

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Pavel Příhoda

Měsíce ve sluneční soustavě (2. část)

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 49 (2004), No. 4, 268--280

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/140854>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2004

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



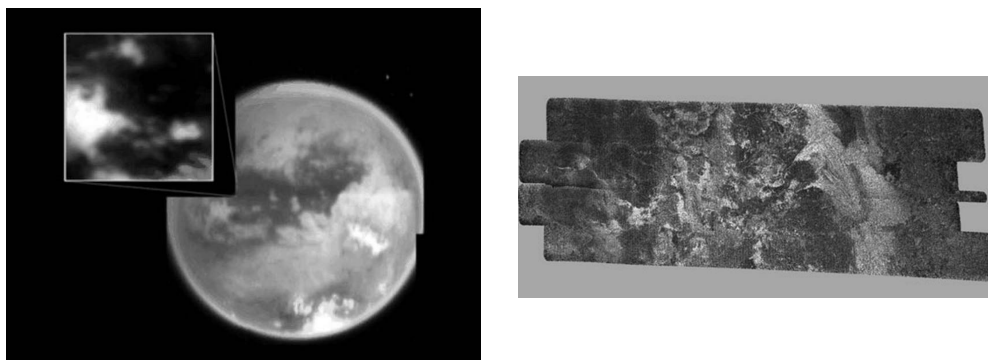
This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Měsíce ve sluneční soustavě (2. část)

*Pavel Příhoda, Praha*

## Velké měsíce planety Saturn

Mezi těmito tělesy suverénně dominuje **Titan**, objevený již roku 1655 Ch. Huygensem. Má průměr 5150 km a je to tedy druhý největší měsíc sluneční soustavy. Kolem Saturna obíhá ve vzdálenosti 1 221 900 km jednou za 15,945 42 dne. Jeho dráha má nepatrnou excentricitu 0,0288 a malý sklon k rovníkové rovině planety  $1,634^\circ$ . Má rovněž vázanou rotaci a nevelkou, v těchto oblastech však již obvyklou hustotu  $1881 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Zcela výjimečná je neprůhledná hustá atmosféra s oblačnou vrstvou. Na povrchu se původně předpokládala přítomnost moří nebo jezer tekutého metanu a etanu, zatímco voda se zde vyskytuje výhradně v pevné fázi. Atmosférický tlak na povrchu dosahuje 160 kPa, je tedy o 60 % větší než na Zemi. Atmosféra se skládá převážně z dusíku s uhlovodíky; proto má Titan naoranžovělou barvu. Soudilo se, že prostředí by mohlo být podobné pozemskému před vznikem života, kdy atmosféra ještě postrádala kyslík.



Obr. 5. V blízké infračervené oblasti ve vlnových délkách 0,85 až 1,05  $\mu\text{m}$  je možné proniknout neprůhlednou vrstvou atmosféry Saturnova měsíce Titan a pozorovat útvary povrchu. (Foto: NASA.)

Povrchová teplota Titanu je však asi  $-178^\circ\text{C}$ . Za této teploty a tlaku tedy metan pravděpodobně není kapalný, ale mohla by tam být jezera etanu s rozpuštěným metanem. Metan se fotochemickými procesy mění na etan, acetylen, etylen a konečně na stavební bloky aminokyselin, např.  $-\text{NH}_2$ . Sonda Cassini, která byla vypuštěna 5. října 1997, dosáhla v červnu 2004 oblasti Saturna. Koncem téhož roku má její pouzdro Huygens sestoupit Titanovou atmosférou na povrch. Sonda Cassini se má

---

Ing. PAVEL PŘÍHODA (1934), Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Královská obora 233, 170 21 Praha 7.

přiblížit k Titanu asi třicetkrát a provádět mapování povrchu radarem. Zatím tam známe jen několik velkých útvarů, které zjistil HST v blízké infračervené oblasti ve vlnových délkách 0,85 až 1,05 mikronu, kde je Titanův atmosférický zákal dostatečně průhledný.

**Mimas** je nejbližší z velkých měsíců Saturna, ale ve srovnání s Galileovými satelity je to drobné těleso o průměru 397 km. Přesto má tvar blízký kouli. Velká poloosa jeho dráhy měří 185 600 km, oběžná doba je 0,942 422 dne. Průměrná hustota je pouhých  $1165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Také povrchová teplota je nízká:  $-200^\circ\text{C}$ . Těleso je samozřejmě ledové, ale led je zchlazen natolik, že je pevný jako kámen a nestéká. Všechny povrchové útvary jsou proto zachovány z dob, kdy měsíc vznikal. Jsou to ovšem impaktní krátery; největší je kráter Herschel o průměru 130 km, s centrálním vrcholkem výšky 6 km.

**Enceladus** má především rekordní albedo téměř rovné 1, povrch snad pokrývá tenká ledová krystalická kůra, v podstatě jinovatka. Jde o těleso průměru 500 km s velkou poloosou dráhy 238 100 km, oběžnou dobou 1,370 218 dne a hustotou  $1603 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Jeho povrch má méně nerovností než většina okolních měsíců. Krátery nejsou větší než 35 km, některé plochy jsou bez kráterů — jsou to různé praskliny a planiny. Zvrásněný terén je místy ostře ohraničen od oblasti připomínající tečení ledu. Měsíc je zřejmě zahříván slapovými silami Saturna a jeho dráha je rušena sousedními měsíci Tethys a Dione.

