Enceladus tajemství zbavený

Rozhovor s prof. Ondřejem Čadkem

Enceladus – neobyčejné jméno pro vskutku neobyčejný měsíc planety Saturn. Až do 80. let 20. století, kdy okolo Enceladu proletěla dvojice amerických planetárních sond Voyager, bylo o vzhledu tohoto výjimečného měsíce známo skutečně jen velice málo. Nyní již víme více, ale ještě více otázek postupem doby vyvstává. Pozoruhodné nebeské těleso mající v „pase" téměř 500 kilometrů je z velké většiny svého povrchu pokryto mladým čistým ledem. Jeho vysoké albedo zapříčiňuje odraz většiny dopadajícího slunečního světla. Vznik Enceladu zaměstnává vědce již dlouhou dobu. Těleso o podobné velikosti by bylo zcela po právu už dávno považováno za vychladlé a „mrtvé". Ale Enceladus se našim představám úspěšně vymyká – třeba už jenom tím, že vyzařuje do okolního prostoru množství tepla. Ale jakým způsobem tak malé těleso teplo generuje?

A jaká tajemství skrývá sondou *Cassini* objevený, organickými látkami protkaný podpovrchový oceán? Ano, otázek máme mnohem více nežli odpovědí. Dokážeme ale poodhrnout závoj, skrývající Enceladova četná tajemství? O nejnovější informace jsem si dovolila požádat vědeckého pracovníka Katedry geofyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy (MFF UK), člena Učené společnosti ČR a především nadšeného odborníka v geofyzikálních vědách, prof. Ondřeje Čadka.

Enceladus byl pojmenován po obrovi Enkeladovi z řecké mytologie. Toho dle pověsti zahubila bohyně Pallas Athéna tak, že na něj hodila ostrov Sicílii. Jeho jméno tím už jakoby samo o sobě předznamenávalo skrývající se tajemství. Čím konkrétně Enceladus oslnil právě Vás?

Musím se přiznat, že až do roku 2006 jsem o existenci Enceladu neměl tušení. Když se ale na internetu objevily obrázky Enceladu s horkou skvrnou a později s gejzíry, tak jsem pochopil, že máme co do činění s něčím zcela mimořádným, s objektem, který na první pohled porušuje fyzikální zákony, podobně jako Solaris ve známém sci-fi Stanislawa Lema. Čím víc jsme se toho o Enceladu dovídali, tím víc jako by se nám jeho pochopení vzdalovalo. Studiem částic vyvržených gejzíry jsme zjistili, že v nitru měsíce existuje oceán slané vody obsahující i organické sloučeniny, přičemž na dně oceánu existují místa, kde teplota vody přesahuje 90 °C. Z měření librace a gravitačního pole pak vyšlo najevo, že kapalná voda zaujímá zhruba polovinu objemu tělesa. Přitom povrch Enceladu je velmi chladný (zhruba mínus 200 °C) a oceán by v tak malém tělese měl zamrznout do 30 milionů let. Poslední desetiletí jsme se na katedře geofyziky MFF UK Enceladu intenzívně věnovali a to, že dnes zhruba víme, jak měsíc „funguje", je velká úleva. Fyzikální zákony platí v celé Sluneční soustavě stejně, jen je bylo třeba správně použít.

Enceladus byl objeven 28. srpna 1780 sirem Frederickem Williamem Herschelem. Jeho zdánlivá magnituda 11,7 a blízkost k mnohem jasnějšímu Saturnu s prstenci z něj udělala obtížný cíl pro pozorování. Mohl byste nám prosím přiblížit, jak vlastně došlo k tomu, že byl přese všechny těžkosti nakonec přece jen na obloze nalezen?

Herschel objevil Enceladus při prvním použití svého nového dalekohledu, tehdy největšího na světě, který měl průměr 120 cm. Důležité bylo, že věděl, kam se má na obloze dívat, neboť tušil, že kolem Saturnu může existovat více měsíců, než bylo tehdy známo (již dříve byl objeven Titan, Tethys, Dione, Rhea a Iapetus). Herschel měl také štěstí, že se Země v tu dobu nalézala v rovině Saturnových prstenců, takže jejich jas byl nižší a nepřesvětloval jas tohoto měsíce. Jen o tři týdny později pak Herschel objevil sedmý měsíc Saturnu, Mimas.

