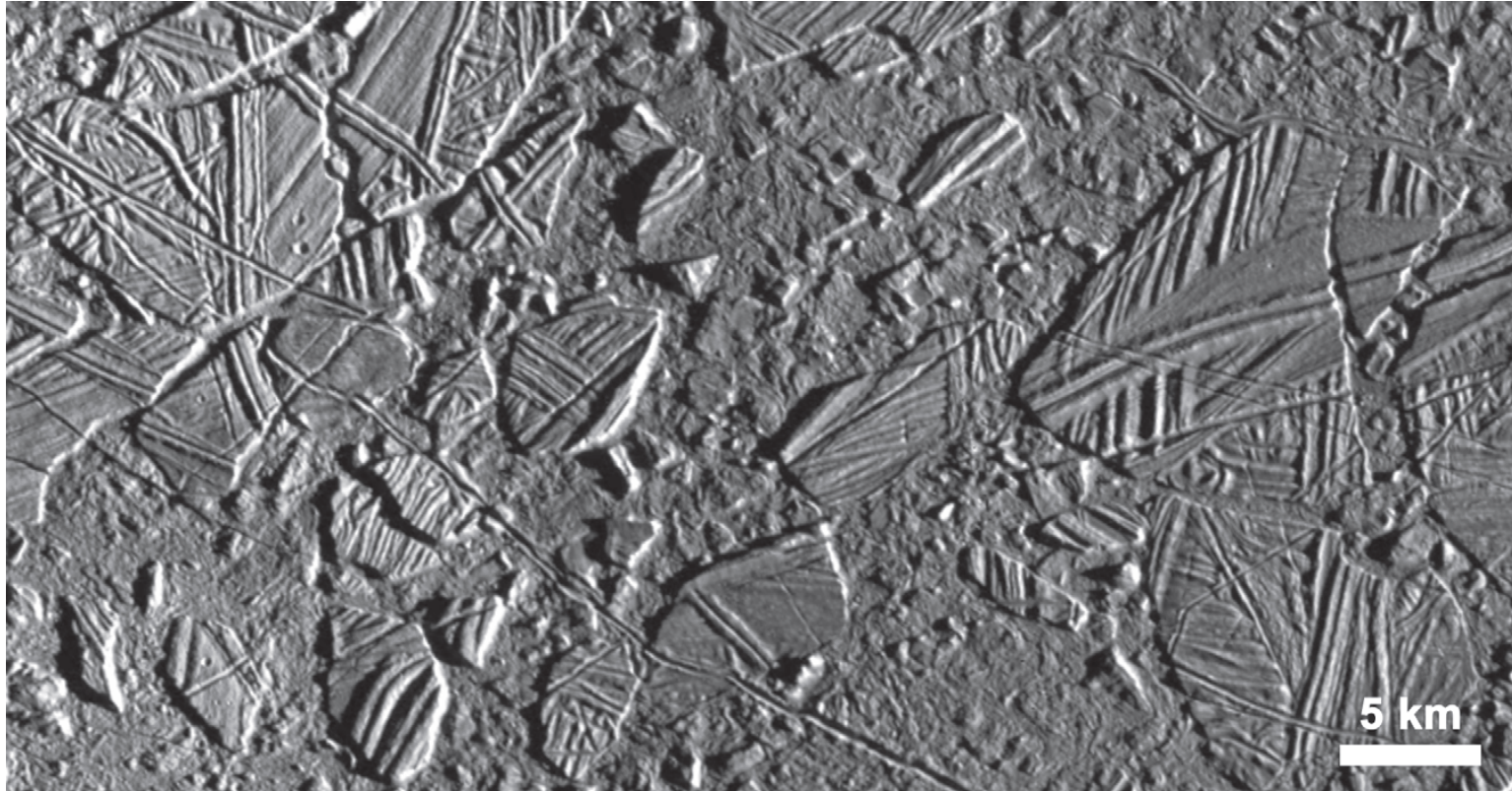


EUROPA





Schmidt et al., Nature 2011



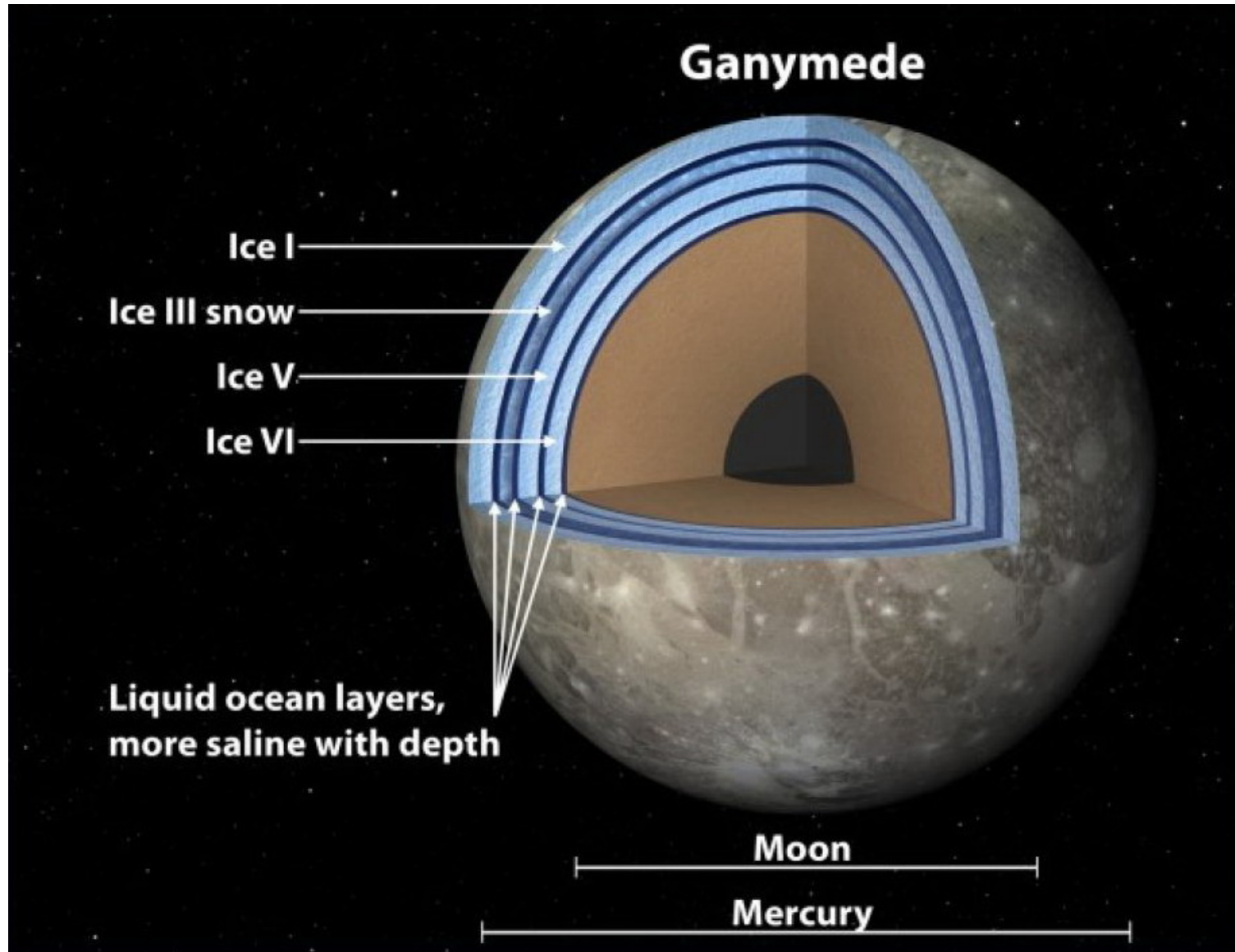
Ganymede

Ice I
Ice III snow
Ice V
Ice VI

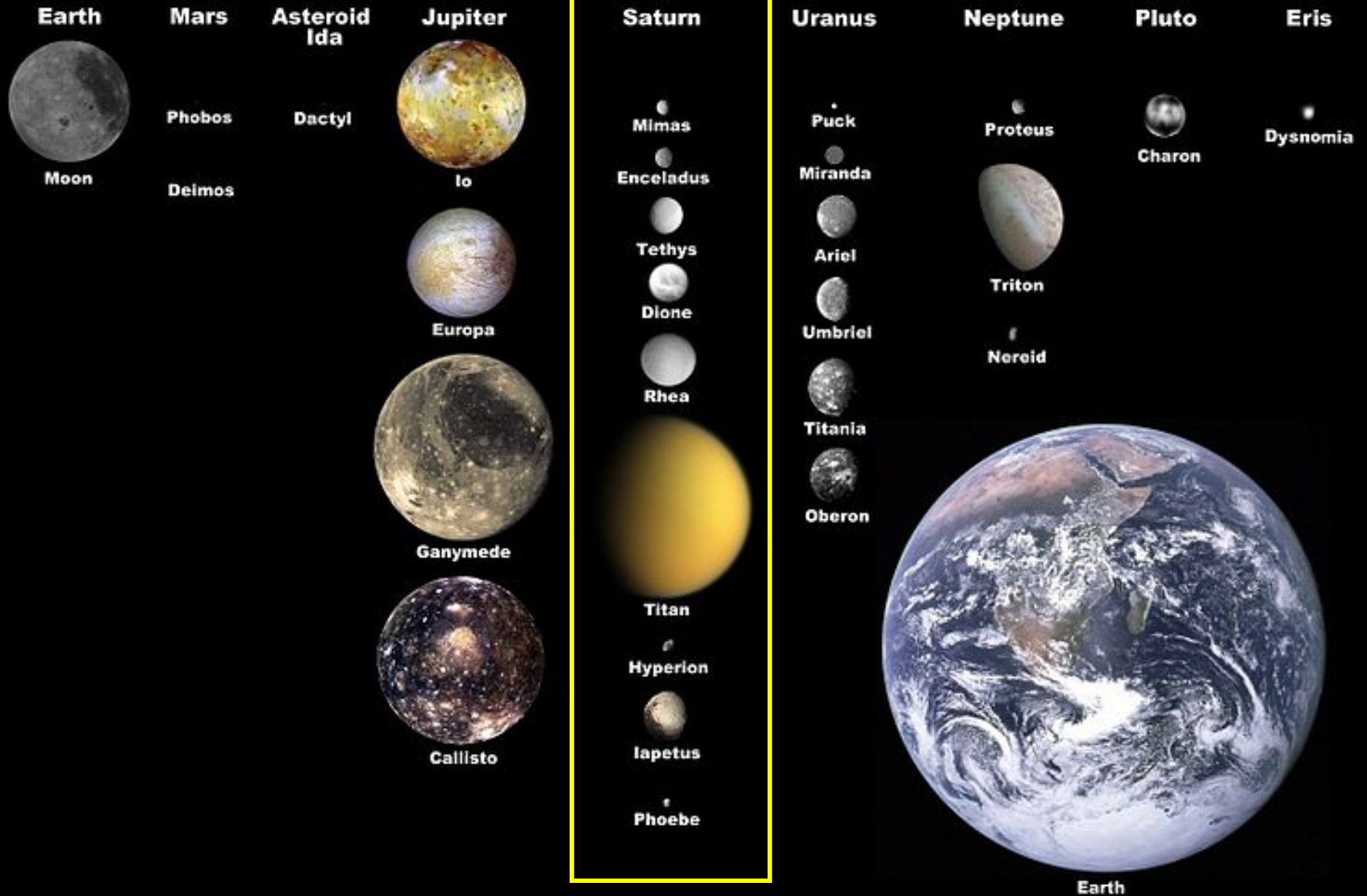
Liquid ocean layers,
more saline with depth

