

Pavel Příhoda

Planety zemského typu z pohledu nových kosmonautických výzkumů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 47 (2002), No. 2, 89--102

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141118>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2002

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>

Planety zemského typu z pohledu nových kosmonautických výzkumů

Pavel Příhoda, Praha

Vznik planet

Ve sluneční soustavě rozlišujeme dva druhy planet. Ve větších vzdálenostech od Slunce obíhají velké planety s nižší hustotou, označované také jako planety typu Jupitera (mezi ně ovšem nepatří Pluto), zatímco v bližším okolí Slunce obíhají menší a hustší planety, zvané planety zemského typu nebo také terestrické. Jsou to: Merkur, Venuše, Země, Mars a můžeme k nim řadit i satelit naší Země, Měsíc. Rozdílnost obou skupin spočívá v odlišných podmínkách při jejich vzniku. Předpokládá se, že sluneční soustava vznikla ze zárodečného oblaku z prachu a plynu, zvaného sluneční pramlhovina. Počátek tohoto procesu klademe do doby před $4,7 \cdot 10^9$ roků. Oblak rotoval a nabýval tvaru disku. Z jeho centra se formovalo Slunce a z okolních oblastí menší tělesa. Podle teorie akumulace se planety vytvořily spojením mnoha menších těles, která obíhala v rovinách, jež se většinou příliš nelišily od roviny ekliptiky, tedy od roviny zemské dráhy. Původní prachová zrna se shlukovala ve větší a větší kusy, planetesimály, které postupně rostly, až dosáhly tisícikilometrové velikosti, protoplanety. Spojováním protoplanet vznikly konečně planety. Takový proces nazýváme akrece. Pokud se planetesimály setkávaly větší vzájemnou rychlostí, mohlo ovšem místo akrece docházet i ke tříštění na menší tělesa. Proces akrece však převládl.

Celý tento proces proběhl relativně rychle. Mezitím se ve Slunci zažehly termojaderné reakce a Slunce ovlivnilo vznikající sluneční soustavu růstem teploty a mohutným proudem částic s intenzitou asi 10^7 krát větší, než je intenzita současného slunečního větru. Ovlivnilo přitom především blízké, tedy terestrické planety. Z tohoto prostoru byly vymeteny lehké a těkavé látky, zejména vodík a helium, do oblasti vzniku velkých planet, a ovšem též zčásti mimo oblast sluneční soustavy. Materiál ve vnitřní oblasti sluneční pramlhoviny se přitom silně zahřál a vypařil. Později teplota poklesla a látky s vysokou teplotou tání a tuhnutí opětně kondenzovaly a roztřídily se podle hustot. Tlak v oblaku tělísek byl zřejmě velmi nízký, řádově 10^{-2} až 10^{-3} Pa. Teplota v této etapě vzniku sluneční soustavy byla v oblasti Merkura asi 1700°C , na úrovni Venuše 1500°C , Země 1200°C , Marsu 1000°C , v oblasti pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem 800°C .

Popsaný proces byl teoreticky propracován zejména v sedmdesátých letech 20. století (Cameron, Pine, 1973 — viz seznam literatury). Průkopníky nebulární hypotézy jsou

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

ovšem I. Kant (1724–1804) jako autor ideje, kterou nezávisle na něm matematicky propracoval P. S. Laplace (1749–1827). Kromě toho dnes výkonné dalekohledy běžně pozorují prachoplynné disky kolem vznikajících hvězd. Nebulární hypotéza je tedy potvrzena pozorováním. Takové protoplanetární disky například obklopují asi 40 % mladých hvězd ve Velké mlhovině v souhvězdí Oriona. Vyskytují se zejména u hvězd podobných Slunci, zatímco hvězdy s velkou hmotností je nemají — zřejmě proto, že mohutný proud částic od takové masivní hvězdy téměř všechen materiál „vymete“ daleko do mezihvězdného prostoru.