Podle všech známých předpokladů by měl být Enceladus vlastně „mrtvé" těleso. Ale po objevu jeho horké skvrny na jižním pólu se situace rázem změnila. Čím se tedy stal natolik výjimečným, že byl zařazen i mezi objekty zájmu sondy Cassini?

Enceladus až do roku 2005–6 nikoho příliš nezajímal a pozornost se upírala hlavně k velkému Saturnovu měsíci Titanu, který má hustou atmosféru a na povrchu jezera tvořená uhlovodíky. Důvod nezájmu o Enceladus byl pochopitelný – tak malé těleso může jen těžko mít dostatečné zdroje tepla a tak se předpokládalo, že všechno zajímavé se tam již událo před miliardami let. Teprve objev horké skvrny na jižním pólu a následný objev gejzírů způsobily, že se Enceladus zařadil mezi hlavní objekty zájmu sondy Cassini. Otázkou zůstává, proč právě Enceladus je tak výjimečný, zatímco ostatní středně velké měsíce Saturnu podobné chování nevykazují.

Donedávna se soudilo, že Enceladus vznikl spolu se Saturnem před 4,5 miliardami let. Byly však představeny alternativní teorie, které kladou vznik měsíce do „nedávné" doby. Hovoří se dokonce o tom, že by Enceladus nemusel být starší než 200 milionů let?

Podle původních představ měl Saturnův systém měsíců vzniknout zhruba ve stejné době jako Sluneční soustava z lokálního prachového disku, který byl tvořen částicemi kamenných hornin a ledu. Nedávno se ale objevil alternativní názor, podle kterého některé měsíce vznikly až mnohem později. Tato teorie vychází z přesných astrometrických měření, která naznačují, že se Enceladus poměrně rychle vzdaluje od Saturnu. Simulovat vývoj Saturnova systému je ale mimořádně složité, takže dnes pracujeme s tím, že Enceladus je starý nejméně 200 milionů let, ale může být klidně stejně starý jako Sluneční soustava.

Nabízí se otázka, zdali se nejedná například o zachycený měsíc z Oortova oblaku nebo o jádro komety?

Takové scénáře se nepovažují za pravděpodobné. Zatím nic nenasvědčuje tomu, že by Enceladus vznikl jinde než uvnitř Saturnova systému. Otázkou ale je, jak probíhal jeho vývoj, kdy Enceladus přesně vznikl a jak se v minulosti měnily jeho orbitální parametry, tj. vzdálenost od Saturnu a excentricita dráhy.

Nemohl tedy Enceladus vzniknout kondenzací nějakého vzdálenějšího Saturnova prstence tak, že do něj narazilo jakési těleso? Pokud by získalo

© NASA

eliptickou dráhu, mohl by se prstenec postupně na těleso nabalovat?

Lze si představit různé kondenzačně-kolizní scénáře, jak Enceladus mohl vzniknout, ale v tuto chvíli nemáme žádná data, která by nám napověděla, jak a zda k tomu skutečně došlo. Vědecká komunita se v tuto chvíli kloní spíše k názoru, že Enceladus je staré těleso a zajímá se hlavně o to, co vedlo k tomu, že se se měsíc rozehřál a pak už zůstal tektonicky aktivní.

Mohl byste nám prosím objasnit hypotézu týkající se tzv. „proto-Enceladu"?

Tato teorie dává do souvislosti úbytek hmoty, který dnes u Enceladu pozorujeme, s jeho počátečním stavem. V okolí jižního pólu Enceladu je více jak stovka gejzírů, které každou sekundu vychrlí do prostoru asi 200 kg ledových částic. Pokud by tento proces trval spojitě po dobu 4,5 miliardy let, ztratil by Enceladus zhruba třetinu své hmotnosti. Jelikož gejzíry odčerpávají z Enceladu vodu, zatímco kamenná složka zůstává zachována, musel mít Enceladus na počátku svého vývoje výrazně menší hustotu než má dnes. Zajímavé je, že hustota proto-Enceladu by byla stejná jako současná hustota Mimase, který obíhá v blízkosti Enceladu. Mimas sice nejeví žádné známky tektonické aktivity, ale má výraznou libraci, která naznačuje, že také uvnitř tohoto tělesa existuje globální vodní oceán. Někteří vědci soudí, že Mimas je analogií raného Enceladu.