**Tethys** je asi dvakrát větší než dva předchozí satelity: 1060 km. Jeho hustota je nízká, jen  $991 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , stejně tak teplota  $-187^\circ\text{C}$ . Kolem Saturna obíhá ve vzdálenosti 294 700 km za dobu 1,887 802 dne. Podobně jako Dione a Rhea má i Tethys množství impaktních kráterů v ledu, ale také zlomy. Najdeme tu oblasti více a jinde méně pokryté krátery, pánev po impaktu o průměru 400 km jménem Odysseus a obrovské údolí Ithaca Chasma, široké až 100 km, hluboké 3 až 5 km a táhnoucí se přes dvě třetiny obvodu. Zejména ono je svědectvím vnitřní aktivity — snad někdejší, možná i současné. Vizualní geometrické albedo má také vysoké: 0,8. V okolí pólů pozorujeme světlejší ledové usazeniny, možná obdobu jinovatky. Názvosloví na měsíci vychází z Homérovy Odyssey.



Obr. 6. Ledový povrch Saturnova měsíce Dione ukazuje starý terén hustě pokrytý krátery. Nerovnosti se výborně zachovaly, protože led byl vždy hluboce zmrazen. (Foto: NASA.)

**Dione** představuje těleso podobné předchozímu satelitu. Má průměr 1120 km, průměrnou hustotu  $1490 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , velkou poloosu dráhy 377 400 km, oběžnou dobu i dobu rotace 2,736 915 dne. Terén hustě pokrývají krátery, řada z nich je větších než 100 km;

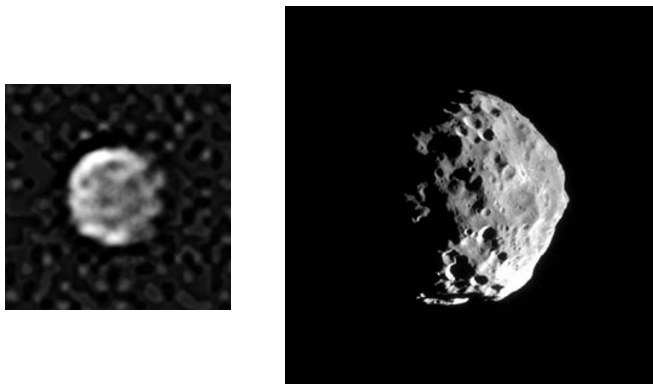
výrazný kráter o průměru 150 km se jmenuje Aeneas. Překvapivě zjišťujeme poněkud více kráterů na zadní polokouli. E. M. Shoemaker a R. F. Wolfe soudí, že větší počet kráterů vznikl na přední polokouli v době těžkého bombardování, když už měl satelit vázanou rotaci. Jakýkoliv pozdější velký impakt mohl tento celkem nevelký měsíc pootočit do opačné orientace a k podobné situaci mohlo dokonce dojít několikrát. Také albedo, průměrně 0,6, ubývá směrem k zadní polokouli, zřejmě proto, že je přední polokoule více zaprášena meteorickým prachem. Podobně jako na Tethys pozorujeme i na Dione brázdy — Palatine Linea, Palatine Chasma, Latium Chasma aj. Dione má zřejmě kamenné jádro s hmotností asi třetiny celého tělesa, ve zbylém objemu převládá vodní led. Nomenklatura se vztahuje k Vergiliovu eposu Aeneis.

**Rhea** se opět nijak významně neliší od předchozích objektů. Má průměr 1528 km, průměrnou hustotu  $1240 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , velkou poloosu dráhy 527 100 km a dobu oběhu 4,517 500 dne. Povrch je přeplněn krátery a stejně jako na Dione zde nacházíme nestejnorodosti: v jedné oblasti se shledáváme s krátery většími než 40 km, v druhé s menšími. Krátery se vzájemně překrývají podobně jako v některých oblastech „pevnin“ zemského Měsíce. Názvosloví čerpá z nejrůznějších bájí o stvoření světa. Albedo je stejné jako u Dione a shodná je také vnitřní stavba.

**Hyperion** obíhá za drahou Titanu. Při své velikosti 410/260/220 km je výjimečný svým nepravidelným tvarem a chaotickou rotací. Vinou nepravidelného tvaru není možné definovat rotační osu, rotační perioda není konstantní a mění se oběh po oběhu. Oběžná doba je 21,276 61 dnů. Nepravidelný tvar a zřetelné projevy impaktů tvoří ukázkou nejstaršího povrchu v Saturnově soustavě. Jde v podstatě o ledové těleso, jak tomu nasvědčuje průměrná hustota  $1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Japetus** vyniká rozdílnými albedy polokoulí. Přední polokoule je temná, s albedem 0,05, zadní polokoule mnohem jasnější (albedo 0,6). Temná oblast zvaná Cassini Regio je hladká, bez kráterů, s jasnými valy. Na okraji temné polokoule jsou dna některých kráterů zaplavena temným materiálem, což by mohlo naznačovat jeho endogenní původ. Protože jsme již dál od Saturna, mohlo by jít o téžavé látky, například metan apod. Japetus má průměr 1436 km, střední hustotu  $1253 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a obíhá kolem planety 3 560 800 km daleko, s periodou 79,330 18 dne.

**Phoebe** býval nejvzdálenějším známým měsícem Saturna. Objevil ho W. H. Pickering v roce 1898. Satelit obíhá po dráze s velkou poloosou 12 944 300 km a s oběžnou periodou 548,21 dnů. Zajímavé je, že pozorujeme jeho rotaci o periodě 9,4 hodiny. Velikostí jde o nevelké těleso s průměrem 220 km. Hustota měsíce má průměrnou hodnotu  $1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pozoruhodný je současný předpoklad, že jde o těleso pocházející z Kuiperova pásu, oblasti, o které podrobněji pojednáváme v odstavcích o Neptunově měsíci Triton. Je-li tato představa pravdivá, pak dráha dnešního měsíce byla původně heliocentrická a zřejmě se postupně měnila vlivem poruch okolních těles, především se zmenšovala vzdálenost tělesa od Slunce, až došlo k zachycení Saturnem. Nasvědčuje tomu i značná excentricita dráhy 0,1644 a zejména zpětný pohyb; sklon dráhy je totiž  $174,751^\circ$ .

