

# Ledové měsíce ve sluneční soustavě

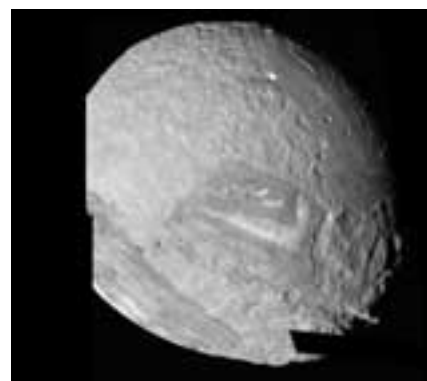
Mojmír Eliáš

K velkým objevům ve sluneční soustavě v posledních desetiletích patří poznání měsíců velkých planet. Již výzkumy prováděné ze Země prokázaly neobvyklé vlastnosti těchto těles. Povahu těchto těles poněkud odkryly průlety sond Pioneer okolo Jupiteru (Pioneer 10 – prosinec 1973 a Pioneer 11 – prosinec 1974) a Saturnu (Pioneer 11 – září 1979). Revoluční poznatky o nich však přinesly až sondy Voyager (Voyager 1: Jupiter – březen 1979; Saturn – listopad 1980) a Voyager 2 (Jupiter – červenec 1979; Saturn – srpen 1981; Uran – leden 1986; Neptun – srpen 1989). Dalším zlomem byla sonda Galileo, která vykonala v Jupiterově soustavě v letech 1996–1997 celkem 11 obletů.

Sonda Galileo prokázala, že Jupiterovy velké měsíce jsou skutečně velmi neobvyklá tělesa. Týká se to nejen měsíce Io, který překvapil svou bouřlivou vulkanickou činností a odrážející intenzivní geologickou dynamiku, kterou možná předhání i Zemi, ale i dalších třech velkých měsíců – Europy, Ganymeda a Callisto. Tato tělesa představují dosud nejlépe známé příklady ledových měsíců, které jsou svým složením a geologickými pochody specifické pro vzdálené části sluneční soustavy. Jejich základní povaha vyplývá z tabulky, ve které je pro srovnání uveden i měsíc Io, který se vlastnostmi blíží terestrickým planetám.

Ledové měsíce jsou velmi rozmanité. Jejich poloměr kolísá od 2631 km u Ganymedu až do téměř 100 km (Phoebe 110 km). Patří k nim nejen měsíce Jupiteru, ale i Saturnu, Uranu a Neptunu (např. Tethys, Dione, Iapetus, Phoebe, Miranda, Triton a další). Vyznačují se vysokým albedem a nápadně nízkými celkovými hustotami v rozmezí 1200–2500 kg m<sup>-3</sup> ukazujícími, že tato tělesa pravděpodobně obsahují v různém podílu kovy, křemičitany a zvláště led. S rostoucí vzdáleností od Slunce se mění chemické složení ledů. Hlavní složkou v ledu Jupiterových měsíců je voda. V měsících Uranu a Neptunu se mohou vyskytovat i ledy metanu a čpavku. Podle modelových představ se předpokládá, že tato tělesa jsou většinou diferencovaná na jádro, plášť a kůru. V jejich jádrech by se měl především koncentrovat kovový nebo silikátový podíl. Jejich plášť by měla tvořit voda. Kůra se skládá z ledu různého složení.

Ledové měsíce se až do průletů Voyagerů převážně považovaly za geologicky mrtvá tělesa. Snímky, které na Zemi zaslaly sondy Voyager 1 a 2 a zvláště Galileo nás však přesvědčily o opaku a ukázaly, že ledové měsíce mají mnohotvárný vzhled, pro jednotlivá tělesa často specifický. Najdeme na nich jak velmi starý, impaktními krátery hustě pokrytý povrch, který svědčí o nepřítomnosti mladších geologických pochodů, tak území mladého vzhledu, obsahující zá-



Mozaika Uranova měsíce Miranda, pořízená v roce 1986 sondou Voyager 2, jediným člověkem vyrobeným tělesem, které se k Uranu kdy přiblížilo, ukazuje jeho neobyčejný mnohotvárný a pestrý terén, plný na první pohled zcela neuvěřitelných geologických jevů

znamy o působení řady specifických geologických pochodů.

