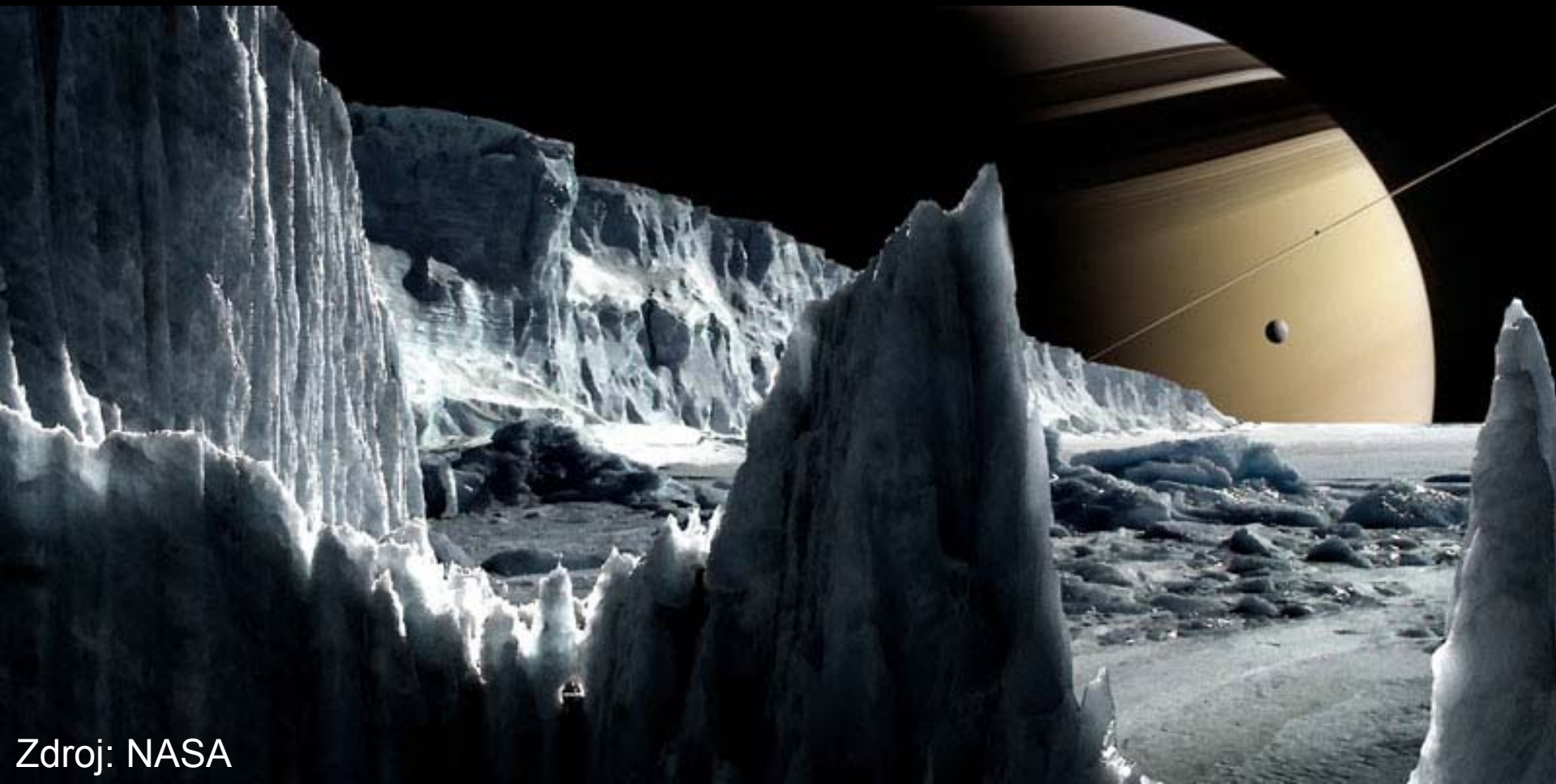


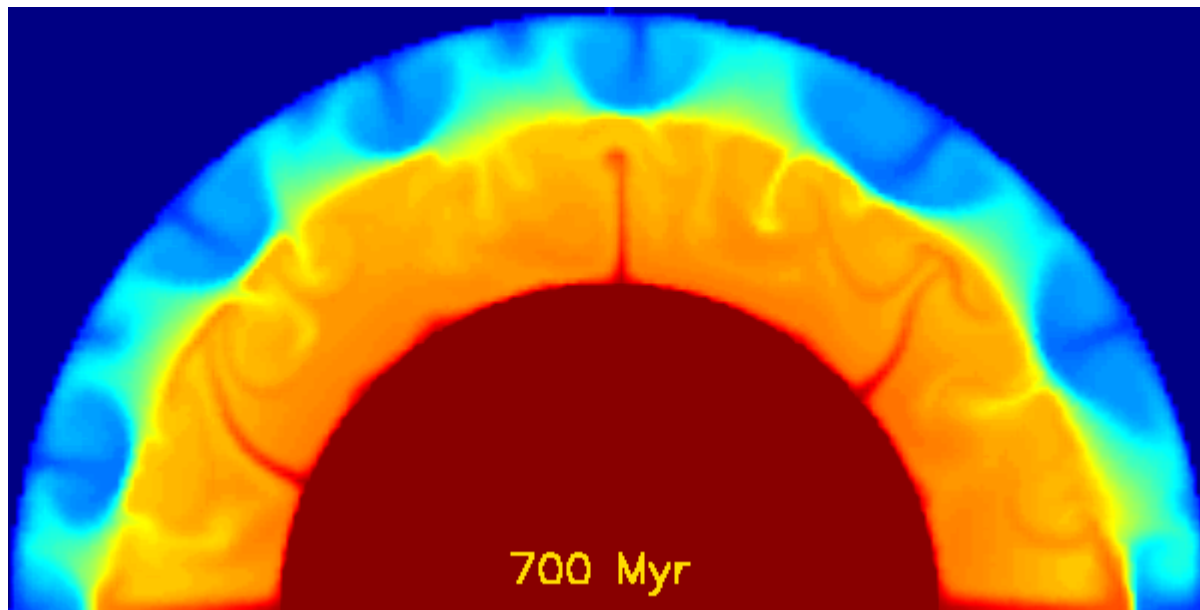
Termální vývoj Saturnova měsíce Enceladu

Ondřej Čadek
Katedra geofyziky MFF UK



1. Termální konvekce

chladnutí tělesa tvořeného viskózní kapalinou

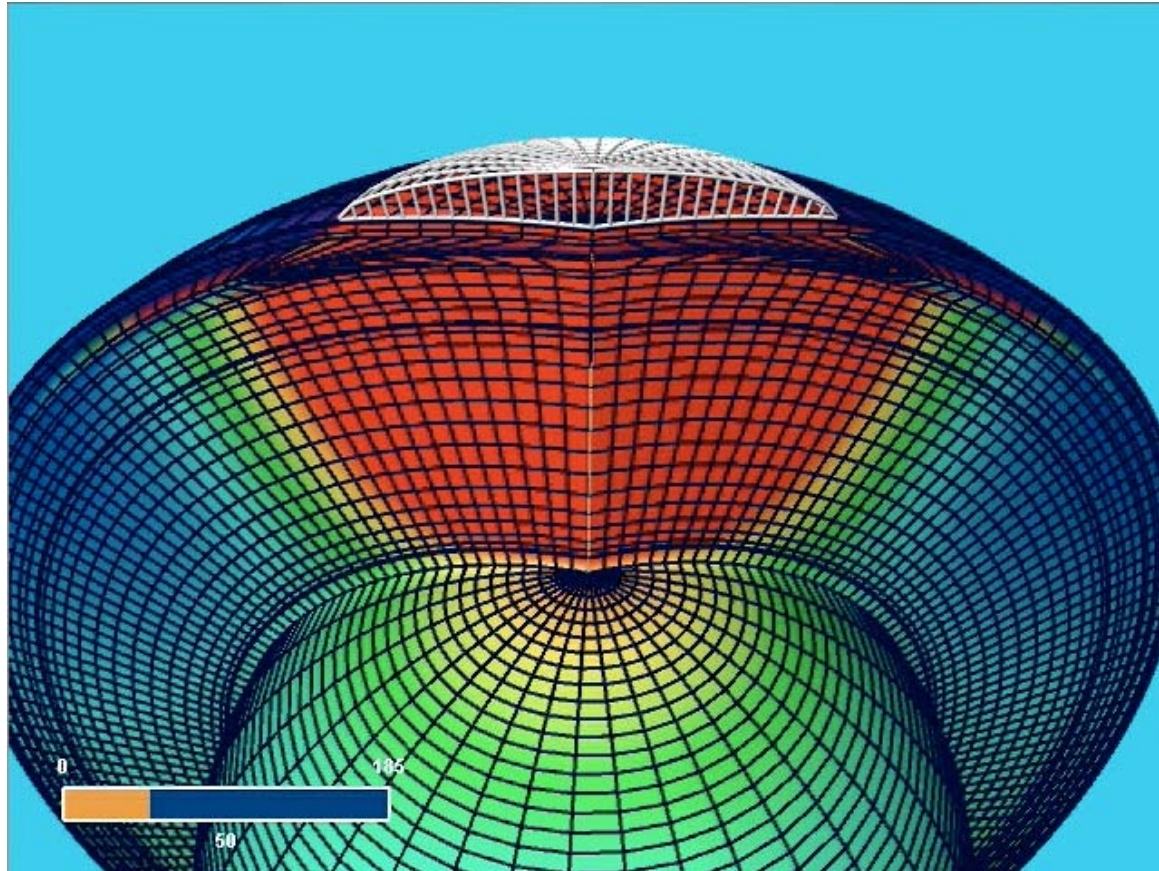


0 3000

T (°C)

Autor: H. Čížková, KG

2. Postglaciální výzdvih viskoelastická odezva Země na povrchové zatížení



Podle L. Hanyka a B.J. Kadlece

Tobie, G., Čadek, O., Sotin, C., 2008:

Solid tidal friction above a liquid water reservoir as the origin of the south pole hotspot on [Enceladus](#), *Icarus*, 196, 642-652.

Robuchon, G., Choblet, G., Tobie, G., Čadek, O., Sotin, C., Grasset, O., 2010:

Coupling of thermal evolution and despinning of early [Iapetus](#), *Icarus*, 207(2), 959-971.

Běhounková, M., Tobie, G., Choblet, G., Čadek, O., 2010:

Coupling mantle convection and tidal dissipation: applications to [Enceladus](#) and [Earth-like planets](#), *J. Geophys. Res.*, 115, E09011.

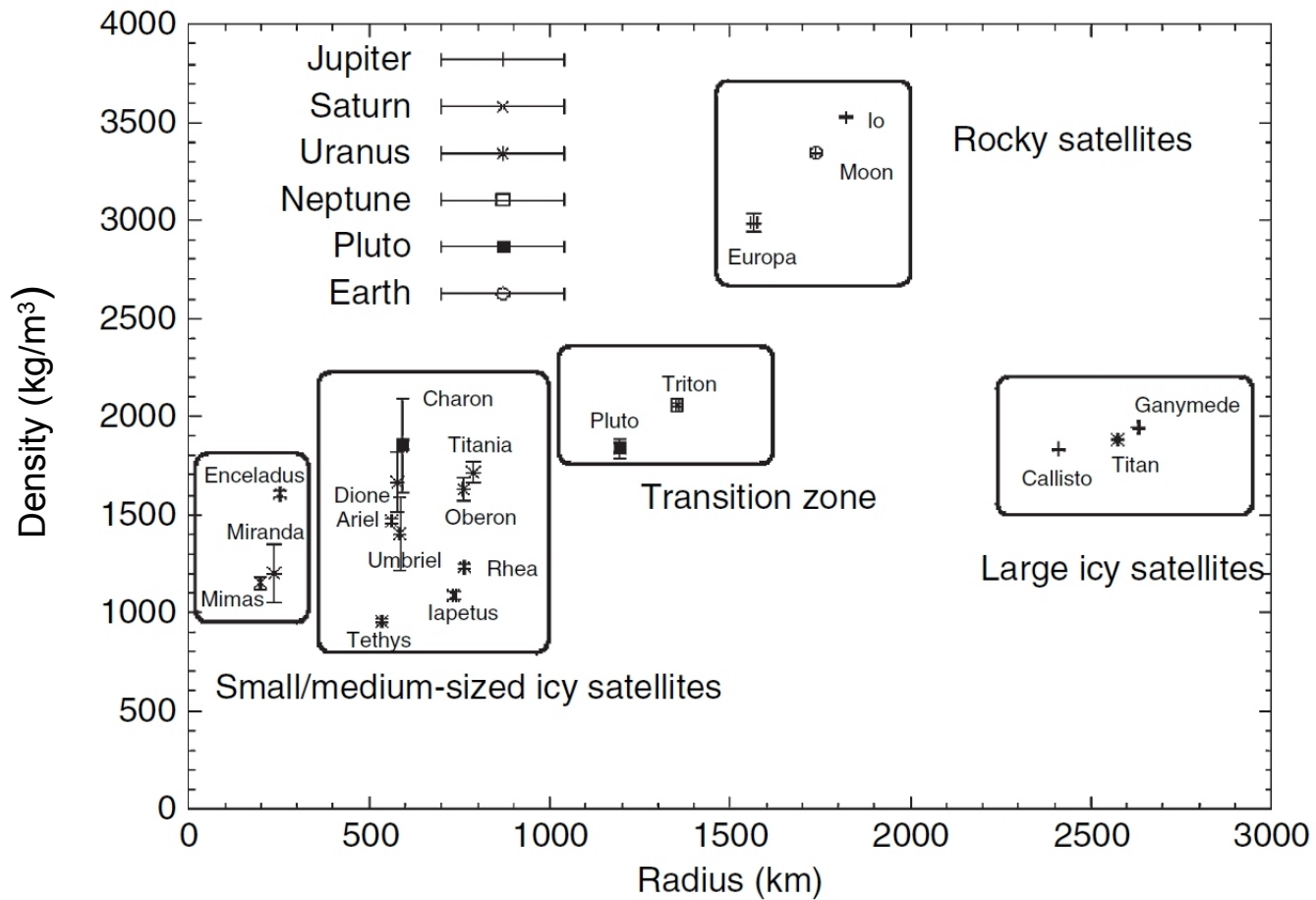
Běhounková, M., Tobie, G., Choblet, G., Čadek, O., 2011:

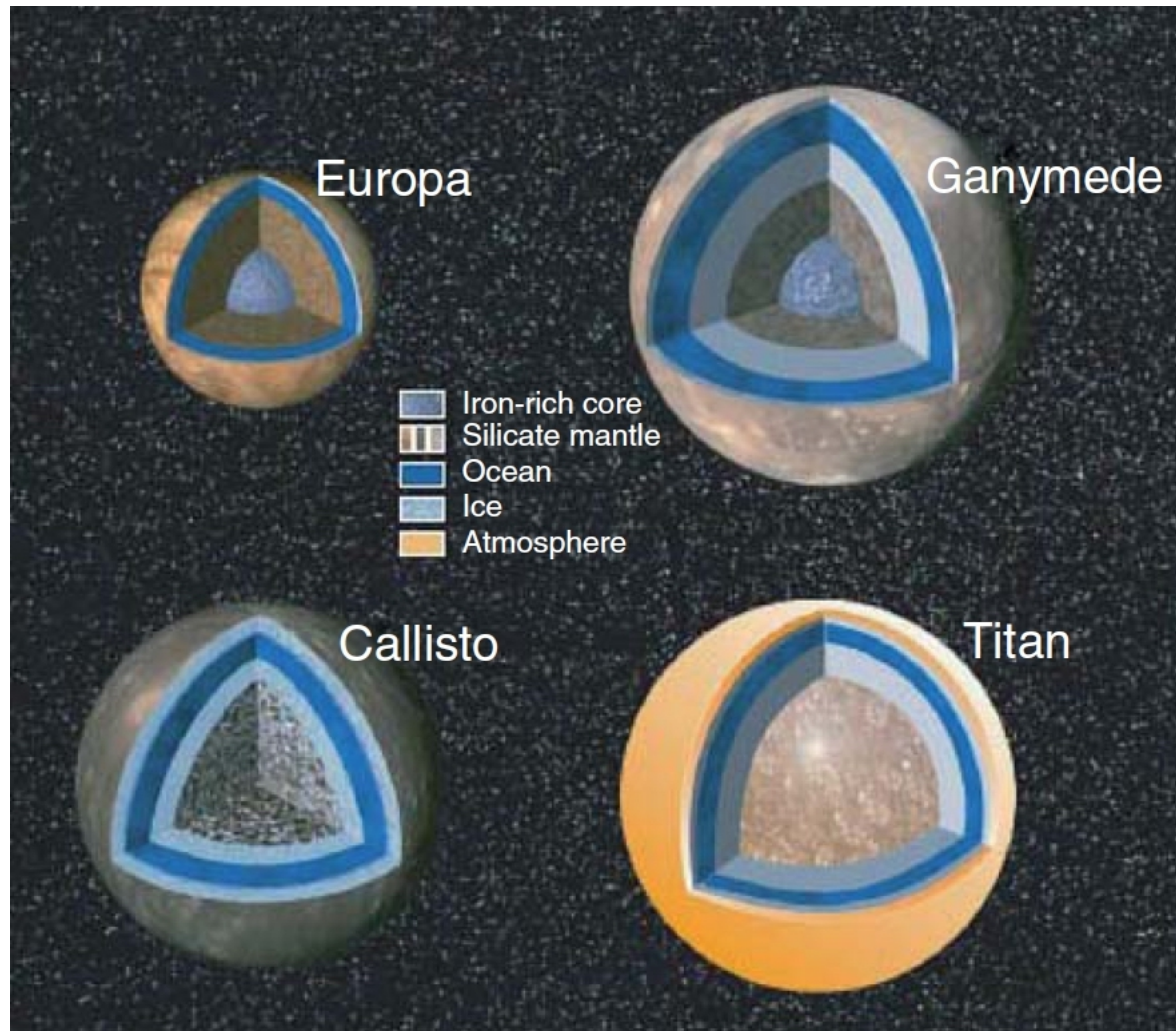
Tidally induced thermal runaways on [extrasolar Earths](#): Impact on habitability, *Astroph. J.*, 728(2), article id. 89

Běhounková, M., Tobie, G., Choblet, G., Čadek, O., 2012:

Tidally-induced melting events as the origin of [Enceladus](#) south pole activity, *Icarus*, v recenzním řízení.