Enceladus je společně s Dione, Tethysem a Mimasem jedním z velkých vnitřních měsíců Saturnu. Jaká je jeho oběžná dráha a rotace?

Enceladus má vázanou rotaci stejně jako ostatní větší měsíce Saturnu a jeho oběžná doba je 1,37 dne. Pohybuje se po eliptické dráze, jejíž výstřednost (excentricita) je 0,0045 (pro srovnání – dráha Země má výstřednost 0,0167). Nenulová excentricita Enceladu je dána vzájemným gravitačním působením s měsícem Dione, se kterým je Enceladus v orbitální rezonanci. Oběžná doba Dione je dvakrát delší než u Enceladu, takže se oba měsíce pravidelně (jednou za zhruba 2,7 dne) setkávají na spojnici Saturn – Enceladus – Dione, což gravitačně ovlivňuje tvar jejich drah. Jde o analogický proces, který pozoroval již Galieo u Jupiterových měsíců Io, Europy a Ganymedu.

Zajímavým projevem měsíce Encelada je jeho librace. Jakým způsobem byla změřena a co nám vlastně o jmenovaném tělese vypovídá?

To, že Enceladus vykazuje libraci, není samo o sobě až tak překvapivé. Spíše je pozoruhodné, že se ji vůbec podařilo přesně změřit, protože

Prof. RNDr. Ondřej Čadek, CSc. (*1957) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy (MFF UK) a dnes na ní působí jako vedoucí katedry geofyziky. Na počátku své odborné dráhy se zabýval především termálním vývojem a deformací Země. V 90. letech opakovaně pobýval na *École normale supérieure* v Paříži, kde se zabýval interpretací gravitačních dat z hlediska dynamických procesů v plášti Země. Od roku 2006 se věnuje geofyzikálnímu výzkumu planet a jejich měsíců. V souvislosti s vesmírnou misí *Cassini* publikoval řadu článků o ledových měsících Saturnu a je spoluautorem numerického modelu, který vysvětluje termální bilanci Enceladu. Je neformálním vedoucím planetologické skupiny na katedře geofyziky MFF UK a aktivně spolupracuje s řadou odborníků v zahraničí. Ondřej Čadek je členem vědecké rady MFF UK a Učené společnosti České republiky.

librační pohyb není příliš velký, a také to, jakým způsobem byla interpretována z hlediska vnitřní struktury měsíce. Pozorovanou libraci lze totiž vysvětlit pouze za předpokladu, že vnější ledová slupka měsíce je poměrně tenká. Zatímco fyzikální modely měsíce před měřením librace běžně pracovaly s tloušťkou ledu 60–80 km a předpokládaly jen mělký podpovrchový oceán, současné preferované modely mají ledovou slupku tlustou jen 20 km a oceán hluboký skoro 50 km.

První sondou, která spatřila povrch Encelada, byla v srpnu 1981 americká planetární sonda Voyager 2. Můžeme nyní již s jistotou říci, jaké na jeho povrchu panují podmínky?

Povrch je tvořen takřka čistým vodním ledem. Je velmi členitý s množstvím rýh, zlomů, depresí a dalších útvarů, svědčících o živé geologické aktivitě. Měsíc nemá atmosféru a gravitační zrychlení na povrchu je stokrát menší než na Zemi. V okolí jižního pólu je zhruba stovka gejzírů, z nichž do prostoru vylétávají ledové částice. Tyto částice jsou zdrojem Saturnova prstence E.

Teplota povrchu Enceladu je téměř –200 °C. Je to dáno např. jeho vysokým albedem?

Enceladus je skutečně velmi jasný (Bondovo albedo 0,8), což je dáno tím, že jeho povrch je tvořen prakticky čistým ledem a je většinou relativně mladý. Důsledkem velké odrazivosti povrchu je pak skutečnost, že povrch má mírně nižší teplotu, než mají ostatní Saturnovy měsíce.