Prvním příkladem je Jupiterův měsíc Europa s hustotou poněkud nižší než u Měsíce. Europa má pravděpodobně malé kovové jádro a z větší části ji tvoří křemičitany. Její povrch je ledový, poměrně mladý, hladký, bez výrazných impaktních kráterů. Je pro něj příznačný výskyt rozsáhlých systémů puklin, někdy dosahujících až přes 3000 km délky. Zajímavým útvarem jsou dlouhé pukliny cykloidálního průběhu. Výplň těchto puklin pravděpodobně vznikla opakovanými výlevy tzv. teplého ledu.

Podle fyzikálních vlastností a mechanických projevů odlišujeme dva typy ledu. Prvním z nich, tzv. chladný led, jehož teplota je nižší než tlakový tavný bod, je kruchý. Druhým typem je tzv. teplý led, jehož teplota se blíží tlakovému tavnému bodu. Teplý led obsahuje určitý podíl vody v tekutém stavu a přechází při dalším zahřátí v ledovou tříšť, která je „lávou“ při ledovém vulkanismu (tzv. kryovulkanismu). Tato sopečná činnost, spolu s objemovými změnami při tuhnutí ledu, je pro ledová tělesa typickým geologickým pochodem. Zdroji vnitřní energie pro tyto pochody může být radioaktivní ohřev, ale spíše to je slapový ohřev vyvolaný slapy

**Tabulka I** - Některé vlastnosti Galileových měsíců

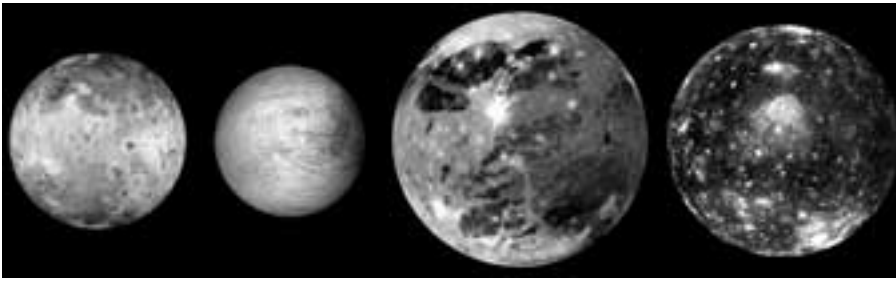
vlastnost	Io	Europa	Ganymed	Callisto
střední poloměr (km)	1821,3 ± 5	1569 ± 10	2634 ± 10	2400 ± 10
objem (km <sup>3</sup> )	2,531.10 <sup>10</sup>	1,59.10 <sup>10</sup>	7,655.10 <sup>10</sup>	5,812.10 <sup>10</sup>
střední hustota (g cm <sup>-3</sup> )	3,529	3,018	1,936	1,851
index setrvačnosti C/MR <sup>2</sup>	0,378	0,26–0,33	0,31	0,406
albedo	0,60	0,64	0,43	0,19
podíl kovového jádra (%)	40	20	18	těleso
podíl silikátového pláště (%) <sup>†</sup>	58	75	50	asi není
podíl vodní vrstvy a ledu (%) <sup>‡</sup>	2	5	32	diferencované

Vysvětlivky: <sup>†</sup> u Io též kůry; <sup>‡</sup> u Io vulkanický plášť

#### RNDr. Mojmir Eliáš, CSc. (\*1932)

je vědeckým pracovníkem Českého geologického ústavu AV ČR, kde pracuje na regionální geologii Karpat. Je specialistou na srovnávací geologii planet.

(E-mail: mojmir.elias@quick.cz)



Rodinka Jupiterových měsíců pohromadě. Zleva Io, Europa, Ganymedes a Callisto

velkých planet a okolních měsíců. Příkladem je Jupiterův měsíc Europa.