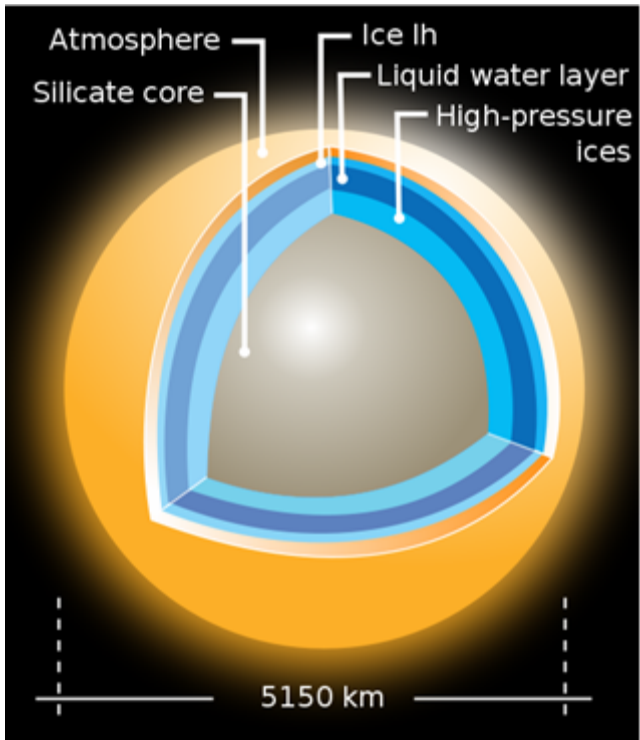
Planetologický institut, Univ. Nantes, Francie: **Gabriel Tobie, Gaël Choblet**
Katedra geofyziky MFF: **Marie Běhounková, Klára Kalousová, Miroslav Kuchta**



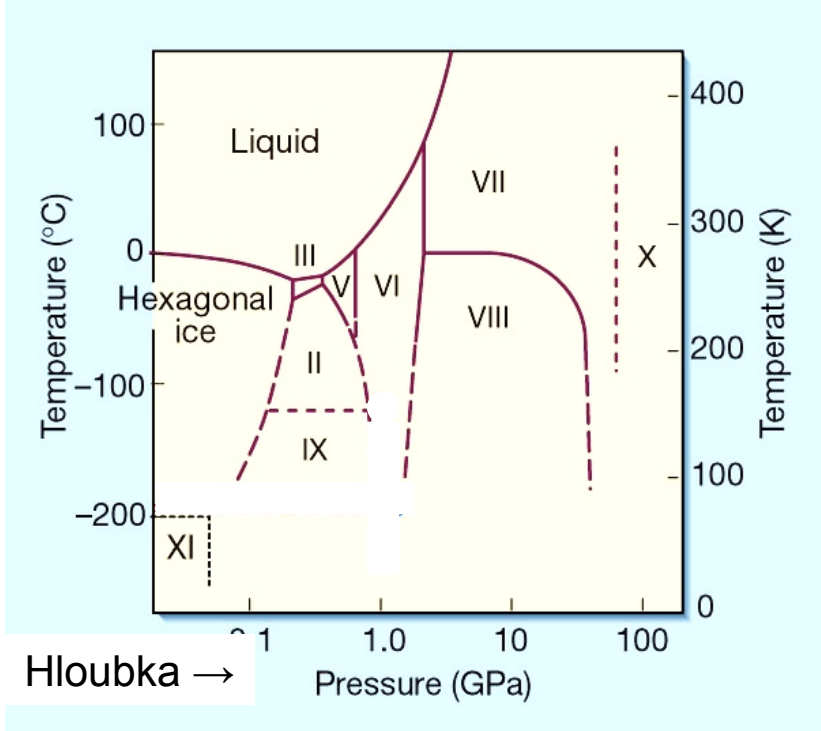


Podle Hussmanna a Sotina, ToG

Voda na ledových měsících

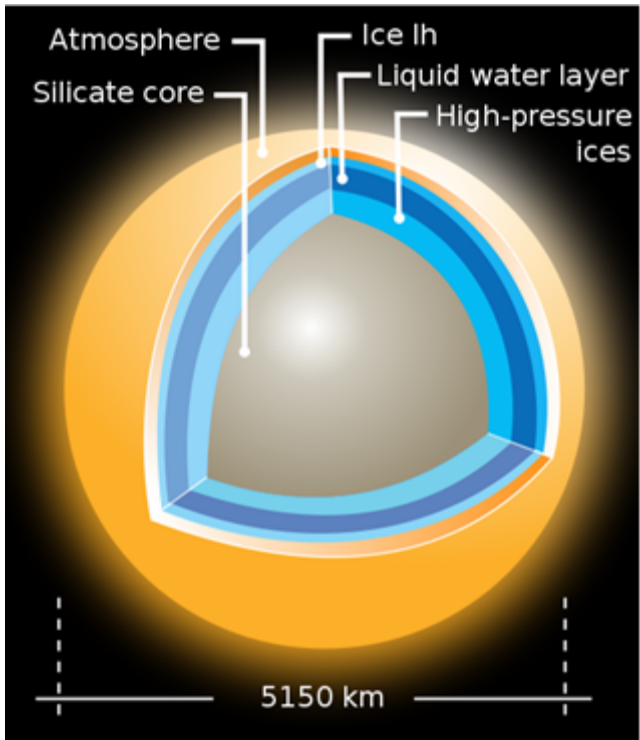


Titan



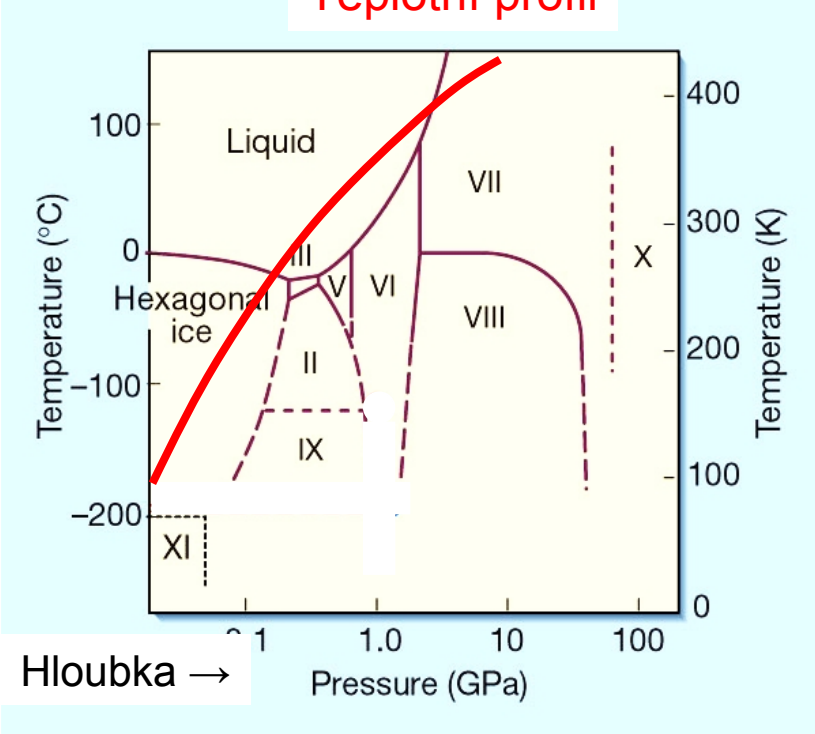
Fázové přechody ve vodním ledu

Voda na ledových měsících



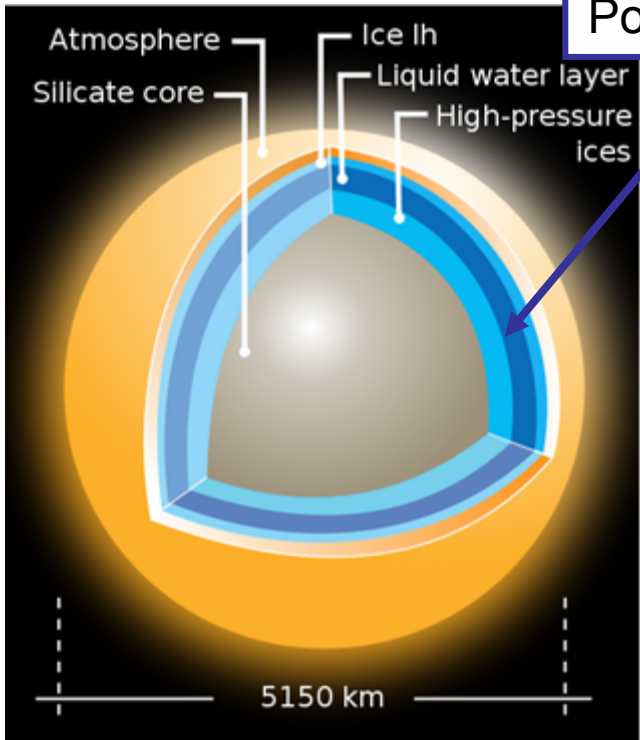
Titan

Teplotní profil



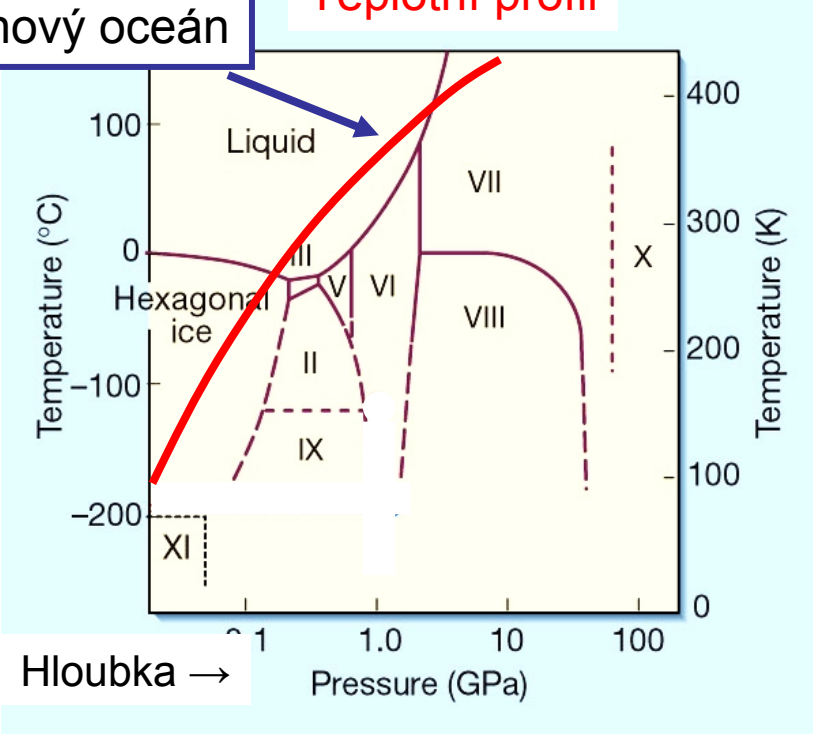
Fázové přechody ve vodním ledu

Voda na ledových měsících



Podpovrchový oceán

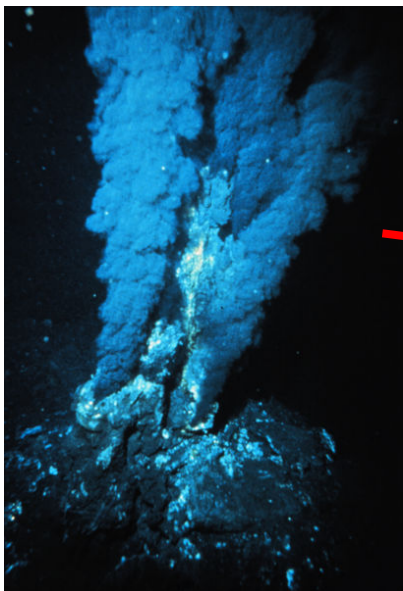
Teplotní profil



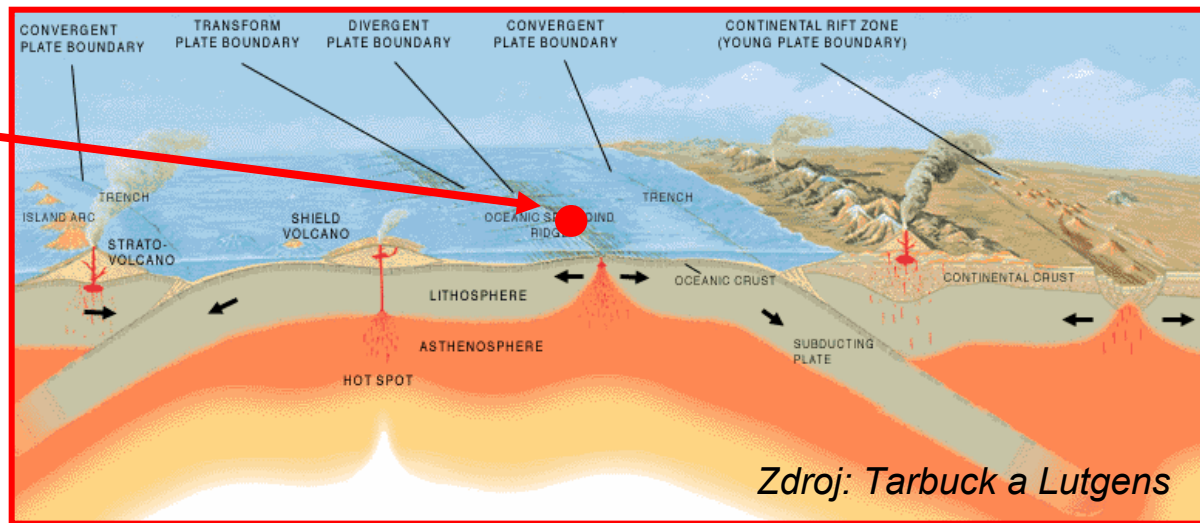
Titan

Fázové přechody ve vodním ledu

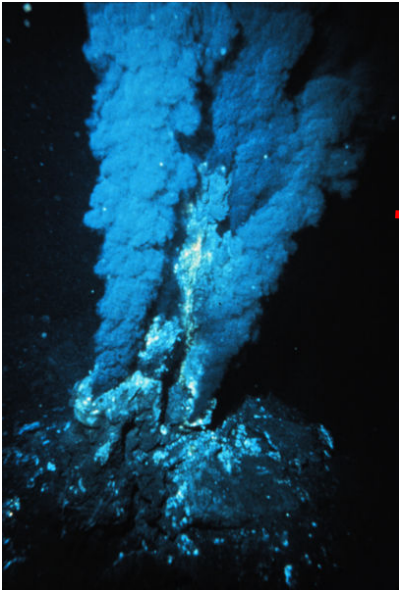
Život na ledových měsících?