Okolní vesmír disponuje teplotou přibližně 10 K. Můžete ozřejmit, z jakého důvodu nedochází k postupnému ochlazování Enceladu?

Enceladus vyzařuje do okolního prostoru velké množství tepla. To, že přitom nechladne, znamená, že má dostatečné vlastní zdroje energie, kterými dokáže tepelné ztráty kompenzovat. U tak malého tělesa je to ale zcela výjimečné.

Velkou neznámou je tedy způsob ohřívání Enceladu. Mohla by to být právě excentricita jeho oběžné dráhy, která má vliv na produkci tepla tzv. slapovým zahříváním?

Slapové zahřívání se jeví jako nejpravděpodobnější zdroj tepla. Měsíc má sice synchronní rotaci, ale jeho vzdálenost od Saturnu se během oběhu mění, neboť putuje po mírně výstředné oběžné dráze. Gravitační tah Saturnu se tedy v čase mění a tyto změny vedou k deformaci celého tělesa, při níž se část deformační energie přeměňuje v teplo. Tento proces, označovaný jako slapové zahřívání, je významný i u některých měsíců Jupiteru, jako např. u Europy nebo Io, nebo u Neptunova Tritonu. Slapové zahřívání Enceladu závisí na excentricitě dráhy, která se může v čase měnit v důsledku gravitačního působení dalších Saturnových měsíců. V současnosti je měsíc nejvíce ovlivněn rezonancí s Dione, ale v minulosti tomu mohlo být i jinak.

Země získává ze Slunce 1,36 kW/m^2, Enceladus zhruba 100× méně. Mohl by být zdrojem energie rozpad radioaktivních látek?

Radioaktivní rozpad může vysvětlit zhruba 10 % tepla, které z Enceladu uniká. Co se týče slunečního záření, tak to určuje především teplotu na povrchu měsíce, která ovlivňuje rychlost úniku tepla ledovou slupkou. Sluneční záření ale nelze považovat za reálný zdroj tepla.

Vzhledem k tomu, že slaná voda Enceladu je dobrý elektrický vodič a Enceladus se pohybuje v proměnlivém magnetickém poli, měly by se v jeho nitru generovat elektrické proudy a ty by jej zevnitř mohly ohřívat. Uvažuje se i o této teorii generování tepla?

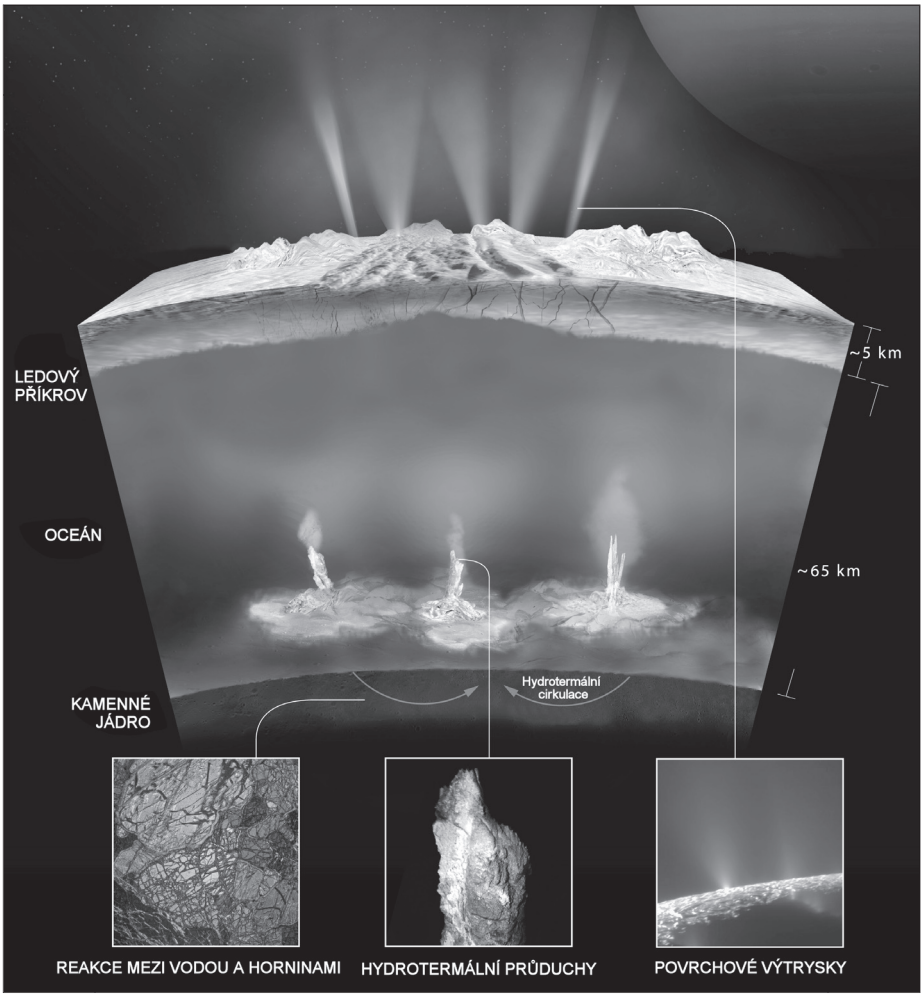
Tento typ zahřívání je pravděpodobně významný u některých exoplanet, které se pohybují v silném magnetickém poli mateřské hvězdy, ale v případě Enceladu je jeho vliv zanedbatelný. Enceladus se totiž pohybuje po slabě výstředné dráze v rovině kolmé k magnetickému dipólu Saturnu, takže změny magnetického pole uvnitř Enceladu jsou poměrně malé.