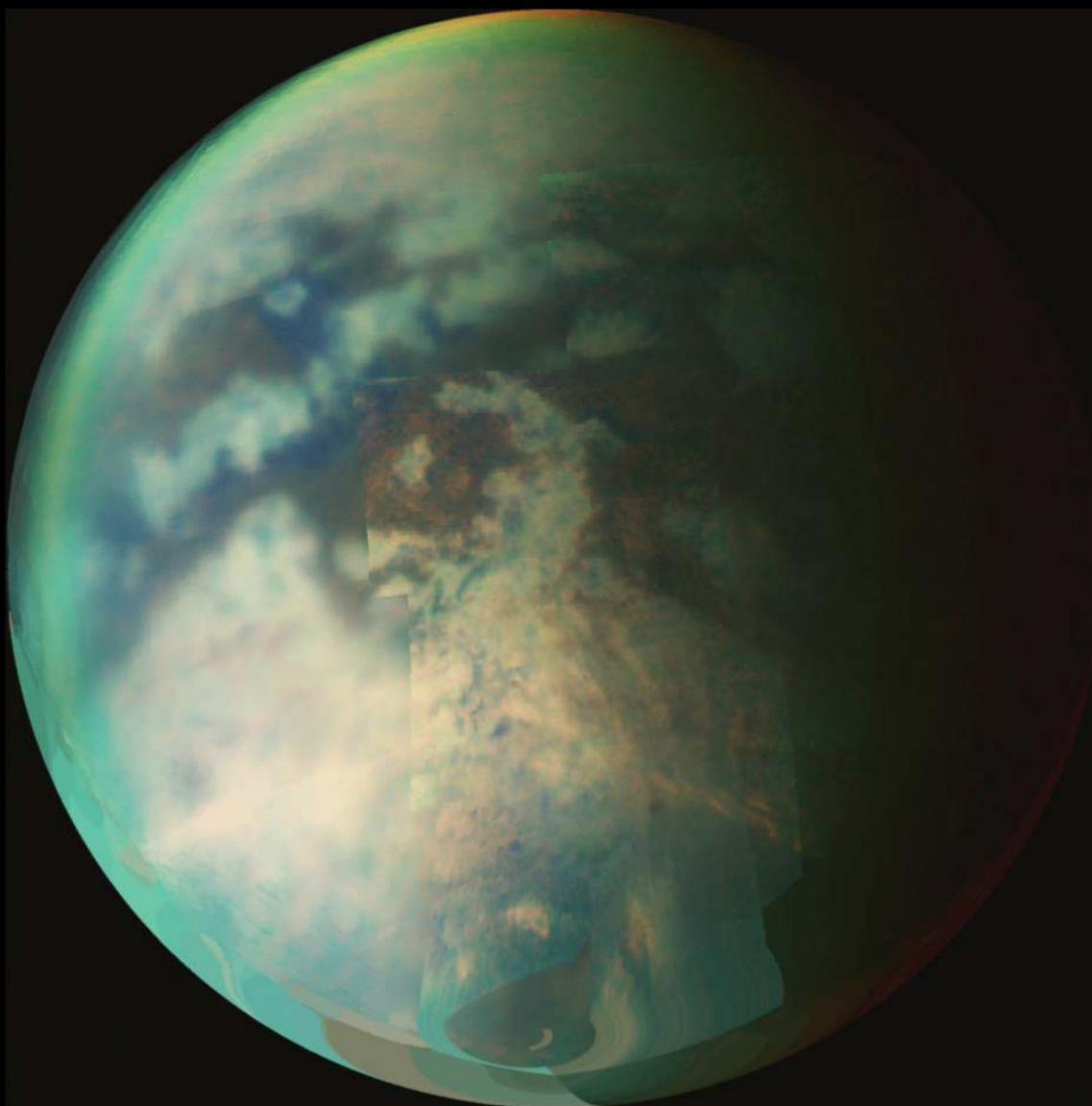
Moon

Mercury



Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale





TITAN

poloměr: 2576 km

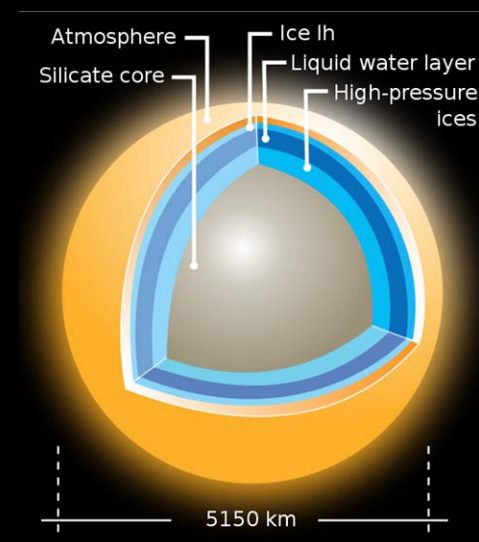
oběžná doba: 15.9 dne

excentricita: 0.0288

střední hustota: 1880 kgm⁻³

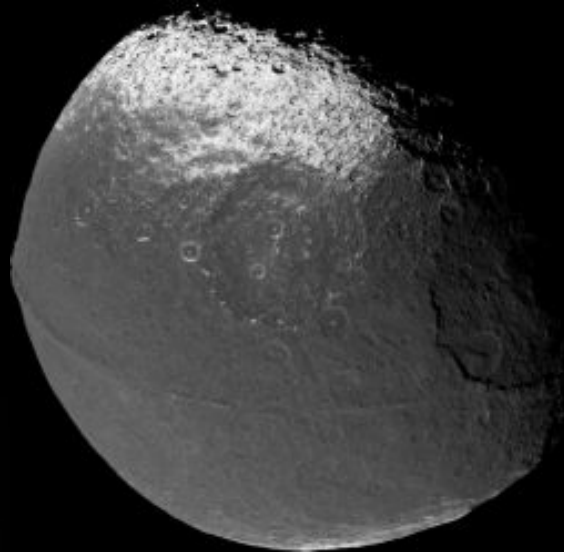
gravitační zrychlení: 1.35 ms⁻²

teplota na povrchu: 95 K

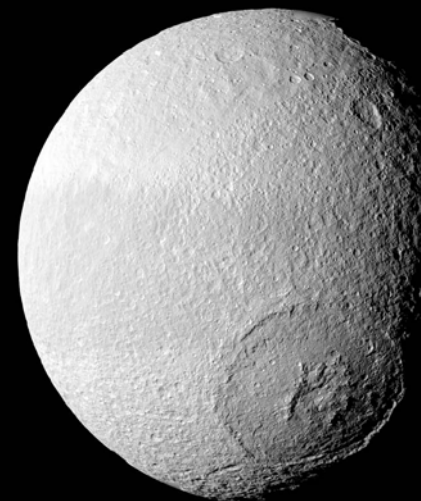




Hyperion



Iapetus



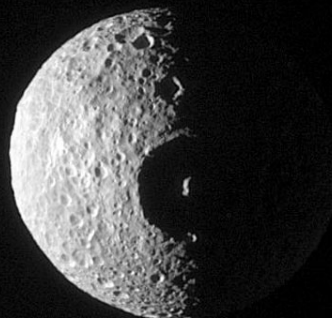
Tethys



Dione



Rhea

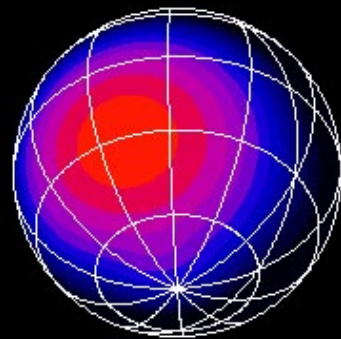


Mimas

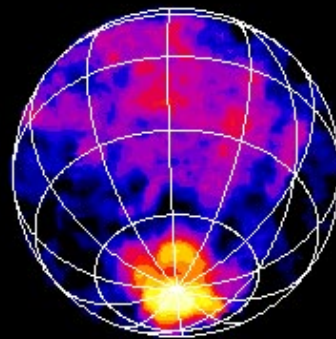


Enceladus

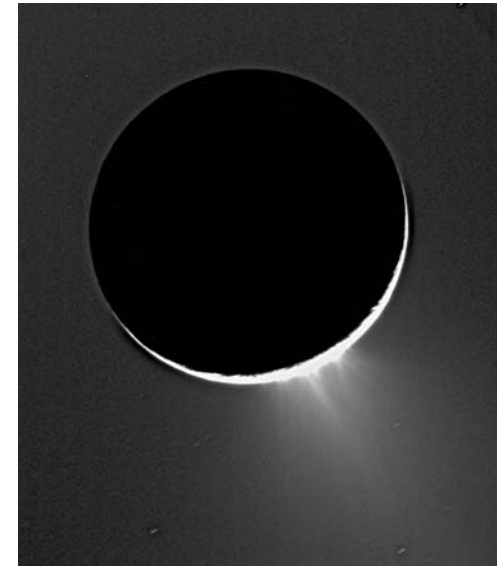
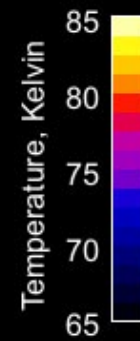
Enceladus Temperature Map



Predicted
Temperatures

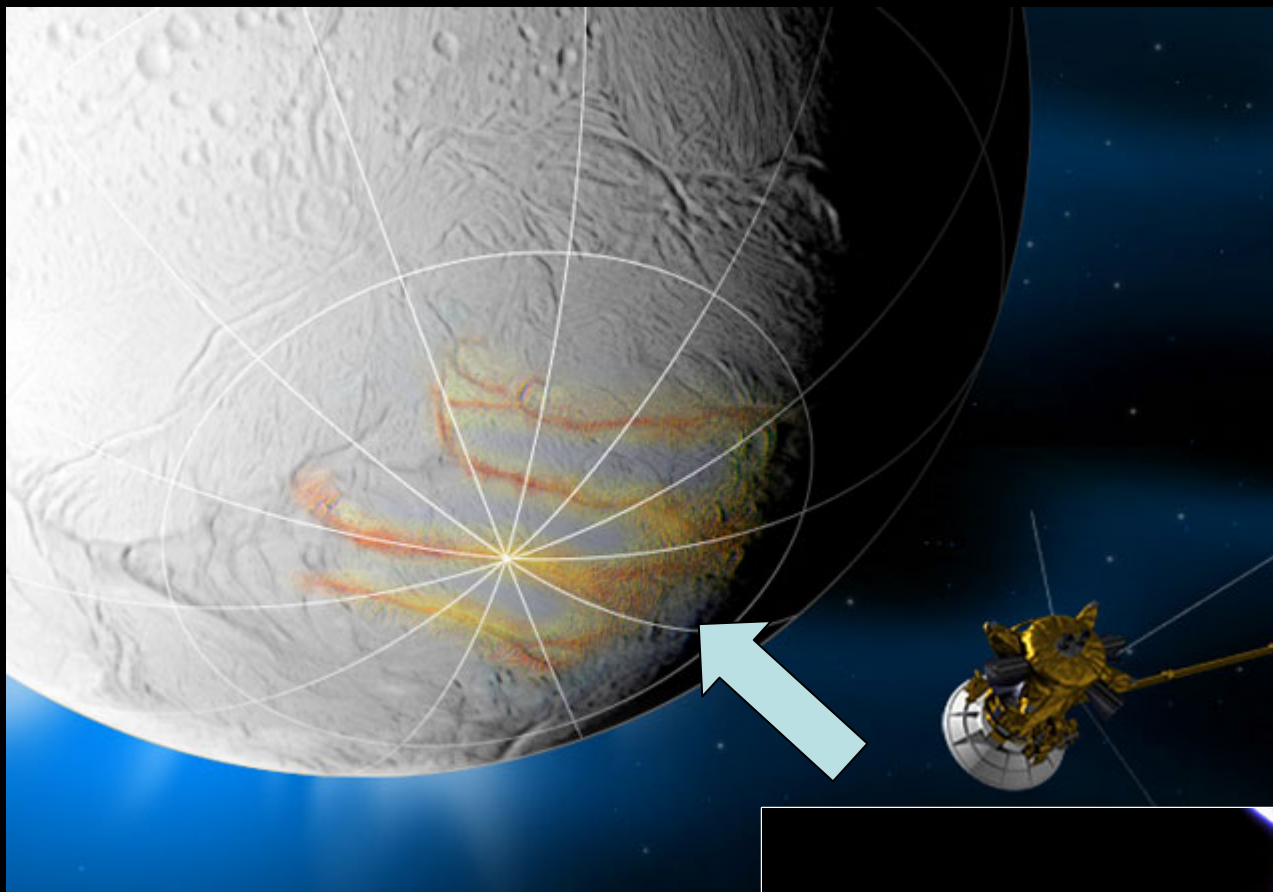


Observed
Temperatures



Zdroj: NASA

Spencer et al., Science 2006



Složení gejzírů

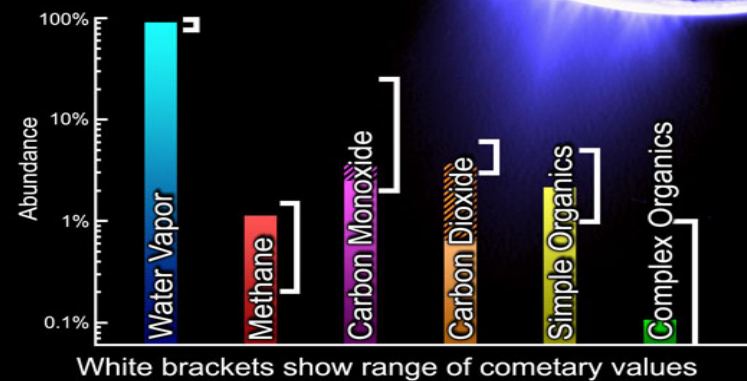
90-95% H_2O

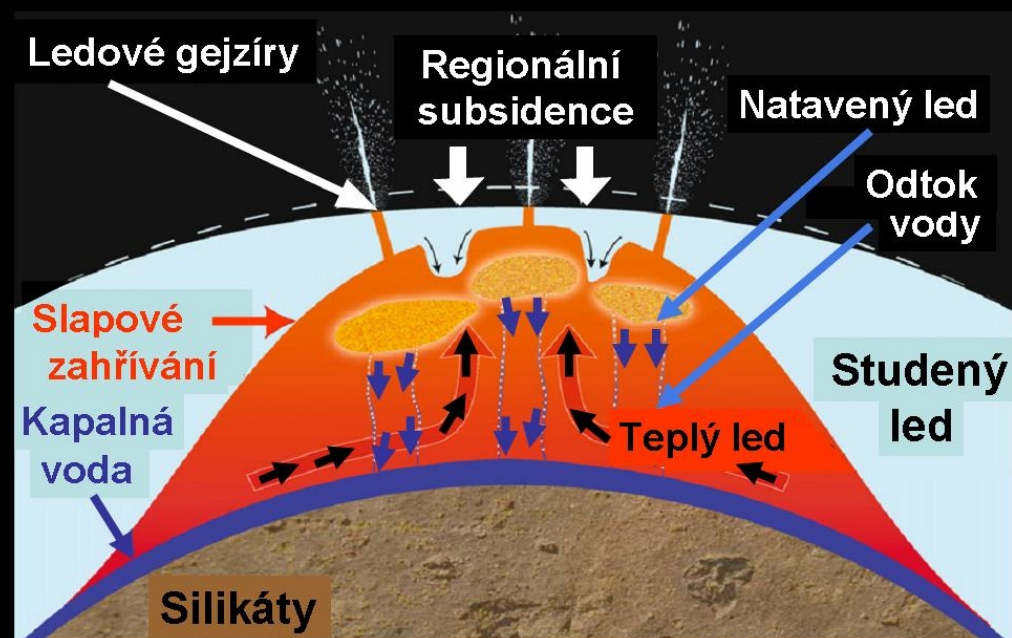
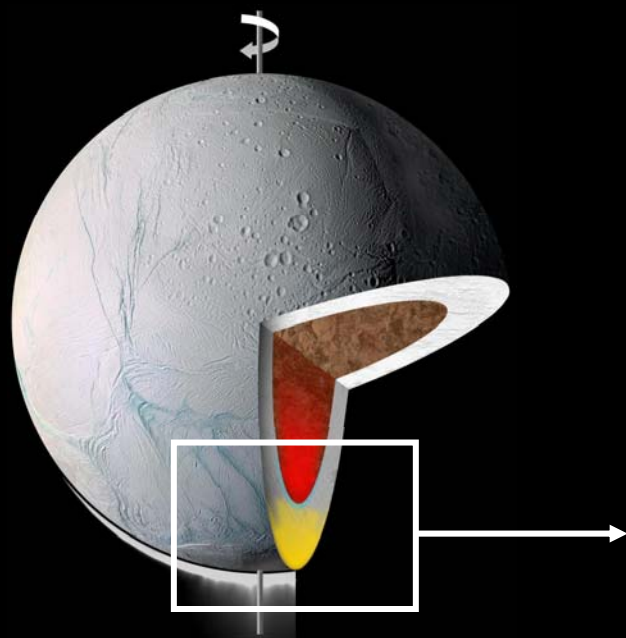
CO , CO_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S aj.

stopově Ar^{40}

Ztráta hmotnosti v minulosti až 20%.

Ztráta vody až 40%.





Střední teplota na povrchu

Europa – 102 K

Titan – 93 K

Enceladus – 75 K

Triton – 38 K

ODKUD SE
BERE TEPLLO ?

Zdroje tepla:

- rozpad radioaktivních prvků
- slapové zahřívání
- teplo nahromaděné na počátku

	Země	Mars	Titan	Iapetus	Enceladus
Čas chladnutí [10^9 let]	130	36	7.1	0.57	0.07

Střední teplota na povrchu

Europa – 102 K

Titan – 93 K

Enceladus – 75 K

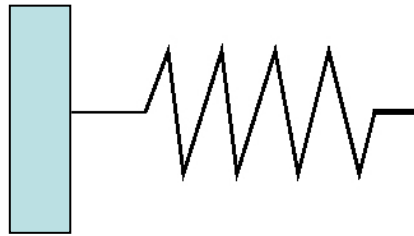
Triton – 38 K

ODKUD SE
BERE TEPLLO ?

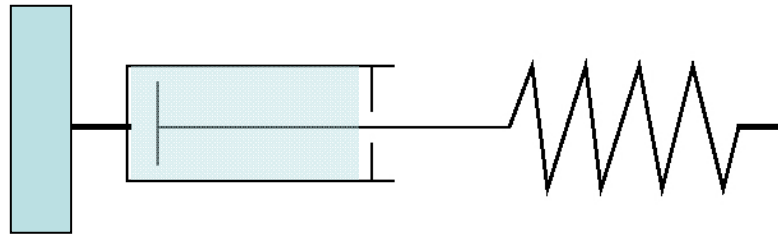
Zdroje tepla:

- rozpad radioaktivních prvků
- **slapové zahřívání**
- teplo nahromaděné na počátku

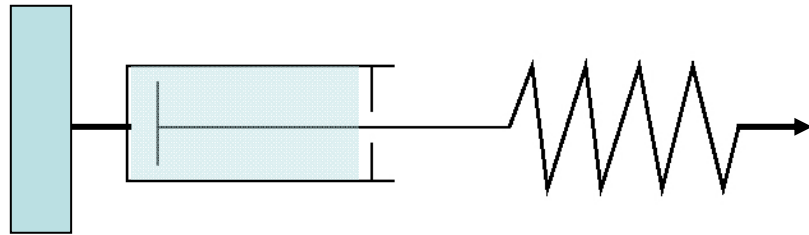
	Země	Mars	Titan	Iapetus	Enceladus
Čas chladnutí [10^9 let]	130	36	7.1	0.57	0.07



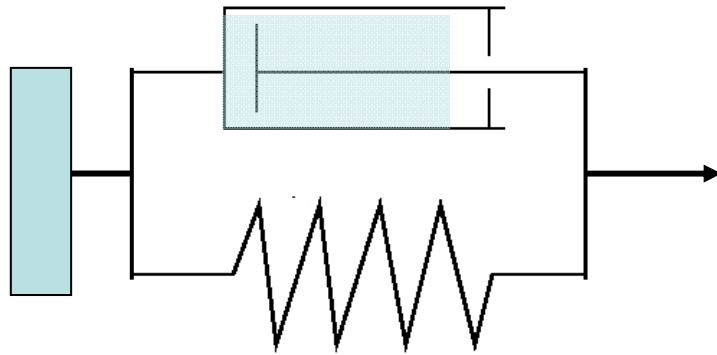
ELASTICITA



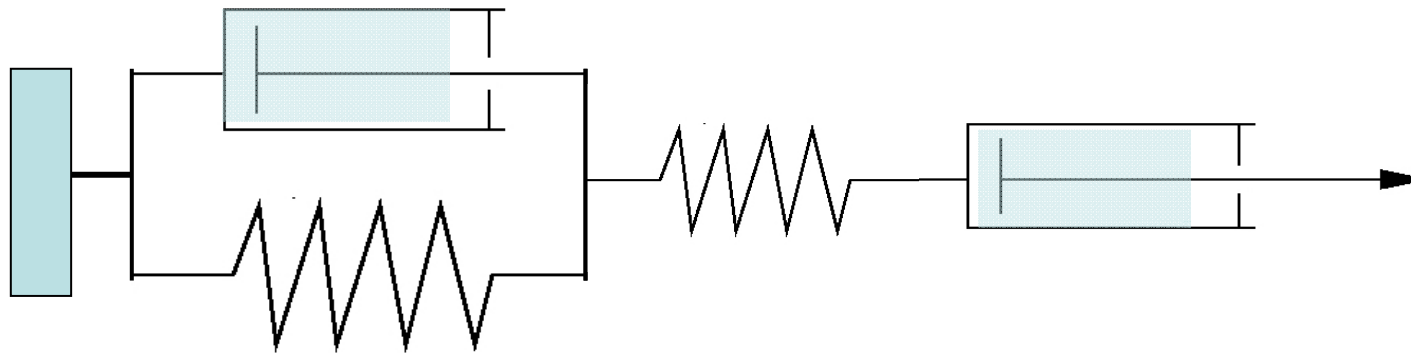
ANELASTICITA



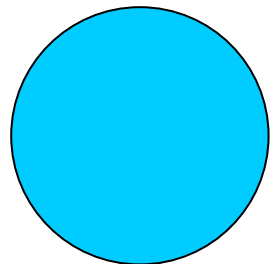
Maxwell



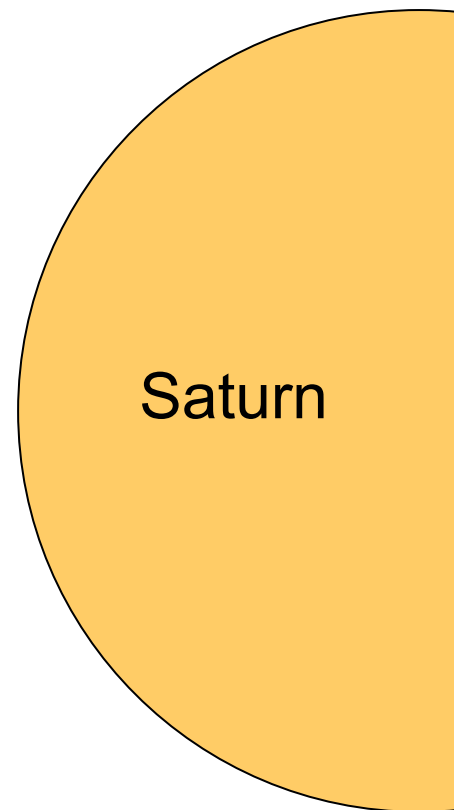
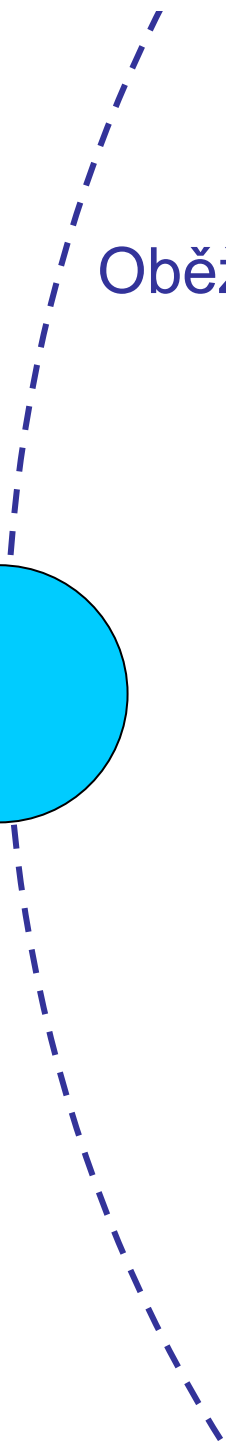
Kelvin-Voigt