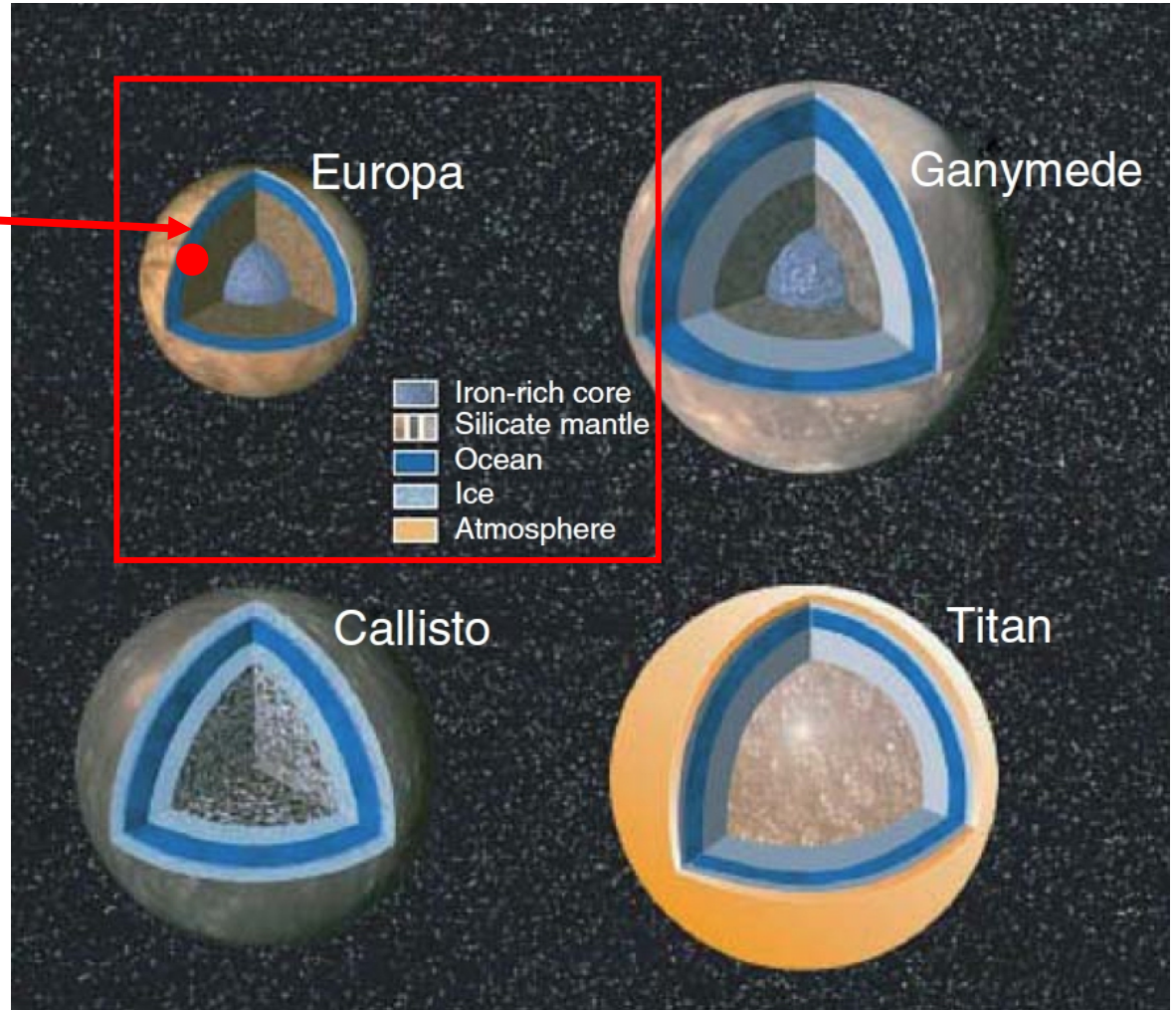
Black smoker
(Země)



Život na ledových měsících?



Black smoker
(Europa???)



Science

10 March 2006 | \$10

ENCELADUS

Cassini at Enceladus

CRASHLESS CARS: Improving Auto Safety (page 86)

SCIENTIFIC AMERICAN

MAGIC and the BRAIN
page 72

December 2008 \$5.99 www.SciAm.com

Secrets of Saturn's STRANGEST MOON

Icy Enceladus has active geysers—and perhaps a hidden sea that could harbor life

Cyberfraud

How to Foil Online "Phishing" Scams

I'VE REMOVED UNWANTED ADS FROM THE BOOK TO REDUCE THE SIZE

Triple Helix

Protein-DNA Molecule Points to Novel Drugs

Bigger Than Life

Winners of the 2008 BioScapes Photo Competition

© 2008 SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

NATURE | Vol 456 | 27 November 2008

RESEARCH HIGHLIGHTS

JOURNAL CLUB

William B. McKinnon
Washington University, St Louis,
Missouri

A planetary scientist has big hopes for a little world.

Right now, the most exciting object in the Solar System is Saturn's diminutive moon Enceladus. Its deformed south polar region emits copious amounts of heat along

World of ADUS

jets of steam and ice grains erupt from deep fractures in the south polar terrain of Enceladus, making this tiny body one of only four places in the solar system known to have geologic activity in the present day. This artist's conception includes astronauts for scale.

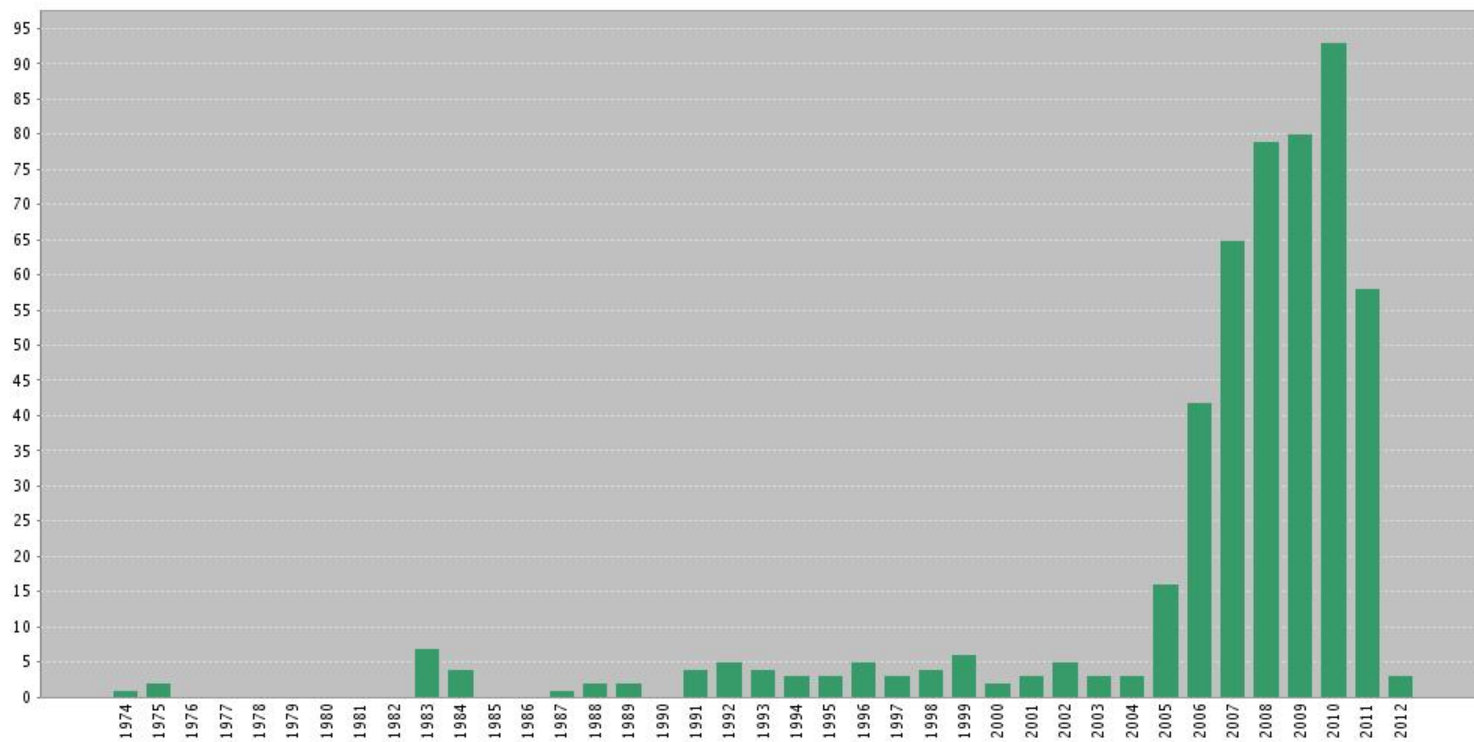
© 2008 SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

52 The Restless World of Enceladus

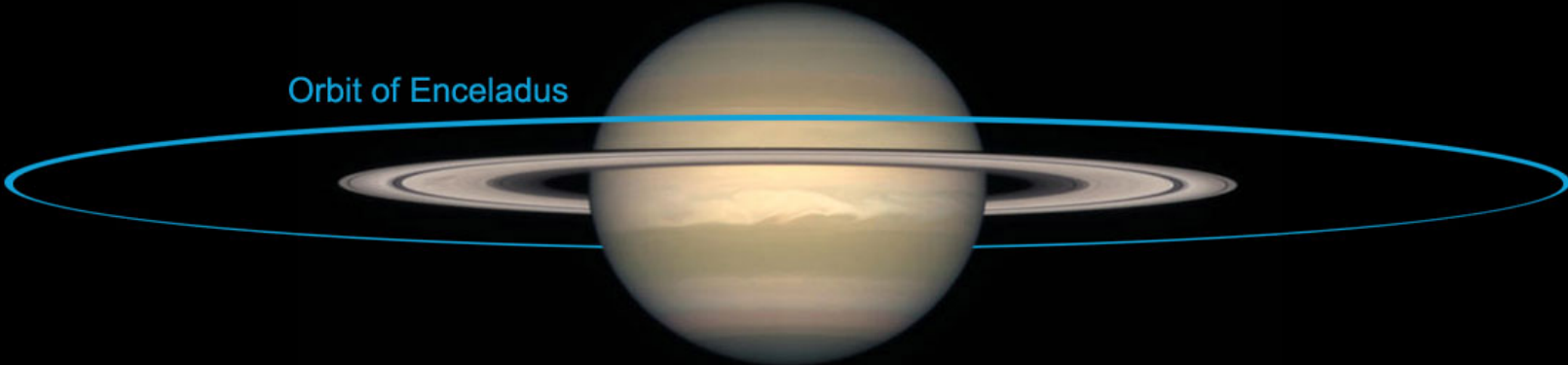
By Carolyn Porco

Scientists have known for decades that Saturn's sixth-largest moon is odd, but recently received images hint that its wrinkled landscape hides underground waters brewing with organic molecules. Could Enceladus be an icy cauldron for extraterrestrial life?

Enceladus v odborné literatuře (podle WoS)



Orbit of Enceladus

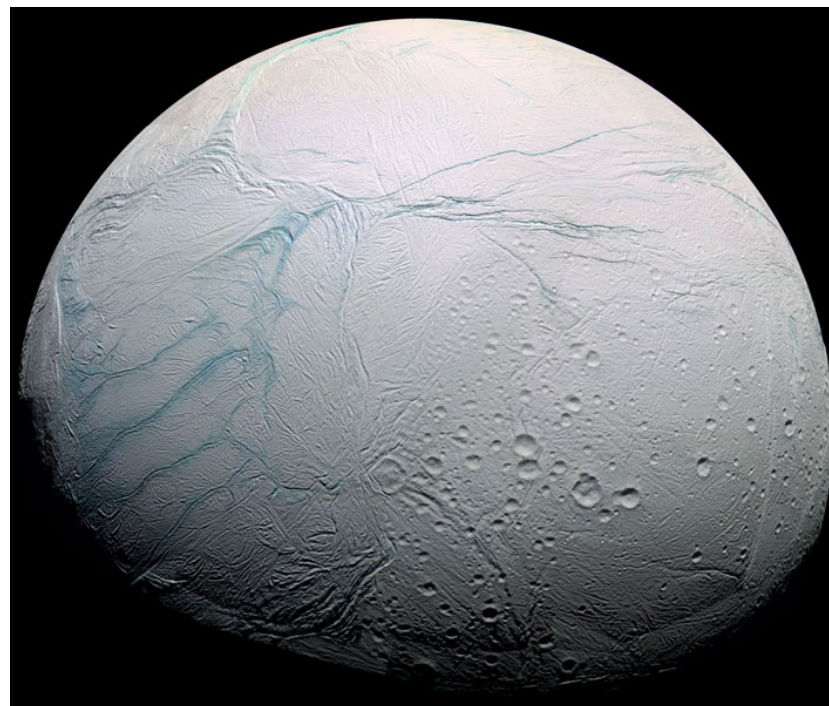




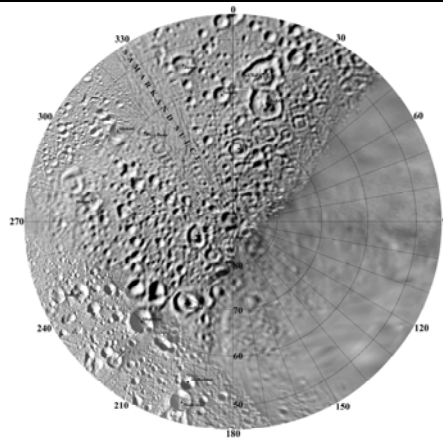
Enceladus

ENCELADUS

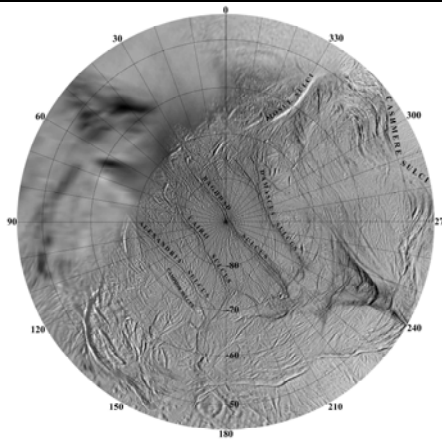
Discovered by	William Herschel
Date of discovery	1789
Mass (kg)	8.40e+19
Mass (Earth = 1)	1.4056e-05
Equatorial radius (km)	250 ←
Equatorial radius (Earth = 1)	3.9197e-02
Mean density (gm/cm³)	1.24
Mean distance from Saturn (km)	238,020 ←
Rotational period (days)	1.370218 ←
Orbital period (days)	1.370218 ←
Mean orbital velocity (km/sec)	12.64
Orbital eccentricity	0.0045 ←
Orbital inclination (degrees)	0.02
Escape velocity (km/sec)	0.212
Visual geometric albedo	0.99
Mean surface temperature	-201°C
Magnitude (Vo)	11.7



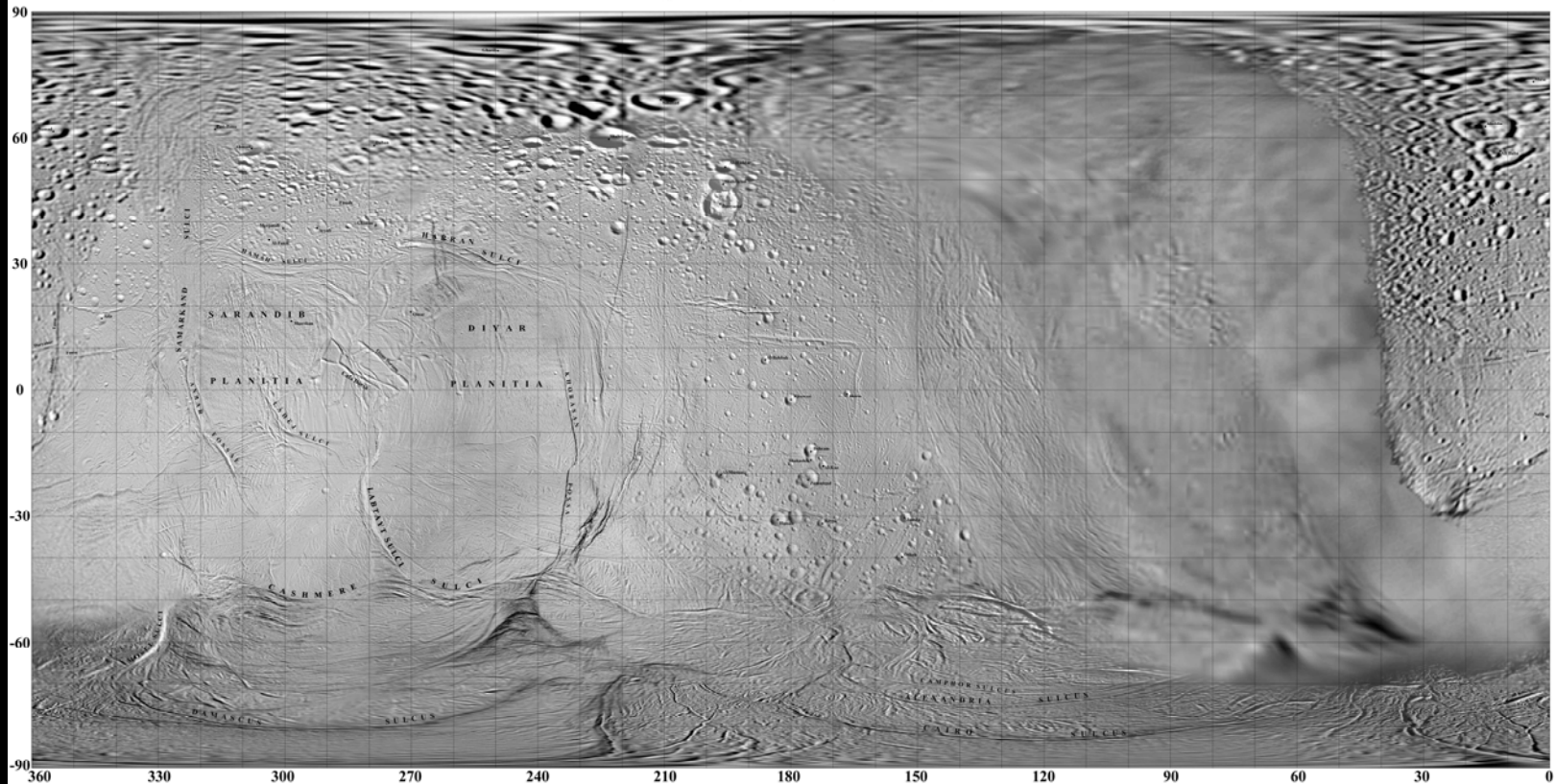
Zdroj: NASA



North Polar Region

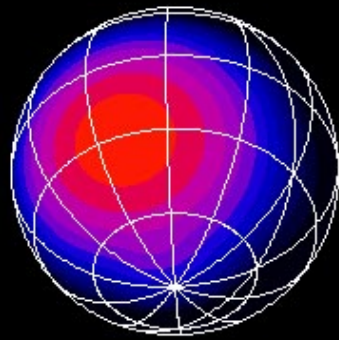


South Polar Region

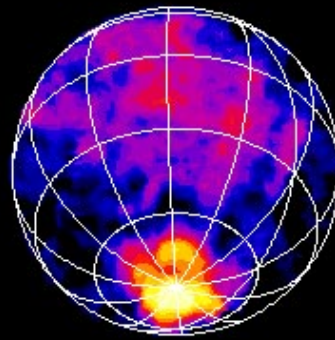


ENCELADUS

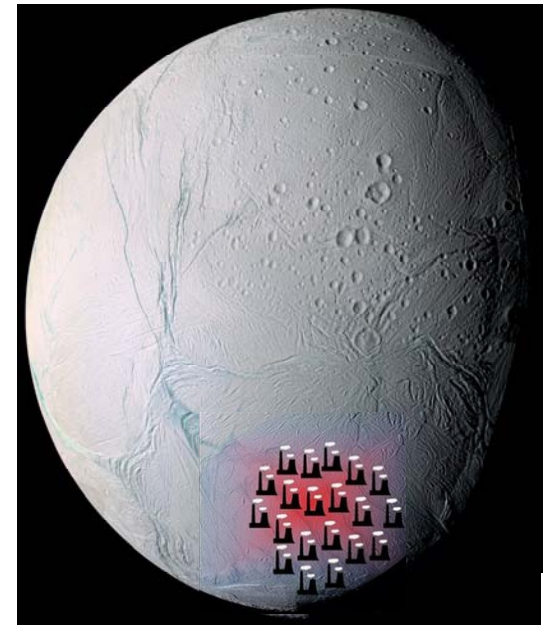
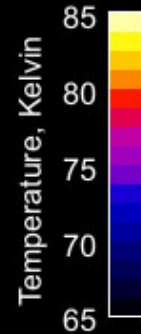
Enceladus Temperature Map



Predicted
Temperatures



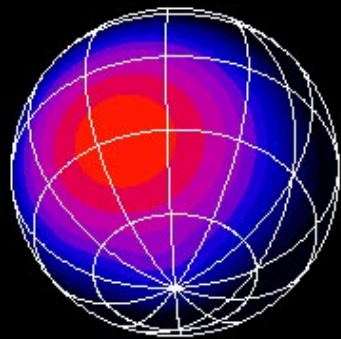
Observed
Temperatures



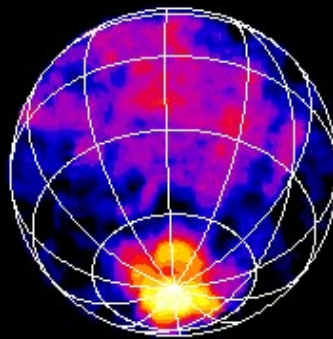
Spencer et al., Science 2006

Tepelný výkon
na jižním pólu
Enceladu odpovídá
20 blokům Temelína!

