

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Marie Běhounková

Ledové měsíce obřích planet z geofyzikálního pohledu

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 61 (2016), No. 3, 214–233

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/145848>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2016

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

# Ledové měsíce obřích planet z geofyzikálního pohledu

Marie Běhounková, Praha

*Abstrakt.* Ledové měsíce obřích planet (tj. Jupiteru, Saturnu, Uranu a Neptunu) jsou tělesa s vysokým obsahem ledu a s rozměry od stovek až po tisíce kilometrů. Mohou být v současnosti neaktivní se starým, prachem a impaktovými krátery pokrytým povrchem, nebo velmi činné s mladým povrchem pokrytým tektonickými útvary a zlomy, s aktivním kryovulkanismem a gejzíry. V některých měsících jsou detekovány i podpovrchové oceány a stojí tak v centru intenzivního astrobiologického výzkumu.

V tomto článku se zaměříme na studium měsíců a jejich nitra geofyzikálními metodami. Nastíníme otázky, na které se při jejich studiu snažíme odpovědět. Popíšeme data, pomocí nichž ledové měsíce zkoumáme. Představíme některé geofyzikální metody průzkumu ledových měsíců, zejména metody numerického modelování používané k interpretaci pozorovaných dat. Na závěr se zaměříme na dva ledové měsíce Saturnu stojící na opačných stranách – na aktivní Enceladus a nečinný Iapetus.

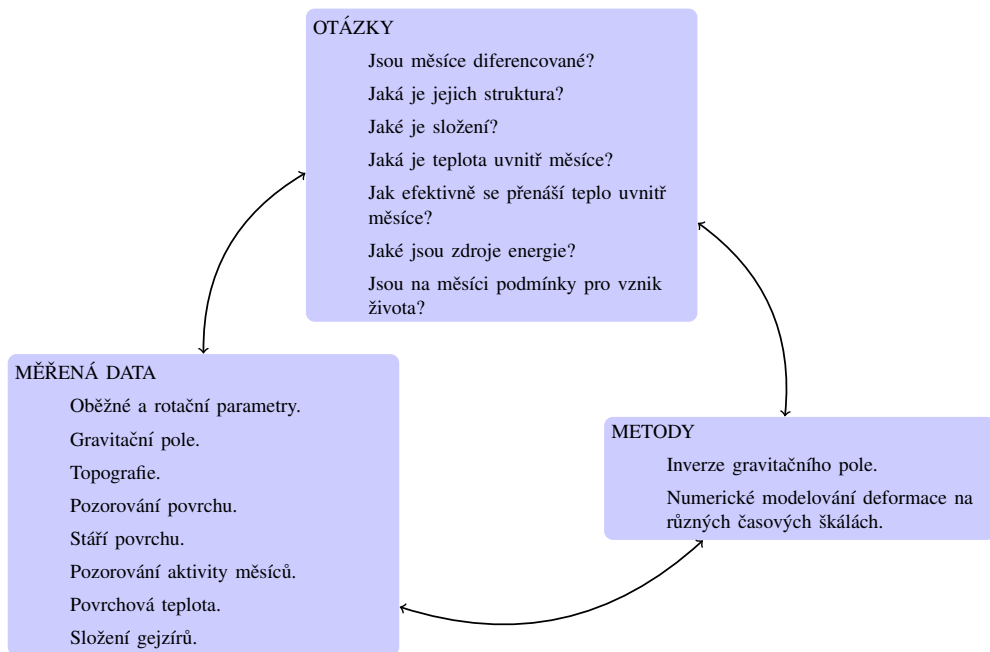
## 1. Úvod

Plynné a ledové obří planety sluneční soustavy obíhá velké množství přirozených satelitů, které tvoří systémy s mnoha specifickými vlastnostmi. Kvůli velké vzdálenosti od Slunce a tedy i malé dopadající energii leží obří planety za sněžnou čarou, v oblastech sluneční soustavy, kde se voda za nízkých tlaků nemůže nacházet v kapalném stavu. Ledové měsíce jsou proto často definovány jako tělesa s vysokým obsahem vody v různých fázích a skupenstvích, jejichž povrch je složen převážně z ledu. Dále mohou tato tělesa obsahovat silikáty a případně železo. Někdy bývají ledové měsíce také definovány jako tělesa s hustotou mezi  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Tethys) a  $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Triton). Při použití této definice by jeden z nejnámějších měsíců Europa nebyl považován za ledový měsíc kvůli vysokému obsahu silikátů a železa (tvoří 90 % jeho hmotnosti).

Největší ledové měsíce jsou srovnatelně velké nebo větší než Měsíc. Pokud byly energie a teplota na počátku formace dostatečně velké, gravitační síly mohly překonat pevnost materiálu a došlo tak k rozdělení (diferenciaci) měsíce na vrstvy v závislosti na hustotě a dalších fyzikálních a chemických vlastnostech. Mezi ledovými měsíci lze proto nalézt měsíce nediferencované (například Iapetus), částečně diferencované (Callisto) nebo plně diferencované (Europa, Ganymedes). Diferencované ledové měsíce se skládají z vnější ledové slupky, silikátového jádra či v případě velkých ledových měsíců i z železitého jádra. Pro velké měsíce Jupiteru je patrně přítomen i podpovrchový

---

RNDr. MARIE BĚHOUNKOVÁ, Ph.D., Katedra geofyziky, Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: Marie.Behounkova@mff.cuni.cz

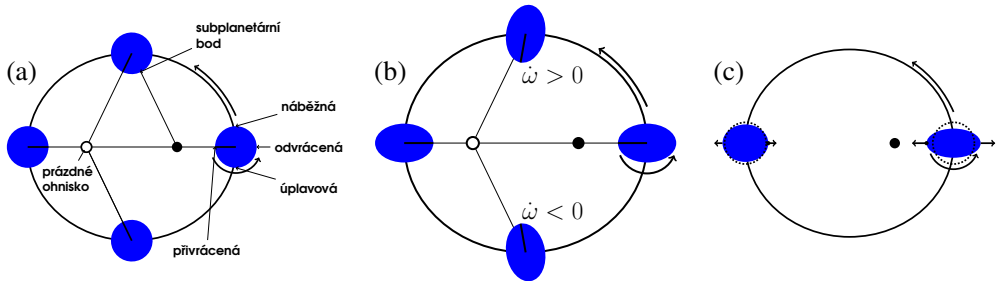


Obr. 1. Pokládáné otázky, měřená data a metody pro geofyzikální studium měsíců

oceán potvrzený díky existenci indukovaného magnetického pole [18], [21]. Na diferencovaných středních a malých měsících byl v historii velmi pravděpodobně přítomen vodní oceán, který vlivem energetických ztrát zkrystalizoval. Výjimku tvoří dva malé měsíce Enceladus a Mimas, kde se vodní oceán vyskytuje až do současnosti [35], [37].

Přítomnost pouze ledu či vody a ledu ve slupkách měsíců závisí zejména na průběhu teploty s hloubkou (tlakem). Pro nízké tlaky má led stejnou formu (s hexagonální strukturou) jako na Zemi. Pro tlaky do 0,1 GPa, charakteristické pro rozhraní ledová slupka-silikátové jádro pro malé a středně velké ledové měsíce a Europu, se voda může v závislosti na teplotě nacházet v kapalném stavu. Pro větší měsíce a vyšší tlaky je pravděpodobný i výskyt vysokotlakých struktur ledu nad rozhraním se silikátovým jádrem. Kvůli přítomnosti vody jsou ledová tělesa v centru zájmu astrobiologie. Za nejvhodnější kandidáty pro vznik života jsou pak považovány měsíce Europa a Enceladus právě díky přímému kontaktu vody se silikáty a tedy i se zdroji minerálů a živin. Naopak přítomnost vysokotlaké formy ledu v případě velkých měsíců a nemožnost přímého kontaktu vody a silikátů pak někdy bývá označována za překážku pro možnou přítomnost života.

Při studiu ledových měsíců se snažíme odhalit informace o nitru měsíců, jejich složení, teplotě či přítomnosti vody. K nalezení odpovědí se používají data odrážející vnitřní složení a strukturu měsíců, například informace o gravitačním poli či tvaru tělesa. K jejich interpretaci jsou velmi často používány statistické metody a metody matematického modelování. Základní otázky, na které se snažíme při studiu ledových měsíců odpovědět, interpretovaná data a geofyzikální metody jsou shrnuty na obrázku 1.



Obr. 2. (a) schéma synchronní rotace a zdánlivé (optické) librace, (b) schéma skutečné (fyzické) librace a (c) schéma slapů

## 2. Měřená data

Převážná část detailních informací o ledových tělesech pochází z vesmírných misí Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA/ARC a NASA/JPL). Průzkum započal již v 70. a 80. letech minulého století misemi s průlety kolem vnějších planet: Pioneer 10 (Jupiter), Pioneer 11 a Voyager 1 (Jupiter a Saturn) a Voyager 2 (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun). V devadesátých letech se sonda Galileo (mise NASA/JPL) stala první umělou družicí Jupiteru a systematicky se po dobu osmi let zabývala průzkumem Jupiteru a jeho měsíců. Od roku 2004 do současnosti provádí sonda Cassini (NASA/JPL) průzkum Saturnu, jeho prstenců a měsíců. V roce 2005 se od sondy Cassini odpojila sonda Huygens (ESA/ASI) a přistála na měsíci Titan.