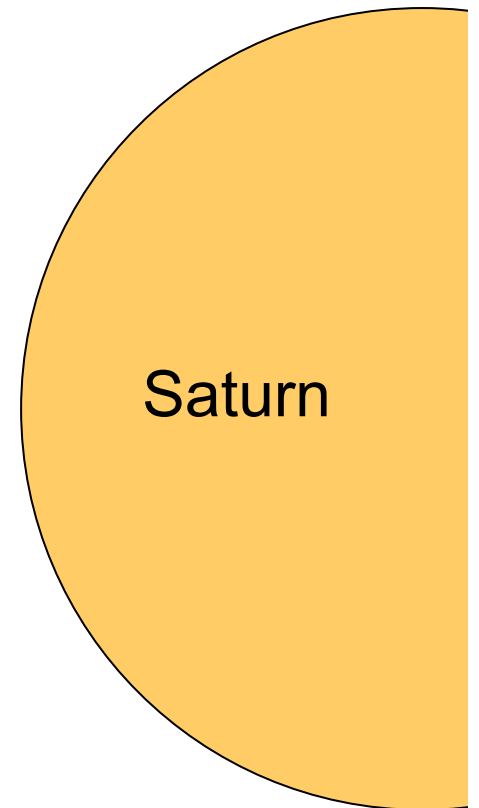
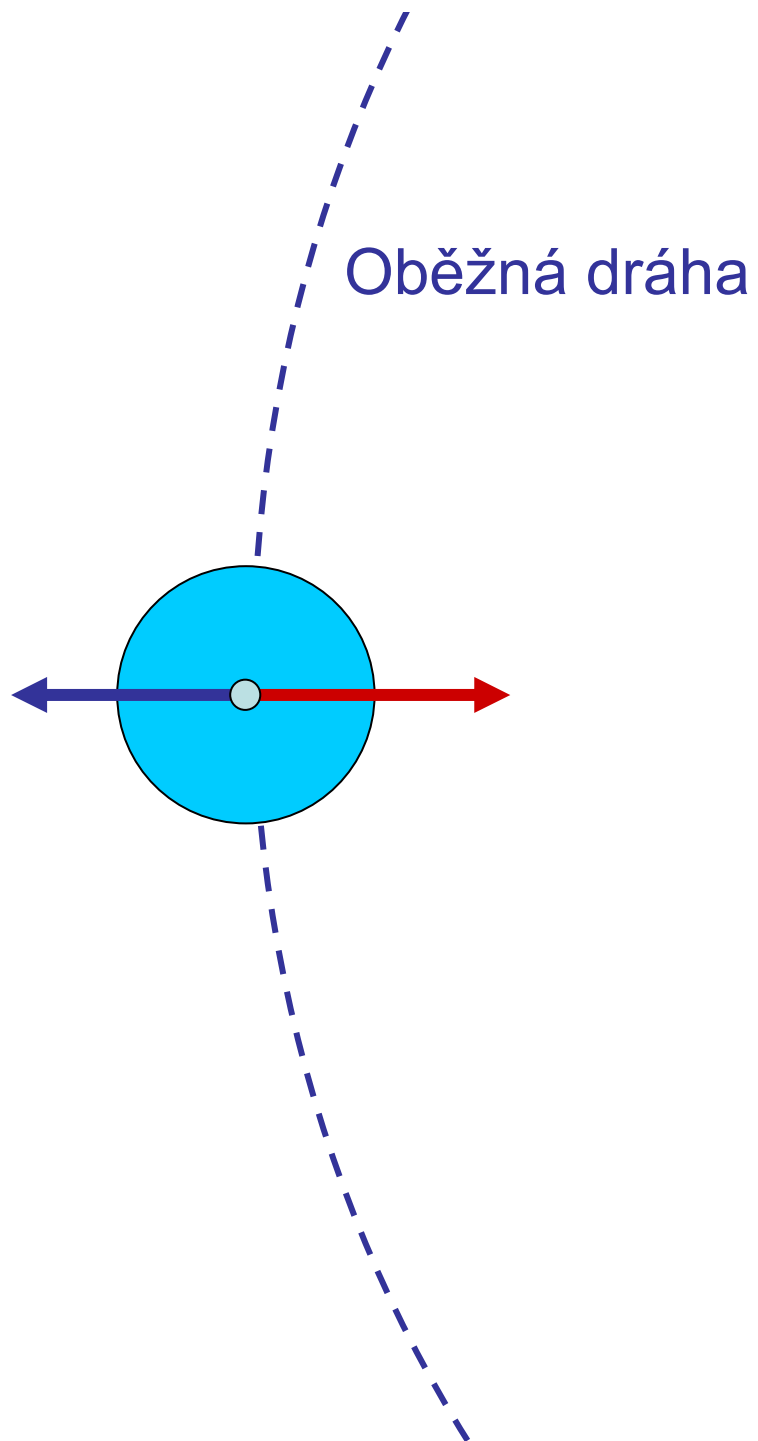
Burgers

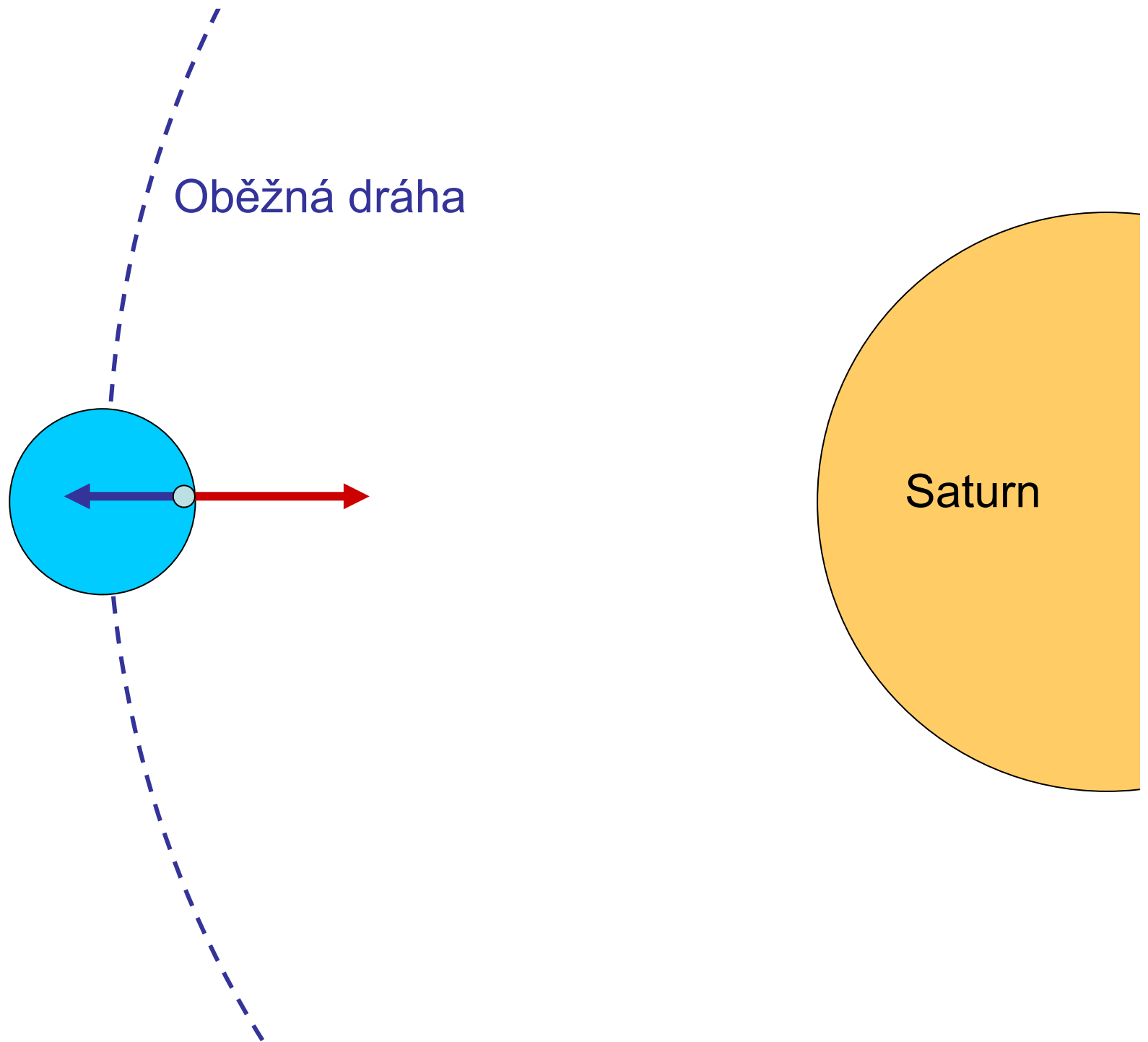


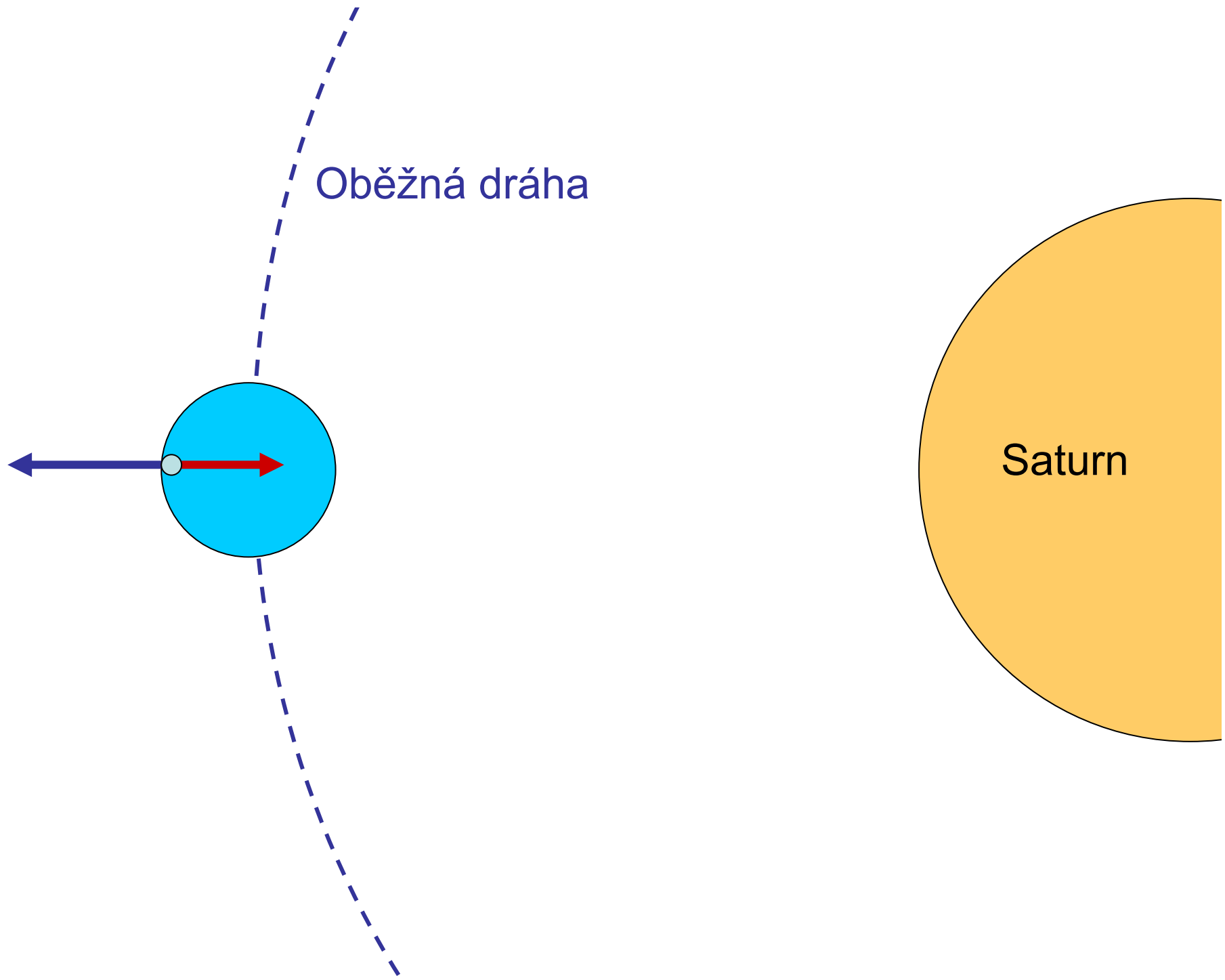
Oběžná dráha

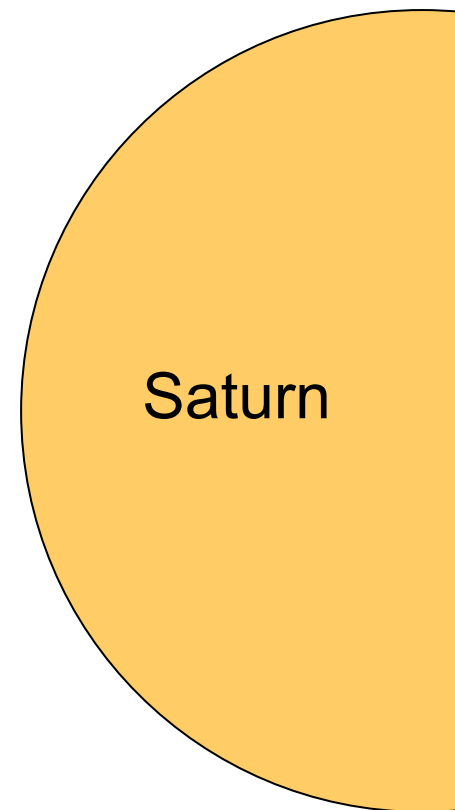
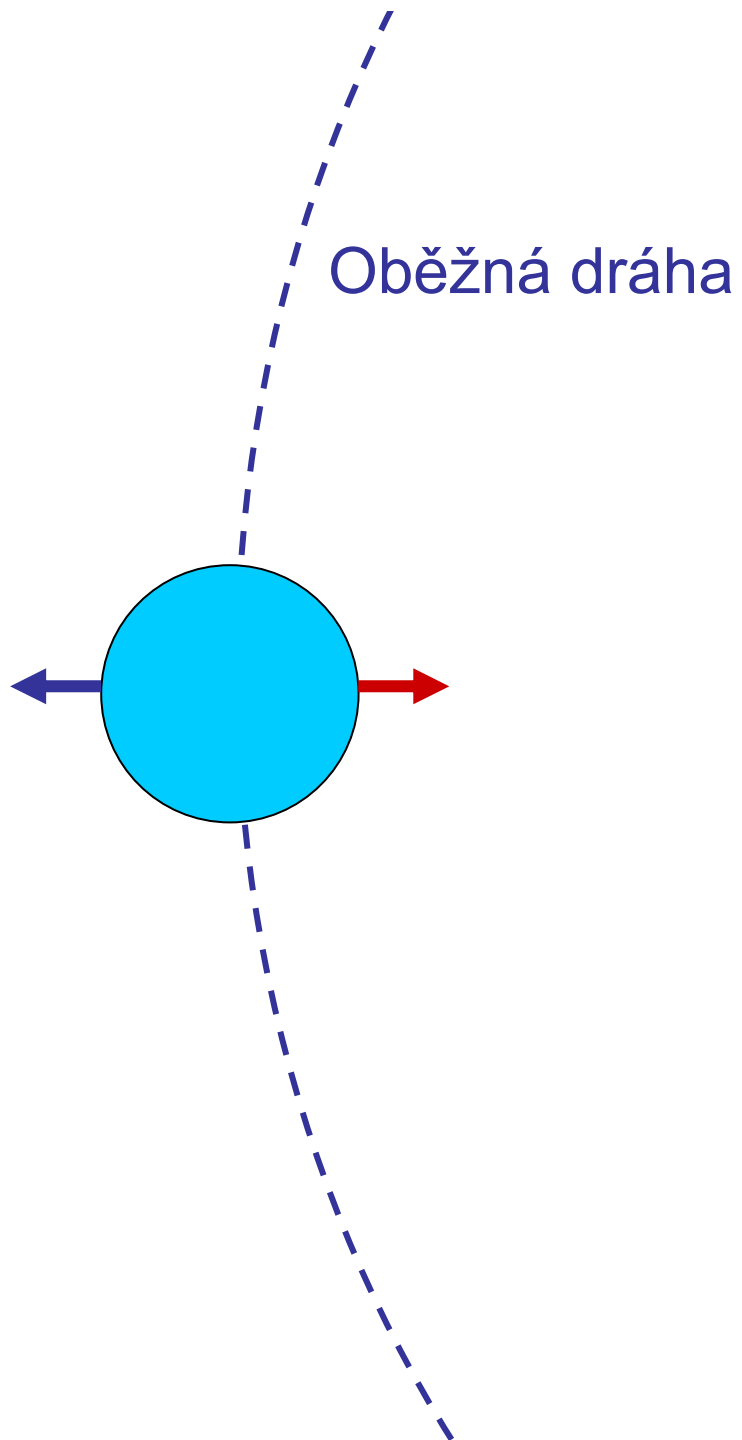