Jaký máte názor na další možnosti produkce tepla, např. tepla z chemických reakcí?

Chemické reakce mezi silikáty v jádře a vodou (tzv. serpentinizace) hrály v minulosti zřejmě významnou roli. Při těchto reakcích vzniká molekulární vodík, který je poměrně hojně obsažen v ledových částicích vyvržených z gejzírů. To naznačuje, že k těmto reakcím dochází i v současnosti, i když z hlediska tepelné bilance měsíce asi nemají zásadnější význam. Tím je primárně teplo uvolňované při slapové deformaci.

Ohřev Enceladu se tedy zatím nedá zcela jednoduše vysvětlit. Je možné uvažovat i jiný výše nezmíněný zdroj? Byl učiněn nějaký nový objev?

Máte pravdu, že až donedávna se nedařilo celkovou tepelnou bilanci měsíce vysvětlit. Po objevu horké skvrny a ledových gejzírů se soudilo, že si Enceladus dokáže udržet teplo díky slapové deformaci ledové slupky. Podrobnější modely ale ukázaly, že slapové teplo generované v ledové slupce nedokáže pokrýt tepelné ztráty měsíce. Velikost tepla uvolňovaného při slapové deformaci závisí na excentricitě dráhy, která se mohla v minulosti měnit. Podle jedné hypotézy může Enceladus periodicky procházet obdobími termální hojnosti, kdy slapy generují víc tepla, než kolik ho měsíc ztrácí, a obdobími termálního půstu, kdy měsíc chladne. Tuto hypotézu se zatím nepodařilo ověřit, ale numerické modely spíše naznačují, že k takovým periodickým změnám nemůže docházet. Jako nejpravděpodobnější se dnes jeví vysvětlení, podle kterého je teplo v Enceladu generováno slapovým zahříváním v porézním silikátovém jádře. Podle této představy je jádro tvořeno nekonsolidovanými úlomky silikátových hornin, přičemž prázdná místa mezi úlomky jsou vyplněna vodou, která může jádrem cirkulovat. Slapová deformace takového jádra je schopna zajistit termální stabilitu měsíce na časové škále miliard let, a to aniž by bylo třeba předpokládat zvýšenou hodnotu excentricity. Model slapového zahřívání jádra, na kterém jsme se podíleli a který byl zveřejněn v časopise *Nature Astronomy* na počátku listopadu 2017, navíc vysvětluje i další pozorování sondy Cassini, např. přítomnost silikátových nanočástic v Saturnově prstenci E nebo skutečnost, že ledová slupka je výrazně tenčí v okolí pólů.