### 2.1. Orbitální a rotační parametry

Oběžnou dobu a hlavní poloosu oběžné dráhy lze určit přímým pozorováním. V systémech obřích planet se velmi často pozorují orbitální rezonance, kdy se dvě či více těles na pravidelné oběžné dráze periodicky gravitačně ovlivňuje a jejich orbitální periody jsou poměrem dvou malých celých čísel. Nejznámější je Laplaceova rezonance, při níž se ovlivňují měsíce Jupiteru Io, Europa a Ganymedes a poměr jejich oběžných dob je 1:2:4. Také v systému Saturnu je v současnosti pozorováno mnoho rezonancí (například 1:2 rezonance mezi měsíci Enceladus a Dione), jejichž časový vývoj byl v průběhu historie složitý [41]. Tyto rezonance umožňují dlouhodobé udržení nenulové výstřednosti oběžné dráhy. Z hlediska vnitřního vývoje měsíců mohou být díky slapovému působení a disipaci významným zdrojem energie.

Rotační perioda a její časové proměny se obvykle určují přímým a opakovaným pozorováním význačných bodů na měsících. Převážná část středně velkých a velkých měsíců má oběžnou dobu přibližně stejně velkou jako rotační dobu. Jsou tedy, podobně jako Měsíc, uzamčeny v takzvané synchronní (1:1 spin-orbitální) rezonanci a lze u nich hovořit o přivrácené a odvrácené polokouli. Velmi často se také používá rozdělení na náběžnou polokouli (leading hemisphere), která je nastavená ve směru pohybu, a úplavovou polokouli (trailing hemisphere), která směřuje proti směru pohybu (viz schéma na obrázku 2a). Ke zpomalení rotace (despiningu) z řádově několika hodin na dny až desítky dnů a k uzamčení do synchronní rezonance došlo postupně vlivem působení slapů. Čas uzamčení je závislý na reologických vlastnostech měsíce a klesá

s klesající vzdáleností od planety a s rostoucí velikostí měsíce. Většina velkých a středně velkých měsíců je v souladu s teoretickou předpovědí uzamčena v krátkém (z hlediska stáří sluneční soustavy) období. Výjimku představuje měsíc Iapetus, který obíhá Saturn ve velké vzdálenosti a přesto je uzamčen v 1:1 spin-orbitální rezonanci.

Významná část oběžných drah má díky dráhovým rezonancím nenulovou výstřednost. Jak plyne z druhého Keplerova zákona, oběžná rychlost se na výstředné dráze mění. Za předpokladu konstantní rotační frekvence se tím mění i poloha subplanetárního bodu (bod, kdy je mateřská planeta v nadhlavníku) v prvním přiblížení mezi krajními hodnotami  $\pm 2 \arcsin e$ . Dochází tedy k zdánlivému kývavému pohybu (optické libraci) v měsícopisné délce (analogie zeměpisné délky). Pokud je měsíc navíc asymetrický (nekulový či má nesymetrické rozložení hmot), mateřská planeta periodicky vyvolává gravitační momenty sil, které působí změny v rotační úhlové rychlosti, měsíc tedy skutečně (fyzicky) libruje v měsícopisné délce (obrázek 2b a například [25]). Vlivem citlivosti skutečné librace na vnitřní strukturu je určení její velikosti jednou z možných metod, jak nahlédnout do nitřní struktury měsíců sluneční soustavy, například [35], [37].

V případě ledových měsíců hrají důležitou úlohu i slapy. Pro těleso konečného rozměru jsou gravitační síla a odstředivá síla vyrovnány právě v těžišti tělesa, mimo těžiště však převládají gravitační nebo odstředivé síly (obrázek 2c). Pokud je navíc výstřednost dráhy nenulová, tyto síly se periodicky mění v průběhu jedné orbity, periodicky zatěžují planetu a mohou být díky disipaci významným zdrojem energie.

## 2.2. Hmotnost a gravitační pole

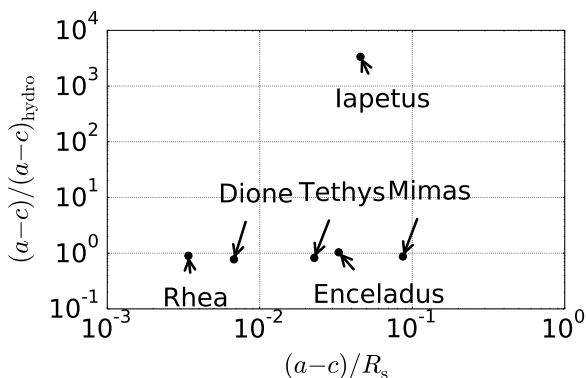
Důležitou informaci o vnitřní struktuře měsíce nese přirozeně také gravitační pole. Vzhledem k tomu, že ledové měsíce nemají přirozené satelity a jejich hmotnost je mnohem menší než hmotnost mateřského tělesa, nelze k určení jejich hmotnosti využít třetího Keplerova zákona. Hmotnost se tedy obvykle určuje z perturbací drah ostatních měsíců. K přesnějšímu určení gravitačního pole měsíců jsou pak používány umělé družice a poruchy jejich drah.

Vnější gravitační potenciál měsíců  $V$  se často vyjadřuje ve formě řady

$$V(\mathbf{r}) = \iiint_V G \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{m=-j}^j \left(\frac{R_0}{r}\right)^j C_{jm} Y_{jm}(\vartheta, \varphi), \quad (1)$$

kde  $G$  je Newtonova gravitační konstanta,  $\mathbf{r}$  a  $\mathbf{r}'$  označují polohový vektor pozorovatele a elementu uvnitř tělesa,  $(r, \vartheta, \varphi)$  jsou sférické souřadnice pozorovatele,  $\rho$  je hustota,  $R_0$  referenční poloměr,  $C_{jm}$  jsou komplexní koeficienty gravitačního rozvoje,  $Y_{jm}$  jsou sférické harmonické funkce [38],  $j$  a  $m$  jsou stupeň a řád rozvoje.

Zvláštní význam má koeficient na stupni 0, který je přímo úměrný hmotnosti tělesa. Stupeň 1 je spjat s polohou těžiště. Pokud je počátek souřadné soustavy zvolen v těžišti, jsou koeficienty na stupni 1 nulové. Koeficienty na stupni 2 (celkem 5 koeficientů) jsou lineární kombinací šesti složek tenzoru setrvačnosti tělesa. Pokud tedy přidáme dodatečný předpoklad (například předpoklad hydrostatické rovnováhy tělesa pomocí Darwinovy–Radauovy rovnice [25]), můžeme určit diferencovnost tělesa. V případě ledových měsíců je známa hmotnost, často i faktor momentu setrvačnosti a pro měsíce Titan a Enceladus i rozvoj do stupně 3 [14], [15].



Obr. 3. Pozorované zploštění (osa  $x$ ), poměr pozorovaného a očekávaného (hydrostatického) zploštění (osa  $y$ ) pro středně velké a malé měsíce Saturnu, podle [36];  $a$  a  $c$  jsou osy triaxiálního elipsoidu aproximujícího tvar měsíce (ve směru k Saturnu a v polárním směru),  $R_s$  je střední poloměr.

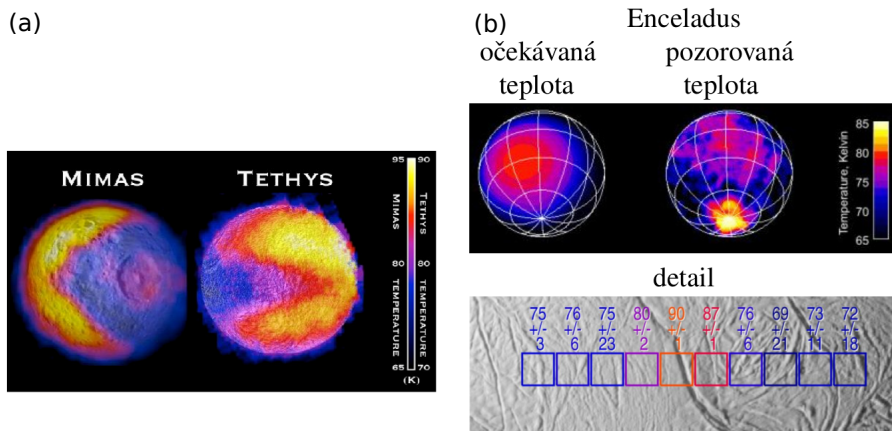
### 2.3. Tvar a topografie

Velikost a tvar tělesa jsou určovány přímým pozorováním či pomocí zákrytu hvězd. K přesnějšímu určení topografie je pak využíváno radarových měření či měření pomocí laserových altimetrů. Tvar i malých ledových měsíců je převážně určen kombinací gravitačního, slapového a rotačního potenciálu. Tvar tělesa pak má tendenci minimalizovat potenciální energii, v případě gravitačního pole tedy těleso preferuje tvar koule, která je kvůli rotaci zploštěná nebo může mít výdutě na odvrácené a přivrácené straně díky slapům. Typicky jsou tělesa s poloměrem větším než 200 km přibližně kulová. Pokud tvar tělesa přesně kopíruje ekvipotenciální plochu přítomných potenciálů a minimalizuje potenciální energii, pak je toto těleso v hydrostatické rovnováze.

Opačný případ obvykle svědčí o aktivní vnitřní dynamice, změně působících vnějších sil v průběhu nedávné geologické historie nebo o skutečnosti, že působící síly nebyly dostatečné velké, aby překonaly pevnost materiálu. Jedním z úkolů planetologie je vysvětlit nehydrostatický tvar tělesa. Příklad zploštění (poměr polárního a rovníkového poloměru) je uveden v případě měsíců Saturnu na obrázku 3. Čím blíže k Saturnu se měsíc nachází, tím kvůli uzamčení do synchronní rezonance rychleji rotuje a tím větší je jeho zploštění (obrázek 3, osa  $x$ ). Ze známé hmotnosti, rotace a ze známých orbitálních parametrů pak lze vypočítat předpokládané zploštění pro těleso v hydrostatické rovnováze a to porovnat se skutečně naměřeným zploštěním (obrázek 3, osa  $y$ ). Téměř všechny středně velké i malé měsíce Saturnu mají poměr skutečného a teoretického (hydrostatického) zploštění blízky jedné, předpokládá se tedy, že jsou téměř v hydrostatické rovnováze. Výjimku opět tvoří měsíc Iapetus, který je oproti očekávání zploštěn řádově více.