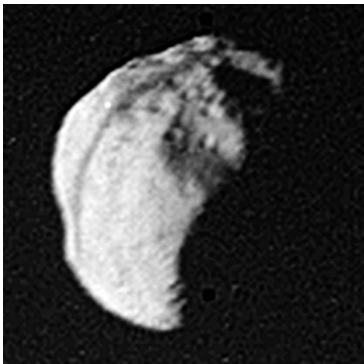


Obr. 7. Vlevo: Saturnův měsíc Phoebe fotografovaný sondou Voyager 2. Vpravo: Povrch měsíce Phoebe, fotografovaný sondou Cassini. Na záběrech je dobře vidět, že satelit má dosti nepravidelný tvar a je pokryt nerovnostmi, většinou krátery. (Foto: NASA.)

### Saturnovy blízké měsíce

Jde většinou o objekty, které jsou v určitém vztahu k rozsáhlému systému Saturnových prstenů. Nejbližší známý je **Pan**, 133 600 km od středu planety, s oběžnou dobou 0,5750 dne a průměrem jen 20 km. Pan obíhá uvnitř Saturnova prstenu A v oblasti tzv. Enckeho dělení a hraje roli tzv. pastýřského měsíce (hlídacího, shepherd moon). Prsten sestává z množství minisatelitů o velikosti desítek m až desítek cm. Měsíček vycytává částice prstenů a udržuje tak mezeru v prstenech — zmíněné Enckeho dělení. Okraj prstenu A zřejmě udržuje další z pastýřských satelitů, **Atlas**, s velikostí 40/30 km a albedem 0,9. Jen o málo vzdálenější dráhu 139 400 km má **Prometheus**, o rozměrech 145/85/62 km a o nízké hustotě srovnatelné se Saturnovou:  $630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Prometheus je další pastýřský satelit, který tentokrát omezuje vnitřní rozsah úzkého prstenu F, ležícího vně prstenu A. I na tomto pórovitém ledovém tělese pozorujeme impaktní krátery, brázdy a údolí. Z vnější strany „hlídá“ prsten F měsíček **Pandora** o velikosti 114/84/62 km, na dráze s velkou poloosou 141 700 km, s albedem 0,5 a povrchem rovněž zaplněným impaktními krátery. Má stejně nízkou hustotu jako Prometheus.

Dalším svérázným případem z hlediska nebeské mechaniky je dvojice měsíčků **Epimetheus** a **Janus**. Oba obíhají po velmi blízkých drahách vzdálených od středu planety 151 400 km a 151 500 km. Blížší z měsíčků, k roku 2004 Epimetheus, má podle III. Keplerova zákona kratší oběžnou dobu a za 4 roky dohoní Januse, kterého svou gravitační silou zpomalí, čímž se podle principu akce a reakce sám zrychlí. Janus pak přejde na nižší dráhu a Epimetheus na vyšší. Je téměř jisté, že původně na této dráze obíhalo jediné těleso, které se rozdělilo na dvě. Muselo k tomu dojít v rané etapě tvorby Saturnovy soustavy satelitů. Epimetheus má velikost 104/108/98 km, Janus 196/192/150 km. Také tyto satelity jsou pokryty změnami impaktních kráterů. Na Epimethu se podařilo zaznamenat stín prstenu F vržený na povrch měsíčku v podobě úzké temné čárky.



Obr. 8. Saturnův měsíček Epimetheus ukazuje na svém nerovném povrchu vržený úzký stín Saturnova prstenu F. (Foto: NASA.)

V Saturnových prstenech je široká mezera, která odděluje prsten A od prstenu B, tzv. Cassiniho dělení. Samozřejmě by nás mohlo napadnout, že ji také vytváří nějaký pastýřský měsíček, který podobně jako Pan udržuje Enckeho dělení. Zde je však situace odlišná. Cassiniho dělení je důsledkem gravitačního působení vzdáleného satelitu Mimas a leží právě v oblasti, kde jsou poměry oběžných dob Mimasu a vnitřního okraje Cassiniho dělení 2 : 1. Částice prstenu zde vlivem Mimasu přešly na eliptické dráhy, což vedlo ke srážkám a přechodu částic do jiných částí prstenu.

V oblasti velkých měsíců Saturna obíhají v dráze Tethys dva malé satelity: **Telesto** je v libračním centru  $L_4$ , tedy  $60^\circ$  před Tethys, a o stejný úhel „za“ tímto měsícem, v libračním centru  $L_5$ , obíhá **Calypso**. Podobný případ je od roku 1906 znám u tzv. Trojanů, planetek, které se pohybují blízko těchto libračních center na dráze Jupitera kolem Slunce. Oba „trojské“ satelity Saturna našel B. Smith roku 1981 na snímcích z roku 1980. Podobným případem je měsíček **Helene** v centru  $L_4$  na dráze Dione.

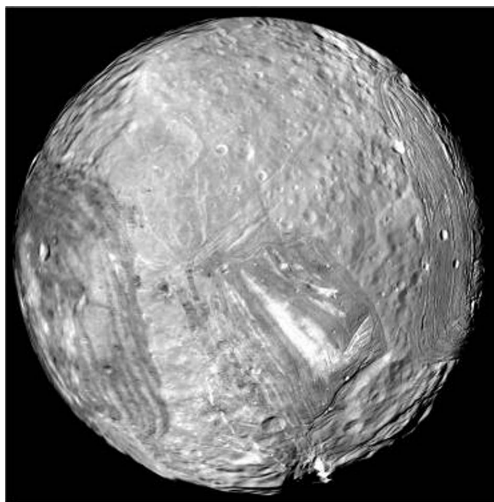
### Saturnovy vzdálené měsíce

Shledáme se tu opět většinou s drobnými měsíčky podobně jako u Jupitera. Jejich pohyb probíhá po drahách s velkými excentricitami. Zatímco u Jupitera všechny známé vnější měsíčky mají retrográdní pohyb, u Saturna shledáváme polovinu na přímých drahách, polovinu na zpětných. Nejvzdálenější dnes známé mají poloosu dráhy větší než 20 milionů km. K 11. květnu 2004 bylo těchto tělísek známo 13. (Zpětný neboli retrográdní je pohyb v záporném smyslu, tedy takový, kdy těleso při pohledu od severního nebeského pólu planety obíhá ve směru otáčení hodinových ručiček.)