© NASA

Současná představa struktury a pochodů v tělese měsíce Enceladus

V roce 2005 zakotvila u Saturnu sonda Cassini, která uskutečnila řadu blízkých průletů okolo Enceladu. Mohl byste nám z toho hlediska Enceladus trochu více přiblížit?

Sonda Cassini detailně zdokumentovala povrch měsíce, zjistila jeho topografii a určila základní charakteristiky jeho gravitačního pole. Ještě větší význam ale měla analýza částic vyvržených z gejzírů, díky níž jsme se dověděli řadu zajímavých informací o složení oceánu a podmínkách, které v něm panují. Současný stav povrchu měsíce je tektonicky velmi komplikovaný a většina pozorovaných útvarů zatím nebyla uspokojivě vysvětlena, i když je zřejmé, že nějak souvisí s termálními procesy v oceánu pod ledovou slupkou a slapovým zahříváním v jádře.

Gravimetrická data pořízená během průletu sondy Cassini nad Enceladem ukázala, že se pod zmrzlým povrchem měsíce pravděpodobně nachází oceán kapalné vody. Myslíte, že by v tomto oceánu bylo možno nalézt tzv. černé kuřáky?

Existence podpovrchového oceánu byla nepřímo potvrzena řadou nezávislých měření, takže o ní dnes už nikdo nepochybuje. O přítomnosti oceánu svědčí nejen charakter gravitačního pole měsíce, ale také jeho librační pohyb a chemické složení materiálu vyvrženého gejzíry do prostoru. Tento materiál obsahuje slané ledové částice, které musely vzniknout v kapalném prostředí, a silikátové nanočástice, které zřejmě vznikly při výronech horkých roztoků na dně oceánu. Tyto výrony by se skutečně mohly podobat černým kuřákům, které známe ze Země a které zřejmě hrály důležitou roli při vzniku a vývoji života.

Kryovulkanismus způsobuje výron směsi vodního ledu, plynných látek a pevných částic včetně krystalků soli do okolního vesmíru. Kam vlastně dopadá vyvržený materiál z Enceladových gejzírů?

Část materiálu dopadá zpátky na povrch Enceladu, ale většina se rozptýlí do prostoru. Saturnův prstenec E je z velké míry složen právě z částic pocházejících z Enceladu.

Enceladus se jeví jako jedno z nejvhodnějších míst ve Sluneční soustavě pro pátrání po případných prostředích umožňujících existenci mimozemského života. Byly již detekovány některé konkrétní organické látky?

Víme, že se v částicích vyvržených z gejzírů nalézají ve stopovém množství i složité organické látky. Hmotnostní spektrometr na Cassini však nedokázal tyto látky přesně identifikovat. Z jednoduchých látek, které spektrometr dokázal určit, lze kromě vody zmínit H_2, CO, CO_2, H_2S, CH_4, NH_3, NaCl nebo C_6H_6. Ze šesti základních prvků potřebných pro život, jak ho známe ze Země, jich bylo zaznamenáno pět (C, H, O, N, S). Přítomnost fosforu se považuje za velmi pravděpodobnou, takže na Enceladu máme vše, co život potřebuje: vodu, celkem stabilní prostředí a dostatek stavebních látek. Jako zdroj energie by mohl sloužit vodík, který pozemské mikroorganismy zpracovávají v procesu zvaném metanogeneze.

Množství objevů sondy Cassini přimělo vědce k předložení návrhů na další mise. Jedním z uvažovaných konceptů NASA je sonda, která by byla schopna nejenom průletu skrz mračna materiálu vyvrženého gejzíry, ale i odebrání jejich vzorků. Je už známo, kdy se tato mise uskuteční?