### 2.4. Magnetické pole

Přítomnost, velikost a charakter magnetického pole ledových měsíců jsou zaznamenávány přímo pomocí magnetometrů či nepřímou díky pohybu nabitých částic. U ledových měsíců je obvykle uvažován makroskopický původ magnetického pole: jedná se o pole



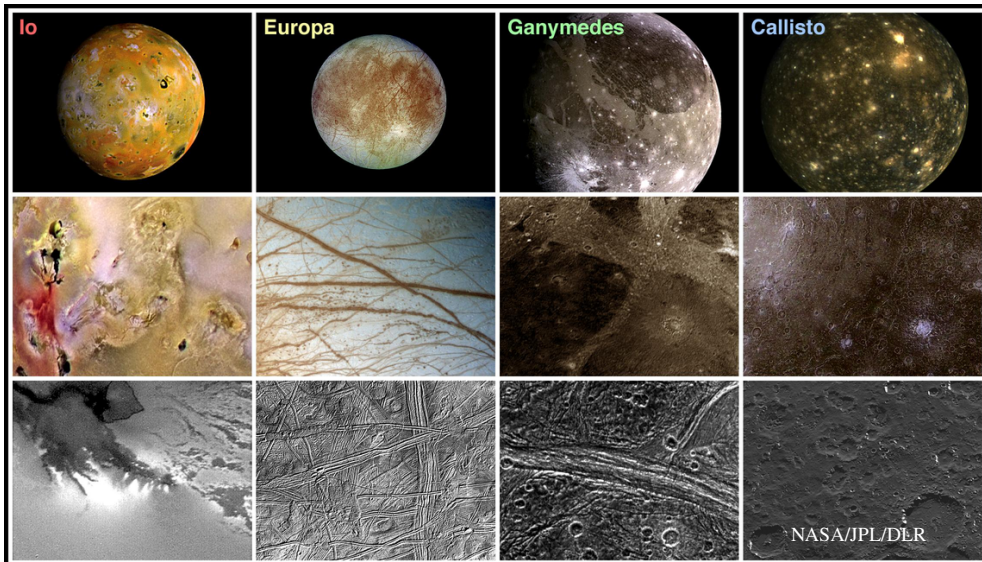
Obr. 4. Teplota na povrchu pro vybrané měsíce Saturnu, upraveno z [26]

generované činností dynamy uvnitř měsíce nebo pole indukované časovými změnami vnějšího pole. Existence či absence globálního pole nese důležitou informaci o nitru měsíce. V případě přítomnosti dynamy a tedy generování vlastního magnetického pole je nezbytná přítomnost na železo bohatého a částečně tekutého jádra, dále je velmi důležitý efektivní přenos tepla z jádra. Z ledových měsíců velmi pravděpodobně má dynamo měsíc Ganymedes [20]. Naopak Europa i přes přítomnost železitého jádra dynamo nemá. Přítomnost indukovaného pole poskytuje informace o rozložení vodivosti v nitrech ledových měsíců. Indukovaná pole byla zaznamenána pro měsíce Europa, Ganymedes a Callisto. V jejich nitrech se tedy nachází vrstva s vysokou vodivostí, která je interpretována jako vodivý (slaný) oceán [18], [21].

## 2.5. Teplota

Povrchová teplota se určuje analýzou emitovaného záření v infračervené oblasti za předpokladu, že vyzařovací charakteristiky povrchu lze aproximovat zářením absolutně černého (případně šedého) tělesa. Povrchová teplota měsíců je převážně určena dopadajícím zářením od Slunce a lze ji teoreticky určit v závislosti na povrchových a přípovrchových vlastnostech materiálu za použití Stefanova–Boltzmannova zákona. Naopak, pokud je známa teplota a její průběh během střídání noci a dne, lze z měření teploty na povrchu určit vlastnosti materiálu. Známým příkladem jsou tzv. struktury Pac-Man na měsících Mimas a Thetys, kde část náběžné strany je kvůli dopadu vysokoenergetických elektronů více konsolidována (má menší porozitu a vyšší tepelnou vodivost) než úplavová strana. V průběhu dne se tedy teplota náběžné strany zvyšuje pomaleji a v noci náběžná strana chladne pomaleji než úplavová hemisféra (obrázek 4a). Pokud se však naměřená teplota výrazně liší od teploty předpovězené na základě záření dopadajícího od Slunce, jsou velmi důležité i zdroje uvnitř planety či aktivní procesy v nitru měsíce. Známým příkladem je měření zvýšené teploty v okolí zlomů na Enceladu (obrázek 4b).

V centru zájmu samozřejmě stojí i průběh teploty s hloubkou a přítomnost vody v kapalném stavu. Stanovení hloubkového profilu teploty není jednoduché, obvykle se



Obr. 5. Tektonika galileovských měsíců, upraveno z [26]

určuje za použití numerických simulací či škálovacích metod. Pokud se teplo přenáší pouze kondukcí, závislost teploty na hloubce je přibližně lineární. Pokud je přítomna konvekce, kde dominuje přenos tepla advekcí (prouděním), teplota mimo hraniční vrstvy kopíruje adiabatický průběh s hloubkou. Důležitou součástí určení průběhu teploty v měsíci jsou samozřejmě zdroje energie. Zdrojem energie je akrece (formování těles z plyno-prachového mračka), diferenciacce, dopady těles na povrch, rozpad radioaktivních prvků, případně disipace při záchytnu do synchronní rezonance či vlivem slapů.

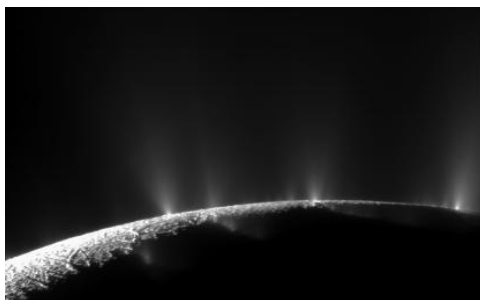
## 2.6. Povrch a tektonické útvary

Mapování povrchu, jeho topografie a spektrální charakteristiky umožňuje vzdálený průzkum (remote sensing). Ze spektrální analýzy je známo, že se povrch měsíců skládá převážně z vodního ledu. Vlivem velmi nízkých povrchových teplot (menších než 90 K) se led v malých hloubkách chová křehce, na površích jsou pozorovány zlomy. Ve větších hloubkách a za vyšších teplot se led chová plasticky a může téci.

Na površích ledových měsíců je pozorována široká škála tektonických útvarů, které mohou být zachovány po geologicky dlouhé období. Výjimku tvoří měsíc Titan, který má hustou atmosféru a na jehož povrchu působí erozivní procesy. Tektonické procesy jsou řízeny zejména periodickým slapovým zatěžováním, změnami objemu díky fázovým přechodům a krystalizací oceánu, termoelastickým napětím, konvektivními procesy a relaxací materiálu. Jedním z nejnázornějších příkladů vlivu slapů a slapového zahřívání jsou galileovské měsíce (Io, Europa, Ganymedes, Callisto). Nejvzdálenější

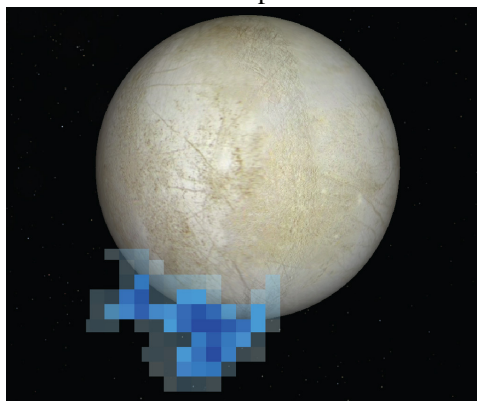


Enceladus



zdroj: NASA/JPL/Space Science Institute

Europa



zdroj: NASA/ESA/L. Roth/SWRI/Univ. of Cologne

Obr. 6. Gejíry na měsících Enceladus (Cassini ISS, viditelná oblast) a Europa (Hubbleův vesmírný teleskop, UV oblast v kombinaci s fotografií ve viditelné oblasti), [26]

měsíce, kde je slapové působení a slapová disipace nejmenší, jsou nejméně aktivní. Měsíc Callisto má velmi starý povrch pokrytý krátery. Má také velmi nízkou odrazivost (nízké albedo) kvůli kumulaci prachových částic na povrchu. Pokud je však povrchová vrstva porušena, například dopadem tělesa, jsou odkryty hlubší vrstvy s vyšším albedem (obrázek 5). Vysoká hustota kráterů a velmi tmavý povrch jsou také zaznamenány na části povrchu měsíce Ganymedes. Nicméně se zde vyskytují i světlejší oblasti, paralelní hřbety a žlaby, jejichž vznik je připisován rozpínání části povrchu a jeho postupné obměně. Europa má mladý a světlý povrch s malým množstvím kráterů a s mnoha zlomy, hřbety, pásy rozpínání či porušenými oblastmi (známé oblasti chaosu). Jupiteru nejbližší měsíc Io, nepatřící do skupiny ledových měsíců, je znám svou současnou aktivitou a neaktivnějším vulkanismem ve sluneční soustavě.