Dnešní počet planet zemského typu (a planet vůbec) je ovšem výsledkem ostřejšího výběru a různí odborníci odhadují, že planet bylo v mladé sluneční soustavě mnohonásobně více. Protože jejich dráhy nebyly ustáleny, mohly vzájemné poruchy drah vést k pádu mnoha planet do Slunce, některé planety se po srážce roztříštily a úlomky po srážce se zřítily do Slunce nebo mohly přejít při těsných setkáních na větší dráhy, například do oblasti dnešních planetek mezi Marsem a Jupiterem. Menší tělesa také skončila svou samostatnou pouť srážkou s některou planetou, jak dosvědčují četné dopadové (impaktní) krátery a pánve, pozorované zejména na Merkuru, Měsíci a Marsu. Ostatně už vznik Měsíce se přičítá takovému katastrofickému procesu, jak ukážeme později. Také sklony rotačních os planet zemského typu mohou být vysvětleny srážkami těles v období akumulace planet.

Nejdůležitější číselné údaje

O jakých tělesech tu chceme pojednat? Na jedné straně mají podobné znaky, na druhé straně je každé něčím výjimečné a zvláštní. Nápadná je nevelká hmotnost terestrických planet, jak ukazuje tabulka 1:

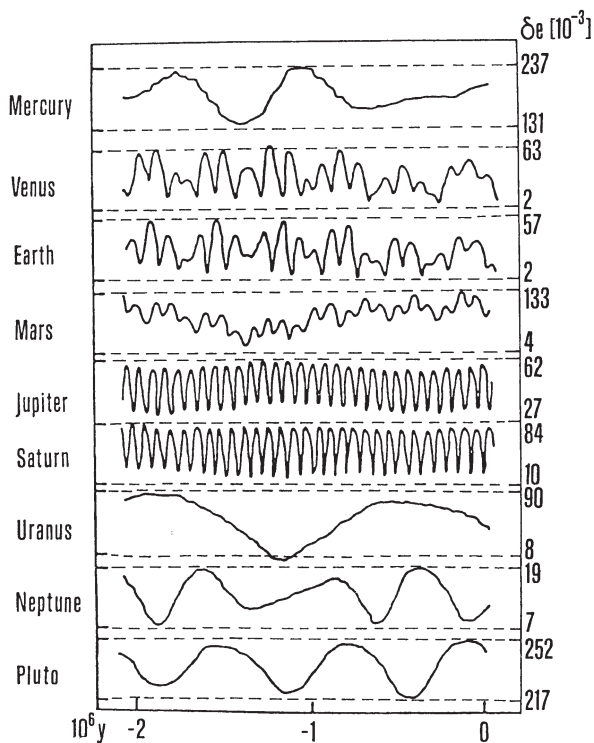
Planeta	Hmotnost (kg)
Merkur	$3,301\,9 \cdot 10^{23}$
Venuše	$4,863\,55 \cdot 10^{24}$
Země	$5,973\,699 \cdot 10^{24}$
Měsíc	$7,347\,7 \cdot 10^{22}$
Mars	$6,418\,5 \cdot 10^{23}$
Celkem	$1,188\,277 \cdot 10^{25}$

Názornější je porovnání součtu hmotností těchto planet s hmotností Slunce. Je to pouhých $\frac{1}{167378} M_S$, kde $M_S = 1,988\,92 \cdot 10^{30}$ kg je hmotnost Slunce.

Hlavní údaje o tělesech planet zemského typu uvádí tabulka 2:

Planeta	Velká poloosa dráhy (10^6 km)	Excentricita dráhy	Sklon dráhy ($^\circ$)	Siderická doba oběhu (dny)
Merkur	57,91	0,20564	7,0048	87,969
Venuše	108,20	0,00680	3,3946	224,701
Země	149,598	0,01666	0,0003	365,257
Mars	227,96	0,09337	1,8494	686,980