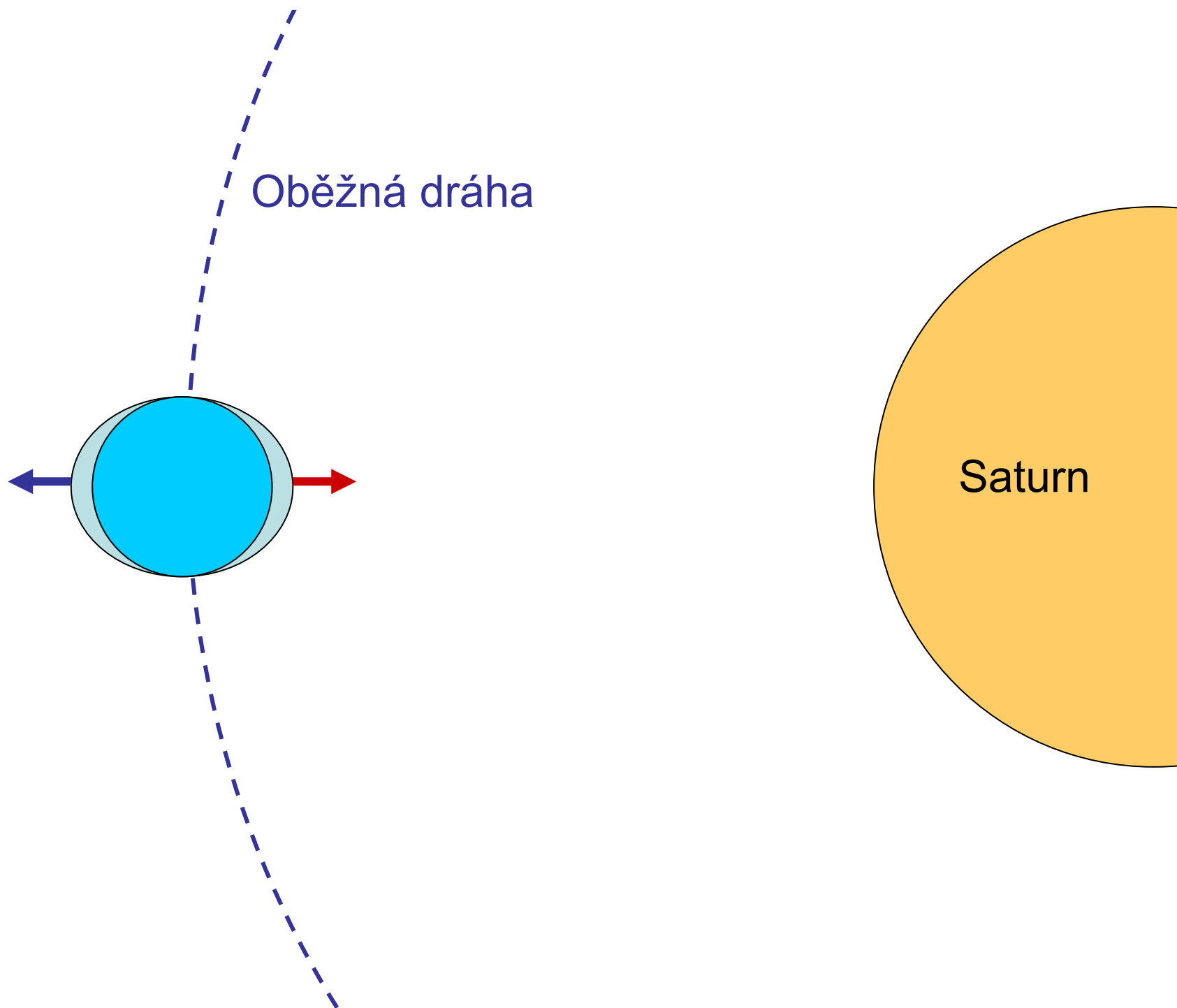
Saturn

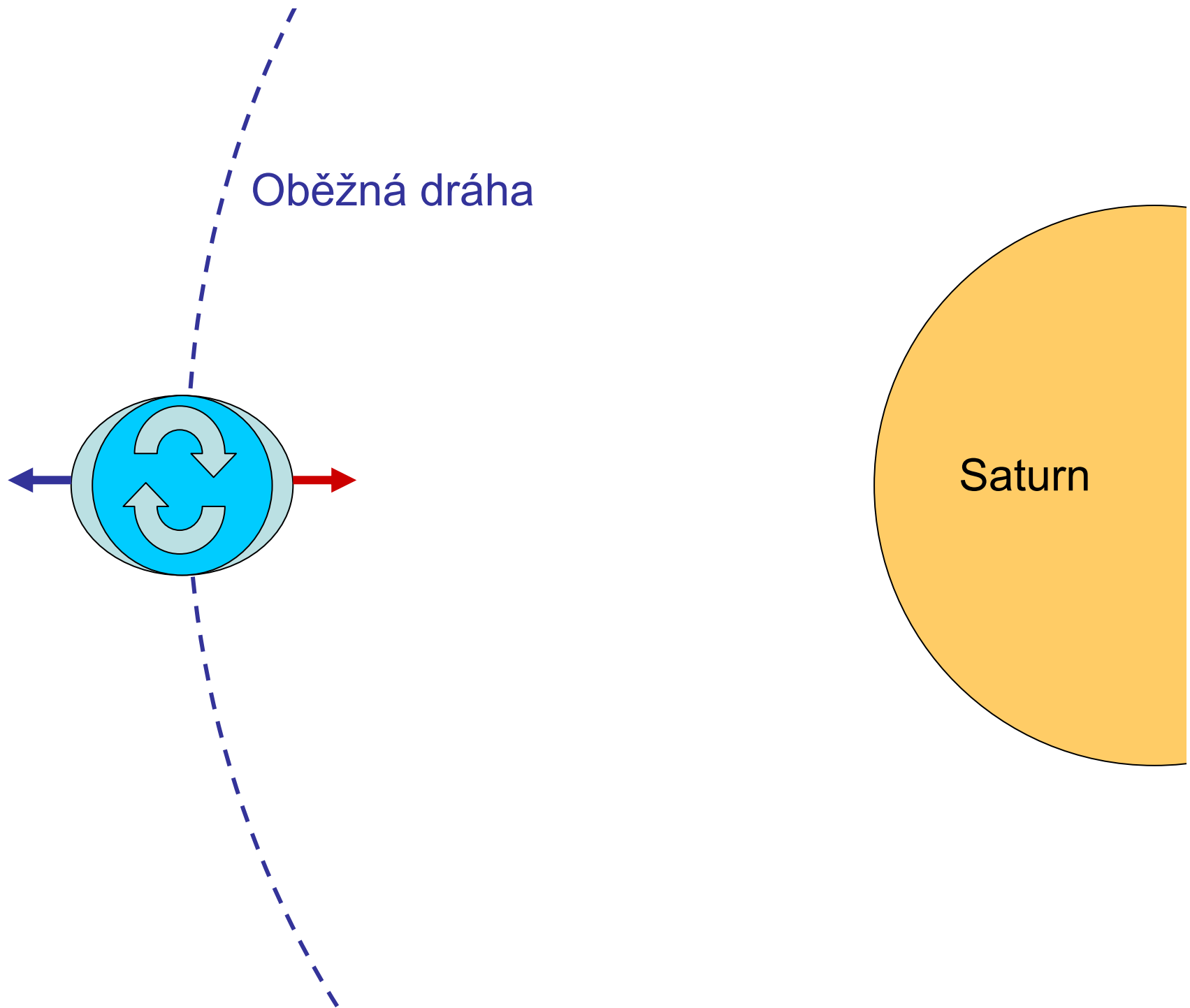


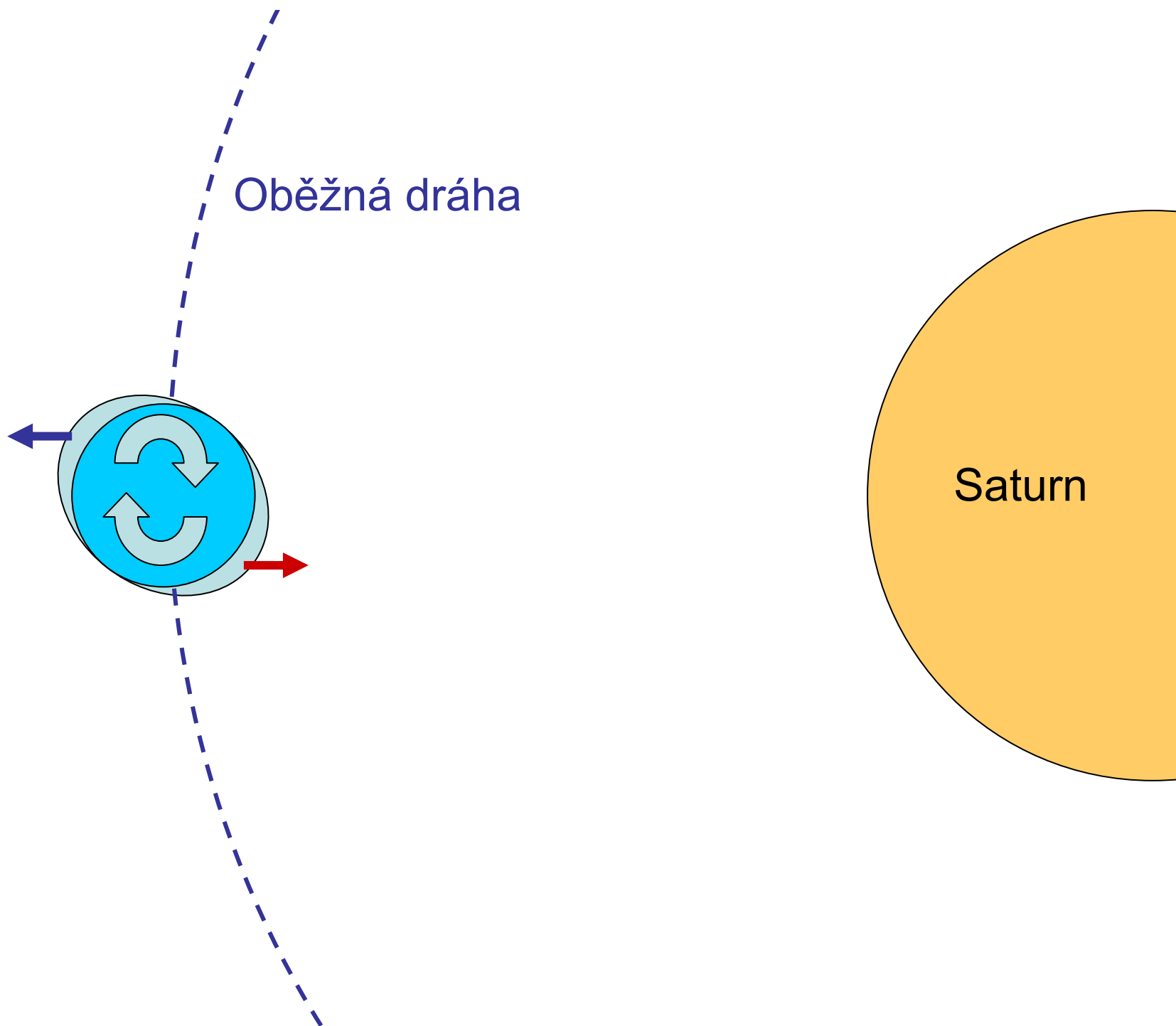


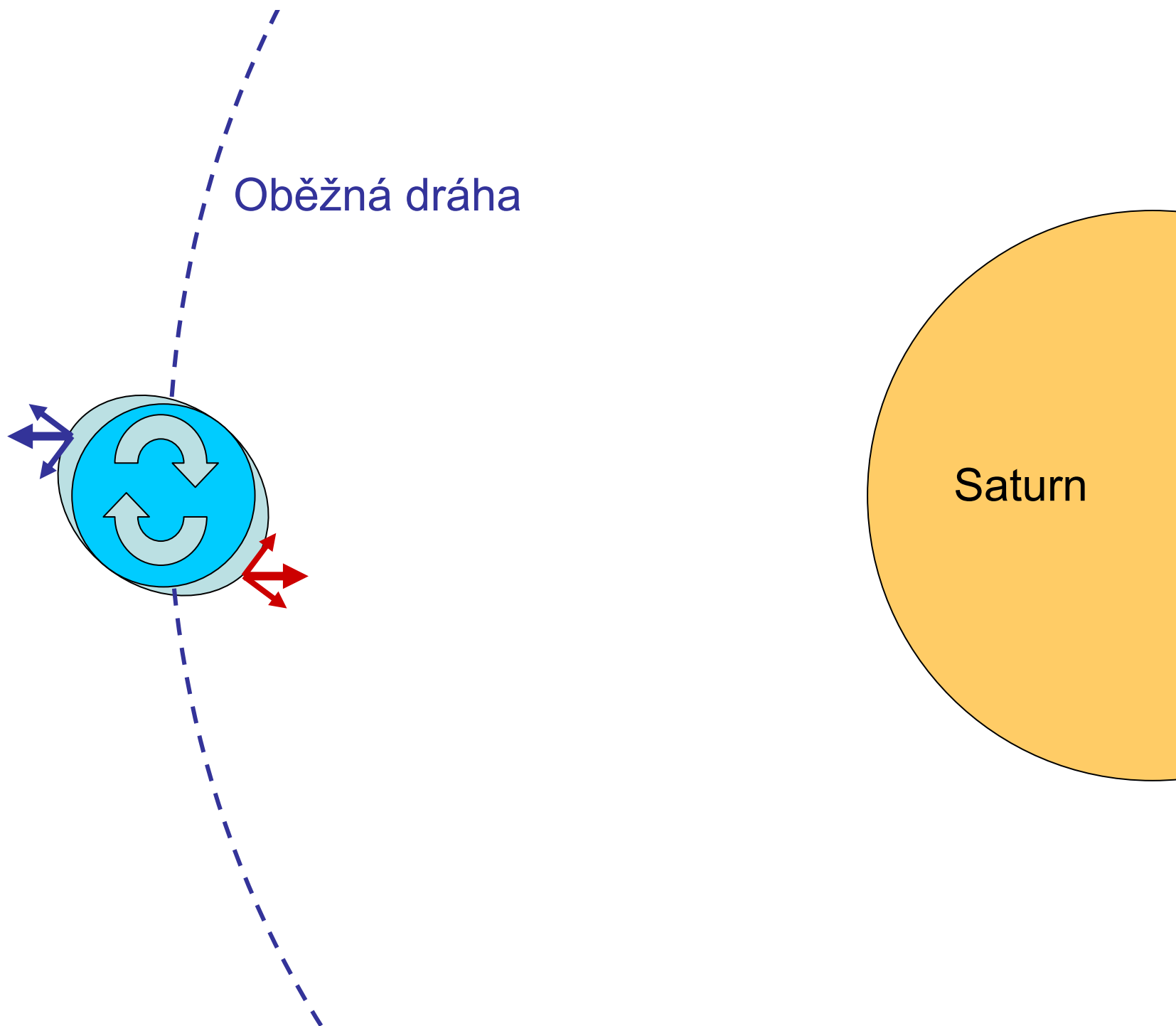


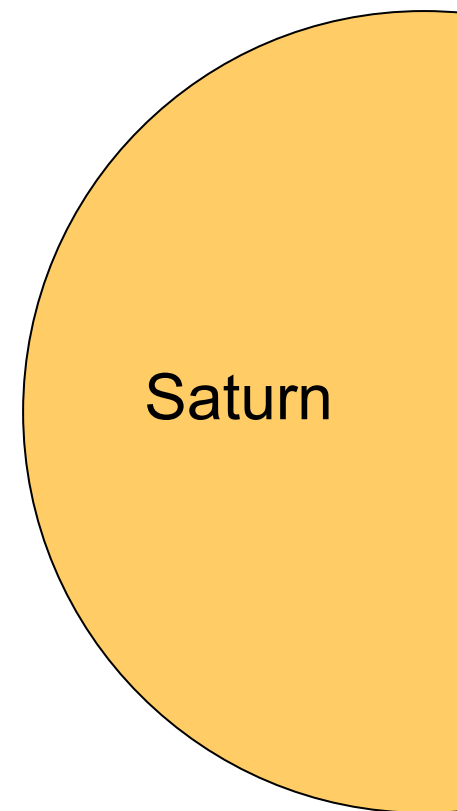
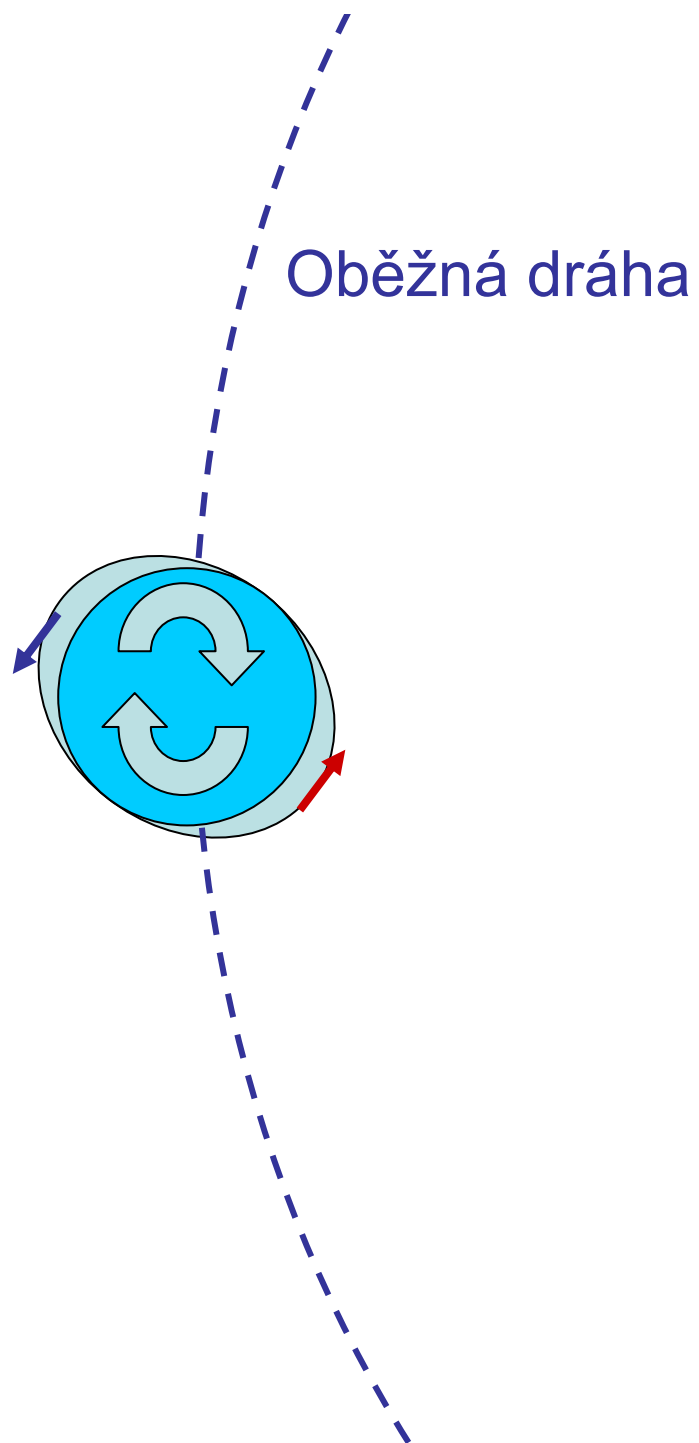


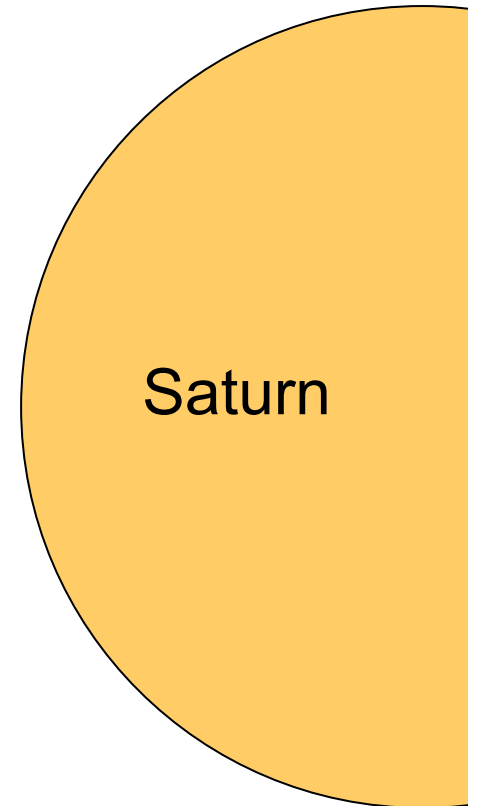