Mezi aktivní měsíce Saturnu patří Enceladus, který má oblast severní polokoule pokrytu krátery, nicméně jeho jižní část je tvořena zlomy, má nejvyšší albedo ve sluneční soustavě a je spojena s kryovulkanickou aktivitou. Měsíc Titan je specifický díky přítomnosti atmosféry. Vyskytují se zde všechny hlavní geologické procesy – dopadové krátery, eroze, tektonismus a vulkanismus. Na Titanu lze tedy pozorovat řeky, jezera, moře, duny a přítomnost větru, deště a metanového cyklu podobného vodnímu cyklu na Zemi.

## 2.7. Aktivita a gejzíry

Důležitým ukazatelem energetické bilance a přítomnosti vody je pozorovaná minulá či do současnosti probíhající aktivita měsíců. Mezi nejvíce aktivní tělesa ve sluneční soustavě patří překvapivě měsíc Enceladus s poloměrem pouhých 250 km (obrázek 6). Zlomy v oblasti jižního pólu jsou zdrojem gejzírů, které jsou spojeny se vznikem Saturnova prstence E. Opakovaným pozorováním sondou Cassini bylo lokalizováno přibližně sto gejzírů včetně úhlu, pod kterým tryskají [29]. Díky sondě Cassini bylo možné ana-

lyzovat složení gejízírů hmotnostním spektrografem. Kromě ledových částic byla zaznamenána i přítomnost jednoduchých uhlovodíků a organických sloučenin. Tento objev samozřejmě podporuje spekulace o možné existenci života na Enceladu. Dále zde byl oproti očekávání zaznamenán řádově vyšší obsah argonu 40. Ten vzniká rozpadem radioaktivního draslíku 40 a je silně volatilním (rychle unikajícím) prvkem. Jeho vysoký obsah v materiálu gejízíru je tedy připisován kontaktu vody a silikátů obsahujících draslík 40 [39]. Díky analýze velikosti a složení částic prstence E bylo také možné určit podmínky kontaktu vody a silikátů. Ten musí probíhat za poměrně vysoké teploty kolem 90 °C, pH musí být 8,5–10,5, což odpovídá salinitě menší než 4 procenta [10].

I v případě měsíce Europa s velmi mladým povrchem se kvůli přítomnosti velké množství zlomů spekulovalo, zda i zde mohou existovat podobné studené gejízíry. První a zatím jediný známý záznam gejízíru na Europě byl zachycen pomocí Hubbleova vesmírného teleskopu a charakteristických vyzařovacích čar vody [32].

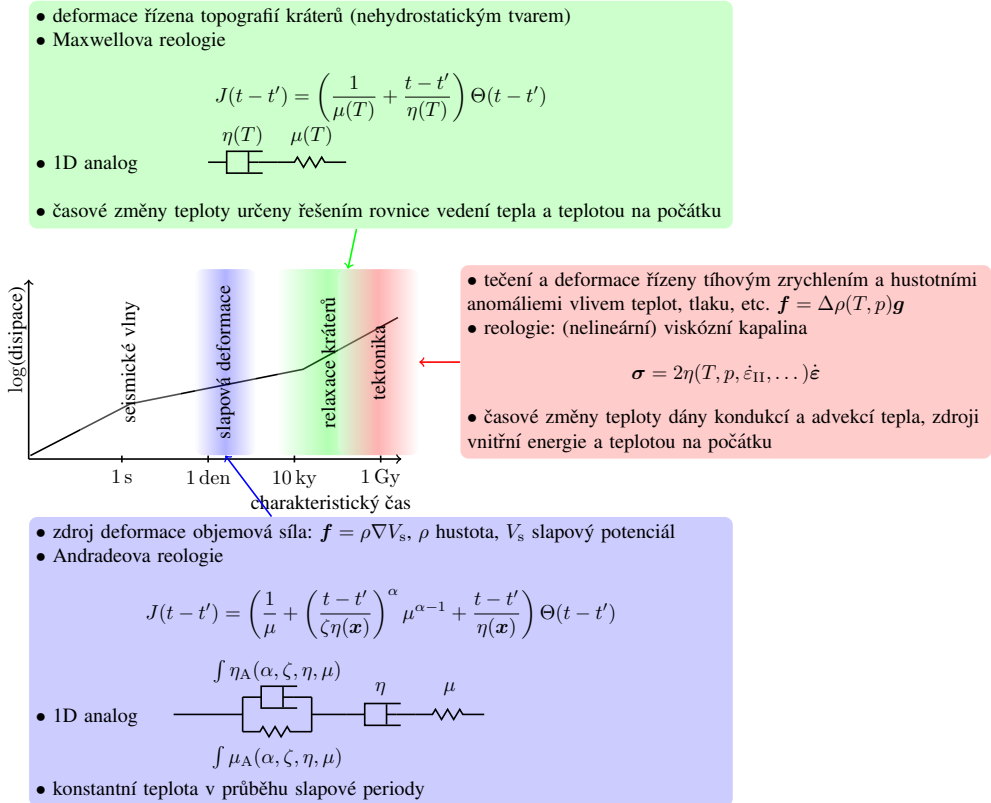
### 3. Metody

V této části se zaměříme na používané geofyzikální metody numerického modelování a metody pro interpretaci gravitačního pole.

#### 3.1. Inverze gravitačních dat

Klíčovou informací o tělesech sluneční soustavy nese gravitačního pole. Pokud je známo rozložení hustot a tvar tělesa, je jednoduché řešit tzv. přímou úlohu, tj. vypočítat gravitační potenciál a koeficienty gravitačního rozvoje pomocí rovnice (1). Pokud naopak ze známého gravitačního pole chceme určit vnitřní složení, tj. řešit tzv. obrácenou úlohu, pak je úloha nejednoznačná. Nalezení řešení může být časově náročnější, typicky se musí řešit mnoho přímých úloh k nalezení nejlepšího řešení nebo řešit inverze přeúrceného systému. Pro určení rozložení hustot je také nutné zvolit parametrizaci studovaného tělesa. Pro diferencovaná tělesa může být nejjednodušší vhodnou parametrizací například počet vrstev, jejich průměrná tloušťka a hustota. Pro identifikaci nejjúspěšnějšího řešení či skupiny nejjúspěšnějších řešení je dále nutné definovat shodu mezi pozorovanými daty (koeficienty gravitačního potenciálu) a predikovanými daty. Obvyklým kritériem je pak minimalizace kvadrátu rozdílu mezi předpovězenými a pozorovanými koeficienty gravitačního rozvoje.

Pokud tvar tělesa není hydrostatický, bere se v úvahu některý z kompenzačních mechanismů, který umožní vysvětlit stabilitu pozorované topografie. Pro ledové měsíce se uvažují dva možné mechanismy. Jedním z nich je izostatická kompenzace (Airyho izostatická kompenzace), kde jakýkoliv nadbytek hmot na povrchu musí být vyvážen úbytkem hmot na spodním rozhraní tak, aby byl tlak v kompenzační hladině (to je pod spodním rozhraním) konstantní. Dalším možným mechanismem je elastická kompenzace. Pro ni se předpokládá, že chování části slupky lze popsat elasticky. Přítomnost nadbytku hmot způsobí ohyb této vrstvy a díky elastickým silám je topografie kompenzována. V případě izostatické kompenzace dostáváme podmínku na tvar vnitřního rozhraní mezi oceánem a ledovou slupkou. V druhém případě pak můžeme určit tloušťku elastické vrstvy.



Obr. 7. Schéma disipace, charakteristických procesů a přehled používaných aproximací v závislosti na časové škále budících sil;  $\eta$  je viskozita,  $\mu$  modul torze,  $\alpha$  a  $\zeta$  jsou parametry Andradeovy reologie,  $\Theta$  je Heavisideova funkce.

### 3.2. Numerické modelování

K interpretaci pozorovaných tektonických útvarů a tepelného toku, předpovědi průběhu vnitřní teploty a vnitřního vývoje jsou často používány metody numerického modelování řešící deformaci tělesa (kontinua) ze zákonů zachování hmotnosti, hybnosti, momentu hybnosti a energie (přenosu tepla) v různých aproximacích.

V ledových měsících probíhá řada procesů na rozličných časových škálách. Materiály se však chovají odlišně v závislosti na frekvenci budící síly (obrázek 7). Uplatňují se proto různé materiálové vztahy tak, aby se vystihly hlavní rysy chování na dané škále a přitom bylo nalezeno řešení v přijatelném čase. V lineární teorii lze vztah mezi deviatorickou částí Cauchyova tenzoru napětí  $\boldsymbol{\sigma}$  a tenzorem deformace  $\boldsymbol{\epsilon} = 1/2 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$  (kde  $\mathbf{u}$  je vektor posunutí) psát pomocí compliance  $J$ :

$$2\boldsymbol{\epsilon} = \int_{-\infty}^t J(t - t') \dot{\boldsymbol{\sigma}}(t') dt'. \quad (2)$$

V případě slapů jsou deformace a napětí řízeny slapovými (objemovými) silami působícími na těleso. Pro slapové periody (dny až desítky dnů) experimenty ukazují, že vhodným popisem vztahu mezi napětím a deformací je tzv. Andradeova reologie [3]. Tuto reologii si lze představit pomocí 1D analogu jako sériové zapojení viskózní a elastické deformace s dodatečným spojitým rozložením relaxačních časů (viz podobnost s RLC obvody). Slapová deformace ledových těles je navíc na výrazně kratších časových škálách než přenos tepla, proto se obvykle teplota a teplotně závislé parametry považují v řádu několika slapových period za konstantní. Rovnice přenosu tepla (energie) se tedy neřeší. Z hlediska dlouhodobého vývoje mohou však slapy výrazně přispívat i k celkové energetické bilanci díky disipaci energie.