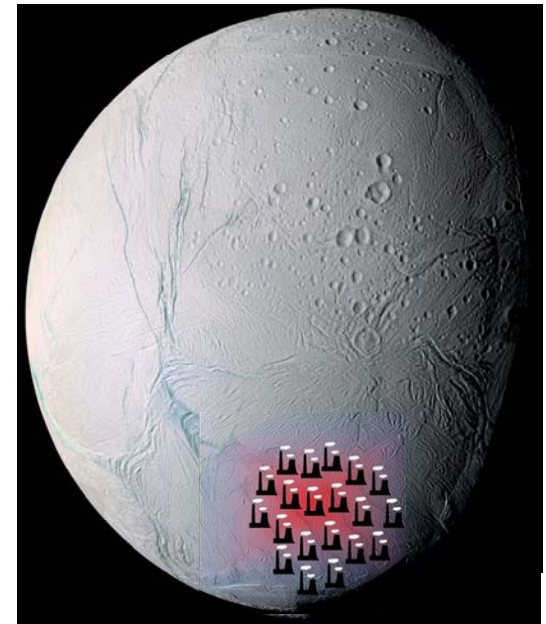
Enceladus Temperature Map



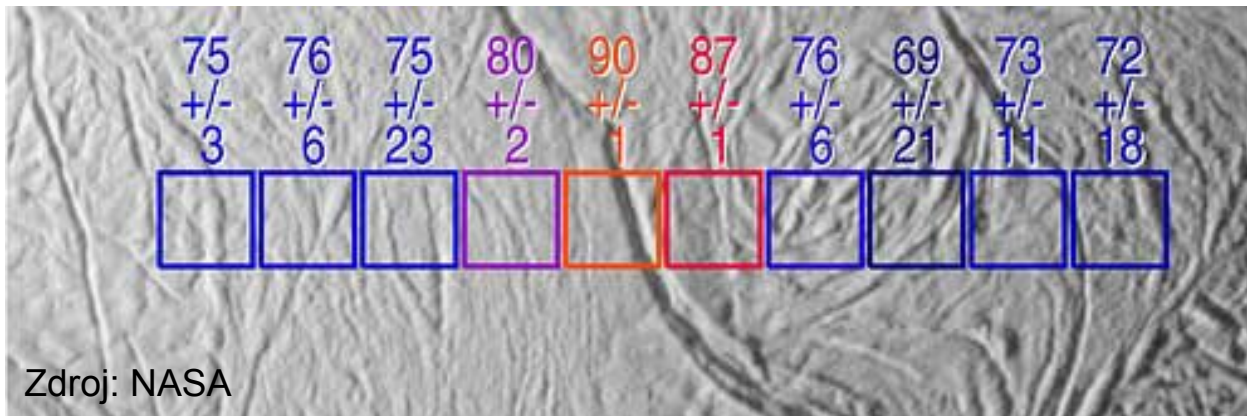
Predicted Temperatures



Observed Temperatures



Spencer et al., Science 2006

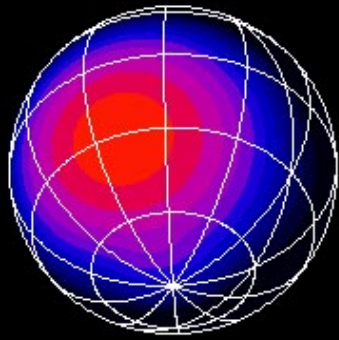


Zdroj: NASA

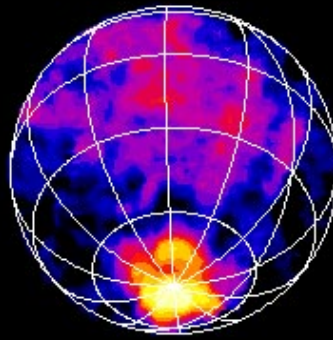


Tepelný výkon na jižním pólu Enceladu odpovídá 20 blokům Temelína!

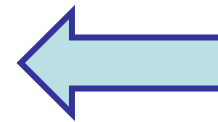
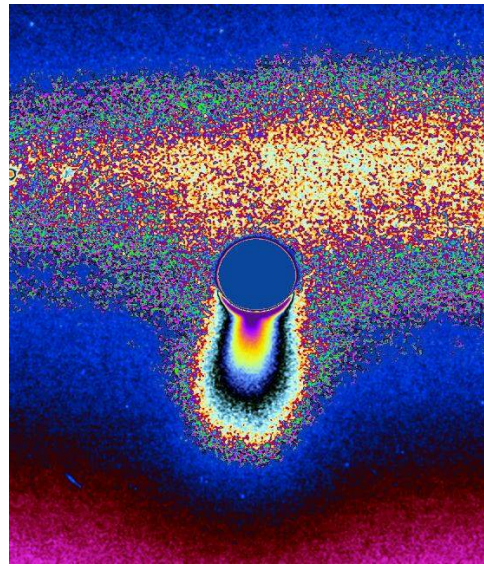
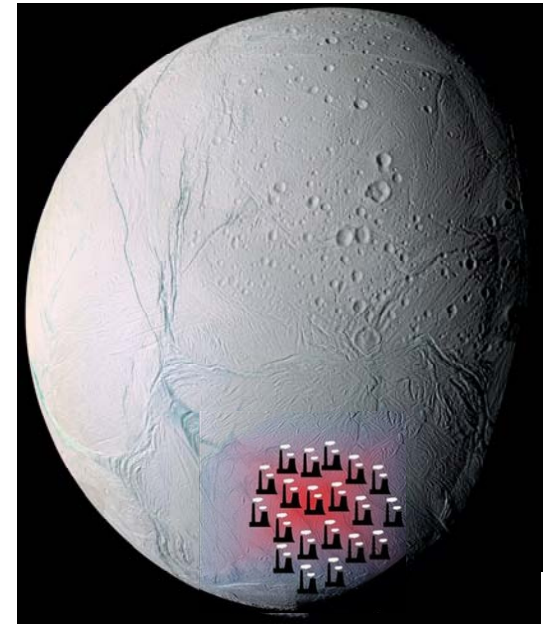
Enceladus Temperature Map



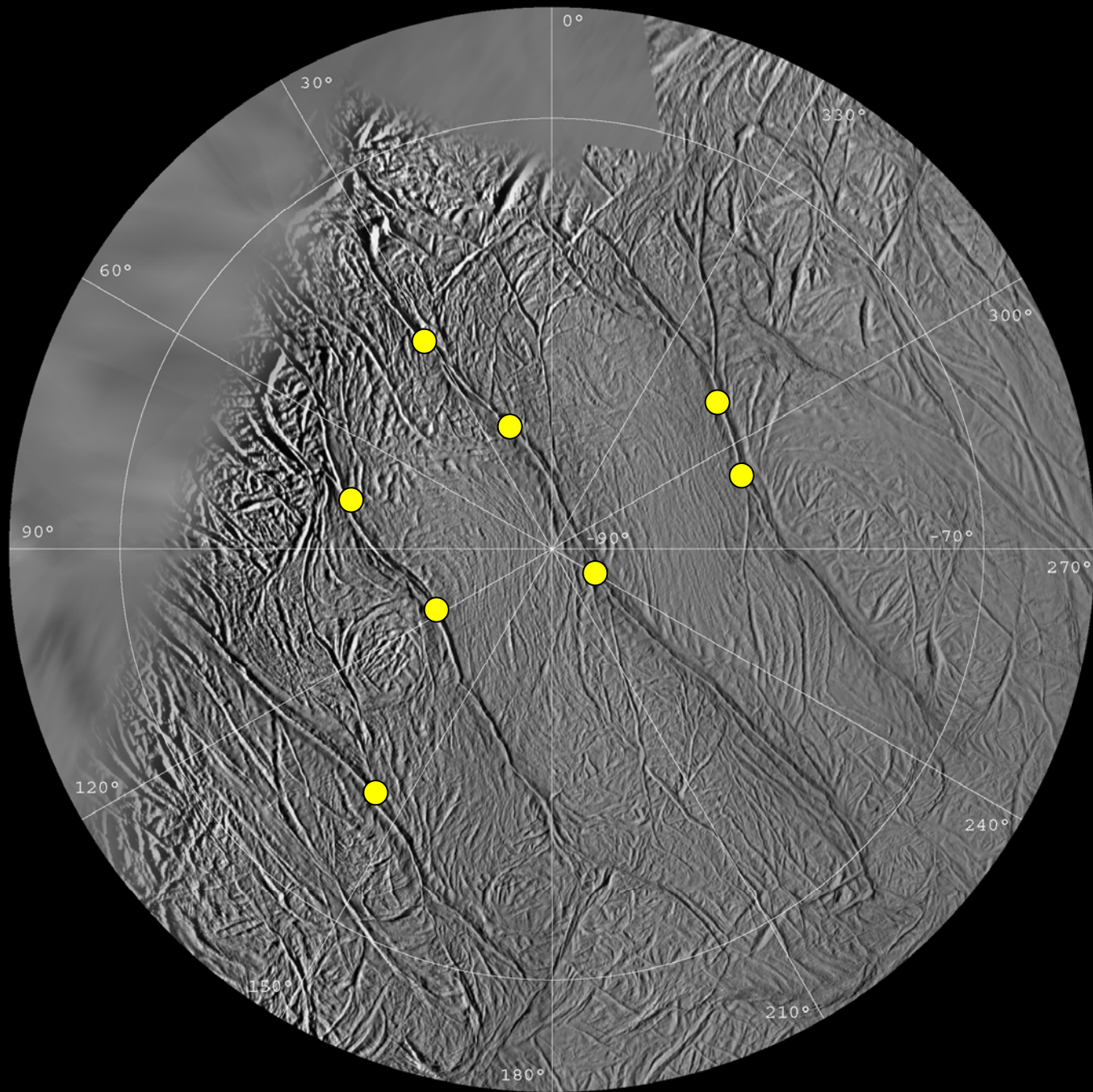
Predicted
Temperatures



Observed
Temperatures



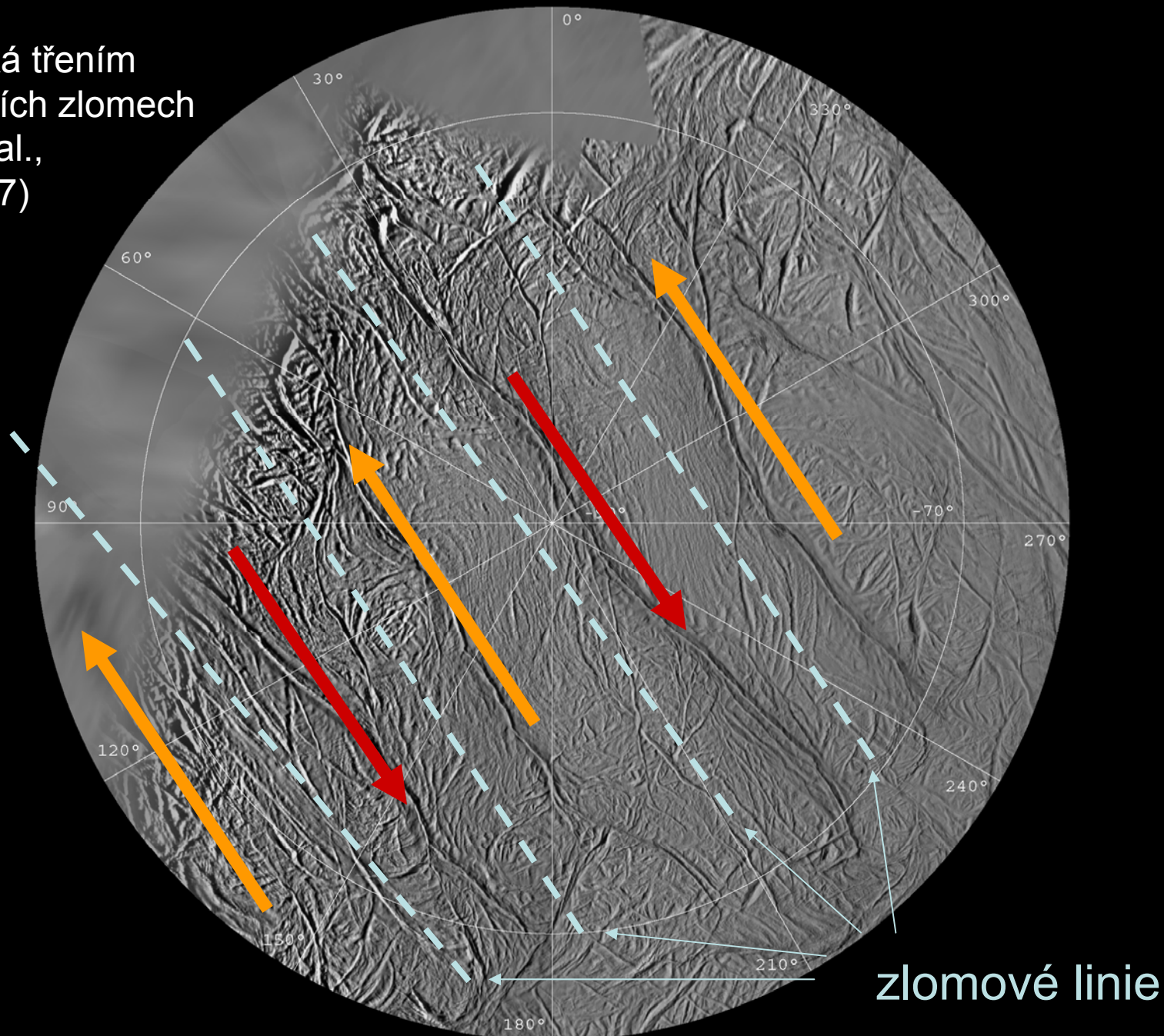
„Studené
gejíry“



Základní otázky:

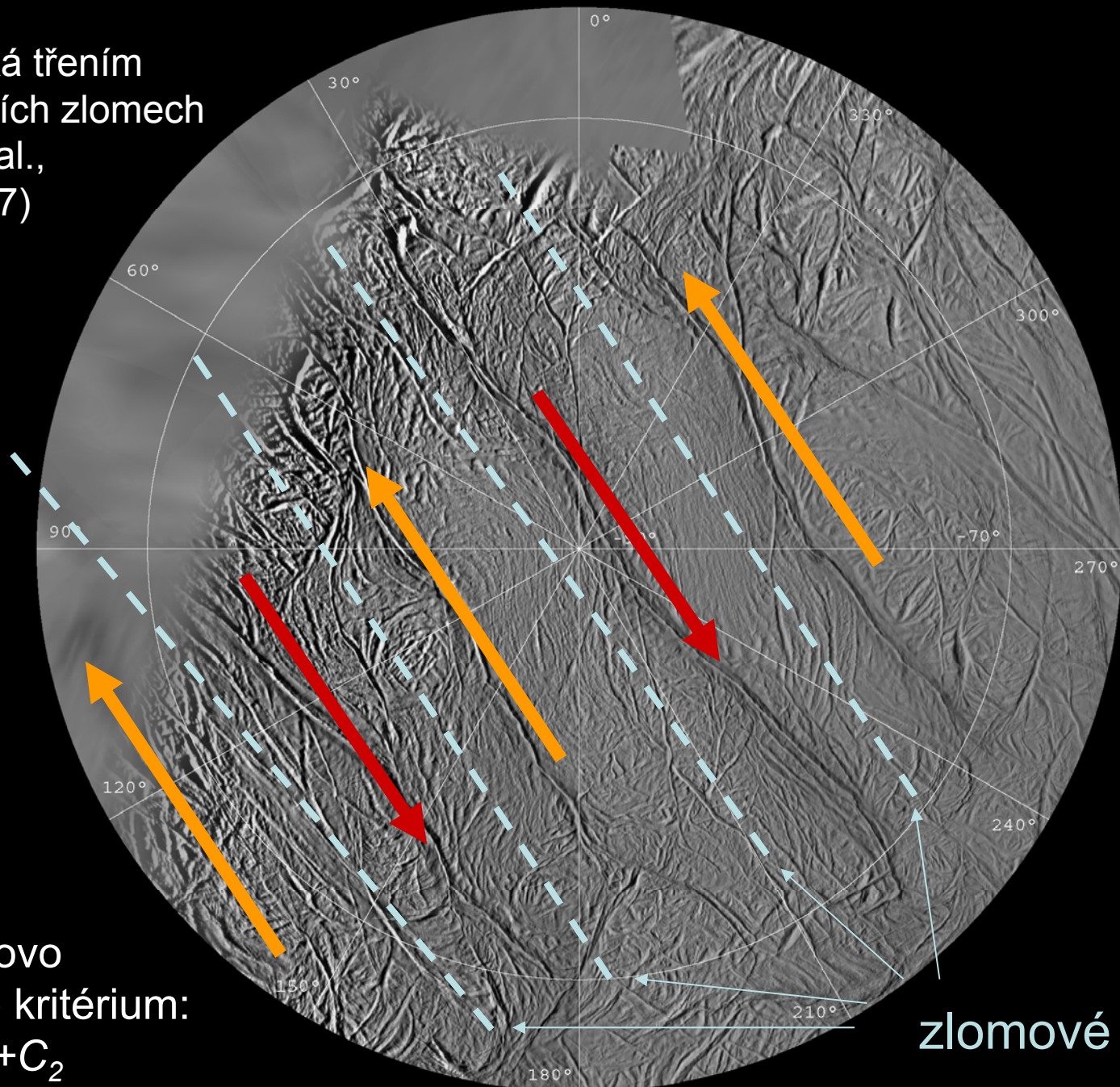
1. Co je zdrojem pozorovaného tepla?
2. Proč se maximum tepelného toku koncentruje v okolí jižního pólu?
3. Jedná se o trvalý (periodicky se opakující?) jev, nebo jsme svědky mimořádné události?

Teplo vzniká třením
na existujících zlomech
(Nimmo et al.,
Nature 2007)



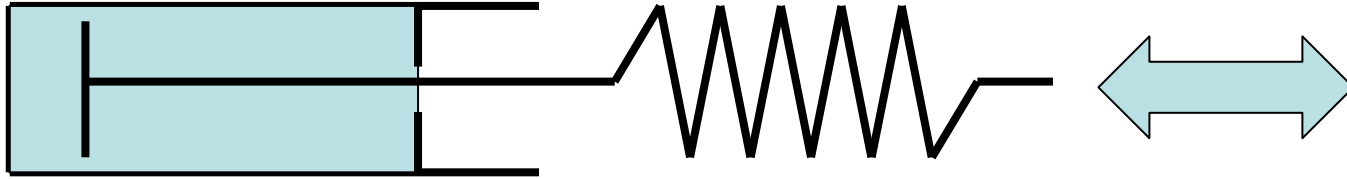
zlomové linie

Teplo vzniká třením
na existujících zlomech
(Nimmo et al.,
Nature 2007)



Coulombovo
napětové kritérium:
 $\sigma_t = C_1\sigma_n + C_2$

zlomové linie



Viskoelastická deformace maxwellovského tělesa

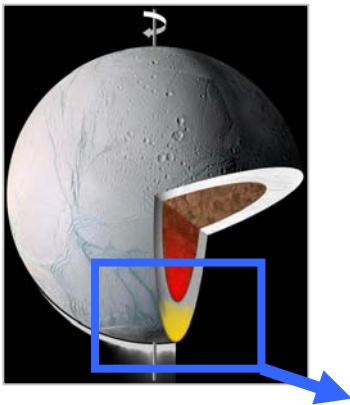
$$-\nabla p + \nabla \cdot \sigma - \rho_0 \nabla V = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \mu \frac{d}{dt} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^\tau] - \frac{\mu}{\eta} \sigma$$

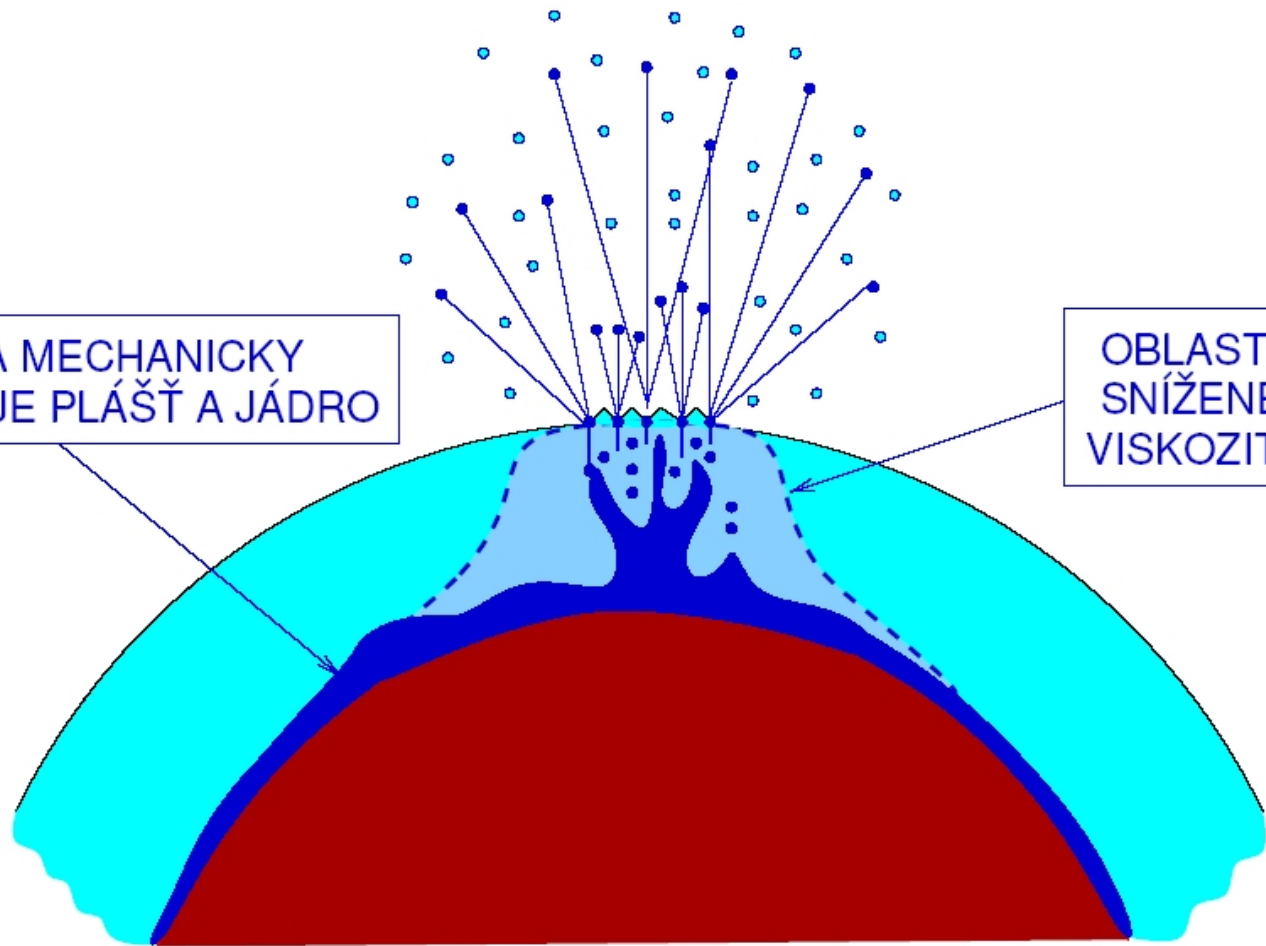


Slapové zahřívání:
$$H_{tide} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{\sigma : \sigma}{2\eta} dt$$