### Velké Uranovy měsíce

Slovo „velké“ berme jen relativně k ostatním měsícům Uranovy soustavy. Nejbližší z nich je **Miranda**, objevená až roku 1948 G. Kuiperem, která je z velkých měsíců svým průměrem 472 km také nejmenší. Má kulový tvar, střední hustotu  $1201 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , velkou poloosu dráhy 129 900 km a oběžnou dobu 1,413 479 dne. Její dráha má malou

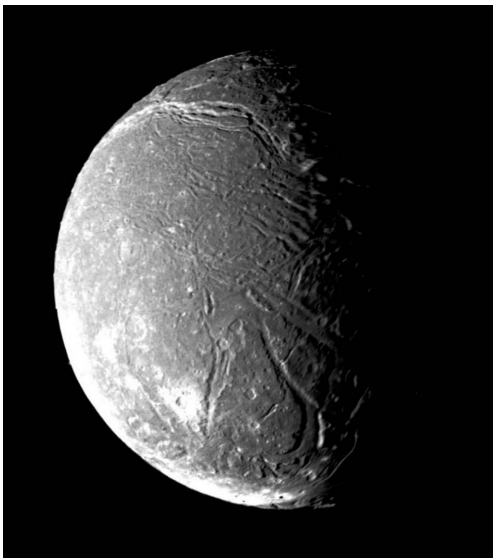
excentricitu 0,0013 a sklon  $4,338^\circ$ . Albedo je průměrné, 0,32, a povrchová teplota  $-187^\circ\text{C}$ . To je hodnota stejná jako u Saturnova měsíce Tethys a je to trochu s podivem, protože jsme už v oblasti zhruba dvakrát vzdálenější od Slunce. Povrch měsíce je zcela specifický a podobný jinde nenacházíme. Pozorujeme tu směsici starých i mladých terénů, které jsou vůči sobě ostře ohraničeny. Zlomy a praskliny mají rozmanitou tvářnost. Mladší jsou oválné soustavy brázd — „volská oka“ a brázdy uspořádané do podoby V („krokvice“). Typické jsou ohromné výškové rozdíly až 20 km. Novější terén vznikl poruchami kůry a eruptivní aktivitou, jejichž příčina je dosud nejasná: působily tu vnitřní nebo vnější síly? Předpokládá se doplňkový tepelný zdroj, který by mohl pocházet od slapového zahřívání planetou a mohl by způsobit proudy ledového materiálu za nízkých teplot a zvedání lehčího materiálu v ohraničených oblastech. Starší oblasti jsou bohatě pokryty impaktními krátery, což je jev u satelitů tak obecný, že nás nijak nepřekvapuje. Vzhledem k pestrosti povrchu se dokonce objevila hypotéza, že byl měsíc nárazem jiného tělesa rozbit a jeho úlomky se poté na oběžné dráze znovu spojily. Podle jiné varianty došlo k takové události dokonce několikrát.



Obr. 9. Také nevelká, ale přece už kulatá Uranova Miranda předvádí pestrý povrch nejen s krátery, ale i se systémy údolí uspořádaných do podoby V („krokvice“), nebo do tvaru oválu („volská oka“). (Foto: NASA.)

**Ariel** obíhá za Mirandou po dráze s velkou poloosou 190 900 km za 2,520 379 dne a má průměr 1158 km. Hustota je průměrná,  $1665 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Na povrchu pozorujeme — jak jinak! — impaktní krátery, ale také mohutná riftová údolí, jejichž dna se jeví rovinatá a nejsou zřejmě zaplněna ledem, který je za nízkých teplot v této oblasti sluneční soustavy tvrdý jako ocel. Stopy tečení materiálu v těchto údolích se dají nejspíše připsat čpavku, metanu nebo dokonce oxidu uhelnatému. Nacházíme zde i rozsáhlé hladké oblasti. Průměry kráterů jsou většinou nevelké, 5 až 10 km.

**Umbriel** je nejtemnější z velkých satelitů Uranu, vizuální geometrické albedo je 0,21, hustota  $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , průměr 1169 km, tedy téměř shodný s Arielem. Kolem Uranu obíhá v periodě 4,144 177 dne a ve vzdálenosti 266 000 km. Povrch je vcelku rovnoměrně pokryt množstvím starých kráterů. Dna několika kráterů jsou jasná a jeví luminiscenci. Také vcelku nenápadné a pravděpodobně staré temnější oblasti jsou



Obr. 10. Na jednom z pěti velkých Uranových měsíců, Arielu, vidíme ledovou krajinu pokrytou krátery, ale také riftová údolí, jejichž dna zřejmě netvoří vodní led, ale čpavek, metan nebo oxid uhelnatý, a dokládají vnitřní aktivitu. (Foto: NASA.)

důsledkem vnitřních sil a tedy projevem ledového vulkanismu pozorovaného i na ostatních velkých Uranových měsících.

**Titania** je se svým průměrem 1578 km největším Uranovým měsícem s velkou poloosou dráhy 436 300 km a oběžnou dobou 8,705 872 dne. Má hustotu  $1715 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a albedo 0,27. Kromě četných menších kráterů zde podobně jako na Arielu nacházíme dlouhé brázdy; nejdelší pozorovaná má délku 1600 km a svědčí o vnitřních silách. Měsíc pokrývá také několik velkých impaktních pánví.