Na škálách desetitisíců let probíhá relaxace vzniklých útvarů (například kráterů), kdy jsou deformace tělesa a tečení vyvolány nehydrostatickou topografií. Vztah mezi napětím a deformací lze uspokojivě popsat pomocí Maxwellovy reologie (viskózní a elastické deformace v sériovém zapojení). Viskozita charakterizující tečení se díky závislosti na teplotě mění v průběhu relaxace útvaru. Průběh teploty v oblastech u povrchu se určuje pomocí rovnice vedení tepla. Díky znalosti stáří, přibližného tvaru kráterů v době vzniku a při porovnání se současnou topografií se pak může odhadovat teplota a tepelný tok v průběhu historie (například [7], [40]).

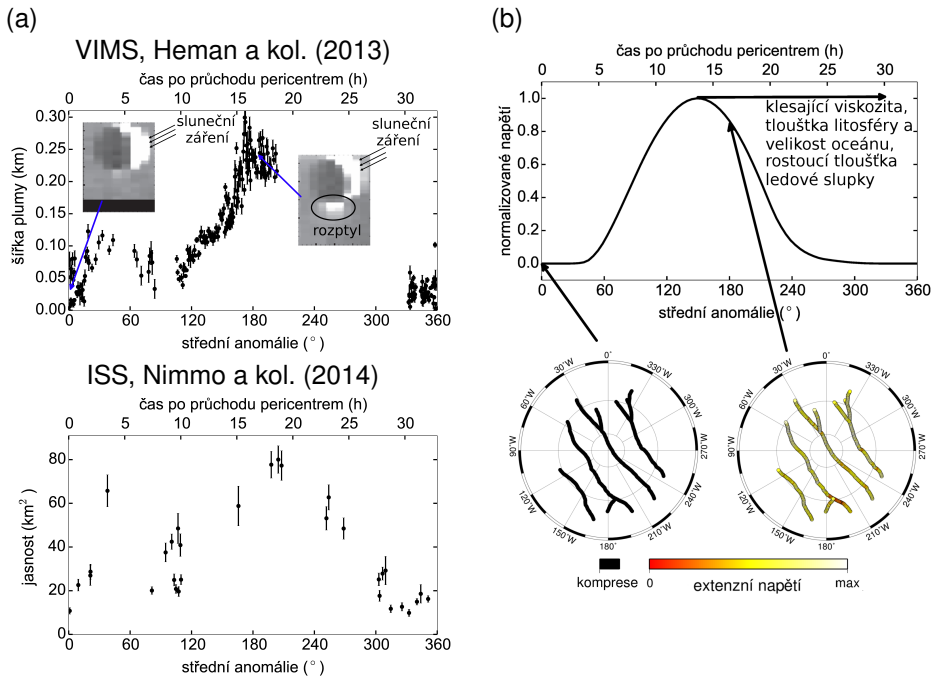
Dlouhodobý teplotní vývoj je řízen zejména schopností ledové slupky odvádět energii z tělesa. V tomto případě jsou rozložení rychlostí a rychlosti deformace v pevných částech těles dány hustotními anomáliemi v plášti a vlastnostmi ledu. Materiál ledové slupky se chová jako viskózní kapalina. Z hlediska přenosu tepla je důležitá nejen konduktance, ale i advekce. Klíčem k celkové tepelné bilanci jsou teplotní zdroje a teplota na počátku vývoje. Teplota na počátku vývoje je dána zejména dostupnou akreční a případně diferenační energií. Významně mohou přispívat i energie z rozpadu radioaktivních nuklidů s krátkým poločasem rozpadu či dopady těles. Z dlouhodobého hlediska hraje důležitou úlohu slapová disipace (v silikátovém jádře i ledové slupce) a v silikátových částech i energie z rozpadu radioaktivních nuklidů s dlouhým poločasem rozpadu. V případě měsíce Triton, s velmi specifickými vlastnostmi oběžné dráhy i rotačního vektoru, je pravděpodobně nezanedbatelná i disipace v oceánu [13].

## 4. Interpretace

### 4.1. Enceladus

Enceladus patří mezi nejzáhadnější tělesa sluneční soustavy. Je velmi malý a měl by tedy být spíše chladný a nečinný. Proto bylo překvapením, že je jedním z nejaktivnějších těles s velmi působivou a stále probíhající kryovulkanickou aktivitou (gejzíry) a s přítomností podpovrchového oceánu. V průběhu historie tedy musel být přítomen zdroj energie, který dokázal dlouhodobě udržet vodu v kapalném stavu nebo byl tak silný, že dokázal zvýšit teplotu na hranici tání ledu. V této části se zaměříme na určení struktury a udržitelnost vodního oceánu. Nastíníme posun ve výzkumu Enceladu, který nastal v roce 2016 díky měření skutečné librace.

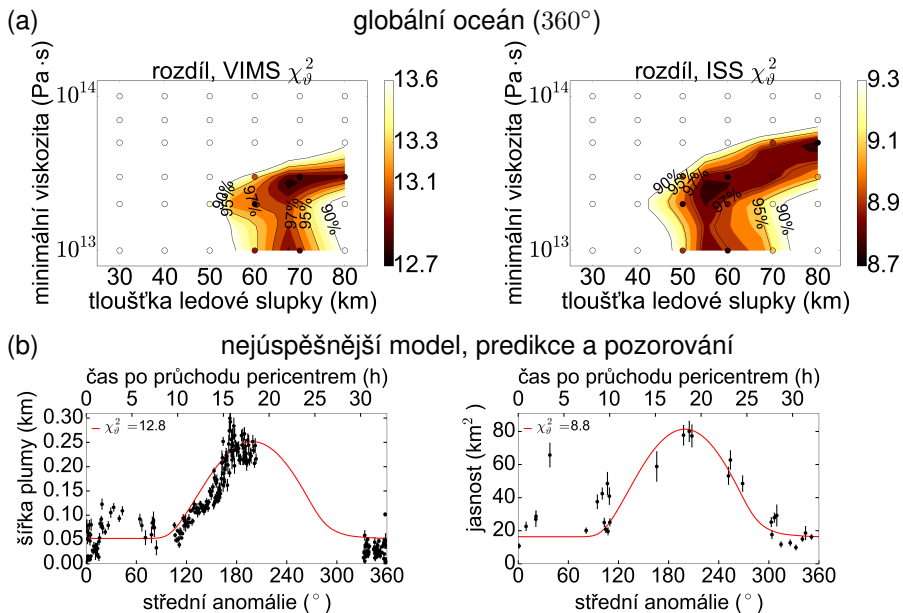
**Gravitační pole a struktura.** Gravitační pole je jedním ze základních zdrojů informací o vnitřní struktuře Enceladu. Za předpokladu znalosti hustoty ledu a vody se známou salinitou hledáme poloměr a hustotu jádra, u kterého předpokládáme, že je v hydrostatické rovnováze. Dále hledáme hloubku vodního oceánu a tloušťku



Obr. 8. Schéma aktivity gejzírů, (a) nahoře: pozorovaná šířka plumy (souborů všech aktivních gejzírů, VIMS) jako funkce střední anomálie ( $0^\circ$  – pericentrum,  $180^\circ$  – apocentrum), malá aktivita bez rozptylu (vlevo) a výrazná aktivita s rozptylem slunečního záření na částicích gejzírů (vpravo); dole: jasnost gejzírů (ISS), (b) teoretická předpověď aktivity v závislosti na střední anomálii. Data převzata z [8], [27], [26], teoretická předpověď z [1]

ledové slupky. Jako vstupní data máme k dispozici topografii a gravitační pole. Z dat je zřejmé, že tvar tělesa neodpovídá hydrostatickému tvaru. Z předpokladu izostatické kompenzace můžeme určit topografii spodního rozhraní ledové slupky. Minimalizací rozdílu mezi predikovanými a pozorovanými koeficienty gravitačního rozvoje pak dokážeme určit i tloušťku ledové slupky, poloměr a hustotu jádra. Výsledky tohoto modelu ukazují, že celková tloušťka oceánu a ledové slupky je přibližně 60 km. Tloušťka ledové slupky se mění mezi 25 a 60 km. Hloubka oceánu pak může být nulová nebo téměř nulová v některých oblastech na rovníku a dosahovat až 35 km pod jižním pólem [15], [24], [5].

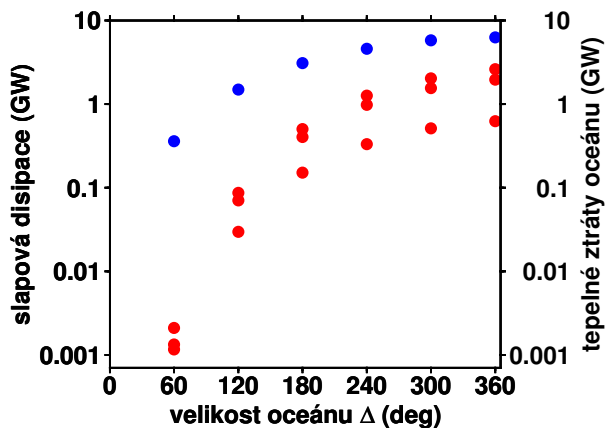
**Slapová deformace.** Deformace vyvolaná působením slapů je díky závislosti na viskozitě a elastických modulech citlivá na vnitřní složení Enceladu (viz kompliance na obrázku 7). Znalost slapové deformace by tedy mohla být metodou k určení jeho vnitřní struktury. Velikost slapové deformace však není k dispozici. Nicméně se již od počátku měření aktivity gejzírů spekulovalo, že je jejich činnost ovlivněna režimem napětí podél zlomů vlivem působení slapové síly. Pokud se zlomy na jižním pólu zavírají (jsou v kompresi), je činnost gejzírů omezená. Pokud se naopak zlomy otvírají (jsou v extenzi), jsou gejzíry neaktivnější [11].