Europa je vystavena, podobně jako Io, významnému tíhovému vlivu Jupiteru a sousedních měsíců a tvoří se na ní stěhující se slapová korová výduť, která vyvolává napětí v kůře (event. svrchním pláští). Toto napětí vede ke vzniku puklin (zvláště cykloidálního tvaru) a k posunům a přesouvání ledových ker přes sebe. Otevírání puklin je spojené s ledovou sopečnou činností – kryovulkanismem. Výsledkem těchto pochodů je vznik tzv. chaotického terénu na Europě (pozor! – odlišovat od chaotického terénu na Marsu, který má jiný vzhled i původ).

Magnetické pole, které bylo na Europě zjištěno při misi Galileo, se přičítá konvekcí v tekutém vodním pláští. I když důkaz vodního pláště je dosud jen nepřímý, vyvolal modelovou představu, že ve vodním prostředí mohl vzniknout jednoduchý život, založený na vnitřních zdrojích energie (obdoba života okolo horkých pramenů na středoocéánských valech v pozemských oceánech).

Typickým příkladem ledových těles je Ganymed. Jeho střední hustota se blíží  $2 \text{ g cm}^{-3}$ . Podle modelových představ jej tvoří poměrně malé kovové nebo horninové jádro, rozměrnější vodní plášť, pravděpodobně s konvekcí, která může vyvolat vznik magnetického pole a ledová kůra.

Typickou ukázkou vzhledu ledových měsíců je povrch Ganymedu. Povrch těchto měsíců pokrývají impaktní krátery. Jejich hustota je mírou stáří povrchu příslušného měsíce a rychlosti a účinnosti procesů, které tento povrch obnovují. Tvar impaktního kráteru ovlivňuje především velikost impaktu a tloušťka ledové kůry. Malé krátery jsou číšovité. U větších kráterů vznikají středové vrcholky. Výhozová pole nebývají rozsáhlá a zvláště u čerstvějších kráterů je tvoří světlý led. Z některých kráterů, podobně jako na terestrických

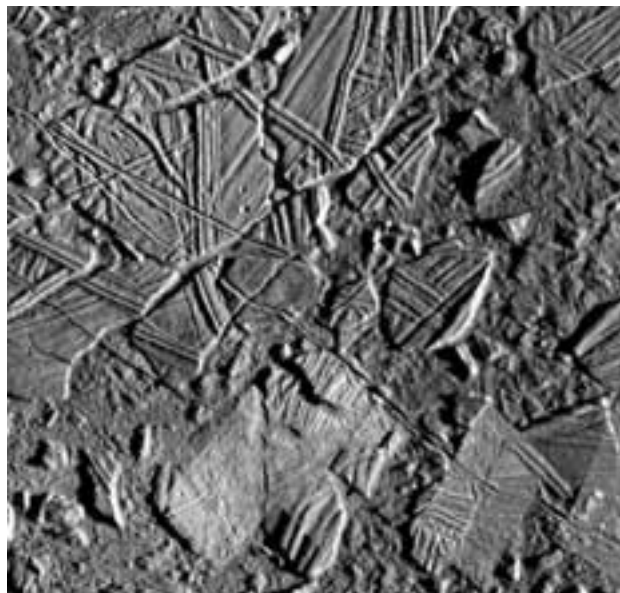
planetách, vycházejí systémy světlých paprsků. Na ledových tělesech existují i velké impaktní pánve obklopené oválnými zlomy a prasklinami, které připomínají kruhovitě poruchy obklopující velké krátery a impaktní pánve na Měsíci (např. na měsících Callisto a Tethys). Pro ledová tělesa jsou zcela specifické tzv. palimpsesty – zbytky po starých, morfologicky výrazně potlačených impaktních kráterech se zastřenými tvary a vyzdviženým dnem. Jejich vzhled velmi pravděpodobně ovlivnily izostatické (vyrovnávací) pohyby v ledové kůře. Na ledových tělesech obecně platí, že hloubky impaktních kráterů jsou zpravidla menší než na terestrických tělesech.