**Oberon** je nejvzdálenější velký satelit Uranu. Krouží po dráze s velkou poloosou 583 500 km s oběžnou periodou 13,463 24 dne a má i při své vzdálenosti vázanou rotaci jako ostatní velké měsíce planety. Dráhu má téměř přesně kružnicovou, s výstředností 0,0014 a sklonem  $0,068^\circ$  vzhledem k rovníku Uranu. Jeho hustota je  $1630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , rovníkový průměr 761 km, albedo 0,23. Jistě nás nepřekvapí, že je měsíc hustě pokryt starými impaktními krátery, z nichž několik je velkých, a že má ledový povrch. Na okraji kotouče byl zaznamenán vrcholek s výškou 6 km. Na tělese však nepozorujeme projevy vnitřní aktivity. Podobně jako na Jupiterově měsíci Kallisto nacházíme i na Oberonu jasné paprsky vyvrženin, rozbíhající se od některých kráterů.

### Uranovy blízké měsíce

Jde o skupinku skromných těles pojmenovaných podle postav Shakespearových her. V pořadí vzdáleností jsou to: **Cordelia**, **Ophelia**, **Bianca**, **Cressida**, **Desdemona**, **Juliet**, **Portia**, **Rosalind**, **Belinda** a **Puck**. Cordelia je nejbližší známý Uranův měsíček, s velkou poloosou dráhy jen 49 800 km. Krouží tedy pouhých 24 400 km nad Uranovou oblačnou vrstvou, s oběžnou dobou jen 0,335 033 dne, tedy jen málo přes 8 hodin. Je to nevelký objekt o průměru 40 km. Jde o pastýřský satelit, který ohraničuje vnitřní okraj



největšího (ale jinak úzkého) prstence označeného  $\varepsilon$  (epsílon). Ophelia o velikosti asi 43 km jako další pastýřský satelit ohraničuje vnější okraj téhož prstence. Měsíček Juliet (titulní postava ze hry Romeo a Julie) má relativně větší průměr, asi 94 km, stejně tak Portia s průměrem 135 km. Ještě o něco větší je Puck, pyšní se průměrem 162 km. Z celé skupinky má největší poloosu své dráhy, 86 000 km, a oběžnou dobu 0,761 832 dne. Na jeho povrchu dokonce vidíme určité nerovnosti včetně jednoho výrazného kráteru.

## Uranovy vzdálené měsíce

Také v případě těchto měsíčků je znát, že soustava Uranových satelitů je poněkud skromnější. Podle vzdálenosti jsou to **S/2001 U3** s velkou poloosou dráhy přes 4 miliony km, dále **Caliban**, **Stephano**, **Trinculo**, **Sycorax**, **S/2003 U3**, **Prospero**, **Setebos** a konečně **S/2001 U2** s velkou poloosou téměř 20 901 000 km. Kromě S/2003 U3 s přímým pohybem mají ostatní měsíčky zpětný pohyb a všechny mají dráhu s velkou excentricitou. Největší je Sycorax: asi 190 km.

## Triton — pozoruhodný Neptunův satelit

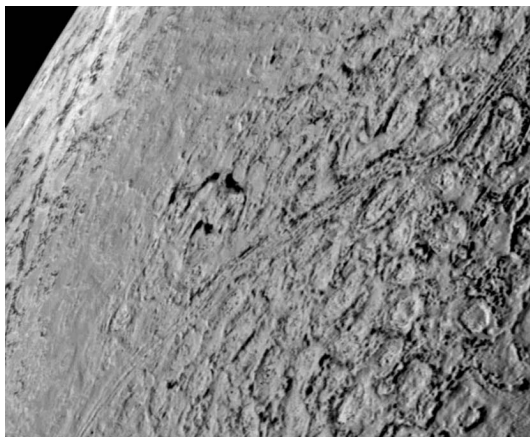
Jde o největší měsíc Neptunův a vlastně jediný jeho opravdu velký satelit, s průměrem 2707 km. Objevil ho W. Lassell v roce 1846, tři týdny po objevu planety. Triton obíhá kolem Neptuna po dráze s velkou poloosou 354 800 km, tedy srovnatelnou s drahou Měsíce. Jeho dráha má sice téměř nulovou excentricitu, výjimečný je však její sklon. Ten má hodnotu  $156,834^\circ$ . Triton tedy jako jediný satelit této velikosti obíhá kolem planety ve zpětném smyslu. Oběžná doba je 5,876 85 dnů a rotace je kupodivu opět vázaná. Triton proto také rotuje v opačném smyslu než Neptun. Hustota  $2061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ukazuje na větší obsah hornin než u ledových měsíců Saturna a Uranu. Nejpodrobnější zobrazení satelitu poskytla sonda Voyager 2, která kolem Tritonu prolétala 25. srpna 1989.

Ve vzdálenosti, z níž se Slunce již jeví jako bodový objekt o průměru jedné úhlové minuty, musíme počítat s nízkými teplotami těles, která nemají vnitřní zásoby energie. Nepřekvapí nás proto, že Triton je nejchladnějším známým tělesem. Povrchová teplota má hodnotu pouhých  $-235^\circ\text{C}$ , tedy asi 38 K. Vodní led dosahuje při této teplotě pevnosti oceli. Za této situace bychom očekávali, že se setkáme se zmrzlým tělesem, utkvělým v naprosté nehybnosti. Pozorovaná skutečnost je však zcela jiná, jsou tu přece i jiné látky! Například dusík se tam vyskytuje ve všech třech skupenstvích a přechod z jednoho skupenství do druhého je doprovázen pozoruhodnými efekty.