VODA MECHANICKY
ODDĚLUJE PLÁŠŤ A JÁDRO

OBLAST
SNÍŽENÉ
VISKOZITY



Global dissipation

No liquid water

With liquid water

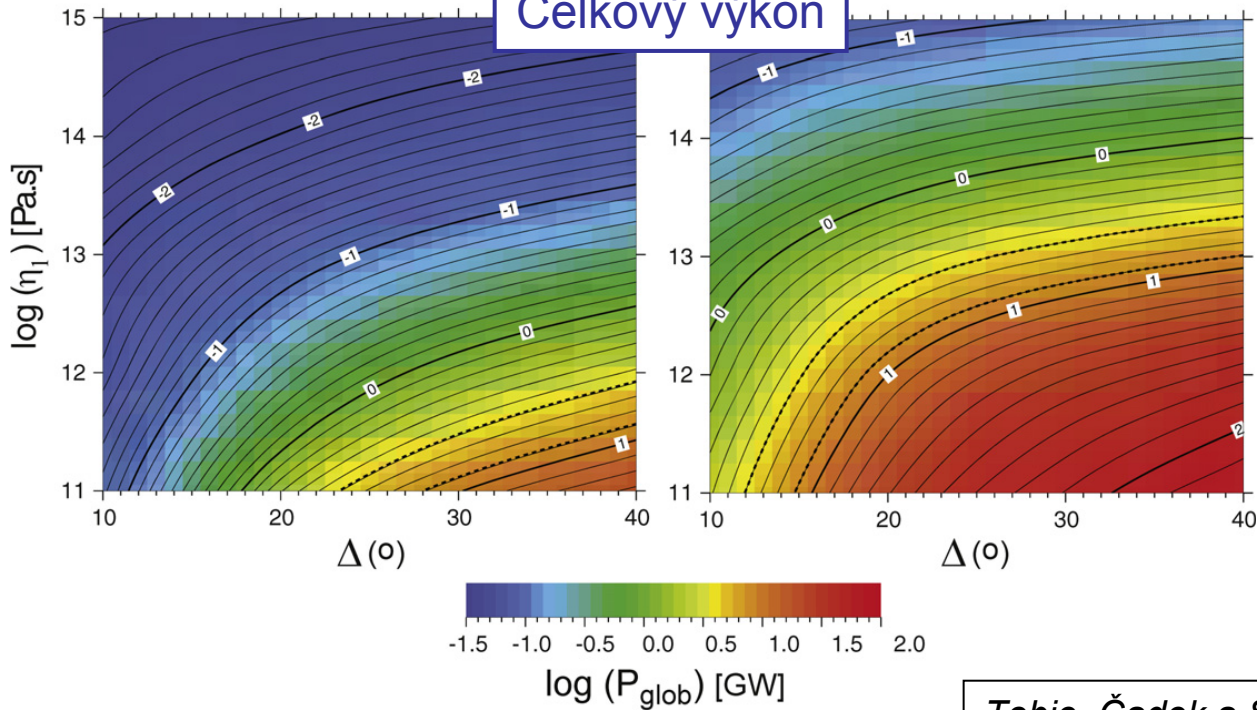
Bez kapalné vody

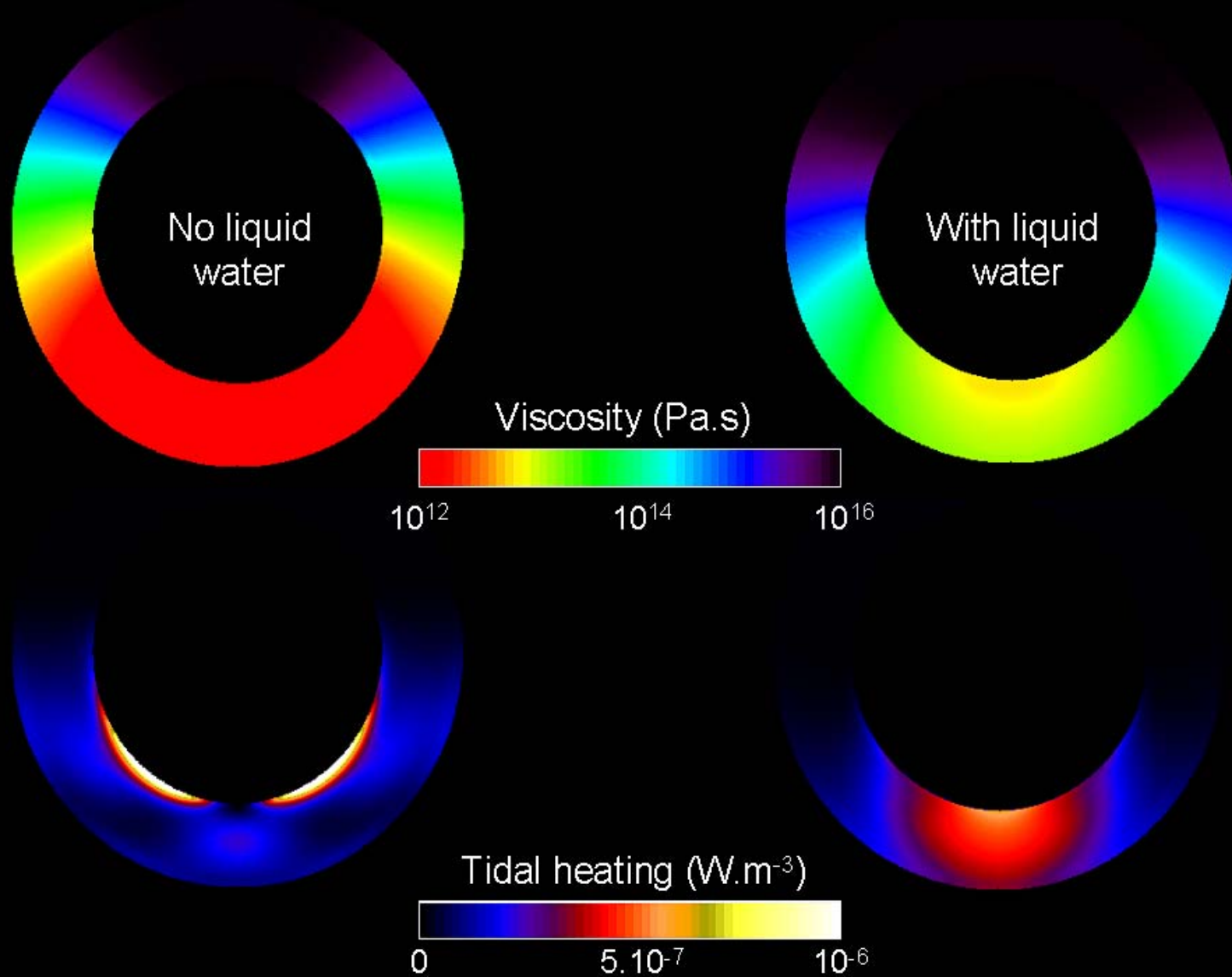
Tenká vrstva kapalné vody

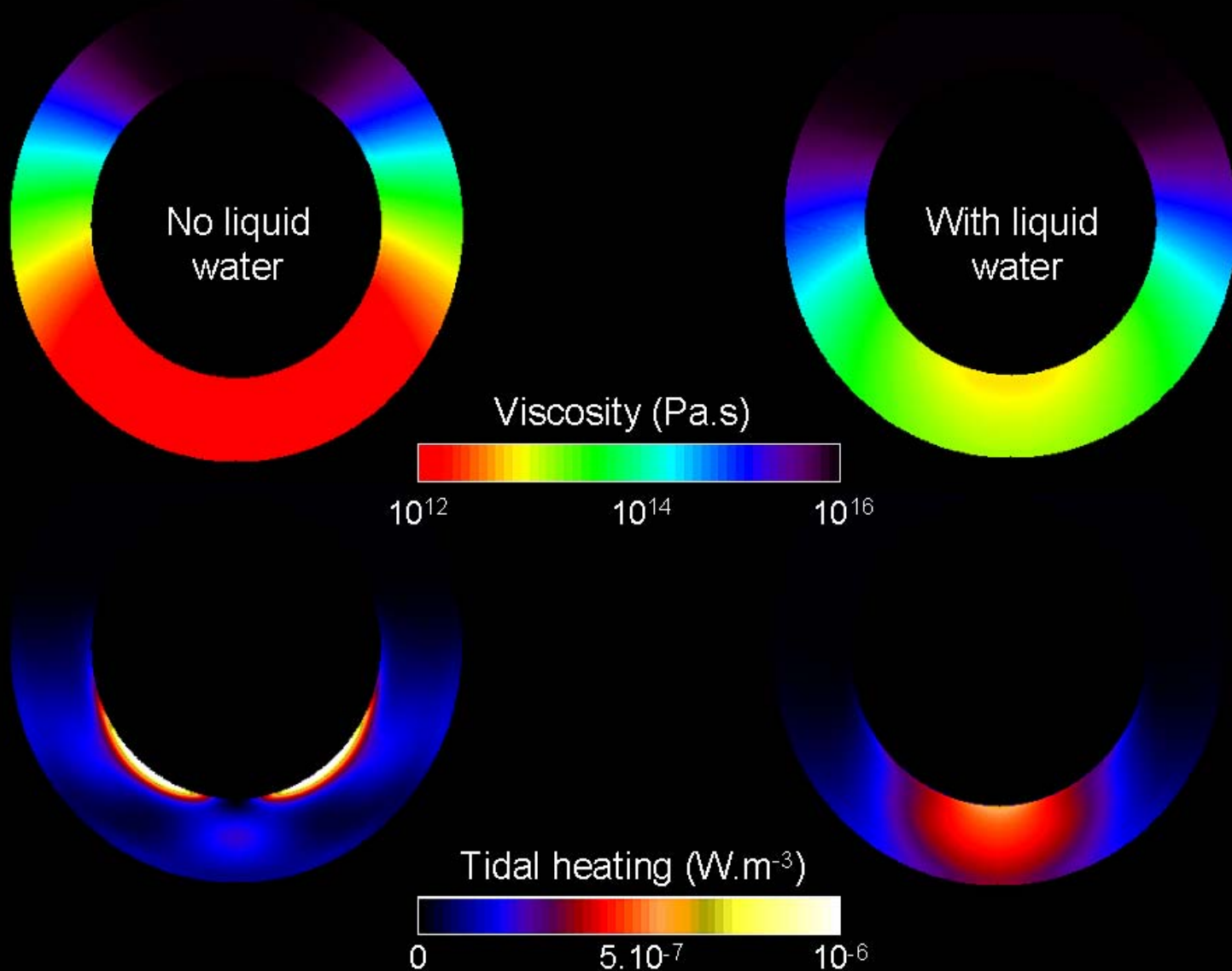
Nízkoviskózní „pluma“

Nízkoviskózní „pluma“

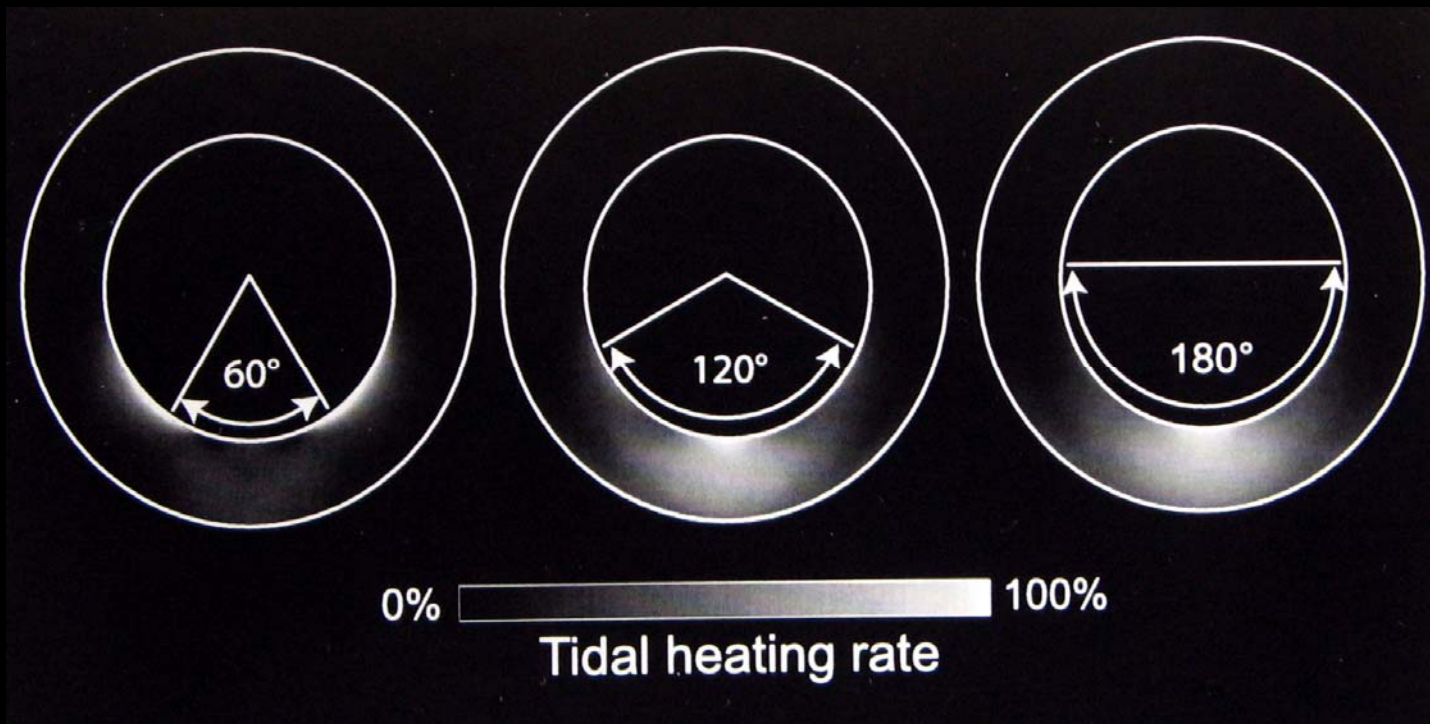
Celkový výkon



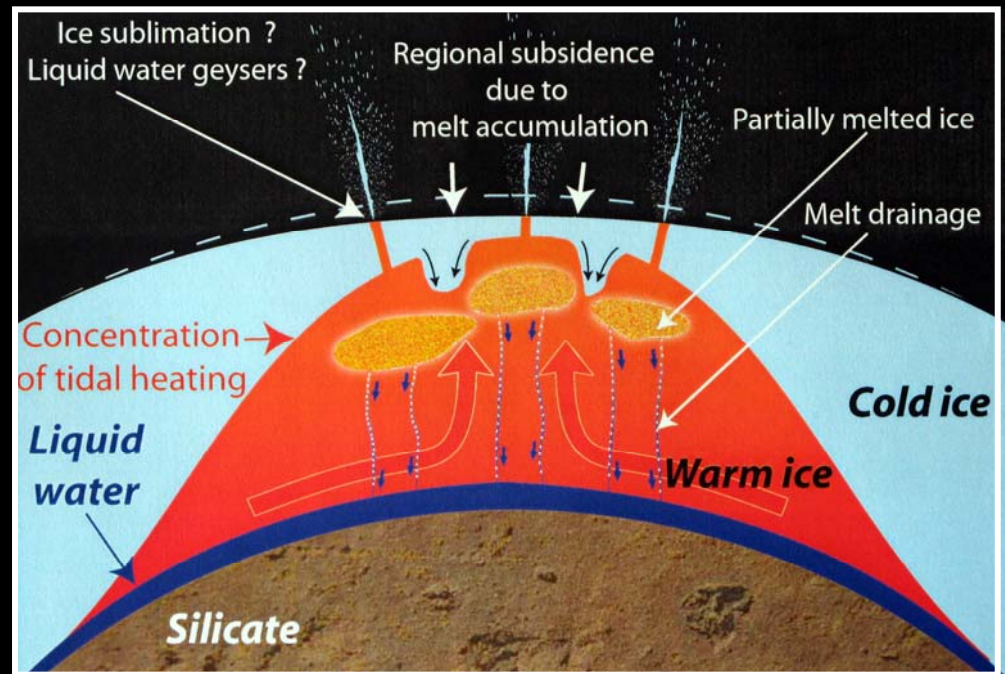
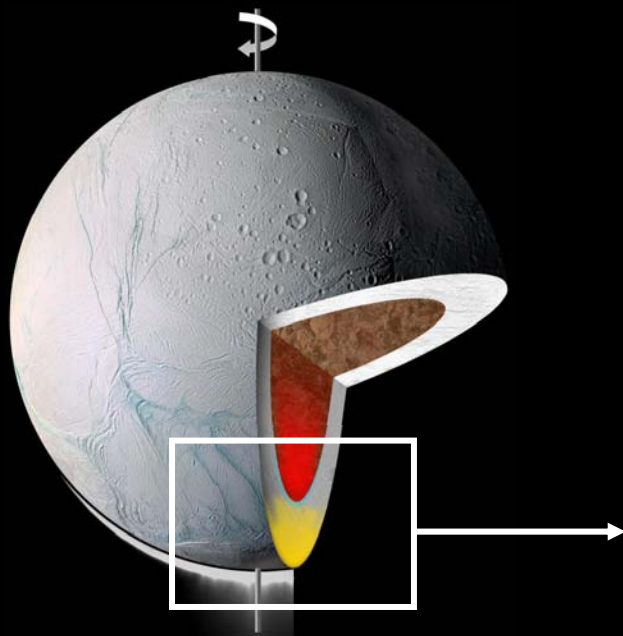




Závěr: Pozorovaný výkon nemůže být generován bez vrstvy kapalné vody



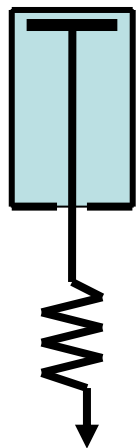
Podpovrchový oceán však pravděpodobně existuje pouze pod jižní hemisférou



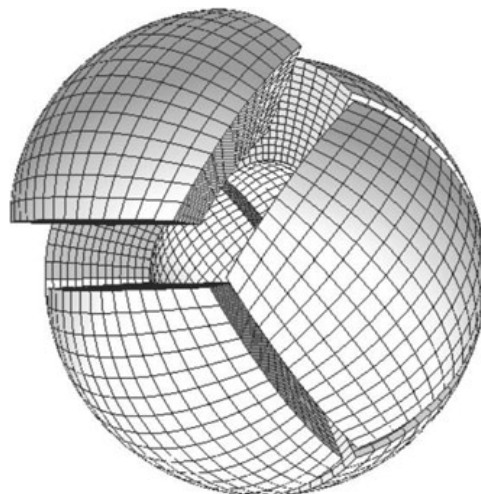
Tobie, Čadek a Sotin, Icarus, 2008

Viskoelastická deformace

Termální konvekce



+



=

Antigona
(M. Běhounková)

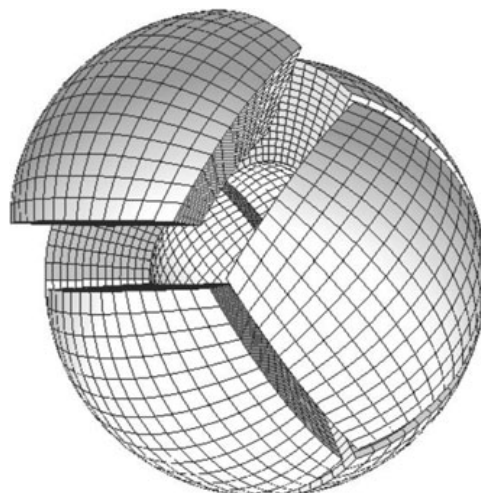
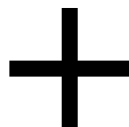
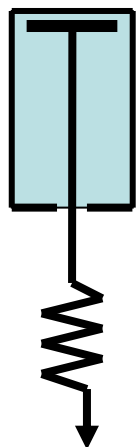
Termální konvekce poháněná
slapovou disipací

Dissip (O. Čadek)

Oedipus (G. Choblet)

Viskoelastická deformace

Termální konvekce



Antigona
(M. Běhounková)

Termální konvekce poháněná
slapovou disipací

Dissip (O. Čadek)

Oedipus (G. Choblet)

-
- 3d sférická geometrie
 - různé časové škály (hodiny vs. miliony let)
 - je třeba řešit soustava rovnic o ~10.000.000 neznámých v každém časovém kroku
 - velké rozdíly ve viskozitě (až 8 řádů)
 - program zahrnuje fázové změny a perkolaci vody

Termální konvekce poháněná slapovým zahříváním

Rovnice termální konvekce

$$-\nabla p + \nabla \cdot \sigma - \rho \nabla V = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\sigma = \eta [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$$

$$\rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho_0 c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + H_i + H_{tide}$$

Termální konvekce poháněná slapovým zahříváním

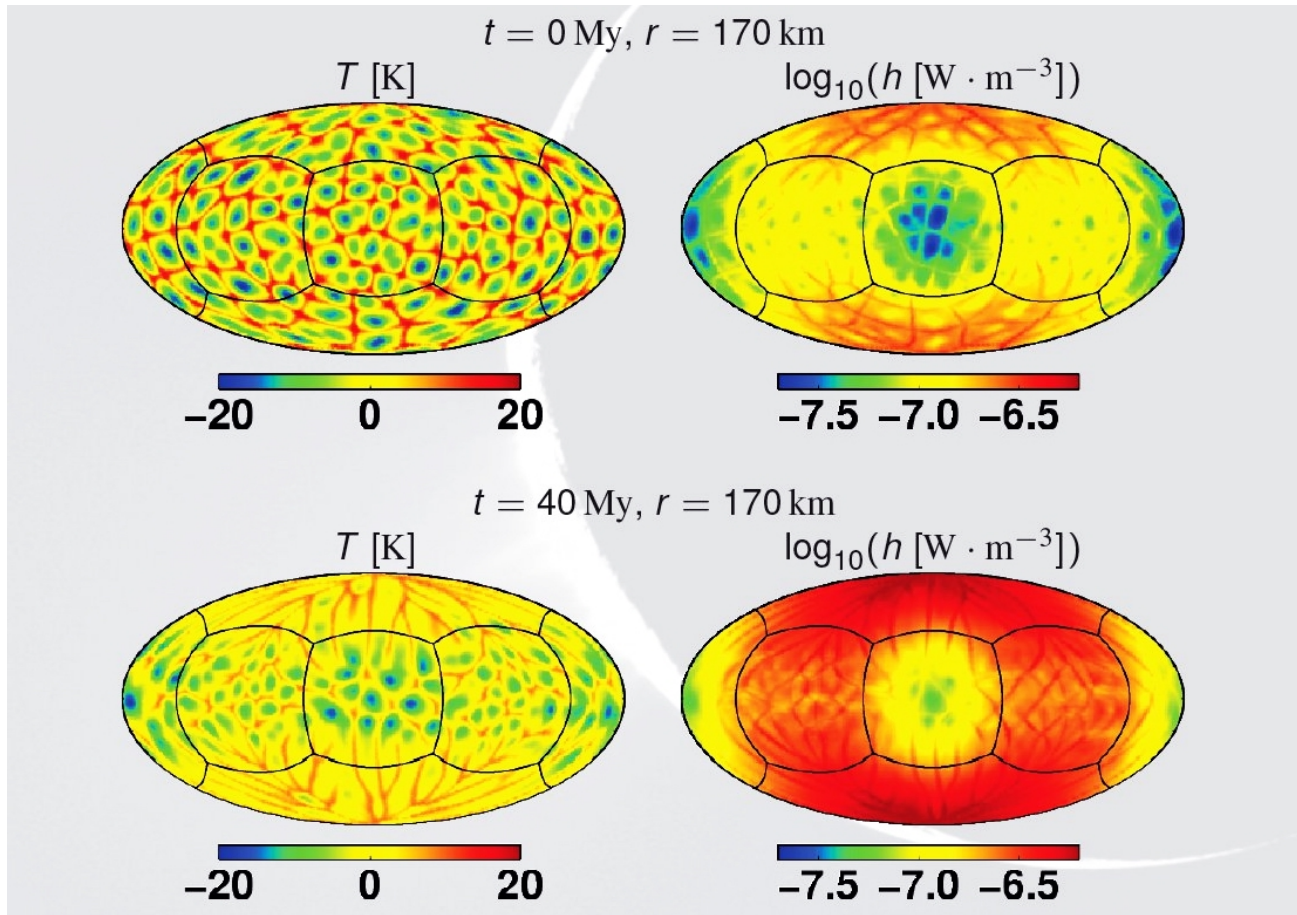
Rovnice termální konvekce

$$\begin{aligned} -\nabla p + \nabla \cdot \sigma - \rho \nabla V &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\ \sigma &= \eta [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^\tau] \\ \rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho_0 c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + H_i + H_{tide} \end{aligned}$$

Slapová deformace

$$\begin{aligned} -\nabla p' + \nabla \cdot \sigma' - \rho_0 \nabla V' &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{d\sigma'}{dt} &= \mu \frac{d}{dt} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^\tau] - \eta' \sigma' \\ &\quad \downarrow \\ H_{tide} &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{\sigma' : \sigma'}{2\eta'} dt \end{aligned}$$

Příklad: Model Enceladu s globálním oceánem

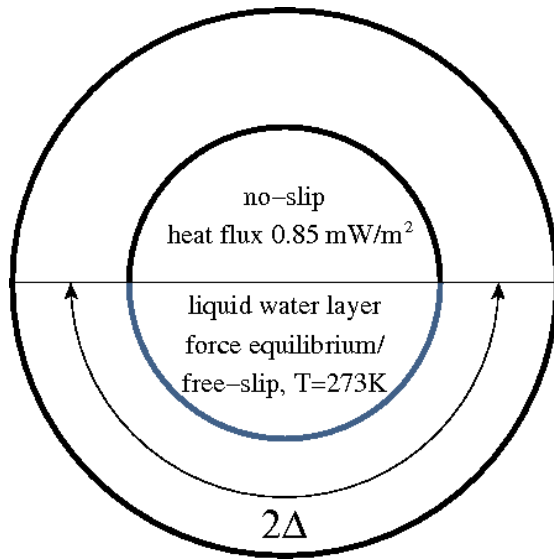


Temperature variations

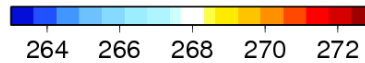
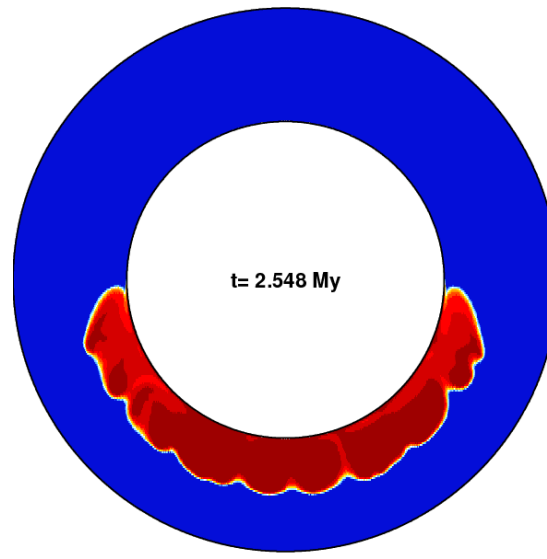
Tidal dissipation