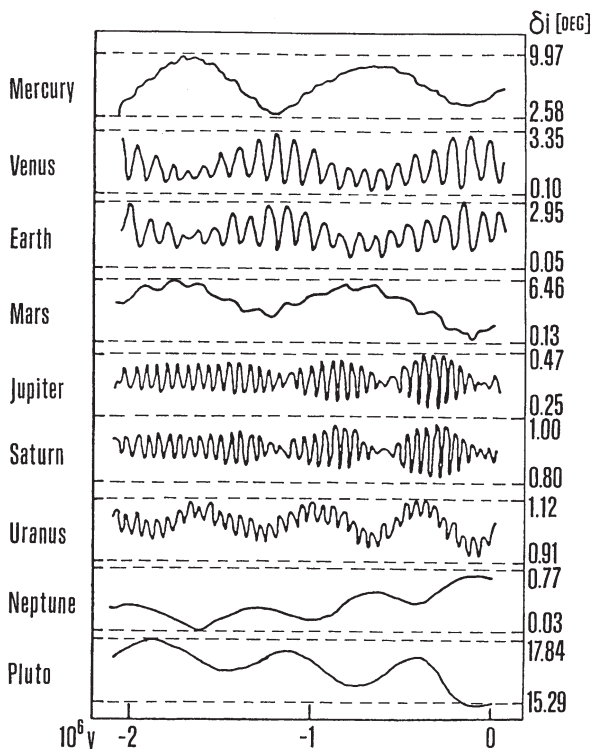
Planeta	Průměr střední (km)	Doba rotace vzhledem ke hvězdám (dny)	Hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Sklon rotační osy vzhledem ke kolmici na rovinu dráhy ($^\circ$)
Merkur	4879,4	58,6462	5428,3	0,01
Venuše	12 103,6	243,018 zpětná	5244	177,36
Země	12 741,99	0,997270	5514,8	23,44
Mars	6780,0	1,02596	3933	25,19



Obr. 1. Dlouhodobé variace excentricit drah planet. Vodorovně vynesěn čas v milionech roků. Podle M. Burši.

Země

Naše planeta je z astronomického hlediska velmi zajímavá a s ní můžeme porovnávat ostatní planety zemského typu, zjišťovat podobnosti i rozdíly. Země je také



Obr. 2. Dlouhodobé variace sklonů rovin drah planet. Podle M. Burši.

pochopitelně nejdetailněji prozkoumána, protože ji studujeme v kontaktu a věnuje se jí řada vědních oborů: geologie, geofyzika, geochemie, meteorologie, oceánografie a další. Zatím jediné na Zemi známe a studujeme život, jeho vznik a vývoj, a to díky optimální vzdálenosti Slunce, které poskytuje energii téměř celé biosféře. Terčem 1 m^2 kolmým na směr slunečních paprsků přijímá Země od Slunce zářivou energii o výkonu 1368 W , jak vychází z nových měření na družicích (Solar Maximum Mission, Nimbus 7). Část této energie se hned odráží zpět, část ohřívá zemský povrch i atmosféru, podílí se na fyzikálních, chemických i biologických procesech, mění se v infračervené záření a to je nakonec opět vyzářeno do vesmíru. Kdyby tomu tak nebylo, teplota na Zemi by rostla, až by zde byl znemožněn život.

Z hodnoty excentricity zemské dráhy lze odvodit, že se naše planeta nejvíce přiblíží Slunci na $147,1 \cdot 10^6 \text{ km}$; je v přísluní, kterého nyní dosahuje kolem 4. ledna. Odsluním prochází nyní přibližně 4. července ve vzdálenosti $152,1 \cdot 10^6 \text{ km}$. Vzdálenost od Slunce není rozhodující pro vznik ročních dob, jak plyne i z uvedených dat; roční doby vznikají proto, že zemská osa je skloněna vzhledem ke kolmici na rovinu dráhy, takže se během roku mění výška Slunce a doba slunečního svitu.

Atmosféra Země má hmotnost $5,157 \cdot 10^{18} \text{ kg}$, tedy zhruba miliontinu hmotnosti planety. Podle různých hledisek ji lze rozčlenit do vrstev. Hustota ovzduší jako stlačitelného prostředí ovšem prudce klesá s výškou: na úrovni moře je 10^{19} částic v cm^3 , ve výšce 25 km desetkrát méně, ve 100 km milionkrát méně. Skládá se ze $75,5\%$ (hmotnostních) dusíku, $23,1\%$ kyslíku, dále $1,3\%$ argonu, $0,05\%$ oxidu