Na Tritonu pozorujeme dva hlavní typy povrchu:

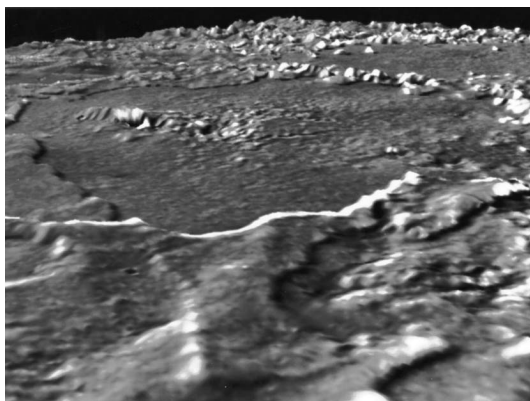
1. Rozsáhlé oblasti severní polokoule pokrývá temnější terén, jehož obdobu neznáme na žádném z těles sluneční soustavy. Velkou část tu zaplňuje oblast s nevelkými depresiemi téměř shodné velikosti, ohraničenými jakýmsi valem. V žádném případě ale nejde o impaktní krátery; deprese jsou si navzájem podobné, jsou až příliš pravidelné

rozmístěny a jejich podoba je rozhodně odlišná od starých a později erodovaných impaktních kráterů. Tato krajina se občas označuje jako „kůra ananasového melounu“ a má skutečně takový vzhled. Každý z detailů mohl vzniknout lokálním tavením a poklesem ledového povrchu. Lépe než popis zobrazí tuto krajinu ilustrace.



Obr. 11. Krajina „kůry ananasového melounu“ na Neptunově měsíci Triton. (Foto: NASA.)

Nacházíme zde také velké deprese podobné extrémně plochým kalderám, ovšem bez valů pro kaldery typických. Připouští se však, že by mohlo jít o pozůstatky starých impaktních pánví. Podoba, kterou pozorujeme dnes, vznikla pravděpodobně výtokem ledových hmot o velmi nízké viskozitě. Mohlo jít o vodní led, ale možná i o směs zmrzlé vody a čpavku. Jedna z depresí je při průměru 200 km ohraničena oblastí vyšší jen o 200 m. Jiná deprese má méně pravidelný obvod a asi trojnásobnou plochu. Jinde pozorujeme plochou krajinu s nevelkým počtem malých, pravděpodobně impaktních a mladých kráterů.



Obr. 12. Útvary podobné kalderám na Tritonu jsou projevem ledového vulkanismu. (Foto: NASA.)

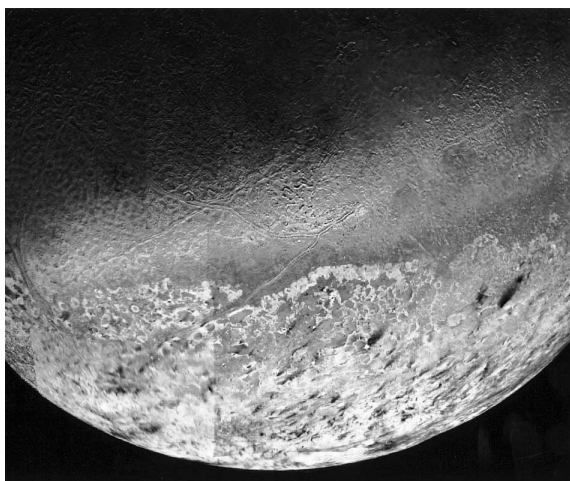
Dalším typem útvarů je několik dlouhých brázd, z nichž některé přecházejí ze severní polokoule na jižní.

2. Jižní polokoule je prakticky celá pokryta rozsáhlou světlou polární čepičkou, která se však v mnohém liší od podobně nazvaných oblastí na Marsu: nejen svým větším

rozsahem, ale i materiálem. Zatímco na Marsu jde o krajiny pokryté vodním ledem a zmrzlým oxidem uhličitým, tvoří Tritonovu zamrzlou oblast pravděpodobně vrstvy pevného dusíku, usazené v průběhu uplynulé jižní zimy. Nyní se zmrzlé usazeniny zvolna vypařují. Pod vrstvou zmrzlého dusíku jsou zřetelně patrné nerovnosti, včetně několika nevelkých impaktních kráterů.

Nejpozoruhodnějším jevem jsou činné gejzíry. Netryská z nich voda, ale plynný a tekutý dusík a snad i metan. Vystupující proud strhává ledové krystaly a zřejmě i prachové částice. Gejzíry dosahují výšek až 8 km a vyvržený materiál je unášen větrem až do vzdálenosti 140 km, kde na povrchu vytvoří temný pruh kontrastující se světlým povrchem polární čepičky. Není k tomu nutné přímo předpokládat, že jde o vyvržený temný materiál; je však teplejší a zřejmě po dopadu na povrch způsobí sublimaci zmrzlých usazenin. Počet pruhů materiálu usazeného z gejzírů jde do desítek a čtyři byly právě aktivní v době fotografování. Kromě vodních gejzírů na Zemi neznáme jinde podobný projev aktivity, ale ty tritonovské mnohonásobně překonávají velikostí gejzíry pozemské.

Severní okraj polární čepičky je velmi nerovný, lemovaný temnější oblastí, a je zřetelné, že čepička zvolna ustupuje. V roce 1995 fotografoval Tritona Hubblův kosmický dalekohled, ale vcelku bez zobrazení detailů.



Obr. 13. Polární čepička Tritonu (na spodní části záběru) vykazuje temné pruhy — stopy materiálu usazeného z mohutných gejzírů. (Foto: NASA.)

Triton má velmi řídkou atmosféru o povrchovém tlaku 1,5 Pa, tedy 0,000015 tlaku zemské atmosféry na úrovni mořské hladiny. Atmosféra vytváří zákal do výšky 13 km s řídkými oblaky a stopy po gejzírech ukazují na její proudění. Hlavní složkou tohoto ovzduší je dusík, nepatrnou příměs tvoří metan. Malé pevné částice o velikosti 0,1  $\mu\text{m}$  vytvářejí zřetelný atmosférický zákal. Tyto částice vznikají působením ultrafialového záření a částic z Neptunovy magnetosféry na atmosférický metan. Jde o tholin, který je pro Tritonovu atmosféru zcela specifický a způsobuje její červenohnědý smog.