Oceán pouze pod jižní hemisférou + „premelting“

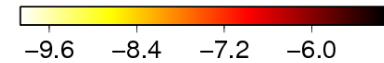
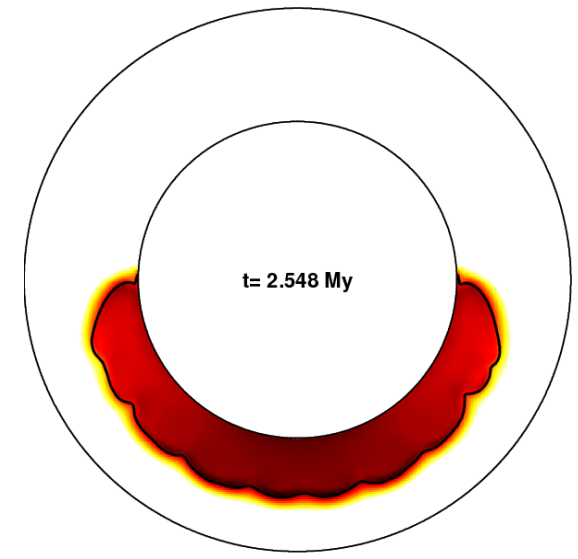
Boundary conditions

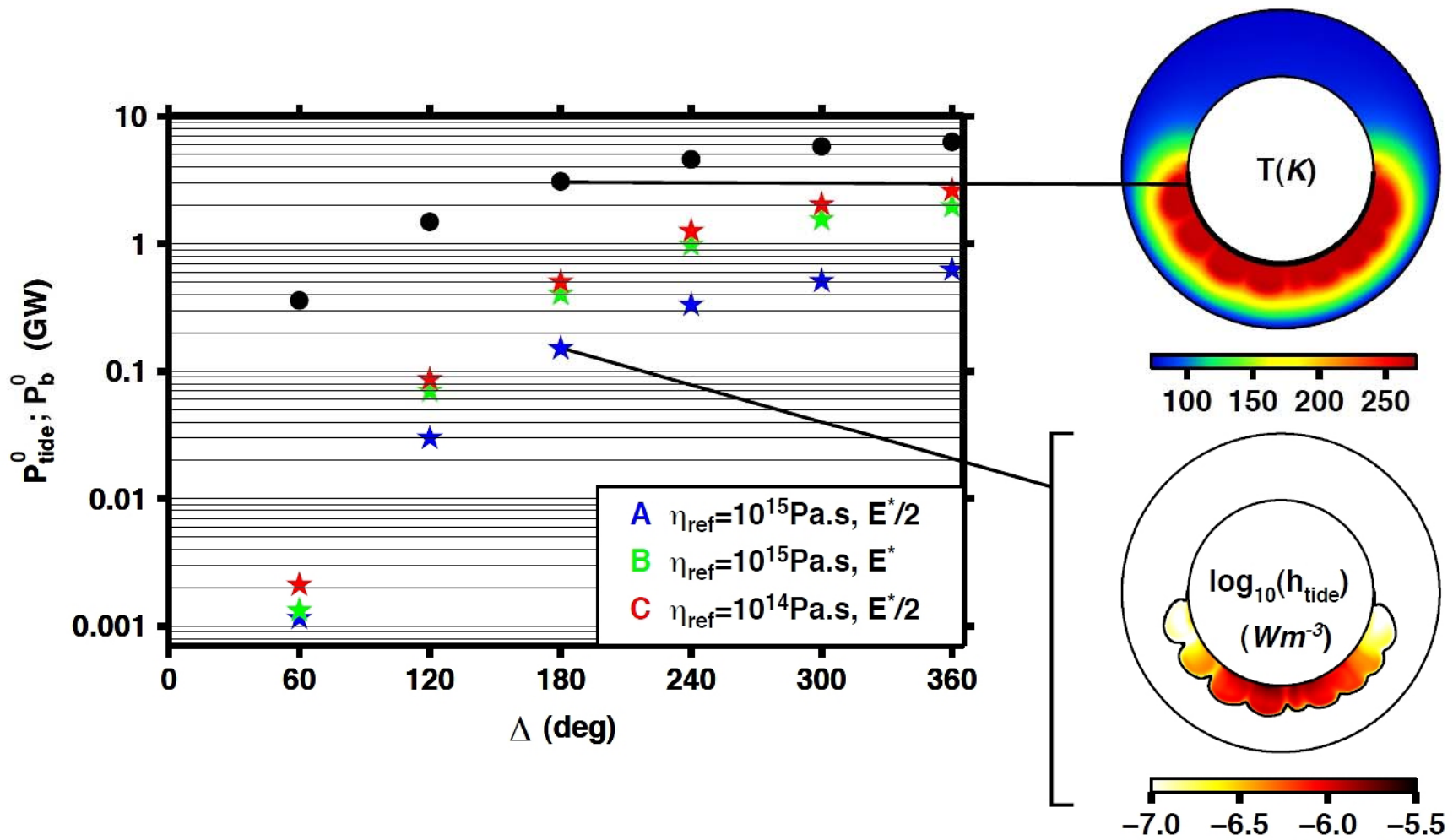


Temperature (K)



Log10 of internal heating

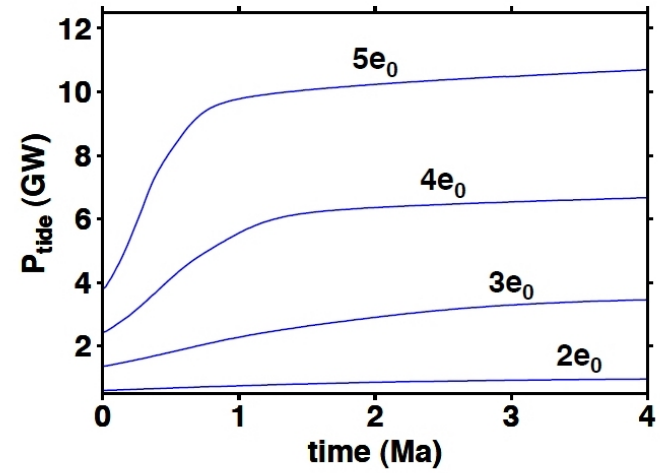
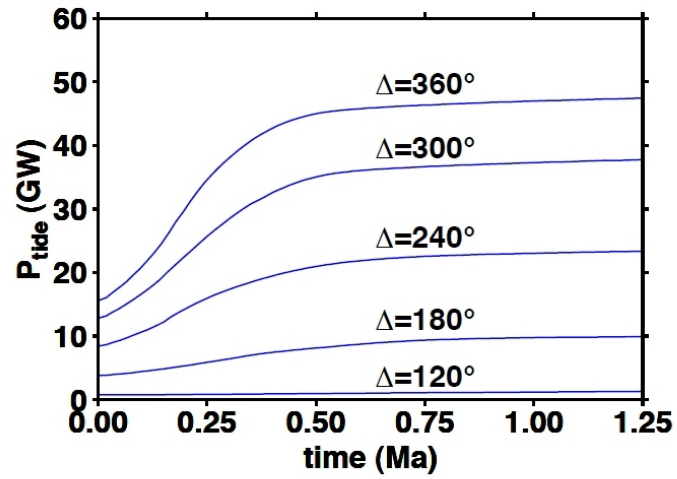




$$e = 5e_0$$

$$\Delta = 180^\circ$$

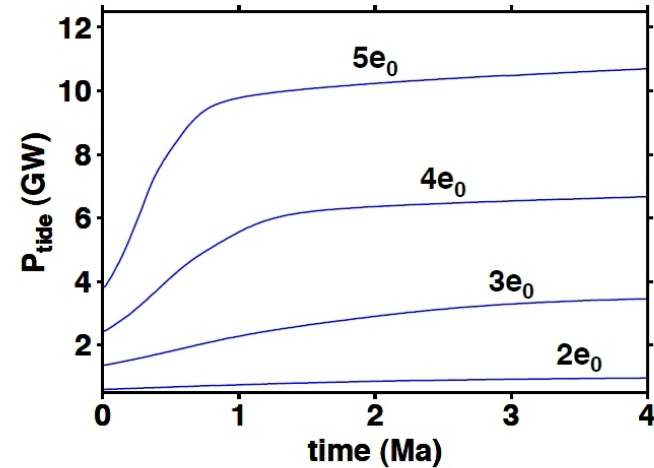
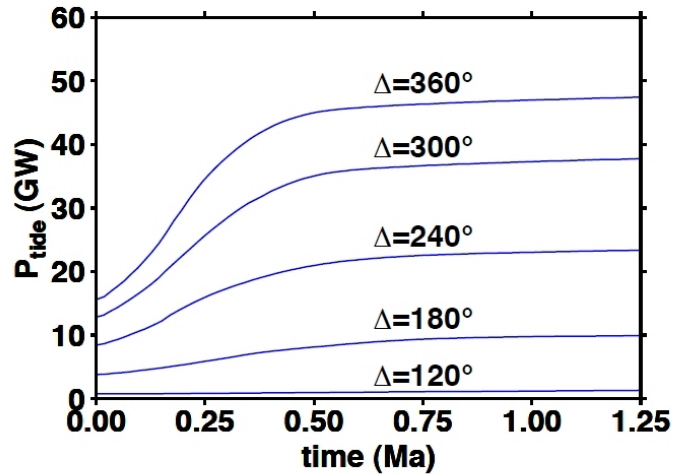
Model A



$$e = 5e_0$$

$$\Delta = 180^\circ$$

Model A



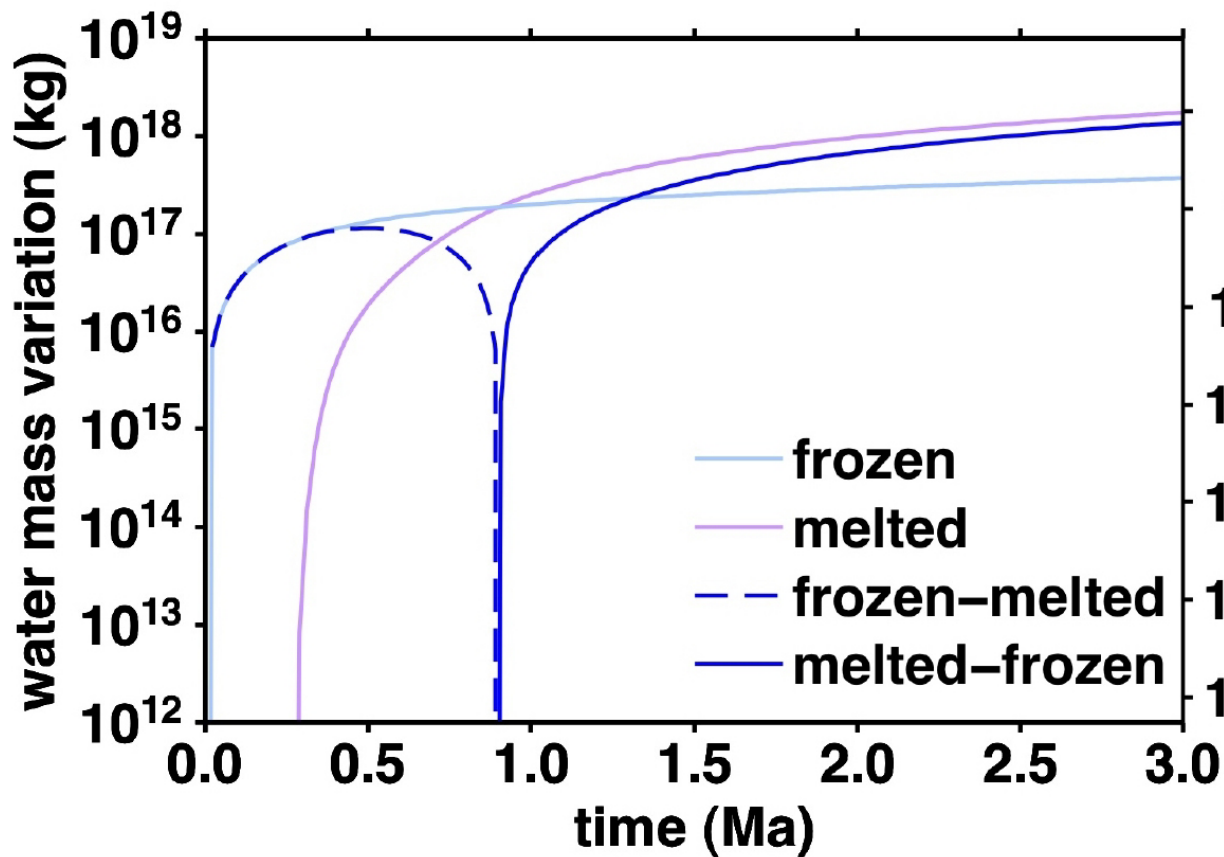
Vyšší excentricita způsobuje **rychlý ohřev tělesa**, a to během velmi krátké doby.

Oceán nestačí zamrznout; po čase naopak **oceán začíná narůstat**

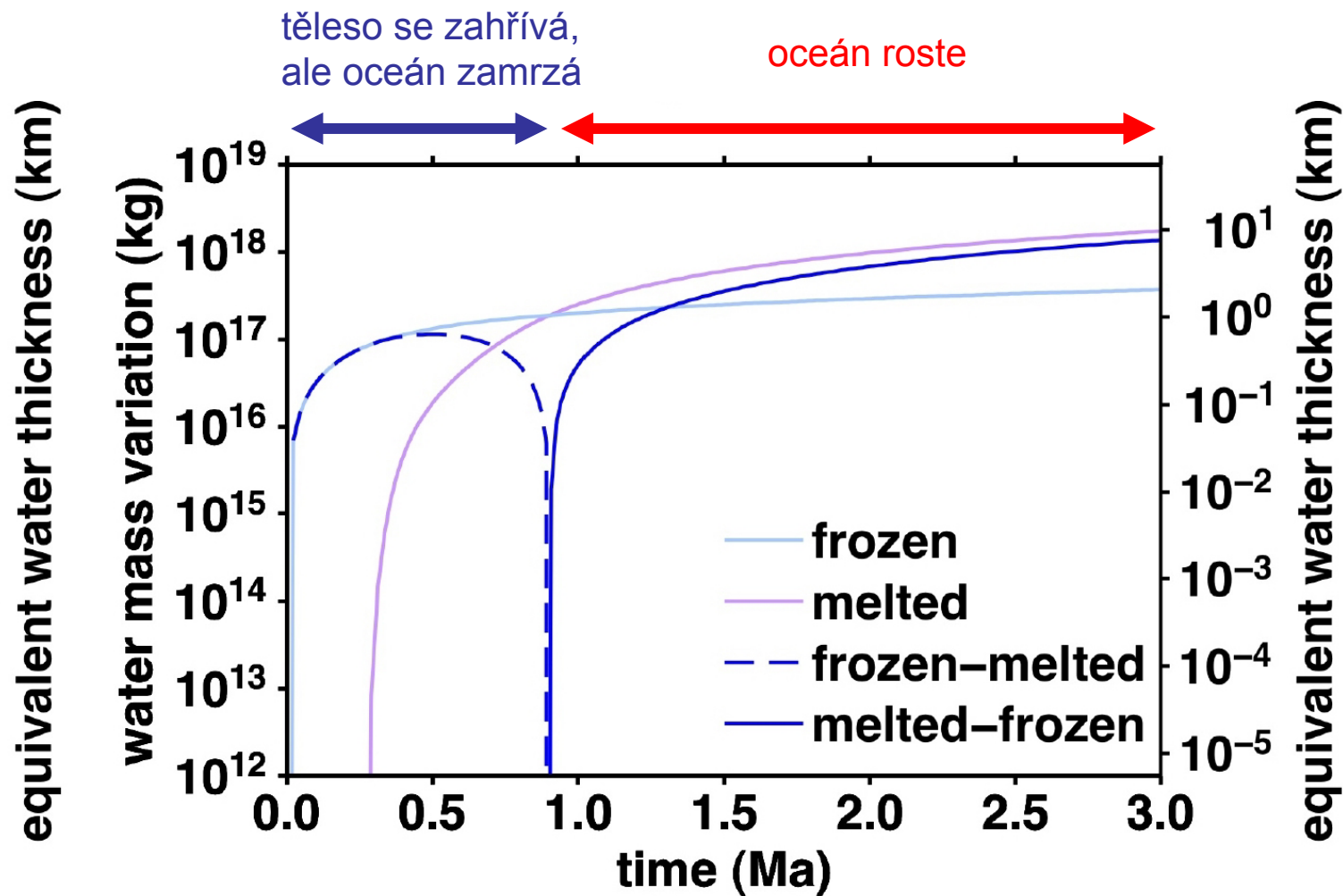
Pozitivní zpětná vazba:

vyšší teplota \rightarrow nižší viskozita \rightarrow efektivnější disipace \rightarrow vyšší teplota