uhličitého, proměnlivého obsahu vodní páry aj. Během historie Země se atmosféra výrazně měnila. Vodní obal Země, hydrosféra, zahrnuje $1,386 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ vody, tedy asi $2,3 \cdot 10^{-4}$ hmotnosti Země. Většina pevného zemského povrchu je pokryta moři a oceány, takže nepřekvapí, že průměrná výšková úroveň leží asi 2430 m pod úrovní mořské hladiny. Země vytváří dosti výrazné magnetické pole, tzv. magnetosféru. Vzniká zřejmě dynamovým efektem v jádru Země, které se chová jako kapalina, a uvnitř obsahuje vnitřní jádro s vlastnostmi pevné látky, jež má funkci dynama. Magnetické pole v okolí Země zadržuje elektricky nabitě částice přicházející nejčastěji od Slunce. Vyšší vrstvy atmosféry, stratosféra a ionosféra, způsobují rozpad částic primární složky kosmického záření, které získávají vysokou energii v mnoha oblastech kosmického prostoru a z menší části mají i sluneční původ. Magnetosféra i atmosféra představují tedy významný ochranný štít živých organismů.

Většinu objemu zemského tělesa zahrnuje plášť. Nad ním leží relativně tenká povrchová vrstva, zemská kůra. Ta společně s nejvyššími částmi svrchního pláště tvoří litosféru, která není souvislá, ale je rozčleněna na litosférické desky — méně mocné oceánské a mocnější pevninské. Většina objemu pláště je v plastickém stavu a proudí rychlostí typicky několika cm za rok. Horizontální proudy v plášti strhávají litosférické desky, které se vůči sobě pohybují. Např. v Atlantském oceánu se rozvírají, mezera je doplňována horninami pláště a oceán se zvětšuje. Jinde se přesouvají pevninské desky přes sebe — tak vznikla pásemná pohoří, Alpy a dosud stále rostoucí Himálaj. Podsouváním oceánských desek pod desku jihoamerickou vyvrásnily Andy. Takové procesy nenajdeme na žádné jiné planetě. Vznik pásemných pohoří je velkou specialitou Země. Existují i vertikální proudy, které stoupají z hlubokých partií pláště, tzv. plášťové hříby.

Měsíc

Jediný, zato velký satelit Země s průměrem 3475 km obíhá kolem Země ve střední vzdálenosti 384 401 km po dráze přibližně eliptické, silně rušené Sluncem, se siderickou dobou oběhu 27,32 dne, zatímco fáze Měsíce se vystřídají za 29,53 dne (synodický měsíc). Přesně vzato obíhají obě tělesa kolem společného těžiště, které leží uvnitř zemského tělesa, v hloubce 1703 km na spojnici jejich středů. Nápadné střídání měsíčních podob (fází) posloužilo kdysi pro tvorbu lunárních kalendářů. Rovina dráhy Měsíce svírá s rovinou ekliptiky úhel $5,14^\circ$ a průsečnice obou rovin se stáčí v záporném smyslu o 360° za 18,66 roku; tato skutečnost ovlivňuje periodicitu slunečních a měsíčních zatmění. Dráha Měsíce vzhledem ke Slunci má přibližně tvar zkrácené epicykloidy, je ve všech bodech konkávní vůči Slunci a blíží se heliocentrické eliptické dráze, rušené ovšem Zemí. Měsíc obrací k Zemi stále jednu polovinu, jeho rotace je vázaná (synchronní), což u satelitů není výjimečné. Při jeho oběhu však dochází ke kývavým pohybům, libraci (v délce, v šířce, paralaktické a nejmenší fyzické), takže je ze Země vidět 59 % měsíčního povrchu.

Pro vznik Měsíce se jeví jako nejpravděpodobnější hypotéza, kterou vypracovali Cameron, Ward (1976) a ještě ji propracoval Cameron (1997). Vyhovuje jak z hle-

diska dynamického, tak geologického. Koncem etapy akrece planet do Prazemě bočně narazilo těleso o něco hmotnější než dnešní Mars rychlostí asi $12 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Obě tělesa splynula a vytvořila Zemi, část hmoty byla při nárazu vymrštěna do okolí a její úlomky spojením vytvořily Měsíc. Modelování ukazuje, že celý proces trval pouze několik hodin. Nižší hustota Měsíce ($3341 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) se pak dá objasnit tím, že se vytvořil z pláště narážejícího tělesa. Schematicky řečeno můžeme tedy Měsíc považovat za čedičovou kouli, pouze u jeho jádra najdeme větší zastoupení hustších látek. Pro své malé gravitační zrychlení ($1,622 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, úniková rychlost $2,38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) nemá Měsíc atmosféru a nikdy neměl vodní obal. Ačkoliv se pohybuje po podobné dráze jako Země, liší se od ní v mnoha směrech.