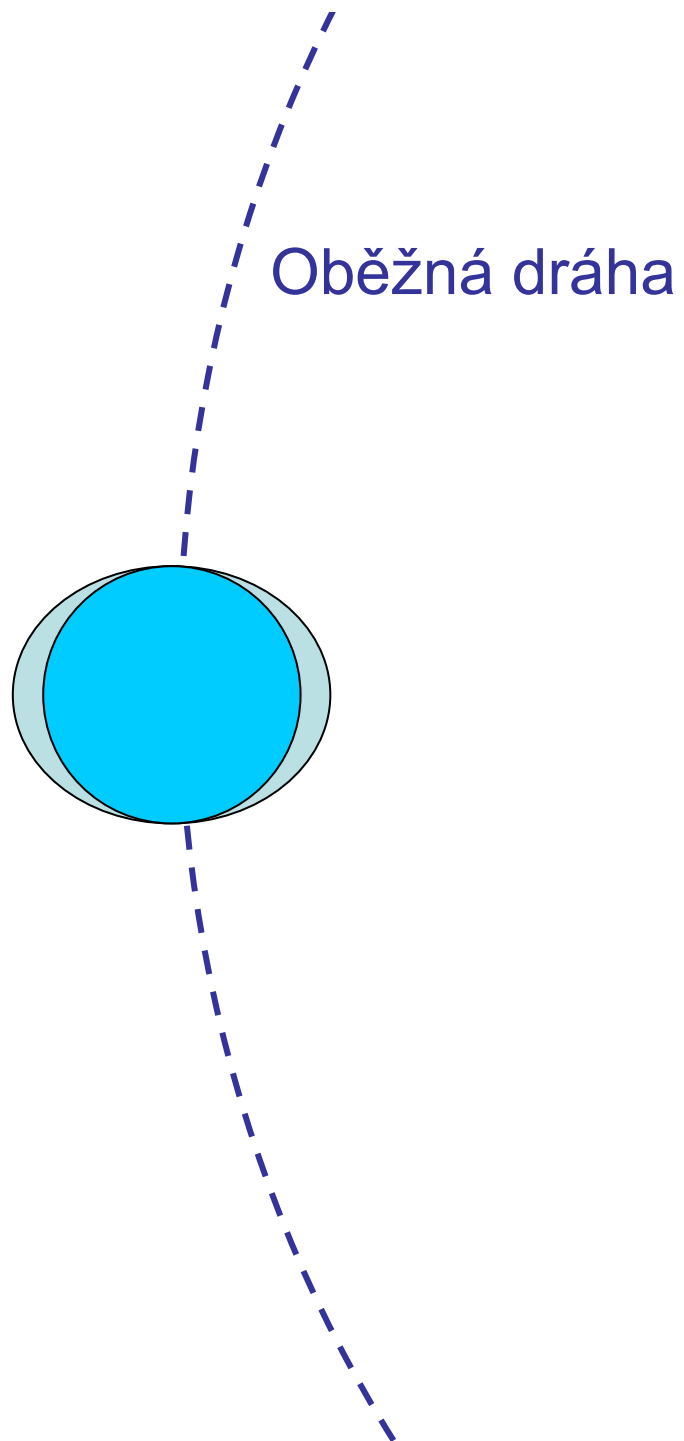


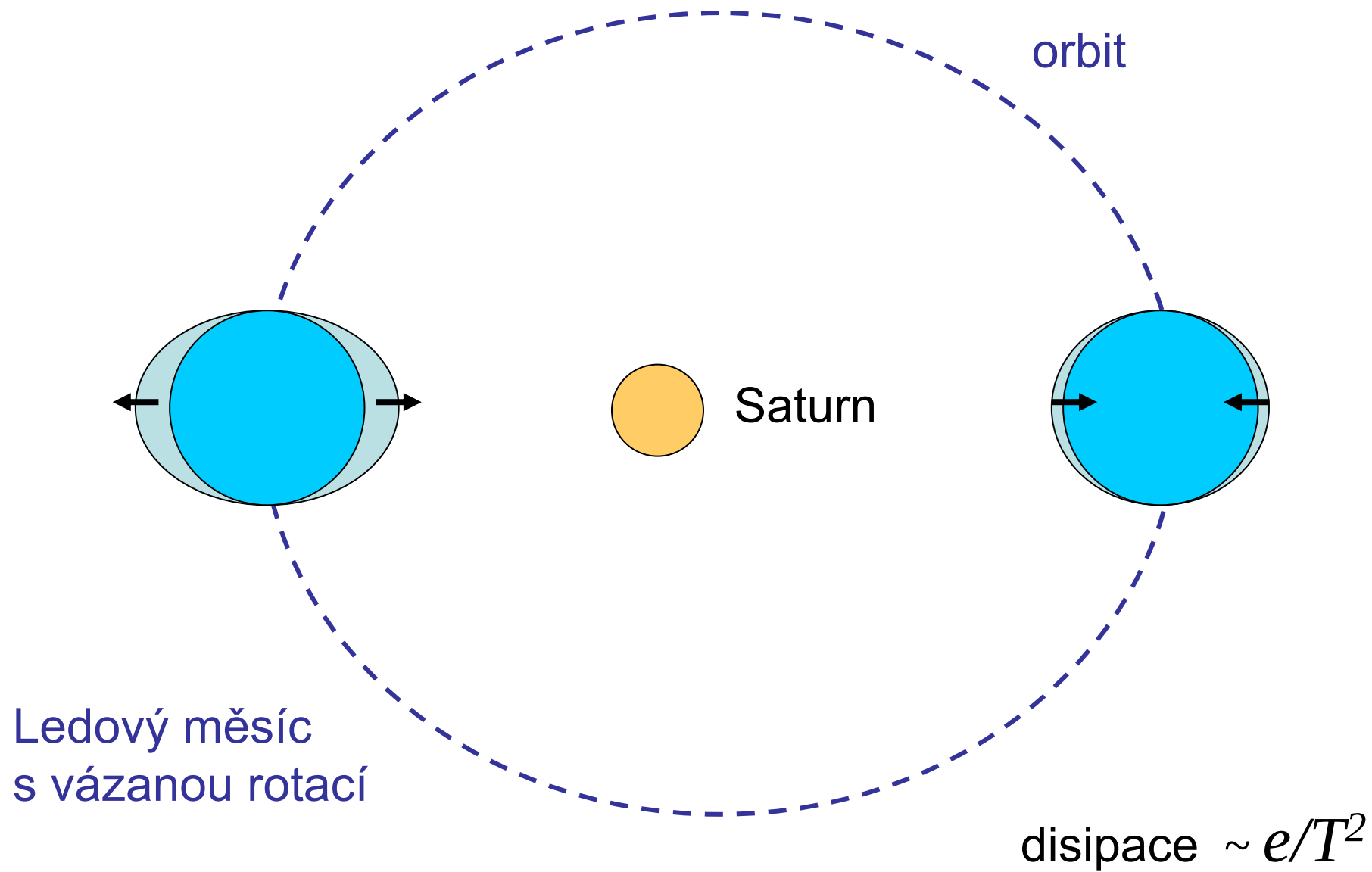












Střední teplota na povrchu

Europa – 102 K

Titan – 93 K

Enceladus – 75 K

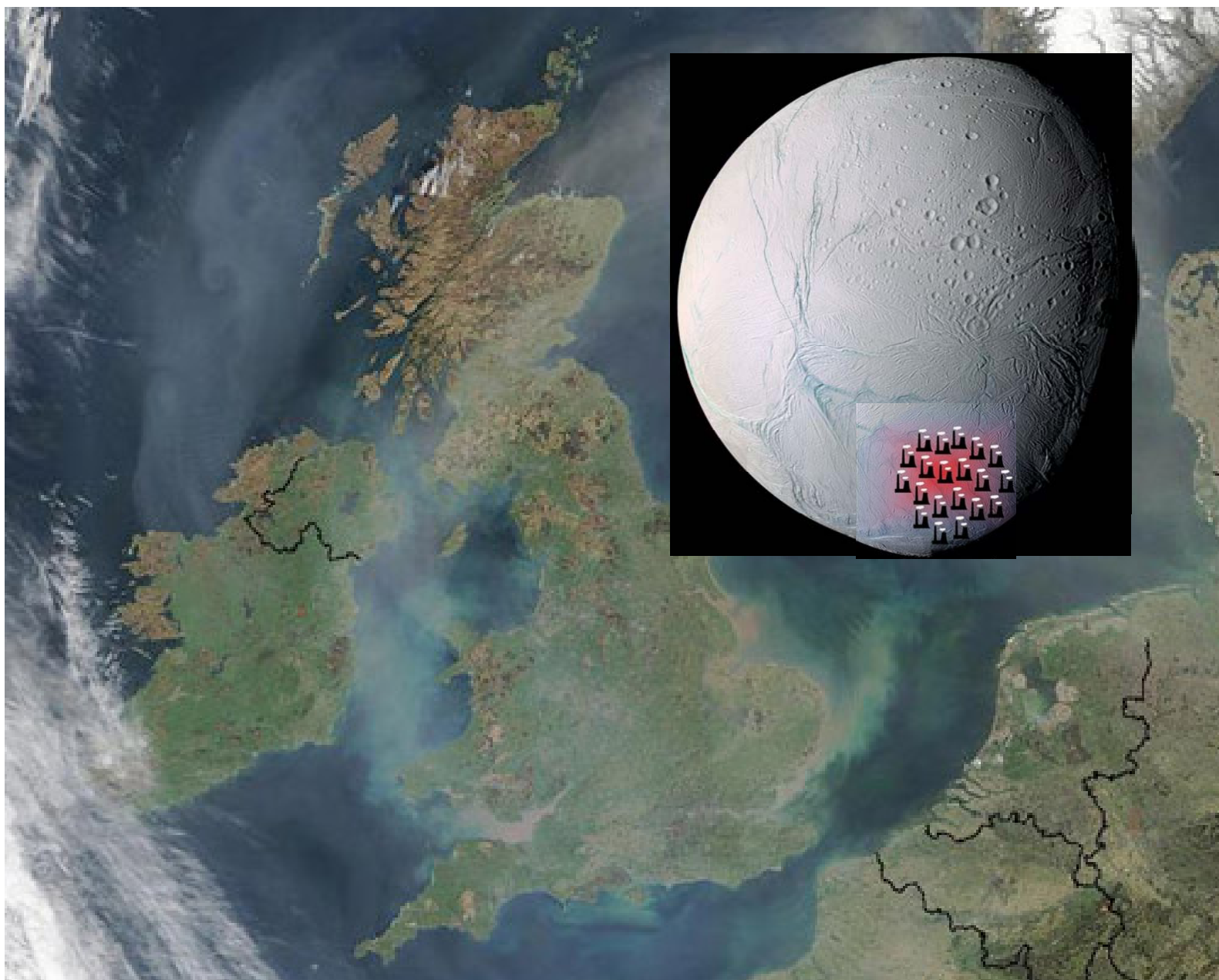
Triton – 38 K

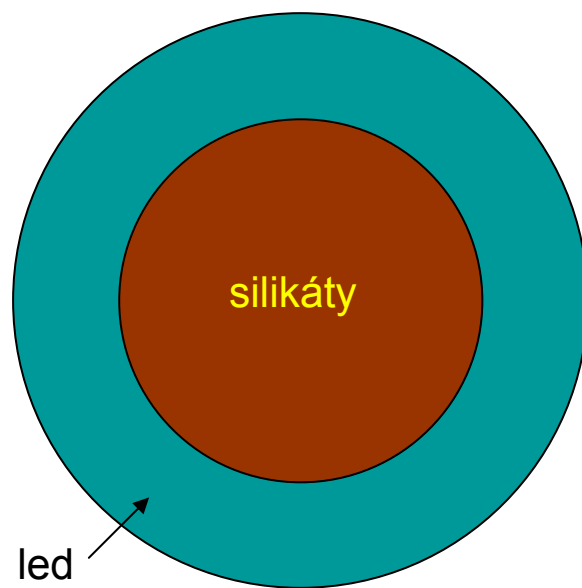
ODKUD SE
BERE TEPLLO ?