Obr. 9. Příklad výsledků inverze, (a) shoda (rozdíl, minimální hodnota značí nejlepší shodu) predikovaných dat s pozorováními a percentil úspěšnosti modelů. Řez studovaným parametrickým prostorem pro tloušťku ledové slupky a minimální viskozitu pro tloušťku litosféry 2,5 km a globální oceán (oceán plně oddělující ledovou slupku a silikátové jádro) shoda pro VIMS a ISS data, (b) porovnání teoretické křivky nejúspěšnějšího modelu a dat, převzato z [1]

Modulace zvýšeného období aktivity slapy podél oběžné dráhy byla potvrzena nedávným měřením jasnosti gejzírů pomocí VIMS (záznam ve viditelném a infračerveném spektru, obrázek 8a nahoře) [8] a ISS (záznam ve viditelném spektru s vysokým rozlišením, obrázek 8a dole) [27]. Se zvyšujícím se otevíráním zlomů (aktivitou gejzírů) roste počet částic v okolí jižního pólu a zvyšuje se tím i jasnost nad oblastí jižního pólu zaznamenávaná sondou Cassini. Obě měření potvrdila, že nejvyšší činnost gejzírů (jasnost) je pozorována po průchodu apocentrem (zlomy jsou v extenzi, střední anomálie 180°; viz obrázek 8a nahoře, vložený panel vpravo) a nejnižší naopak kolem pericentra (zlomy jsou v kompresi, střední anomálie 0°; viz obrázek 8a nahoře, vložený panel vlevo).

Z numerického modelování slapové deformace a pomocí vyhodnocení normálového napětí podél zlomů dokážeme určit, kdy jsou zlomy v extenzi/kompresi. Můžeme tedy vypočítat teoretickou křivku aktivity gejzírů (obrázek 8b), která se zvyšuje s rostoucím extenzním napětím. Maximum aktivity této teoretické křivky se pak pohybuje v závislosti na vnitřním složení. Teoretická aktivita se opožďuje v čase například se snižující se viskozitou a rostoucí tloušťkou ledové slupky. Úkolem je tedy porovnat teoretickou křivku pro různé vnitřní struktury a měřené jasnosti. Cílem je nalézt takovou vnitřní strukturu, která minimalizuje rozdíl mezi naměřenými a teoretickými křivkami jasnosti. Ukázka výsledků shody modelu a pozorování a porovnání nejúspěšnějších modelů s daty je na obrázku 9. Na tomto obrázku je také demonstrována nejedno-

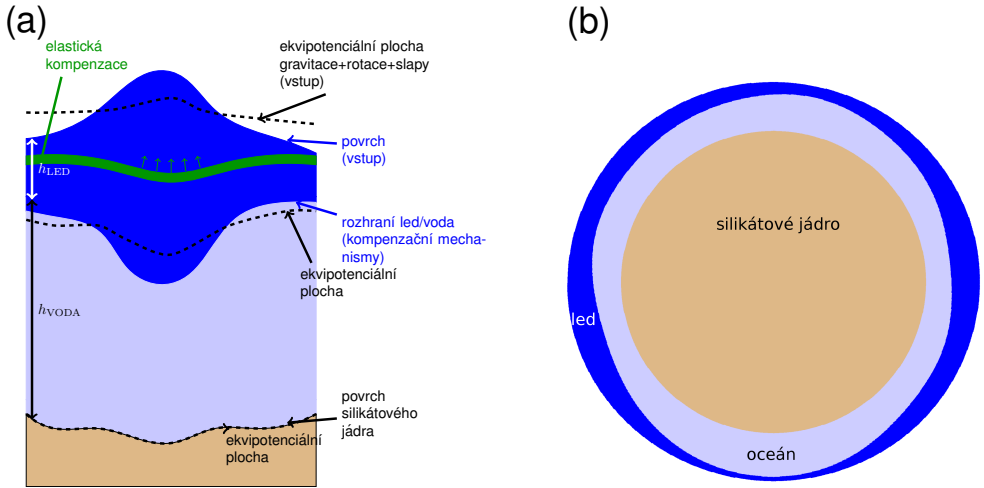


Obr. 10. Energetická bilance – slapové zahřívání pro různé reologie (kruhy) a tepelné ztráty oceánu (čtverce), převzato z [2]

značnost úlohy, stejnou shodu lze získat pro různé modely vnitřní struktury. Výsledky ukazují, že nejlepší shoda (5 % nejuspěšnějších modelů) pro obě sady dat (VIMS a ISS) je zároveň pro modely s nízkou viskozitou a malou tloušťkou litosféry (do 5 km). V případě globálního oceánu (oceán, který plně odděluje silikátové jádro a ledovou slupku) jsou možné tloušťky ledové slupky větší než 60 km, pro regionální oceán patří mezi nejuspěšnější i modely s tloušťkou přibližně 30 km.

**Udržitelnost vodního oceánu.** Se slapovou deformací a slapovým zahříváním se pojí další z důležitých otázek, a to udržitelnost oceánu. Sonda Cassini zaznamenala zlomy s vysokou teplotou spojené s výše zmíněnou kryovulkanickou aktivitou a velké teplotní ztráty v oblasti jižního pólu (až 20 GW) [9]. Otázkou pro tak malé těleso jako Enceladus je vysvětlení této výrazné aktivity a dlouhodobá udržitelnost oceánu. Možným zdrojem je energie z rozpadu radioaktivních elementů v silikátovém jádře. Odhady však ukazují, že tepelná produkce je řádově nižší než pozorovaná [33]. Dalším možným zdrojem je vzhledem k nenulové výstřednosti dráhy i disipace vlivem slapů. K zahřívání může docházet lokálně díky tření podél slapově zatěžovaných zlomů či v celé ledové slupce díky její periodické deformaci. Obrázek 10 ukazuje porovnání mezi tepelnými ztrátami (viz obrázek 7, tektonika) a slapovou produkcí v ledové slupce (viz obrázek 7, slapová deformace) pro různé šířky oceánu [2]. Porovnáním tepelných ztrát oceánu a energie dostupné ze slapů je zřejmé, že ani slapová disipace v ledové slupce nedokáže plně vysvětlit energetické ztráty a znamenala by velmi rychlou krystalizaci oceánu. Kvůli doposud chybějícímu vysvětlení dostatečně velkého zdroje energie se předpokládá, že se Enceladus nachází v nerovnovážném stavu. Disipovaná energie může tedy být uvolňována epizodicky, kdy se střídají období velké (tak jak je v současnosti pozorováno) a malé aktivity [28]. Druhý scénář vychází z předpokladu, že výstřednost oběžné dráhy a slapová disipace se mění s časem [2].

**Důsledky měření librace.** Jedním z nejnovějších poznatků, který výrazně mění pohled na Enceladus, je měření skutečné librace. Naměřená hodnota librace je konzistentní s globálním oceánem a tloušťkou ledové vrstvy pohybující se mezi 20 a 25 km [37]



Obr. 11. Inverze gravitačních dat, (a) schéma, data a předpoklady, (b) výsledky inverze, vertikální řez strukturou jdoucí nulým a stoosmdesátým měsícopisným poledníkem, model převzat z [5]

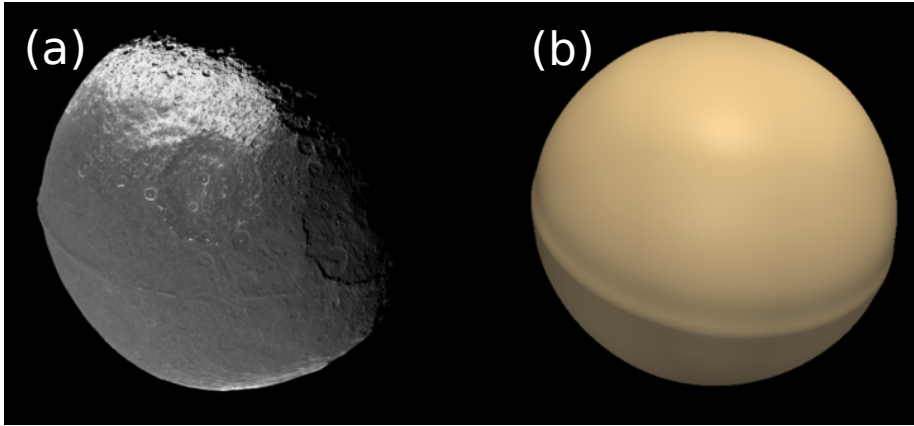
a je tedy v rozporu s dosavadními výpočty tloušťky určenými pomocí gravitačních dat či z pozorování aktivity gejzírů.

Abychom našli shodu mezi gravitačními daty a měřením librace, je nutné opustit klasický předpoklad izostaticky kompenzované topografie a vzít v úvahu elastickou kompenzaci topografie (obrázek 11a). Dalším parametrem, který hledáme při inverzi gravitačních dat, je tedy procento topografie kompenzované elasticky. Jako nutnou podmínku úspěšnosti modelu připojíme omezení na tloušťku slupky konzistentní s měřením librace [5]. Po zahrnutí elastické kompenzace se velikost kompenzační izostatické hloubky, to je vzdálenost mezi topografií a ekvipotenciální plochou na rozhraní voda-led, zmenší. Nejúspěšnější modely s nejvyšší shodou jsou pak ty, kde je 20 % topografie kompenzováno elasticky. Díky podmínce kladené libračními daty se celkový obraz vnitřní struktury změní. Tloušťka vrstvy vnitřního oceánu plus ledové slupky je stále přibližně stejná, nicméně průměrná tloušťka ledové slupky dramaticky poklesne v souladu se zadanými podmínkami. Lokálně mocnost ledové slupky může dosahovat pouze několika kilometrů pod jižním pólem a více než 30 km v oblasti rovníku. Podobně hloubka oceánu se dramaticky zvýší. Tento model však ještě zvyšuje problematickost dlouhodobé stability oceánu. Vlivem přítomnosti velmi tenké ledové slupky jsou energetické ztráty výraznější a měřené ztráty v okolí jižního pólu tvoří jen zlomek celkových ztrát, které slapová disipace v ledové slupce nemůže kompenzovat, a je tedy dále nutné hledat zdroje energie.