Povrch Ganymedu je zvláště složitý. Tento měsíc ještě podstatně ovlivňuje slapové působení Jupiteru vyvolávající podobné výdutě kůry jako na Europě. Vznikající výdutě vyvolávají tahová napětí v kůře, projevující se hustou sítí puklin vyplněných produkty kryovulkanismu. Kůra Ganymedu byla rozbita na rozměrné bloky se

starým, tmavě zbarveným povrchem, spojené rozsáhlými systémy světlých pásem s výrazně lineární strukturou, která mohla vzniknout opakovanými projevy vodního vulkanismu, nebo případně to jsou bloky mladší, světlejší kůry. Na Ganymedu jsou patrné i příkopové propadliny, zlomově omezené pánve a ledová pohoří orámovaná zlomy. Zjištěny byly i horizontální pohyby velkých bloků ledové kůry. I na něm se podle existence magnetického pole předpokládá globální „ocean“, který, podobně jako na Europě, by mohl obsahovat stopy jednoduchého života.

Některé impaktní krátery mají jak koncentrické, tak paprskité zlomové systémy, mnohdy sahající do širšího okolí. Některé impakty, které zasáhly ledová tělesa, byly tak mohutné a ničivé (např. kráter Odyseus na Saturnově měsíci Tethys), že podstatně narušily původní tvar měsíce. Není vyloučené, že zvláště ničivé impakty mohly rozbít celá tělesa.

Podivuhodnou formu má Uranův měsíc Miranda význačným blokovanou stavbou, jeho nerovný povrch výškovými rozdíly připomíná horský reliéf. Předpokládá se, že původní těleso roztušil mohutný impakt. Vzniklé úlomky – bloky – se pohybovaly po impaktu po blízkých oběžných dráhách a působením tíhy zrekominovaly do dnešního tvaru. Protože měsíc již v té době neměl dostatečné zdroje energie a bloky byly rigidní, dále se neměnily. I když tyto výklady nám připadají jako fantastické, jsou možné.

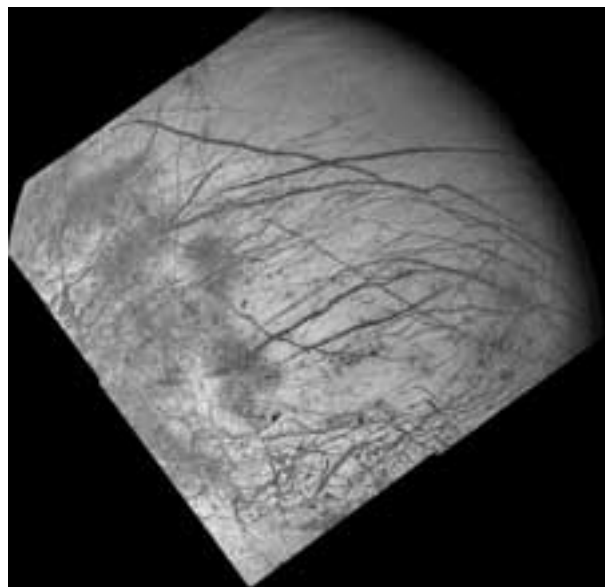


Pohled na chaotický terén Europy. Pět podrobných snímků pořízených sondou Galileo v prosinci roku 1997 při blízkém průletu nad povrchem Europy bylo vloženo do o několik měsíců staršího obrázku s menším rozlišením, který pokrývá oblast 35 krát 50 kilometrů. Nejmenší zachycené detaily na podrobných snímcích měří jen 20 metrů. Pozorované struktury ukazují na relativně nedávné pohyby a lámání ledových bloků.

Sopečná činnost na ledových tělesech probíhá nejen na bázi vody, vodního (teplého) ledu, směsi vody a ledové tříšti, ale i na bázi dusíku, jako u Neptunova měsíce Tritonu. Součástí vyvrhovaného materiálu jsou i částice silikátů a dalších složek, které jsou v ledu obsaženy jako „špína“. Projevy této sopečné činnosti jsou mnohotvárné. Nejčastěji dochází k jednorázovým nebo opakovaným výlevům vody, ledové tříště nebo teplého ledu vystupujících podle puklin v ledové kůře. Velmi pěkné příklady tohoto vulkanismu nedávno zachytila sonda Galileo na Jupiterově měsíci Europa. Sopečnou činností na bázi vody a ledu (částečně s příměsí silikátů) vysvětlujeme vznik nápadných trojpásů (ve středním pásu zpravidla s velmi světlým, relativně čistým ledem) vyplňujících některé pukliny. Jejich vznik se vysvětluje opakovanými sopečnými výrony. Opakované výrony těchto látek můžeme pozorovat i na dalších měsících. Tak např. na Saturnových měsících Tethys a Enceladus vyvolal tento vodní vulkanismus vznik komplikovaných plošin a pásů a přispěl významně ke zmlazení povrchu těchto měsíců.