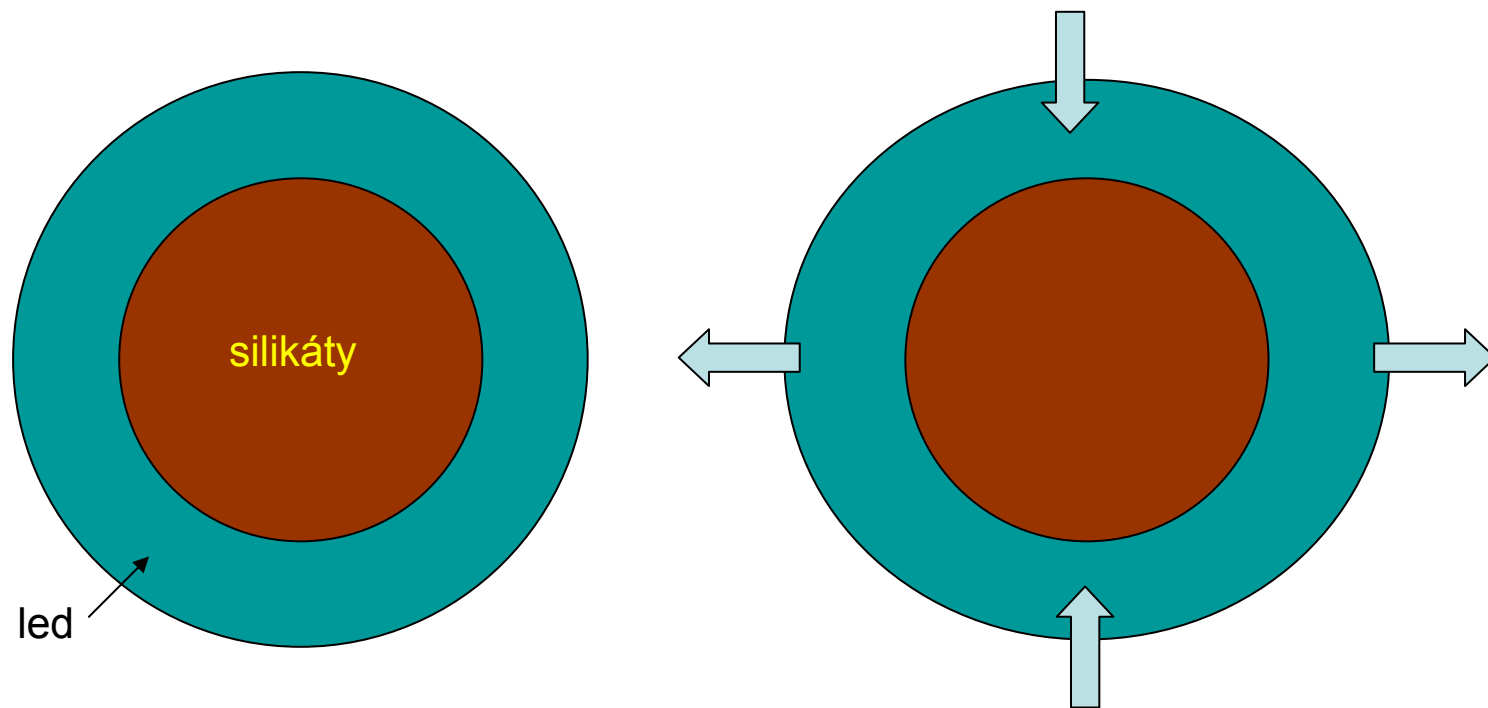
Zdroje tepla:

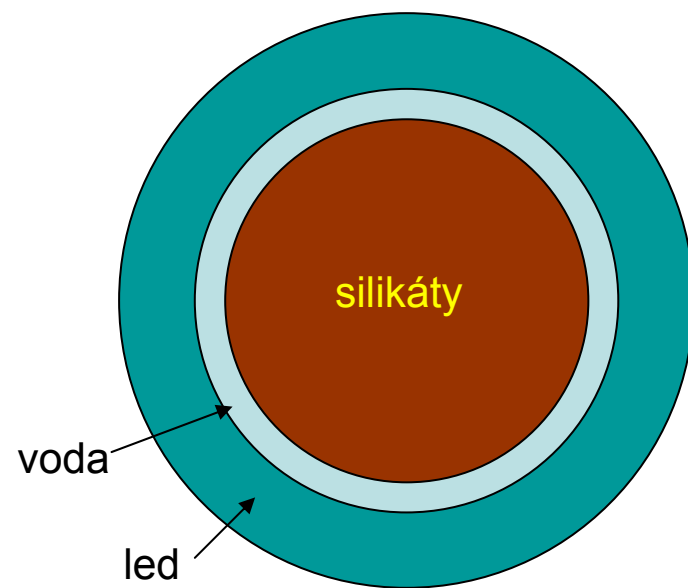
- rozpad radioaktivních prvků
- **slapové zahřívání**
- teplo nahromaděné na počátku

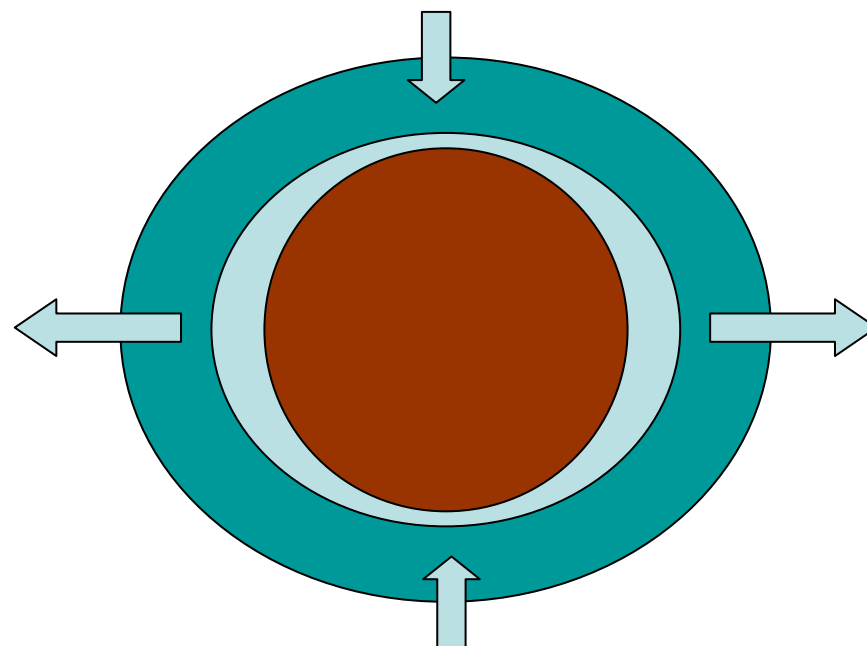
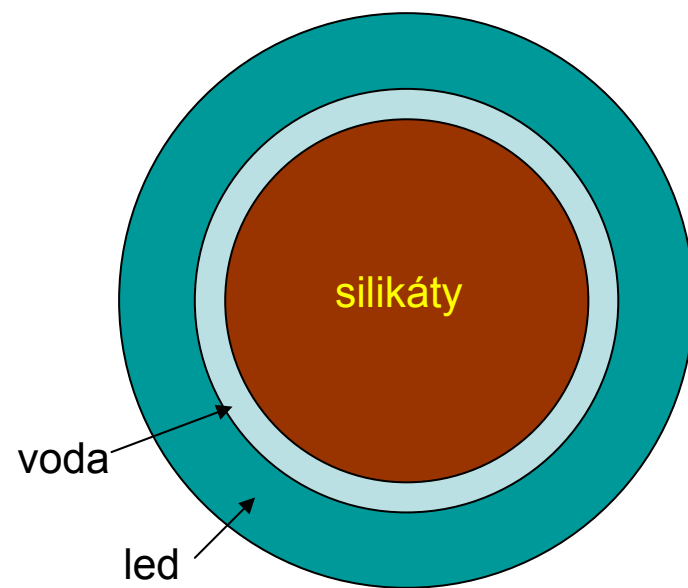
	Země	Mars	Titan	Iapetus	Enceladus
Čas chladnutí [10^9 let]	130	36	7.1	0.57	0.07

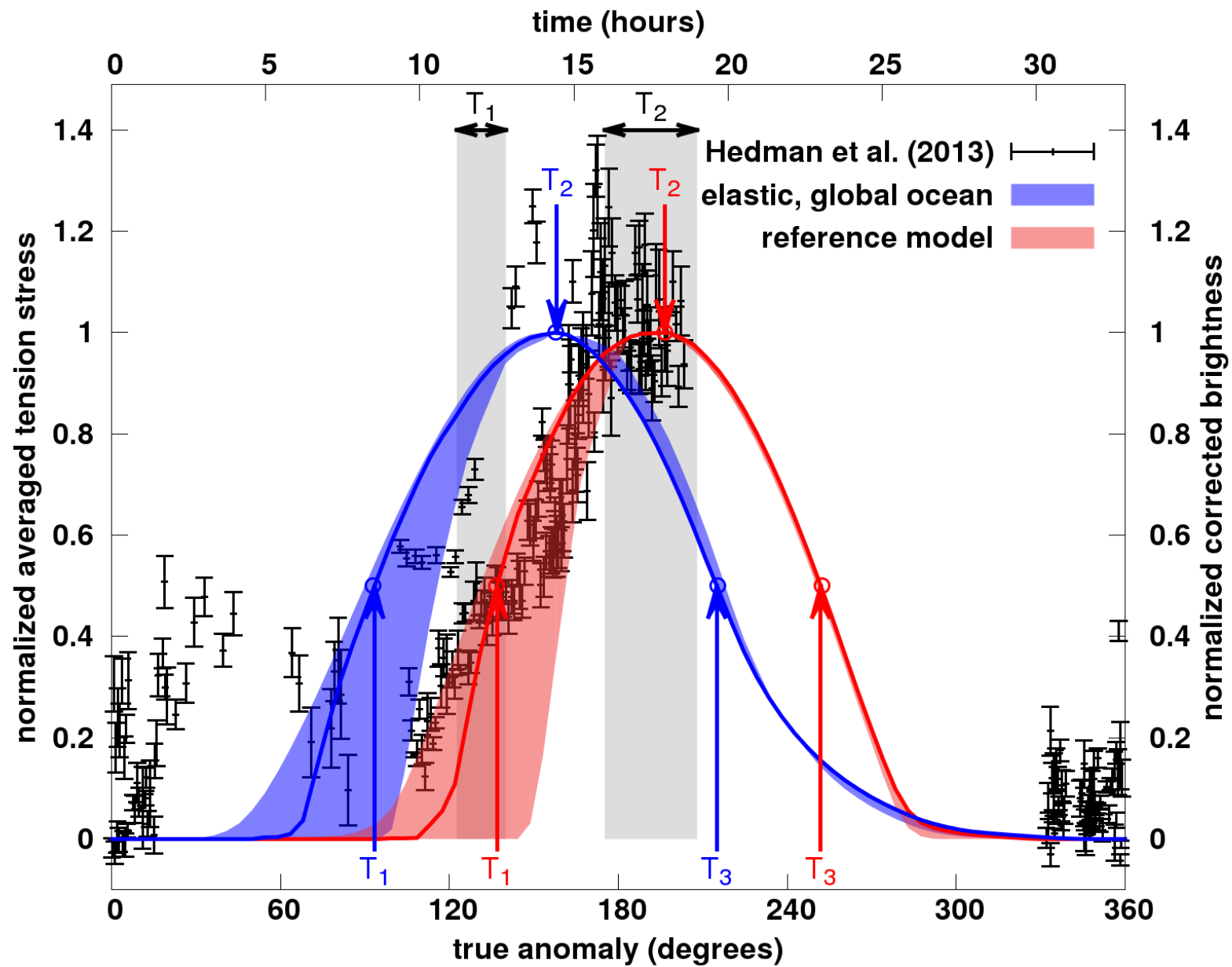




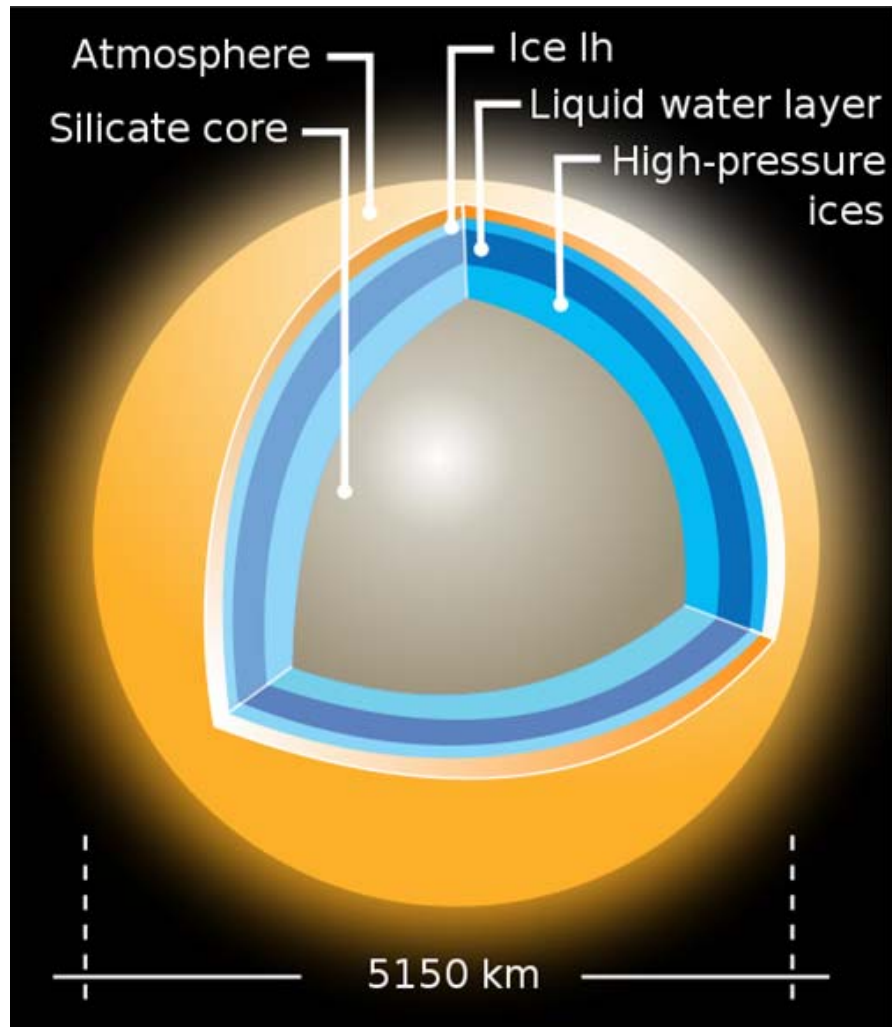




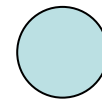




TITAN



ENCELADUS



OSNOVA

- Kapalná voda ve vnější sluneční soustavě: výjimka, nebo pravidlo?
- Příklady ledových měsíců a jejich „habitabilní potenciál“
- Problém č. 1
Odkud se bere teplo, které udržuje vodu v kapalném skupenství?
- Problém č. 2
Jsou vodní rezervoáry dlouhodobě stabilní?
- Problém č. 3
Proudění vody v tuhých slupkách ledových měsíců

Tepelná bilance:

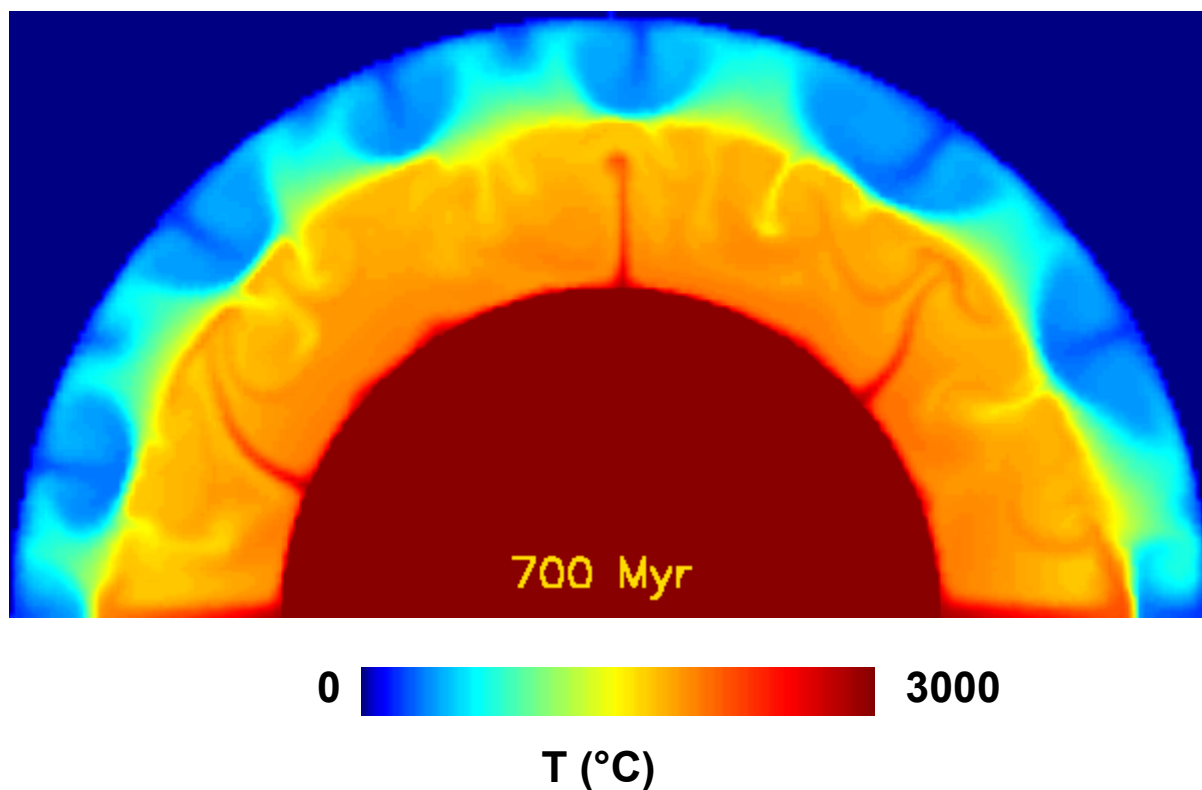
$$P(t) = \boxed{\begin{array}{l} \text{celkový výkon} \\ \text{vnitřních zdrojů tepla} \\ \text{(tepelná produkce)} \end{array}} - \boxed{\begin{array}{l} \text{celkový tepelný tok} \\ \text{přes povrch tělesa} \\ \text{(míra ochlazování)} \end{array}}$$

Těleso bude dlouhodobě stabilní, pokud $P(t) \approx 0$.