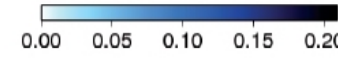
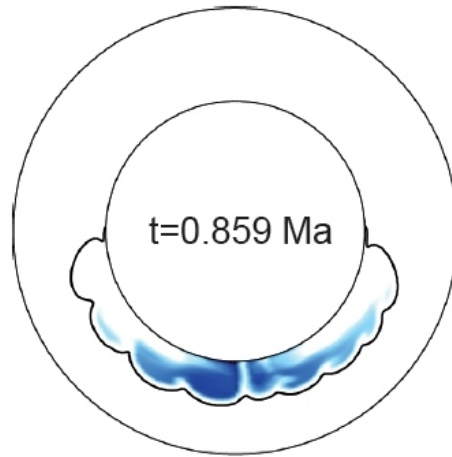
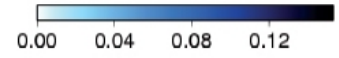
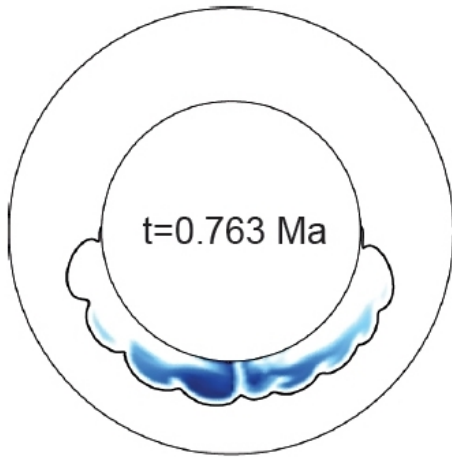
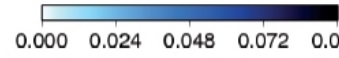
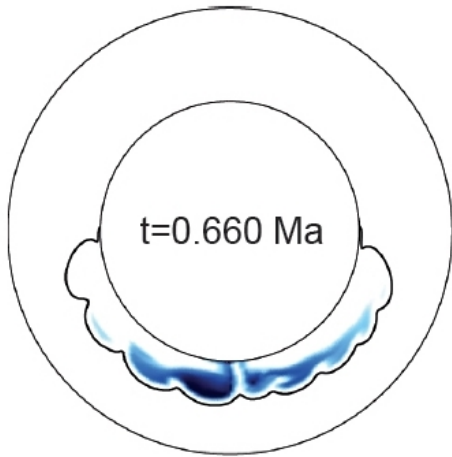
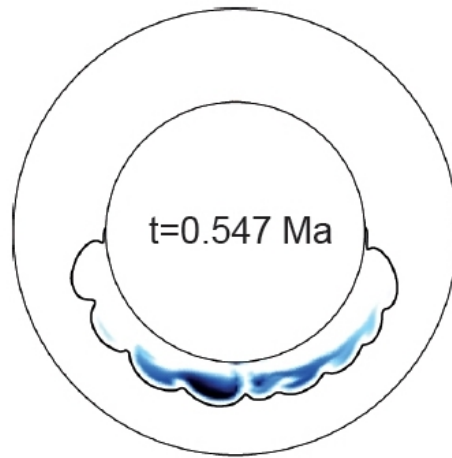
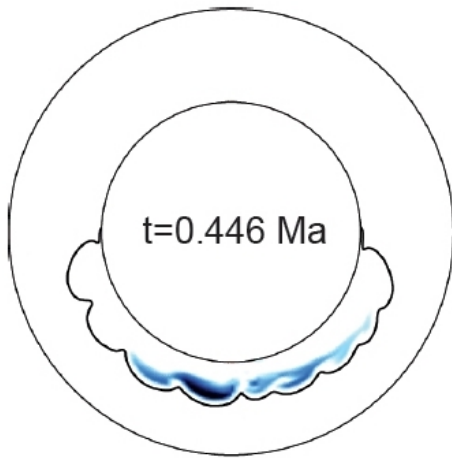
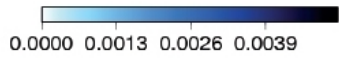
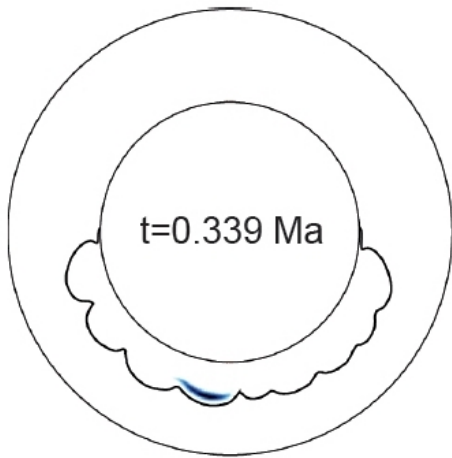
equivalent water thickness (km)



equivalent water thickness (km)



Produkce kapalné vody

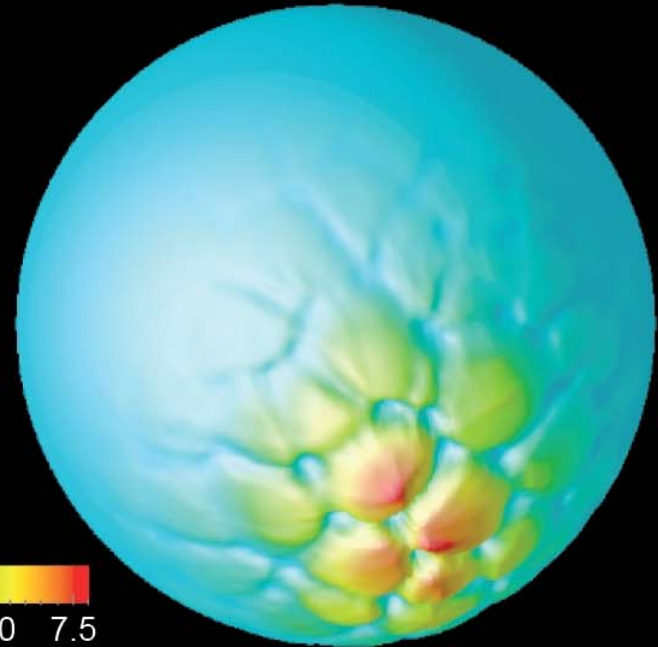
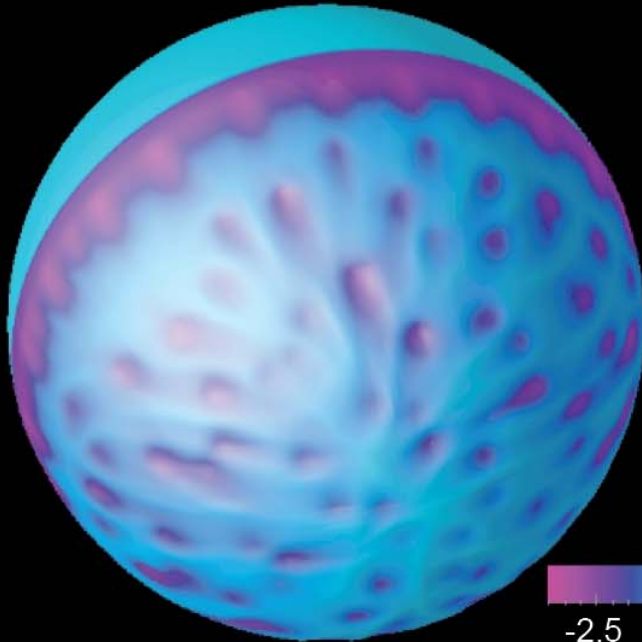


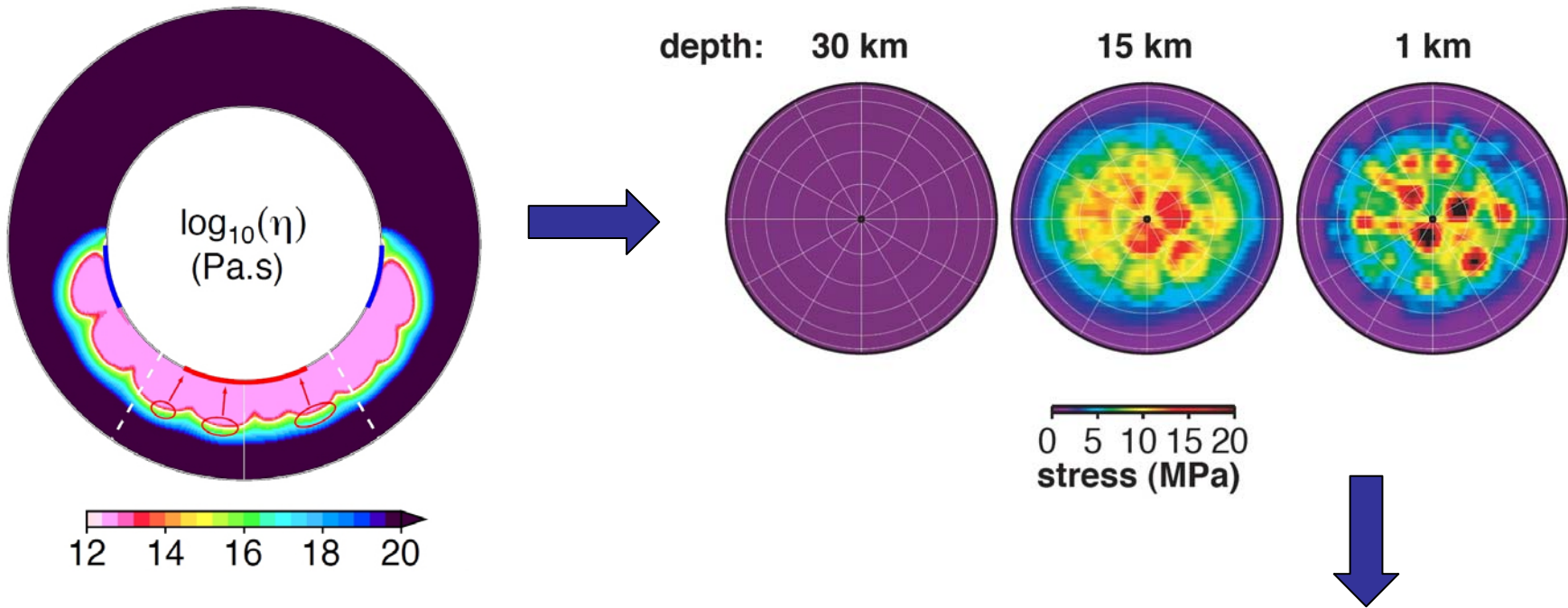
Map of frozen and melted water at t=0.95 Ma

frozen

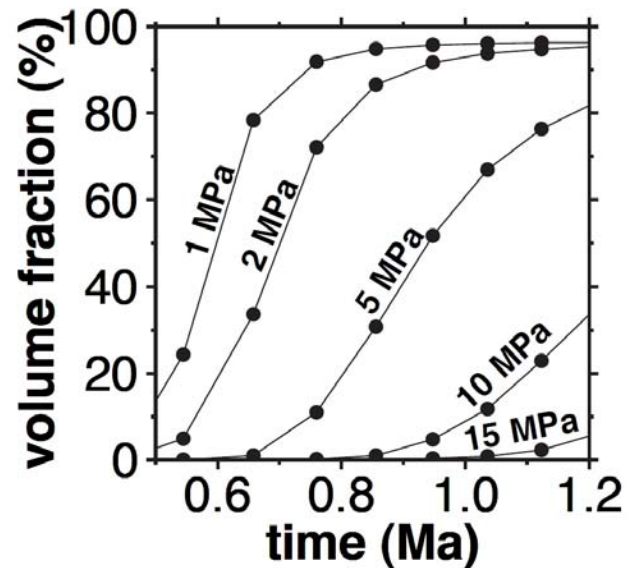
$P_b = 1.4 \text{ GW}$, $P_{\text{tide}} = 9.7 \text{ GW}$

melted





Objemové změny v důsledku tání vedou k dramatickému nárůstu napětí ve vnější tuhé slupce a posléze k jejímu rozlámání → vznik zlomů (Tiger Stripes)

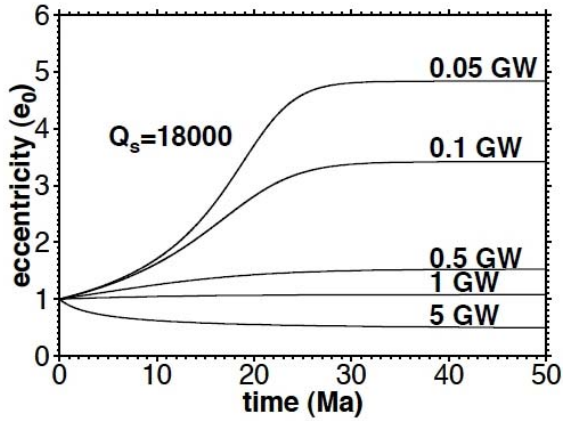


Je změna excentricity o pětinásobek reálná?

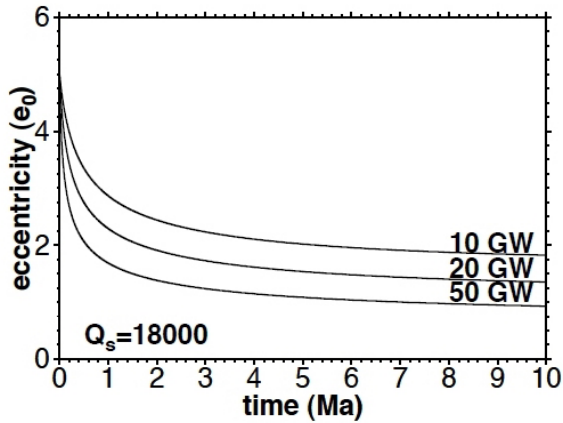
$$\frac{de_e}{dt} = \left[\frac{0.49 M_S c_e}{M_d \alpha C_a} \right] e_e^2 (1 - 30.69 D_e e_e^2),$$

$$D_e = \left(\frac{R_e}{R_S} \right)^5 \left(\frac{M_S}{M_e} \right)^2 \left(\frac{Q_S}{k_2^S} \right) \left(\frac{k_2^e}{Q_e} \right),$$
$$\frac{k_2^e}{Q_e} = \frac{2}{21} \frac{G}{n_e^5 R_e^5 e_e^2} P_{\text{tide}},$$
$$c_e = \frac{9}{2} \left(\frac{R_S}{a_e} \right)^5 \left(\frac{M_e}{M_S} \right) n_e \frac{k_2^S}{Q_S},$$
$$\alpha = a_e / a_d, C_a = 1.19$$

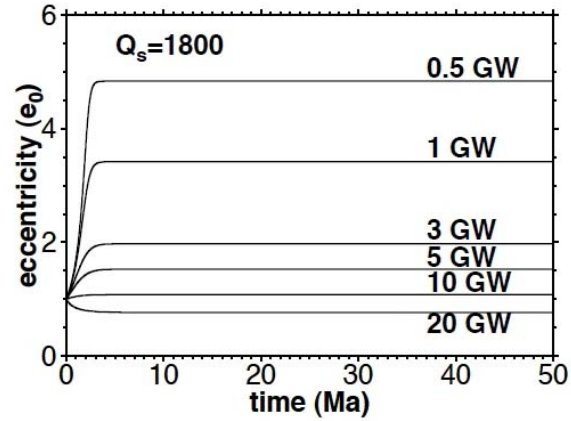
$Q_s = 18000$



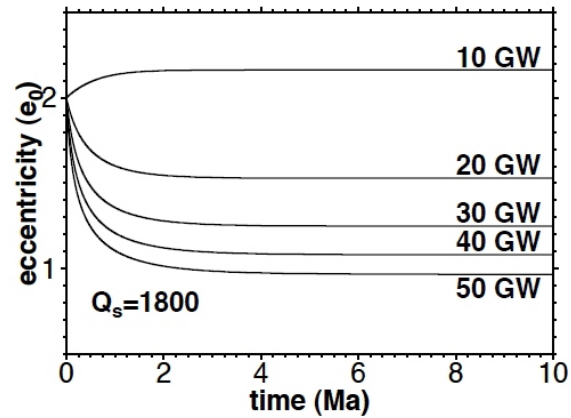
(c)



$Q_s = 1800$
(Lainey et al., *Astroph. J.*?)



(d)



ZÁVĚR:

- Současná hodnota excentricity nemůže uspokojivě vysvětlit pozorovaný tepelný výkon. Ten je zřejmě důsledkem uvolňování tepla nahromaděného v předchozí fázi charakterizované výrazně vyšší excentricitou, než je současná.
- Trvalou existenci vnitřního oceánu mohou vysvětlit pouze rychlé a významné variace excentricity v čase.

Další práce:

- Zahrnutí variací excentricity v závislosti na míře disipace.
- Zahrnutí plasticity a křehkého chování litosféry.
- Zahrnutí vývoje vnitřního oceánu.

ZÁVĚR:

- Současná hodnota excentricity nemůže uspokojivě vysvětlit pozorovaný tepelný výkon. Ten je zřejmě důsledkem uvolňování tepla nahromaděného v předchozí fázi charakterizované výrazně vyšší excentricitou, než je současná.
- Trvalou existenci vnitřního oceánu mohou vysvětlit pouze rychlé a významné variace excentricity v čase.

Další práce:

- Zahrnutí variací excentricity v závislosti na míře disipace.
- Zahrnutí plasticity a křehkého chování litosféry.
- Zahrnutí vývoje vnitřního oceánu.

DĚKUJI ZA POZORNOST!