Nejen atmosféra, ale také povrch ukazuje zajímavé barevné odstíny. Polární čepička má lehce narůžovělý nádech. Lem polární čepičky — tedy oblast, kde se ledové usazeniny už vypařily — jeví skořicové zabarvení. Sousedící pás na severní polokouli

je namodralý a krajina severní polokoule nejdále od čepičky je načervenalá. Tam se pravděpodobně tvoří tholin i na povrchu, podobným procesem jako v atmosféře. Svědčí to o povrchovém výskytu metanu.

Při popisu všech zvláštností tohoto pozoruhodného měsíce můžeme jen litovat, že ho známe jen z menší části, vlastně zhruba polovinu. Část polokoule přivrácená k prolétajícímu Voyageru 2 byla totiž ponořena do stínu. A Hubbleův kosmický dalekohled bohužel v tomto směru nemůže soutěžit s Voyagerem, který zachytil většinu podrobností. Povrch Tritonu se jistě mění, ale nemáme zatím vyhlídku detailní studium zopakovat.

Další zajímavou okolností je střídání ročních dob na Tritonu. Protože jeho rotace je vázaná, otočí se Triton jednou za periodu svého oběhu. Můžeme proto definovat jeho rotační osu. Víme, že severní nebeský pól Tritonu leží kupodivu poblíž severního nebeského pólu Země. Pro standardní epochu 2000,0 má tuto polohu: rektascenze =  $2^{\text{h}} 25^{\text{min}} 38^{\text{s}}$ ; deklinace =  $+83^{\circ} 56'$ , je tedy v souhvězdí Cefeia nedaleko Polárky. (Pro úplnost dodejme, že za severní považujeme podle dohody vždy ten pól, který leží na severní straně Laplaceovy neproměnné roviny sluneční soustavy, bez ohledu na smysl rotace). Na Tritonu tedy nastává situace dosti podobná střídání ročních období na Zemi, kdy se střídavě ke Slunci natáčí severní a po půlroce jižní polokoule. Ovšem s tím nezanedbatelným rozdílem, že periodou není 1 rok, ale 164,79 roků, což je oběžná doba Neptuna. V současnosti nastoupilo na jižní polokouli léto a dopadá tam stále více slunečního světla. Jižní polární čepička, tak rozsáhlá z uplynulé zimy, se postupně vypařuje. Její rozsah se od roku 1989 určitě zmenšil. Bylo by také jistě zajímavé pozorovat severní polární čepičku, kterou jsme vůbec nespatriili. Můžeme důvodně předpokládat, že poroste od severních polárních oblastí, časem pravděpodobně až k rovníku.

Poněkud větší průměrná hustota, povrchová teplota a zachovalé povrchové útvary Tritonu naznačují, že jeho kůra je poměrně silná, asi 175 km, a tvořená tvrdým i pevným materiálem, kterým je při nízké teplotě vodní led. Ve větší hloubce za vyšší teploty a tlaku se předpokládá voda v kapalné fázi ve vrstvě o mocnosti zhruba 150 km. Pode dnem tohoto oceánu již začíná rozsáhlá oblast z hornin, bez zřetelně odlišeného jádra.

Pozorovaná hustota a především retrográdní dráha, u tak velkých satelitů jinde neznámá, to jsou skutečnosti, které vedou řadu odborníků k předpokladu, že nejde o původní Neptunův měsíc, ale že byl zachycen z heliocentrické dráhy, z oblasti Kuiperova pásu (viz dále), možná současně s Nereidou. Je totiž vhodné upozornit, že Neptun se pohybuje blízko vnitřního okraje oblasti, kde obíhá řada menších těles. Této skutečnosti si blíže všimneme, i s ohledem na nejbližší známý satelit, který se jmenuje Charon a obíhá kolem Pluta.

## Blízké Neptunovy měsíčky

Všechny tyto objekty mají pochopitelně nepravidelný tvar. Nejbližším měsíčkem je **Naiad** o velikosti 66 km, která obíhá po dráze s velkou poloosou 48 200 km, tedy pouze 23 400 km nad Neptunovou oblačnou vrstvou. Spolu s měsíčky **Thalassa** a **Despina**

ohraničuje Naiad vnitřní okraj prstenu 1989N4R, který je však také lemován uzoučkým prstýnkem 1989N2R. Na vnitřním okraji úzkého prstýnku 1989N1R, nejvíce vzdáleném od Neptuna, je měsíček **Galatea**, který zřejmě také plní funkci pastýřského satelitu. Dále následují **Larissa** a **Proteus**, které už obíhají mimo prstény. Z Neptunových blízkých měsíčků je největší Proteus o velikosti 420 km, který má sice zaoblený tvar, ale na první pohled není kulovitý. Proteus má z těchto měsíčků také největší vzdálenost od planety, a to 117 600 km.

## Vzdálené Neptunovy měsíce

Jmenujme zejména **Nereid**, satelit nepravidelného tvaru s největším rozměrem 340 km. Krouží po dráze s velkou poloosou 5 513 400 km, má sklon  $7,232^\circ$ , především však nezvykle protáhlou dráhu s excentricitou 0,7512. O jejím možném podílu na zachycení Tritonu jsme se už zmínili.

Další satelity jsou mnohem dál. Za Nereid obíhá **S/2002 N1** s velkou poloosou dráhy 15 686 000 km. Ke dni 11. května 2004 bylo těchto těles známo pět a neměla ještě přidělena svá jména. Největší ze skupinky, **S/2002 N4**, má průměr asi 60 km a obíhá po dráze s velkou poloosou 46 570 000 km, s velkou výstředností 0,5273 a ovšem zpětně — má totiž sklon dráhy  $132,470^\circ$ . Nejvzdálenější z pětice je **S/2003 N1**; má totiž velkou poloosu dráhy 46 738 000 km, které ovšem odpovídá dlouhá oběžná doba 9136,11 dnů, tedy přes 25 roků.