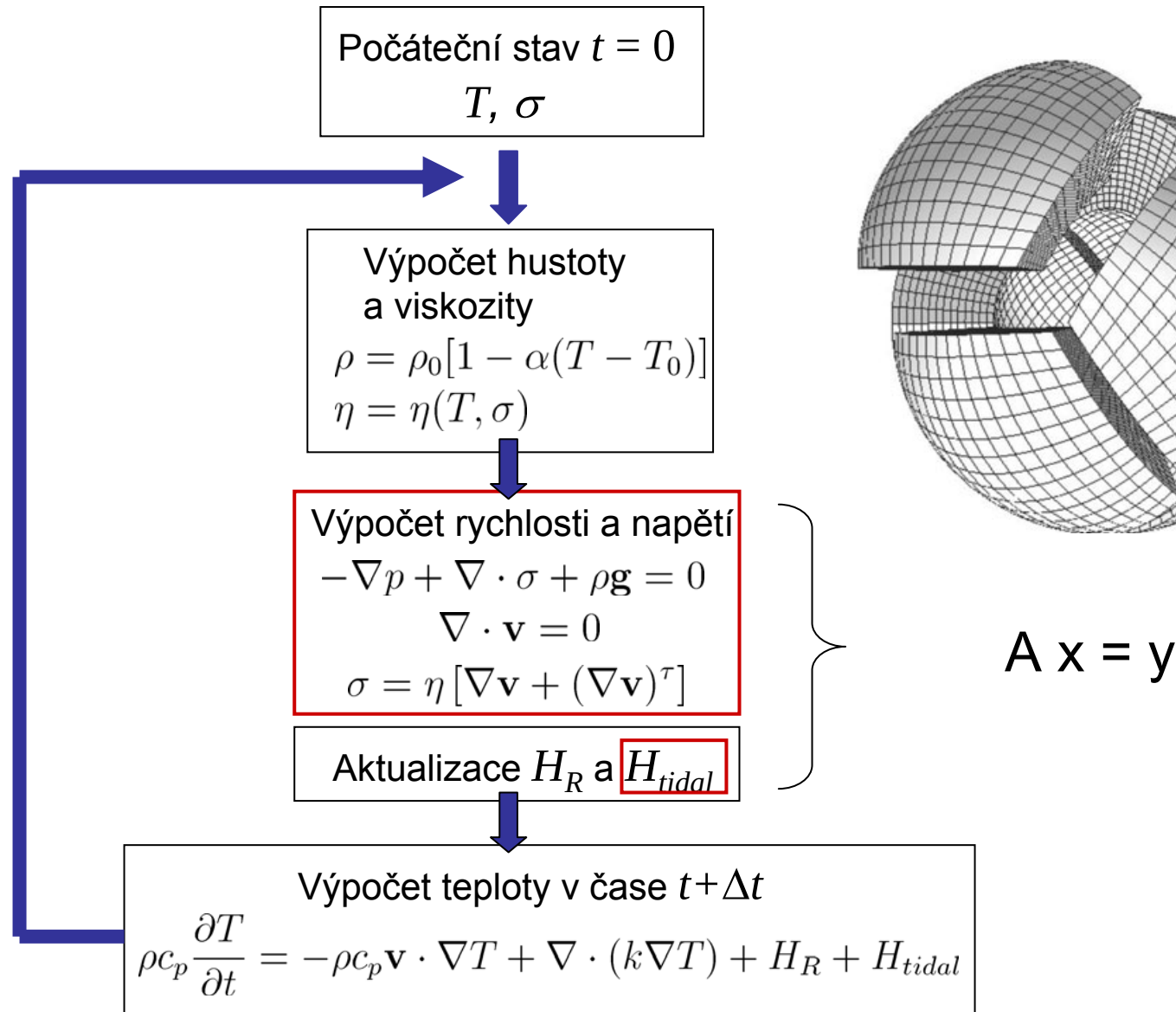
Tepelná bilance:

$$P(t) = \boxed{\begin{array}{c} \text{celkový výkon} \\ \text{vnitřních zdrojů tepla} \\ \text{(tepelná produkce)} \end{array}} - \boxed{\begin{array}{c} \text{celkový tepelný tok} \\ \text{přes povrch tělesa} \\ \text{(míra ochlazování)} \end{array}}$$

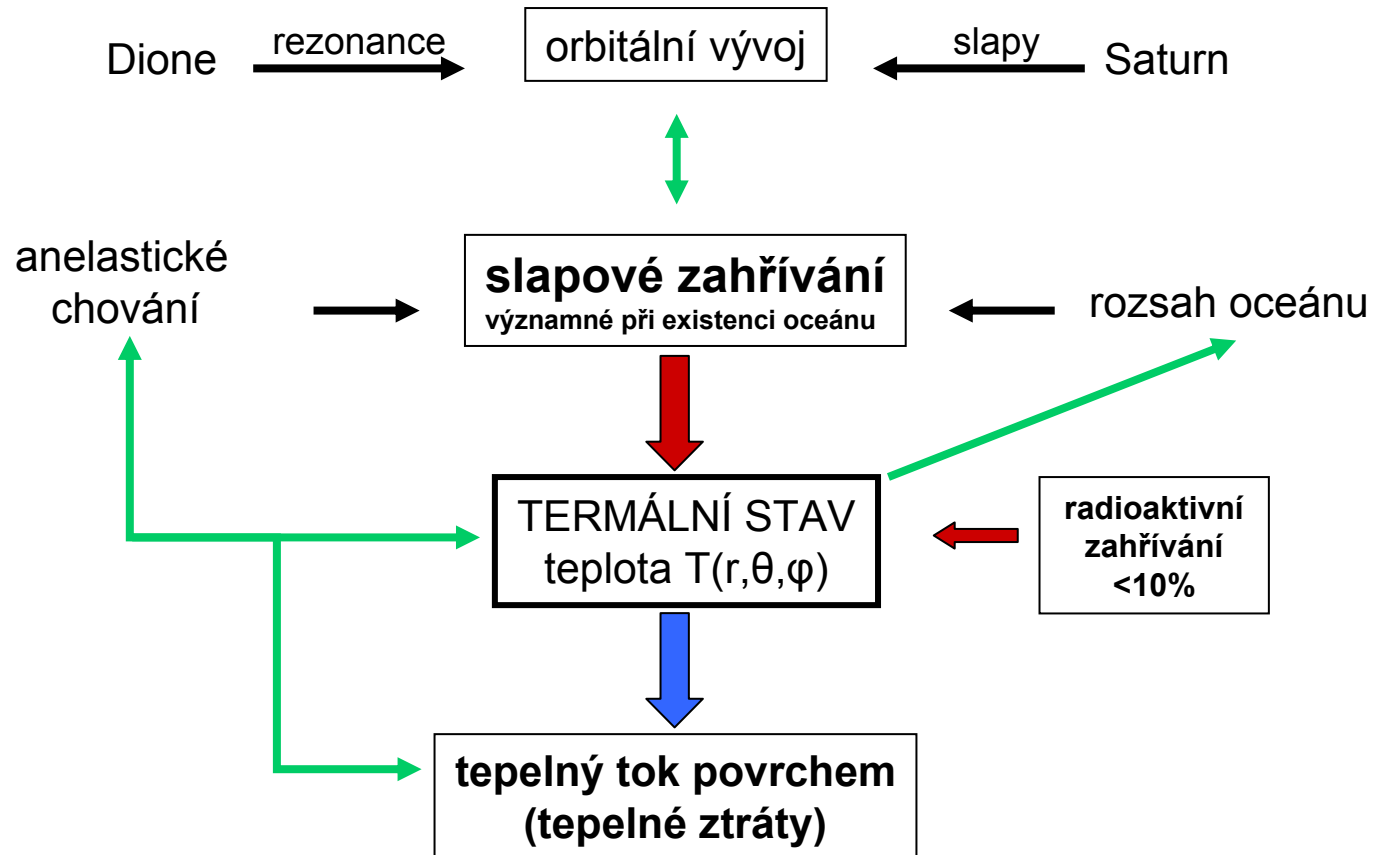
Těleso bude dlouhodobě stabilní, pokud $P(t) \approx 0$.

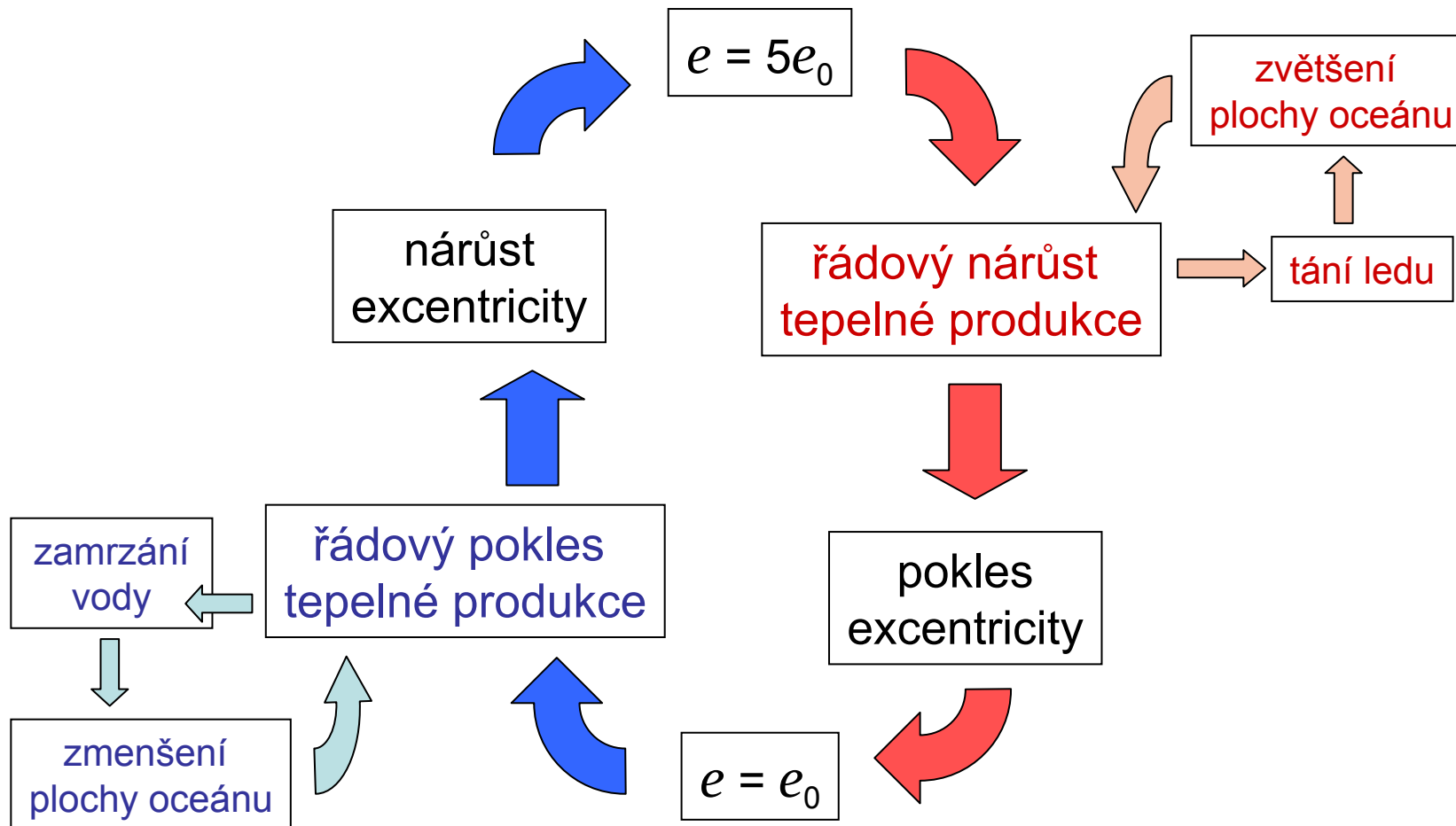


Numerické simulace termálního vývoje



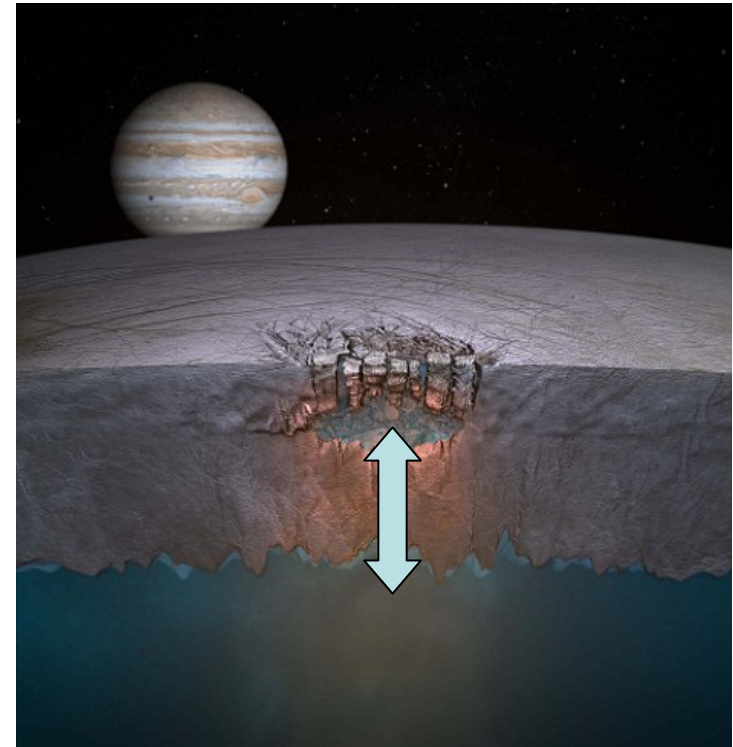
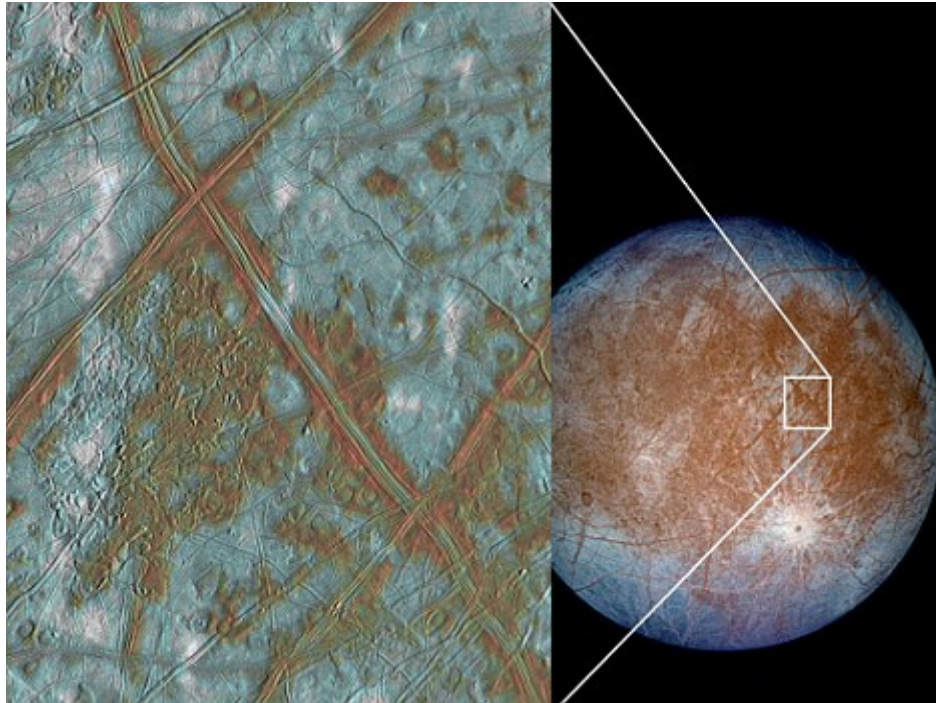
ENCELADUS