Povrch Měsíce je téměř výhradně exogenního původu, zaplněný impaktními krátery od nárazů menších těles natolik, že jsou často starší krátery překryty mladšími. Kromě toho utrpěl nárazy větších těles, která vytvořila rozsáhlé pánve. Také některé pánve se zčásti překrývají. Prohlubně pánví se postupně zaplnily lávovými příkrovy, které později utuhly — tak vznikla měsíční moře, tmavší, rovnější a mladší než oblasti starých kráterů, jen místy zaplněná menšími mladšími krátery. Větší krátery jsou pojmenovány podle vědců, moře mají romantická jména ze 17. stol. Některé krátery nesou i jména českých vědců nebo pozorovatelů Měsíce: Anděl podle Karla Anděla (1884–1947), autora mapy Měsíce „Mappa Selenographica“, Hagecius je latinizované jméno Tadeáše Hájka z Hájku (1525–1600), Heinrich podle astronoma W. W. Heinricha (1884–1965), profesora Karlovy univerzity, Heyrovský podle nositele Nobelovy ceny za chemii J. Heyrovského (1890–1967), Purkyně podle přírodovědce a fyziologa J. E. Purkyně (1787–1869), Rheita podle Antonína Šírka z Rheity (1597–1660), optika, hvězdáře, konstruktéra dalekohledu a autora mapy Měsíce. Jeho jméno nese i Vallis Rheita, přiléhající 500 km dlouhé údolí.

Krátery najdeme v rozsáhlé škále velikostí, od průměrů přes 200 km až k mikrokráterům velikosti $1 \mu\text{m}$. Největší pánev South Pole-Aitken leží na odvrácené straně Měsíce a má průměr 2500 km! Při impaktech se uvolňovalo ohromné množství energie. Například Copernicus, jeden z větších a mladších kráterů, má průměr 93 km a vznikl před $9 \cdot 10^8$ lety. Při jeho vzniku se uvolnilo $7,2 \cdot 10^{22}$ J, což odpovídá explozi $2 \cdot 10^{13}$ t trinitrotoluenu. Horniny vymrštěné po impaktu vytvořily kolem kráteru vrstvu s typickými světlejšími paprsky, větší kusy vyryly další, tzv. sekundární krátery. Při impaktech větších těles se může pod povrchem vytvořit lokální vulkanické ložisko a nastanou mohutné otřesy; obojí se rovněž podílí na utváření povrchu. Krátery mají průměr desetkrát až stokrát větší než dopadající těleso. Mikrokrátery nacházíme na kuličkách přírodního skla a vznikly nárazy nepatrných meteorických tělísek na heliocentrických drahách.

Je zajímavé, že se měsíční moře vyskytují téměř výhradně na polokouli Měsíce přivrácené k Zemi. Naopak na odvrácené straně najdeme změl kráterů a také pánve; ty však nejsou zalaty lávou. Kůra Měsíce je tenčí na přivrácené straně. Pod kůrou je plášť, kolem středu měsíčního tělesa pod hloubkou 1000 km je oblast částečně natavených hornin a u samého středu „náznak“ jádra. Vnitřní stavbu studujeme pomocí měsíčních zemětřesení, přírodních i umělých. Seismická činnost je ovšem celkově 10^9 krát slabší než pozemská.

Oblasti kráterů („pevniny“) se skládají hlavně z anortozitů, hornin bohatých živcem, bílým minerálem, proto jsou světlejší. Moře jsou tmavší a tvoří je bazalty, které obsahují olivín, pyroxeny, plagioklas, sklo, ilmenit. Vrchní část kůry tvoří regolit — měsíční půda. Obsahuje úlomky hornin, mezi nimi též přírodní skleněné kuličky velké desetiny mm až milimetry, vzniklé rychlým zchlazením roztavených i vypařených hornin vyhozených při impaktu. Na jejich hladkých plochách zjišťujeme zmíněné mikrokrátery. Zajímavá je také příměs ledových krystalků v regolitu v okolí pólů.