## Tělesa Kuiperova pásu

Existenci této oblasti za drahou Neptuna předpověděl G. Kuiper (1951) spolu s K. E. Edgeworthem (1943). Označuje se proto jako Edgeworthův-Kuiperův disk, nyní častěji Kuiperův pás. První těleso zde bylo objeveno v roce 1992. K roku 1997 bylo známo 60 těchto objektů, k 29. únoru 2000 již 243 a jejich počet stále roste. Označení, případně jména a efemeridy KBO (Kuiper Belt Objects) snadno vyhledáme na internetu. V disku se předpokládá na 70 000 těchto objektů. Často jsou označovány jako planety. Musíme si však uvědomit, že jde o tělesa jiného druhu, než jsou planety tzv. hlavního pásu, které nacházíme zejména mezi drahami Marsu a Jupitera. Tělesa Kuiperova pásu obsahují v pevném skupenství řadu látek, které se v blízkosti Slunce projevují jako plyny, například dusík. Pokud se těleso dostane blíž ke Slunci, tyto těkavé látky se vypařují a objekt se chová jako kometární jádro. Taková tělesa řadíme ke Kentaurům — např. Chiron je zařazen jak k planetkám, tak i ke kometám. Obíhají většinou uvnitř Neptunovy dráhy, ale nepřibližují se tak blízko ke Slunci jako klasické komety.

Vedle typických objektů Kuiperova pásu ještě jmenujme tzv. plutina, což jsou tělesa, která obíhají po heliocentrických drahách v rezonanci 3 : 2 s Neptunem. K těmto četným tělesům patří i Pluto, objevený jako první z nich. Právě z Kuiperova pásu zřejmě pochází i Triton.

## Charon, poslední měsíc naší přehlídky

Závěrem se dostáváme k planetě Pluto, kterou řadíme k planetám spíše ze setrvačnosti, a k jedinému jejímu satelitu, jenž není typickým satelitem; je prostě jedním z těles Kuiperova pásu, který tvoří dvojici s Plutem. Charon má průměr 1186 km, tedy plných 52 % průměru Pluta, a obíhá kolem něho ve vzdálenosti 19 410 km s periodou 6,387 245 dne. Má však hmotnost jen 15 % hmotnosti Pluta. Slapové síly dvojice postupně vedly k oboustranně vázané rotaci. To znamená, že každé z obou těles obrací ke druhému jen jednu svou polokouli. Dráha měsíce není ovšem zcela přesně kružnicová, má excentricitu 0,0002 a sklon zhruba k rovině kolmé na směr zorného paprsku je  $99,089^\circ$ . To je však dosti nenázorné, uveďme tedy souřadnice severního pólu na nebeské sféře: rektascenze =  $20^{\text{h}} 52^{\text{min}}$ ; deklinace  $+6,59^\circ$ . Rotační osa Charona tedy směřuje do souhvězdí Delfína.

Charona objevil J. W. Christy na snímku, který byl pořízen 2. července 1978. Nedlouho potom během osmdesátých let 20. století došlo k příznivé situaci, kdy pro pozorovatele na Zemi přecházel Charon střídavě přes kotouč Pluta a docházelo také k zákrytům Charona Plutem. Díky tomu bylo možno poměrně přesně určit nejen velikost Charona, ale i Pluta. Přesto různí autoři udávají pro průměr Pluta hodnoty 2274 km, ale také až 2320 km. Podařilo se rovněž určit hmotnosti, které zůstávaly dlouho neznámé; je to  $1,27 \cdot 10^{22}$  kg pro Pluta,  $1,90 \cdot 10^{21}$  pro Charona. Průměrná hustota Pluta pak vychází na  $2050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , Charona  $1853 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Podrobnosti na povrchu obou těles vlastně dnes neznáme, pozorujeme pouze několik neurčitých skvrn, jejichž pravá podstata zůstává nejasná. Do této oblasti neletěla totiž dosud žádná sonda, takže útvary známe jen z pozorování Hubblova kosmického dalekohledu a z fotometrických měření. Je však velmi pravděpodobné, že první sonda, která Pluta detailně zobrazí, ukáže svět podobný Tritonu. Dá se na to usuzovat ze změn jasných skvrn, objevení řídké atmosféry v době, kdy se Pluto pohyboval u perihelia své dráhy, a z dalších pozorování.

Charonův povrch je zřetelně odlišný od povrchu Pluta. Zdá se, že je pokrytý spíše vodním ledem než zmrzlým dusíkem. V každém případě jde o zmrzlé látky, proto má Charon dosti vysoké albedo 0,5. Z průměrné hustoty tělesa vyplývá vnitřní stavba; satelit zřejmě obsahuje málo hornin. Rozdílné hustoty znamenají, že každé z těles vzniklo nezávisle akrecí a že teprve později vytvořily dvojici. Podobných dvojic, třebaže menších, známe v Kuiperově pásu již několik.

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

- [1] BURŠA, M.: *Země ve sluneční soustavě*. VTOPÚ, Dobruška 2000.
- [2] KLECZEK J.: *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha 2002.
- [3] LACKOVIČ, M.: *Urán má 27 mesiacov, pribudli dva*. *Kozmos 34* (6/2003), 30–31.
- [4] STERN, A., MITTON, J.: *Pluto and Charon*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1998.
- [5] [http://ssd.jpl.nasa.gov/sat\\_props.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/sat_props.html)
- [6] [http://ssd.jpl.nasa.gov/sat\\_elem.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/sat_elem.html)
- [7] <http://planetarynames.wr.usgs.gov/append7.html>
- [8] [http://ssd.jpl.nasa.gov/sat\\_discovery.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/sat_discovery.html)
- [9] <http://planetescapes.com>