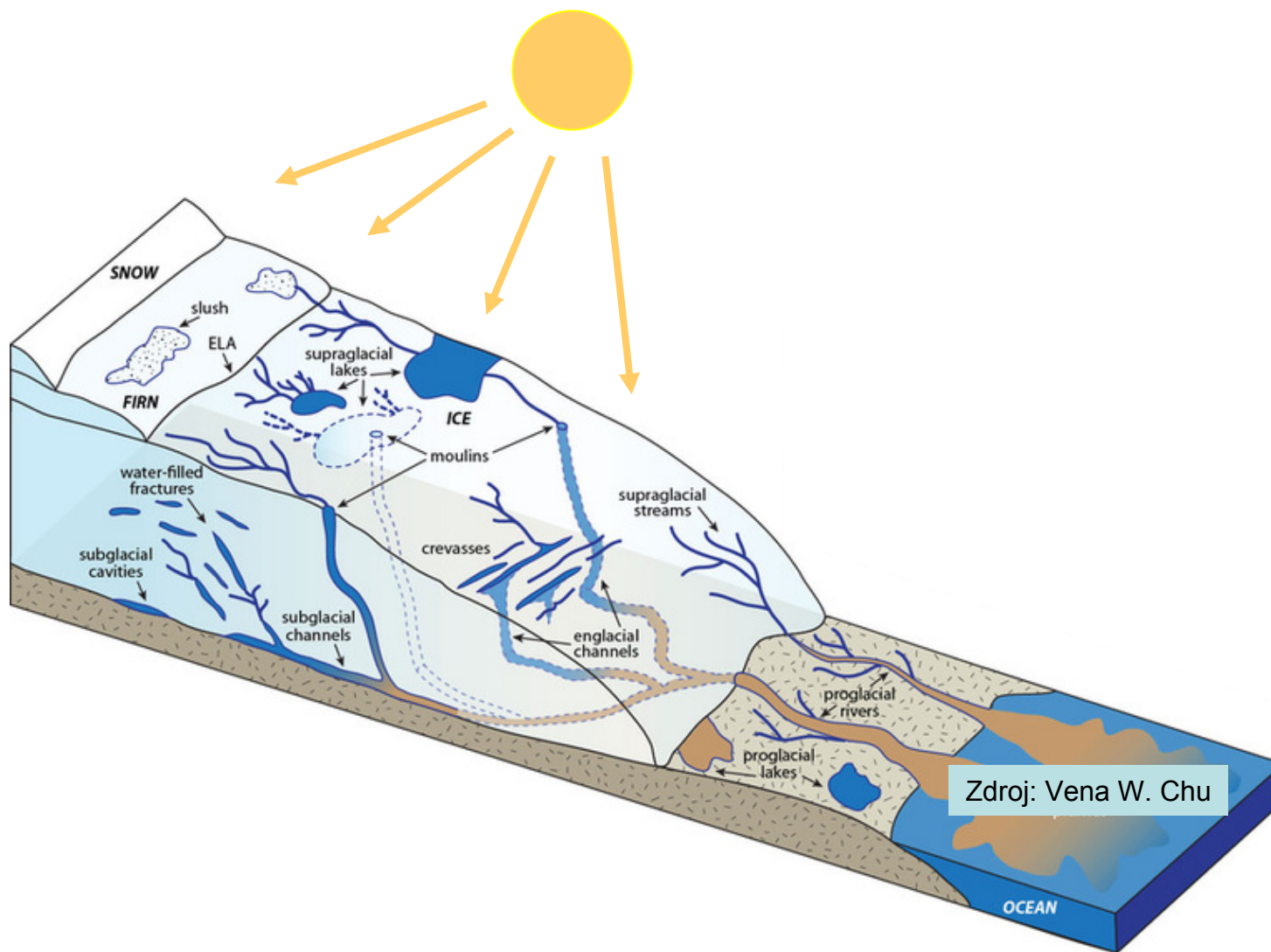


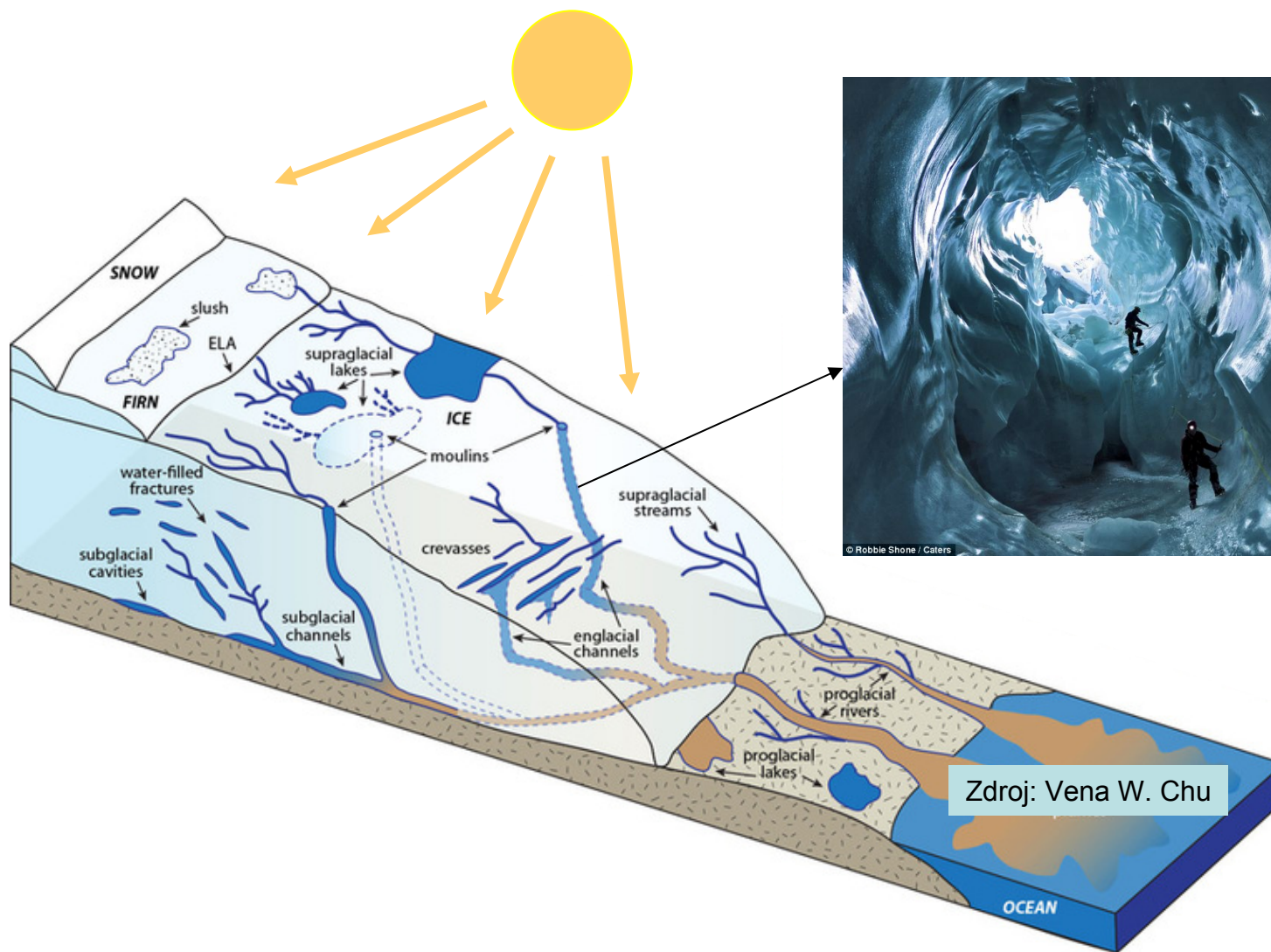
OSNOVA

- Kapalná voda ve vnější sluneční soustavě: výjimka, nebo pravidlo?
- Příklady ledových měsíců a jejich „habitabilní potenciál“
- Problém č. 1
Odkud se bere teplo, které udržuje vodu v kapalném skupenství?
- Problém č. 2
Jsou vodní rezervoáry dlouhodobě stabilní?
- Problém č. 3
Proudění vody v tuhých slupkách ledových měsíců

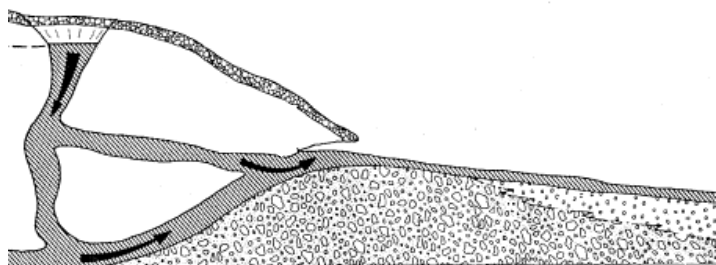
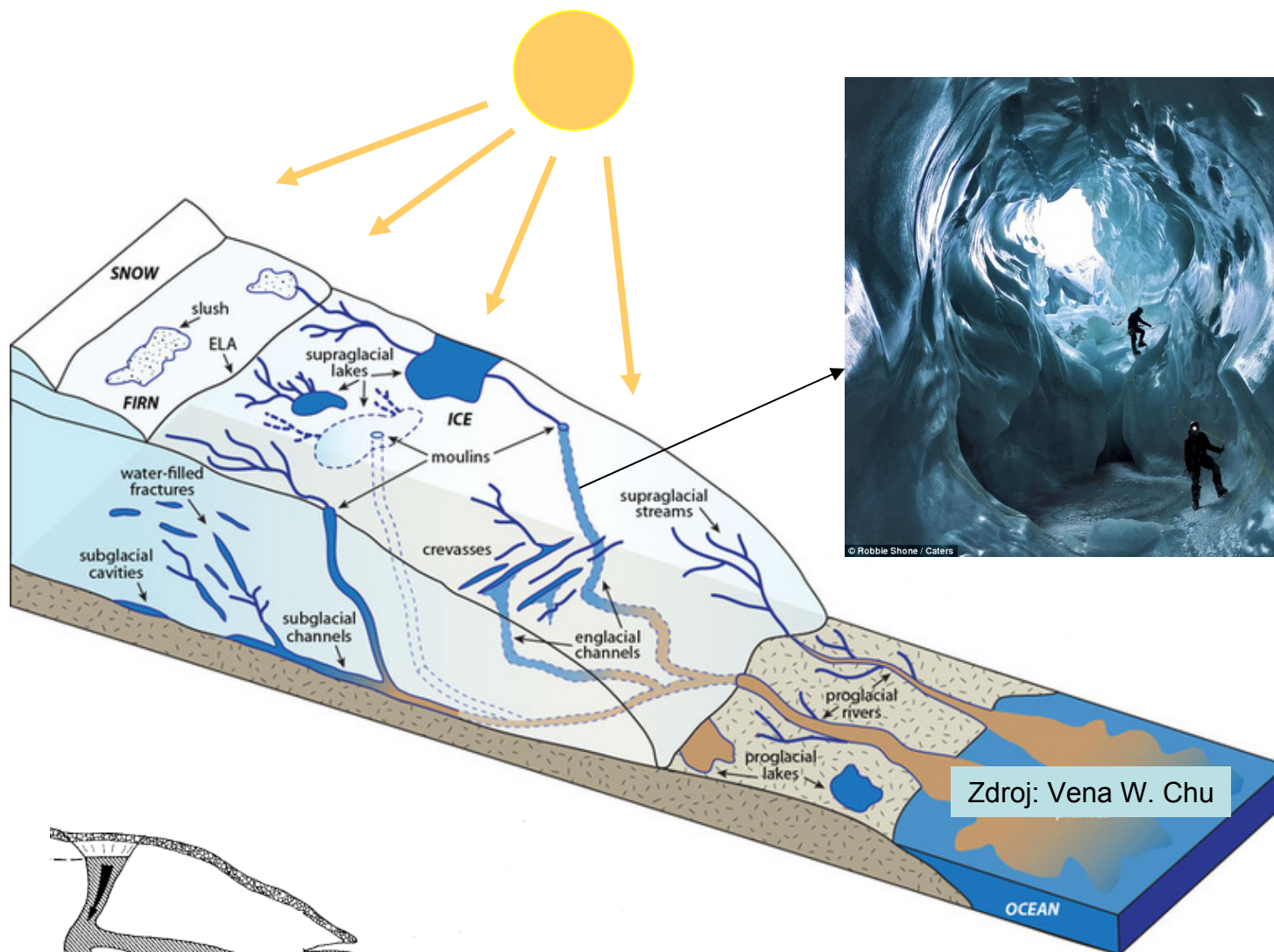


Schmidt et al., Nature 2011



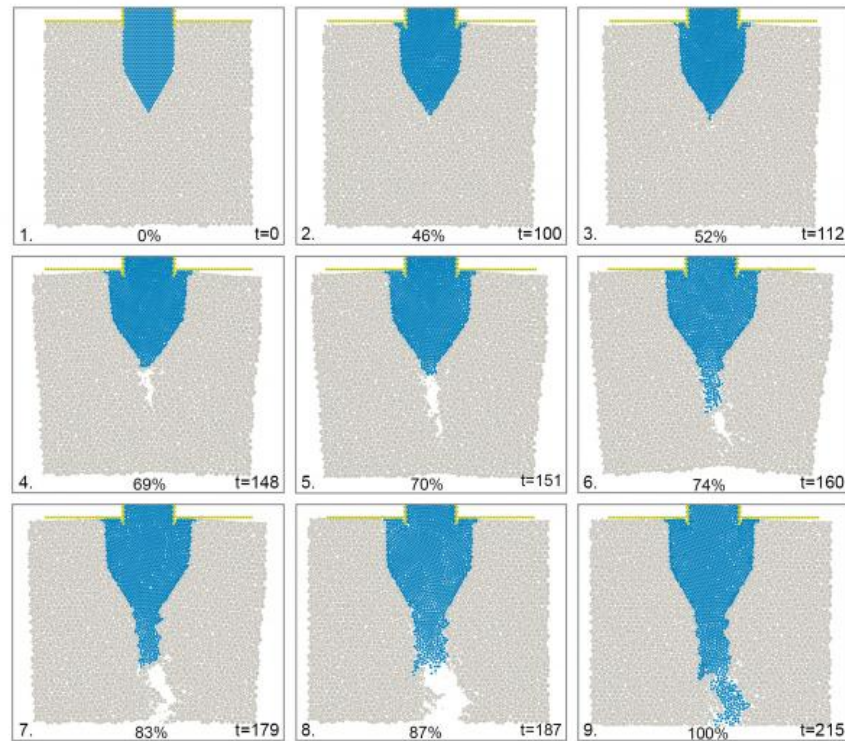


Zdroj: Vena W. Chu

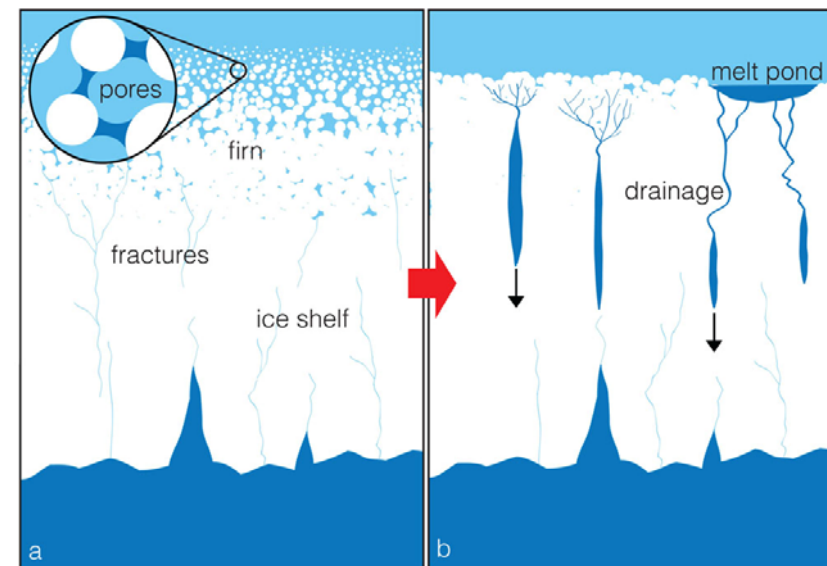


Gustafson and Boyd (1987)

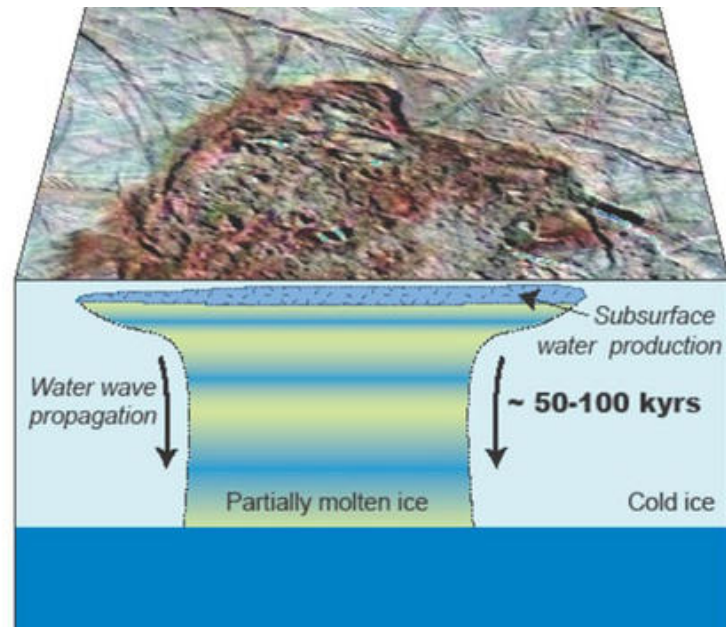
HYDROFRAKTURACE



Zdroj: Andrea Komoróczy



Zdroj: Peter Kuipers Munneke



Zdroj: Klára Kalousová



DĚKUJI ZA POZORNOST!