Merkur

Je planeta nejbližší Slunci a viditelná jen občas, když vychází před Sluncem nebo zapadá po něm. První detailní pohled na povrch poskytla zatím jediná sonda Mariner 10 při třech průletech v letech 1974–75. Atmosféra je zcela zanedbatelná (z helia o tlaku $5 \cdot 10^{-10}$ Pa) a planetě také chybí voda. Její krajina je proto podobná měsíční, pokrytá mnoha krátery včetně sekundárních, oblasti rozlité a utuhlé lávy nejsou tak hladké a výrazné jako měsíční moře a je jich méně. Krátery nesou jména spisovatelů, hudebníků a výtvarníků. Povrch je pokryt rozsáhlou soustavou zlomů, vzniklých tektonickými procesy v kůře. Zato zde známe jedinou pánev, Caloris Planitia; z toho plyne, že se v oblasti Merkura v době akrece planet zřejmě pohybovalo méně větších těles. Zatímco povrch se podobá Měsíci, nitro je zcela odlišné. 42 % jeho objemu zaujímá železné jádro, které zahrnuje 65 % hmotnosti planety. Proto má Merkur tak vysokou průměrnou hustotu, po Zemi největší z planet.

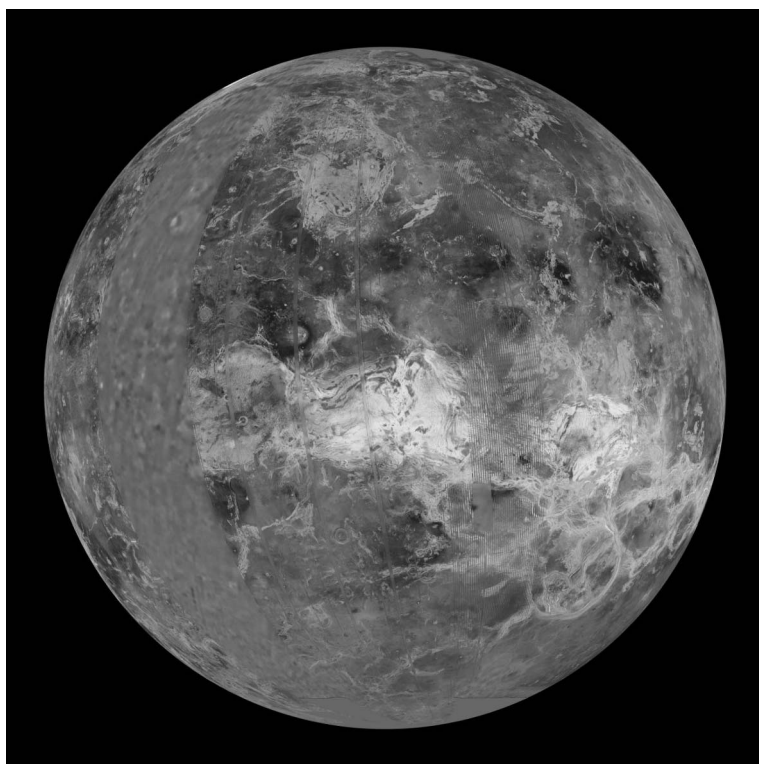
Nesmíme však zapomenout, že známe pouze polovinu povrchu Merkura. Ukažme si proč. Radarové studie radioteleskopem v Arecibu (Portoriko) v roce 1965 ukázaly, že doba rotace Merkura je asi 59 dní (siderická ovšem, tedy vzhledem ke hvězdám). Později se zjistilo, že jsou to právě 2/3 oběžné doby, s chybou nejvýše $5 \cdot 10^{-6}$. Rotace probíhá v kladném smyslu a plyne odtud, že sluneční den na Merкуру trvá 2 oběžné doby, tedy 175,9 dne. To je jistě zajímavá rezonance a zatím ji nedokážeme plně objasnit. Podle modelu slapového tření mělo totiž spíše dojít k vázané rotaci vzhledem ke Slunci, tedy orbitálně-rotační rezonanci 1 : 1. Zatím je aspoň jisté, že příčinou pomalé rotace Merkura bylo zejména slapové tření. Mariner 10 obíhal po heliocentrické dráze s dobou oběhu dvojnásobnou ve srovnání s Merkurem, k němuž se přiblížil třikrát, ale vždy po uplynutí jednoho slunečního dne Merkura, takže pokaždé zastihl osvětlenou tutéž polovinu povrchu. Bohužel nebyl vybaven radarem, proto oblast ve stínu nemohl sledovat.