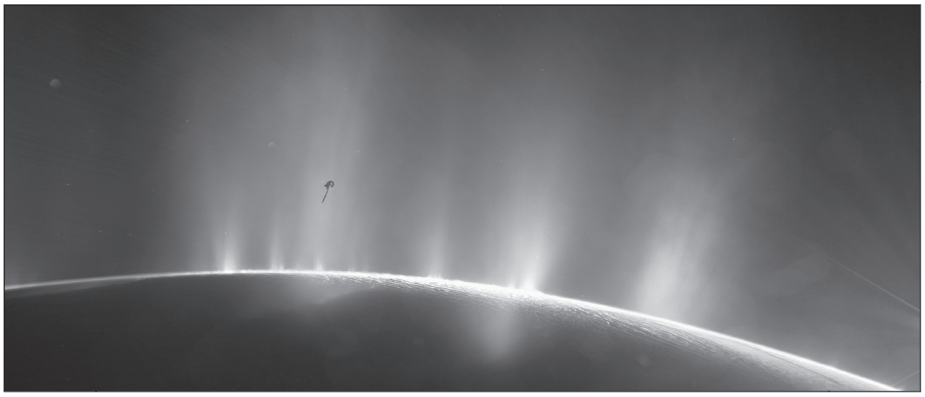
Jedná se zatím jen o projekt, označovaný pracovním názvem *Enceladus Life Finder*. Zatím není jasné, kdy se mise uskuteční a zda vůbec získá finanční podporu. Záleží na prioritách americké vlády a NASA.

Pokud byste měl hypotetickou možnost uskutečnit následující misi k Enceladu, na co byste se nejvíce zaměřil? Jaké odpovědi byste chtěl získat?

Mise by měla zodpovědět jedinou otázku, a to zda na Enceladu existuje život. Za tímto účelem by musela odebrat vzorky z gejzírů a analyzovat je buď přímo na místě, nebo se s nimi vrátit na Zem. Zní to jednoduše, ale logisticky se jedná o poměrně složitou operaci.

Zkoumání vesmírných těles je „během na dlouhou trať". S kým na tomto úkolu spolupracujete?

Na katedře geofyziky se planetárnímu výzkumu věnuje několik lidí. Dr. Běhounková je náš specialista na Enceladus a v poslední době se věnuje také slapově zahřívaným exoplanetám. Dr. Kalousová se zabývá tavením v ledových slupkách velkých měsíců Jupiteru, což je



© NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Hmotnostní spektrometr na sondě Cassini zaznamenal při průletu gejzíry na Enceladu ze šesti základních prvků potřebných pro život, jak ho známe ze Země, pět (C, H, O, N, S)

perspektivní z hlediska vědeckého programu připravovaných misí *Juice* a *Europa Clipper*. Na některých projektech s námi spolupracují studenti, ať už se jedná o budoucí geofyziky, astronomy nebo matematické modeláře.

Dovolím si nevšední otázku. Uvažuje se o možnosti primitivních životních forem na Enceladu. Zajímal by mě Váš názor na to jaká forma života by mohla v podpovrchovém oceánu dřímat?

Abych pravdu řekl, nemám tušení a rád se nechám překvapit. Ale samozřejmě to může dopadnout i tak, že nenajdeme nic, stejně jako jsme zatím nenašli nic na Marsu. Pak už zbývá jen Titan a Europa. Pokud ani tam nic neobjevíme, zbývá nám vzdálený vesmír, ale tam se primitivní život hledá obtížně. Ale nepředbíhejme. Enceladus a Europa jsou dnes nejnadějnější astrobiologické objekty ve Sluneční soustavě. U Enceladu víme, že je to stabilní svět poháněný slapovým teplem v jádře, kde je dostatek vody i živin potřebných pro udržení života. Zda tam život skutečně existuje, zatím nejsme schopni říci. Výhodou Enceladu je, že nám díky gejzírům nabízí vzorky vody přímo ve svém okolí a informaci o případném životě v oceánu můžeme tedy poměrně snadno získat při průletu kolem měsíce. Myslím, že bychom této možnosti měli v budoucnosti využít.

Za Astropis se ptala Bc. Jana Žďárská (tajemnice Kosmologické sekce ČAS).

■

Profesor Sotin nás při své návštěvě Prahy v roce 2006 ke studiu ledových měsíců vlastně přivedl. Jakožto řídící vědecký pracovník na JPL-Caltech/NASA je dobře obeznámen s posledními výsledky vesmírných misí, což je pro naši práci důležité (viz rozhovor v Astropisu 3/2017, str. 12–15).