Poněkud odlišný a opět zcela specifický vulkanismus má Neptunův měsíc Triton. Při průletu na něm Voyager 2 zachytil plynné erupce, pravděpodobně na bázi dusíku,

*Změť tmavých pruhů na povrchu Europy je z dálky nejlépe patrným projevem ledového kryovulkanismu, jak ukazuje snímek pořízený v prvních měsících mise sondy Galileo ze vzdálenosti přes 150 tisíc kilometrů od satelitu. Délka nejdelších brázd, vzniklých patrně výlevem materiálu z nitra měsíce do povrchových puklin přesahuje 1600 kilometrů. Při bližším pohledu na obrázek však kromě nich nalezneme i řadu kruhových útvarů impaktního původu.*



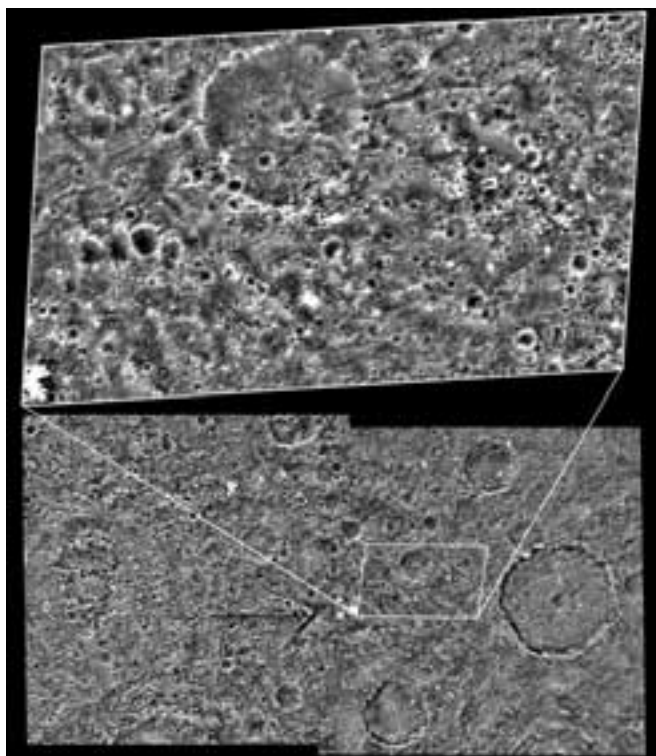
kteří se šíří řídkou atmosférou a nechávají za překážkami klasické vlečky.

Vnitřní stavba Callisto je odlišná. Toto těleso není diferencované a představuje izotropní směs kovových minerálů, křemičitanů a vodního ledu. Jeho povrch neporušily vnitřní síly vyvolané slapovými vlivy okolních těles nebo vnitřními zdroji energie. Callisto je jediné dosud známé těleso, které od svého vzniku prakticky neprodělalo podstatné vnitřní (endogenní) pochody a bylo vystaveno jen vnějším (exogenním)

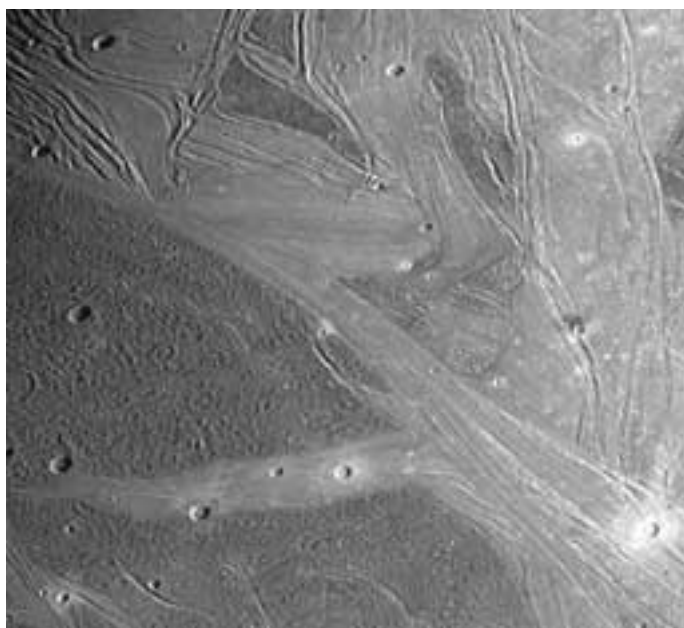
vlivům. Podle hustého pokrytí impaktními krátery je jeho povrch velmi starý.