Podobně se hledá i mechanismus, který by vysvětloval rozpor mezi strukturou určenou z inverze aktivity gejzírů a libračními daty. Pozornost je věnována modelování slapové deformace se zahrnutím zlomů, jejichž implementace je z numerického hlediska velmi náročná [34], či dynamice vodního sloupce ve zlomu a udržitelnosti zlomů [19].

Jak již bylo zmíněno, vlivem malé tloušťky ledové slupky dochází k obřím energetickým ztrátám i za předpokladu málo efektivního přenosu tepla vedením. Z inverze





Obr. 12. Iapetus, (a) pozorovaný tvar [26], (b) tvar určený modelem [22]

gravitačních dat navíc víme, že hustota silikátového jádra Enceladu je velmi malá ( $2\,400\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), nižší než hustota plně hydratovaných silikátů. Jádro je tedy pravděpodobně porézní a má nižší viskozitu i modul torze, než se doposud předpokládalo, a je tedy více deformovatelné. Proto se studium slapů a slapové disipace soustředí i na jádro [30]. Vysoká disipace v jádře by navíc byla v souladu s vysokou teplotou na rozhraní silikátového jádra a vodního oceánu nutnou k tvorbě zaznamenaných silikátových částic v prstenci E [10].

## 4.2. Iapetus

Iapetus je středně velkým měsícem Saturnu. Jeho střední poloměr je 734 km, je tedy výrazně větší než měsíc Enceladus. Je však neaktivní, nediferencovaný, se starým povrchem pokrytým krátery. V průběhu jeho historie nebyl přítomen dostatečný zdroj energie a vnitřní teplota nepřesáhla teplotu tání ledu. I přesto má tento měsíc několik velmi zajímavých charakteristik. Je zachycen v 1:1 spin-orbitální rezonanci, má velké zploštění (34 km) a úzký 15 km vysoký rovníkový hřbet (obrázek 11a). Výrazné zploštění odpovídá hydrostatickému tvaru pro rotační periodu přibližně 16 hodin [36]. Iapetus tedy musel v minulosti rotovat rychleji. Záchyt do synchronní rotace s periodou 79 dní je vzhledem k velké vzdálenosti od Saturnu a závislosti času zachycení na šesté mocnině vzdálenosti [12] velmi obtížný. Nitro měsíce by muselo umožnit extrémní disipaci a být tedy velmi měkké, aby došlo k zachycení do synchronní rotace během existence sluneční soustavy.

Modely vzniku zploštění i rovníkového hřbetu se dělí na dva hlavní, endogenní (vnitřní dynamika) a exogenní (typicky srážka s tělesem). Endogenní modely zpomalení rotace pracují s energií vzniklou rozpadem radioaktivních prvků s krátkým poločasem rozpadu, důležitých na počátku vývoje. Přítomnost těchto prvků vedla ke zvýšení teploty možná až k hranici tání a tedy změknutí a ke zvýšení disipace [4], [31], [22]. Exogenní modely vysvětlují zpomalení rotace vlivem interakce s oběžnicí Iapetu, která vyústila v obří impakt [23], [6].

Také vznik rovníkového hřbetu je u endogenního modelu spojován se změnou tvaru při zpomalení rotace [4], [31] a v exogenním případě dopadem malých těles, a to buď původních [16], nebo vzniklých při obřím impaktu [23], [6].

Žádný z popsaných modelů však nedovedl plně reprodukovat pozorované charakteristiky numerickými experimenty. Studie [22] používající numerické simulace podobně jako předchozí přístupy ukázala, že zpomalení rotace je možné jen pro velmi měkký materiál, který však dokáže jen obtížně zachovat výrazné zploštění po geologicky dlouhou dobu. Pozorovaný tvar i záchyt do synchronní rezonance je však možno vysvětlit kombinovaným původem. V příslušném modelu se řeší vnitřní vývoj společně s tvarem tělesa (je zde tedy nutné numericky pracovat s volným povrchem) a vývojem rotační doby za předpokladu, že dojde k náhlému částečnému zvýšení rotační periody v důsledku impaktu.

Předpokládejme tedy, že po svém vzniku Iapetus rotoval s periodou menší než 16 hodin. Vlivem vysoké teploty po formaci a radioaktivního zahřívání bylo jeho nitro měkké, jen u povrchu kvůli nízké energii dopadající ze Slunce byla nízká teplota. Díky nízké viskozitě měl Iapetus hydrostatický tvar s výrazným zploštěním. Vlivem přenosu tepla (kondukcí nebo i advekcí v závislosti na počáteční teplotě a viskozitě) začal chladnout a tuhá studená litosféra u povrchu zvyšovala svou mocnost. V důsledku náhlé změny rotační periody se změnil i rotační potenciál a teoretický hydrostatický tvar tělesa, který je přirozený pro systém s větší rotační periodou a který má zároveň výrazně nižší zploštění a tedy i menší povrch. Tvar měsíce se začal přizpůsobovat novým působícím silám, snažil se zmenšit svůj povrch. Ve studené litosféře u povrchu proto výrazně vzrostlo napětí, díky nelineární reologii došlo k efektivnímu změknutí studené litosféry a rychlé formaci hřbetu z přebytečného materiálu povrchu. Po snížení napětí litosféra opět ztuhla a Iapetus postupně ztrácel energii vedením či prouděním. Díky disipaci se postupně dále zvyšovala jeho rotační perioda. Pokud byla viskozita v době po formaci hřbetu dostatečně nízká, dokázala tuhá litosféra udržet tvar po několik miliard let. Záchyt do rezonance a výsledný tvar, který by měl popisovat pozorované zploštění a tvorbu hřbetu, závisí přirozeně na počáteční teplotě, velikosti ledového zrna (malá velikost ledového zrna a vysoká teplota značí nízkou viskozitu) a počáteční rotaci. Příklad úspěšného modelu v porovnání s pozorovaným tvarem je na obrázku 12, kdy je pro počáteční rotační periodu 6 hodin nutná maximální vnitřní teplota 230 K a velikost zrna 1 mm, aby byl měsíc na konci simulace zachycen v 1:1 spin-orbitální rezonanci, měl požadované zploštění a vytvořil se rovníkový hřbet.

## 5. Budoucí mise

Objevy, informace a měřená data o vzdálených tělesech sluneční soustavy jsou vázány na kosmické sondy. Důležité jsou zejména mise, které dlouhodobě pozorují ledová tělesa a provádějí opakovaná měření. Mohou tak zaznamenat časové změny, zmenšit statistické chyby pozorovaných veličin či částečně měnit průběh mise a zaměřit se na průzkum nově objevených útvarů. Mezi tyto mise patří sondy Galileo a Cassini, které se staly prvními umělými oběžnicemi Jupiteru a Saturnu. Sonda Cassini má navíc k dispozici záznam pomocí pevného záznamového média (solid-state recorder), a může tak získat velké objemy dat (sonda Galileo měla k dispozici záznam na magnetofonové pásky). S rozvojem pozorování a se zvětšujícím se objemem dat se zároveň vyvíjejí nové

metody, které pomáhají k interpretaci nově získaných dat (například dvoufázové tečení s interakcí vody a ledu [17] či realistický popis zlomů [34]). Numerické modely mohou navíc pomoci před začátkem misí vybrat místa, na která by bylo vhodné soustředit pozornost.

V roce 2016 také dorazila do systému Jupiteru sonda Juno zaměřená primárně na studium Jupiteru, jeho gravitačního a magnetického pole, struktury, atmosféry a formace. Sonda může také přispět k řešení otázek zdrojů vody na měsících Jupitera. V současnosti se připravují dvě mise do systému Jupiteru zaměřené na výzkum ledových měsíců a detekci vody se zvláštním důrazem na astrobiologický potenciál měsíců. Mise JUICE (JUperiter ICy Moon Explorer, Evropská vesmírná agentura ESA) bude zaměřena na průzkum měsíce Ganymedes (stane se jeho prvním umělým satelitem) a provede několik průletů kolem Europy a Callista. Další misí je Europa Multiple-Flyby Mission (dříve známá také jako Europa Clipper Mission) připravovaná Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA) určená k průzkumu Europy. Obě tyto sondy mají být vypuštěny ve dvacátých letech s příletem na počátku třicátých let 21. století.

**Poděkování.** Autorka děkuje doc. Antonínu Slavíkovi a anonymnímu recenzentovi za podnětné návrhy a připomínky k předchozí verzi článku. Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury České republiky (projekt číslo 14-04145S) a České fyzikální společnosti JČMF.