Víme, že povrch Galileových měsíců erodují nabitě částice z Jupiterovy magnetosféry. Dosud neznáme složení a pochody způsobující barevné změny ledů na povrchu ledových těles. Je nutné např. studovat vlivy různých typů záření na vzhled jejich povrchu. Některé ledové měsíce mají řídkou atmosféru (např. Europa a Ganymed – velmi řídká kyslíková atmosféra vznikající disociací vodního ledu zářením, Triton – řídká dusíková atmosféra). Přítomnost atmosféry umožňuje některé změny vyvolané migrací plynů, jako jsou např. zvětšování a zmenšování polární čepičky na Tritonu, pravděpodobně zalednění horských vrcholů na Ganymedu.

Nové kosmické sondy dovolují zobrazit povrchy ledových těles s vyšší rozlišovací schopností než dříve a odhalují složitý geologický vývoj těchto těles. Nové výzkumy ukázaly, že tato tělesa nejsou mrtvými kusy ledu, ale objekty, které prodělaly, případně ještě prodělávají složitý geologický vývoj. Mnoho toho ještě nevíme, např. proč mají Europa a Ganymed magnetosféru a případně ionosféru. Neznáme přesně složení ledů. Významnou výzvou pro exobiologii je ověření nebo vyvrácení přítomnosti primitivního života na Europě a Ganymedu. Doufáme, že další lety kosmických sond přinesou nové poznatky, které by nám lépe pomohly pochopit podstatu těchto těles a geologických pochodů, které je formovaly.



*Tmavě zbarvený povrch zabírá asi jednu třetinu celého povrchu Ganymedu; podrobný snímek nahoře (vůbec nejpodrobnější zatím pořízený záběr tohoto typu povrchu) ukazuje, že na malých měřítkách mu jasně dominují drobné impaktní krátery, mezi nimiž se větší útvary, tak dobře patrné ze vzdálenějších snímků, téměř ztrácejí. Nejmenší detaily na obrázku mají velikosti jen okolo 30 metrů.*



Méně podrobný obrázek povrchu měsíce Ganymedu ukazuje jednotlivé typy terénu v širším kontextu. V oblasti Merius Regio, fotografované sondou Galileo v těsné blízkosti terminátoru (rozhraní dne a noci na povrchu satelitu) jsou dobře patrné jednotlivé bloky staršího tmavého a mladšího světlého terénu. Rozlišení snímku je jen okolo jednoho kilometru.

Krátery Gula (nahore) a Achelous o průměru 38 a 32 kilometrů na povrchu největšího satelitu sluneční soustavy, Jupiterova Ganymedu, jsou typickým příkladem mladých, neerodovaných impaktních kráterů. U obou je patrný vyhozený materiál v těsném okolí a řada drobných sekundárních kráterů, vzniklých jeho dopadem zpět na povrch. U severnějšího kráteru Gula se vyjímá dobře vyvinutý centrální vrcholek.



Neptunův největší měsíc Triton, zachycený sondou Voyager 2 na mozaice z roku 1989, je jedním z nejchladnějších míst ve sluneční soustavě. Probíhající vulkanické procesy na bázi dusíku vymodelovaly jeho povrch do řady odlišných druhů terénu.

Starému povrchu měsíce Callisto vévodí velké množství impaktních kráterů. Tento, pojmenovaný Har, má průměr okolo 50 kilometrů a na snímku ho můžeme spatřit tak, jak byl zaznamenán sondou Galileo v červnu roku 1997.