#### L i t e r a t u r a

- [1] BĚHOUNKOVÁ, M., TOBIE, G., ČADEK, O., CHOBLET, G., PORCO, C., NIMMO, F.: *Timing of water plume eruptions on Enceladus explained by interior viscosity structure*. Nature Geosci. 8 (2015), 601–604.
- [2] BĚHOUNKOVÁ, M., TOBIE, G., CHOBLET, G., ČADEK, O.: *Tidally-induced melting events as the origin of south-pole activity on Enceladus*. Icarus 219 (2012), 655–664.
- [3] CASTILLO-ROGEZ, J., EFROIMSKY, M., LAINEY, V.: *The tidal history of Iapetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model*. J. Geophys. Res. 116 (2011), E09008.
- [4] CASTILLO-ROGEZ, J., MATSON, D., SOTIN, C., JOHNSON, T., LUNINE, J., THOMAS, P. C.: *Iapetus' geophysics: Rotation rate, shape, and equatorial ridge*. Icarus 190 (2007), 179–202.
- [5] ČADEK, O., TOBIE, G., VAN HOOLST, T., MASSE, M., CHOBLET, G., LEFEVRE, A., MITRI, G., BALAND, R.-M., BĚHOUNKOVÁ, M., BOURGEOIS, O., TRINH, A.: *Enceladus's internal ocean and ice shell constrained from Cassini gravity, shape, and libration data*. Geophys. Res. Lett. 46 (2016), 5653–5660.
- [6] DOMBARD, A. J., CHENG, A. F., MCKINNON, W. B., KAY, J. P.: *Delayed formation of the equatorial ridge on Iapetus from a subsatellite created in a giant impact*. J. Geophys. Res. 117 (2012), E03002.
- [7] DOMBARD, A. J., MCKINNON, W. B.: *Elastoviscoplastic relaxation of impact crater topography with application to Ganymede and Callisto*. J. Geophys. Res. 111 (2006), E01001.
- [8] HEDMAN, M. M., GOSMEYER, C. M., NICHOLSON, P. D., SOTIN, C., BROWN, R. H., CLARK, R. N., BAINES, K. H., BURATTI, B. J., SHOWALTER, M. R.: *An observed correlation between plume activity and tidal stresses on Enceladus*. Nature 500 (2013), 182–184.

- [9] HOWETT, C. J. A., SPENCER, J. R., PEARL, J., SEGURA, M.: *High heat flow from Enceladus' south polar region measured using 10–600 cm<sup>-1</sup> Cassini/CIRS data*. J. Geophys. Res. 116 (2011), 3003.
- [10] HSU, H.-W., POSTBERG, F., SEKINE, Y., SHIBUYA, T., KEMPF, S., HORÁNYI, M., JUHÁSZ, A., ALTOBELLI, N., SUZUKI, K., MASAKI, Y., KUWATANI, T., TACHIBANA, S., SIRONO, S.-I., MORAGAS-KLOSTERMEYER, G., SRAMA, R.: *Ongoing hydrothermal activities within Enceladus*. Nature 519 (2015), 207–210.
- [11] HURFORD, T. A., HELFENSTEIN, P., HOPPA, G. V., GREENBERG, R., BILLS, B. G.: *Eruptions arising from tidally controlled periodic openings of rifts on Enceladus*. Nature 447 (2007), 292–294.
- [12] HUSSMANN, H., CHOBLET, G., LAINEY, V., MATSON, D. L., SOTIN, C., TOBIE, G., VAN HOOLST, T.: *Implications of rotation, orbital states, energy sources, and heat transport for internal processes in icy satellites*. Space Sci. Rev. 153 (2010), 317–348.
- [13] CHEN, E. M. M., NIMMO, F., GLATZMAIER, G. A.: *Tidal heating in icy satellite oceans*. Icarus 229 (2014), 11–30.
- [14] IESS, L., RAPPAPORT, N. J., JACOBSON, R. A., RACIOPPA, P., STEVENSON, D. J., TORTORA, P., ARMSTRONG, J. W., ASMAR, S. W.: *Gravity field, shape, and moment of inertia of Titan*. Science 327 (2010), 1367.
- [15] IESS, L., STEVENSON, D. J., PARISI, M., HEMINGWAY, D., JACOBSON, R. A., LUNINE, J. I., NIMMO, F., ARMSTRONG, J. W., ASMAR, S. W., DUCCI, M., TORTORA, P.: *The gravity field and interior structure of Enceladus*. Science 344 (2014), 78–80.
- [16] IP, W.-H.: *On a ring origin of the equatorial ridge of Iapetus*. Geophys. Res. Lett. 33 (2006), L16203.
- [17] KALOUSOVÁ, K., SOUČEK, O., TOBIE, G., CHOBLET, G., ČADEK, O.: *Ice melting and downward transport of meltwater by two-phase flow in Europa's ice shell*. J. Geophys. Res. 119 (2014), 532–549.
- [18] KHURANA, K., KIVELSON, M., STEVENSON, D., SCHUBERT, G., RUSSEL, C., WALKER, R., POLANSKEY, C.: *Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto*. Nature 395 (1998), 777–780.
- [19] KITE, E. S., RUBIN, A. M.: *Sustained eruptions on Enceladus explained by turbulent dissipation in tiger stripes*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 113 (2016), 3972–3975.
- [20] KIVELSON, M. G., KHURANA, K. K., RUSSELL, C. T., WALKER, R. J., WARNECKE, J., CORONITI, F. V., POLANSKEY, C., SOUTHWOOD, D. J., SCHUBERT, G.: *Discovery of Ganymede's magnetic field by the Galileo spacecraft*. Nature 384 (1996), 537–541.
- [21] KIVELSON, M. G., KHURANA, K. K., VOLWERK, M.: *The permanent and inductive magnetic moments of Ganymede*. Icarus 157 (2002), 507–522.
- [22] KUČHTA, M., TOBIE, G., MILJKOVIĆ, K., BĚHOUNKOVÁ, M., SOUČEK, O., CHOBLET, G., ČADEK, O.: *Despinning and shape evolution of Saturn's moon Iapetus triggered by a giant impact*. Icarus 252 (2015), 454–465.
- [23] LEVISON, H. F., WALSH, K. J., BARR, A. C., DONES, L.: *Ridge formation and despinning of Iapetus via an impact-generated satellite*. Icarus 214 (2011), 773–778.
- [24] MCKINNON, W. B.: *Effect of Enceladus's rapid synchronous spin on interpretation of Cassini gravity*. Geophys. Res. Lett. 42 (2015), 2137–2143.
- [25] MURRAY, C., DERMOTT, S.: *Solar system dynamics*. Cambridge University Press, 1999.
- [26] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). <http://www.jpl.nasa.gov>

- [27] NIMMO, F., PORCO, C., MITCHELL, C.: *Tidally modulated eruptions on Enceladus: Cassini ISS observations and models*. *Astronom. J.* 148 (2014), 46.
- [28] O'NEILL, C., NIMMO, F.: *The role of episodic overturn in generating the surface geology and heat flow on Enceladus*. *Nature Geosci.* 3 (2010), 88–91.
- [29] PORCO, C., DININO, D., NIMMO, F.: *How the geysers, tidal stresses, and thermal emission across the south polar terrain of Enceladus are related*. *Astronom. J.* 148 (2014), 45.
- [30] ROBERTS, J. H.: *The fluffy core of Enceladus*. *Icarus* 258 (2015), 54–66.
- [31] ROBUCHON, G., CHOBLET, G., TOBIE, G., ČADEK, O., SOTIN, C., GRASSET, O.: *Coupling of thermal evolution and despinning of early Iapetus*. *Icarus* 207 (2010), 959–971.
- [32] ROTH, L., SAUR, J., RETHERFORD, K. D., STROBEL, D. F., FELDMAN, P. D., MCGRATH, M. A., NIMMO, F.: *Transient water vapor at Europa's south pole*. *Science* 343 (2014), 171–174.
- [33] SCHUBERT, G., ANDERSON, J. D., TRAVIS, B. J., PALGUTA, J.: *Enceladus: Present internal structure and differentiation by early and long-term radiogenic heating*. *Icarus* 188 (2007), 345–355.
- [34] SOUČEK, O., HRON, J., BĚHOUNKOVÁ, M., ČADEK, O.: *Effect of the tiger stripes on the deformation of Saturn's moon Enceladus*. *Geophys. Res. Lett.* (2016), accepted.
- [35] TAJEDDINE, R., RAMBAUX, N., LAINEY, V., CHARNOZ, S., RICHARD, A., RIVOLDINI, A., NOYELLES, B.: *Constraints on Mimas interior from Cassini ISS libration measurements*. *Science* 346 (2014), 322–324.
- [36] THOMAS, P. C., BURNS, J. A., HELFENSTEIN, P., SQUYRES, S., VEVERKA, J., PORCO, C., TURTLE, E. P., MCEWEN, A., DENK, T., GIESE, B., ROATSCH, T., JOHNSON, T. V., JACOBSON, R. A.: *Shapes of the saturnian icy satellites and their significance*. *Icarus*, 190 (2007), 573–584.
- [37] THOMAS, P. C., TAJEDDINE, R., TISCARENO, M. S., BURNS, J. A., JOSEPH, J., LOREDO, T. J., HELFENSTEIN, P., PORCO, C.: *Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean*. *Icarus* 264 (2016), 37–47.
- [38] VARSHALOVICH, D., MOSKALEV, A., KHERSONSKII, V.: *Quantum theory of angular momentum*. World Scientific, Singapore, 1989.
- [39] WAITE, J. H., JR., LEWIS, W. S., MAGEE, B. A., LUNINE, J. I., MCKINNON, W. B., GLEIN, C. R., MOUSIS, O., YOUNG, D. T., BROCKWELL, T., WESTLAKE, J., NGUYEN, M. -J., TEOLIS, B. D., NIEMANN, H. B., MCNUTT, R. L., PERRY, M., IP, W. -H.: *Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and <sup>40</sup>Ar in the plume*. *Nature* 460 (2009), 487–490.
- [40] WHITE, O. L., SCHENK, P. M., DOMBARD, A. J.: *Impact basin relaxation on Rhea and Iapetus and relation to past heat flow*. *Icarus* 223 (2013), 699–709.
- [41] ZHANG, K., NIMMO, F.: *Recent orbital evolution and the internal structures of Enceladus and Dione*. *Icarus* 204 (2009), 597–609.