Dráha Merkura má značnou excentricitu a bod perihelu se stáčí o $5594,74''$ za století, jak ukázal již U. J. J. Leverrier (1811–1877). Klasická fyzika nedokázala vysvětlit $42,98''$ z tohoto posuvu; právě tato hodnota se stala úspěšným testem teorie relativity. Relativistická změna hmotnosti s rychlostí objasní stáčení perihelu $7,4''/100$ let, zbytek lze vysvětlit pomocí obecné teorie relativity.

Zajímavá orbitálně rotační rezonance a velká excentricita dráhy má ten důsledek, že na rovníku planety jsou dvě protilehlá místa, která mají Slunce v zenitu v okamžiku průchodu přísluním. Tam teplota dosahuje $+500$ °C, jinde na rovníku nejméně $+375$ °C. Na noční straně klesá teplota přibližně na -200 °C.

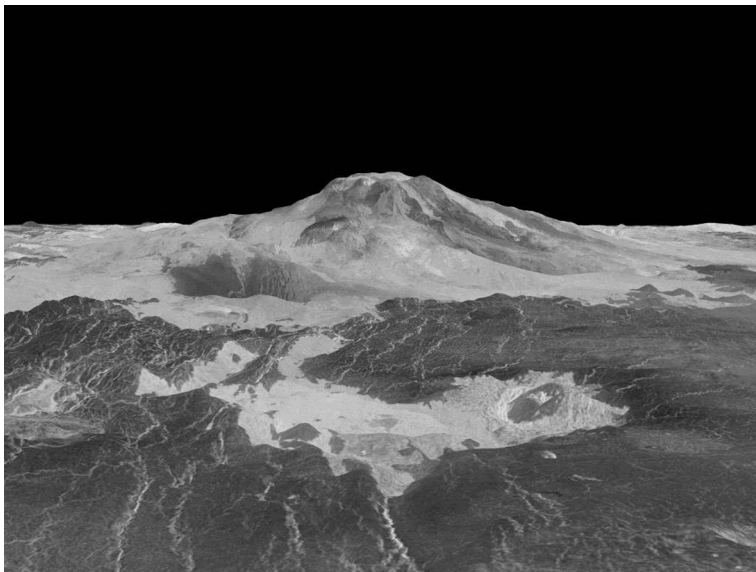
Venuše

Po Slunci a Měsíci je nejjasnějším objektem pozemské oblohy. Během synodické doby oběhu 583,92 dne se vystřídá její viditelnost jako večernice a jitřenky a Venuše postupně ukáže všechny fáze. Právě pozorování fází blízkých úplňku, které jako první provedl Galilei, ukázalo, že Venuše může být od Země dál než Slunce, což je v rozporu s Ptolemaiovou geocentrickou soustavou a svědčí pro její nesprávnost. Po staletí se pak nezjistilo prakticky nic, protože povrch planety je trvale zahalen souvislou oblačností. Teprve studie pozemními radary od konce šedesátých let 20. stol. dovolily zachytit terén a pořídit první jednoduchou mapu Venuše. Od roku 1964 se radarem měřila perioda rotace, která se ukázala být nečekaně dlouhá a navíc zpětná. Měření rádiového záření ukázala, že na povrchu musí být vysoká teplota a velký atmosférický tlak.



Obr. 3. Venuše — celkový záběr ze sondy Magellan. (Foto: NASA/NSSDC.)

Venuše se od šedesátých let 20. století stala cílem řady kosmických sond. Zpočátku to byly americké Mariner a sovětské sondy Veněra a Vega. Mariner 2 prováděl u planety první měření, která potvrdila vysokou teplotu na povrchu, Veněra 4 uskutečnila první měření při padákovém sestupu k povrchu. Veněra 8 prováděla měření při padákovém sestupu i po přistání, orbitální část sondy Veněra 9 se stala první umělou družicí Venuše. Sondy Veněra 9, 10, 13 a 14 vysílaly po úspěšném přistání detailní snímky



Obr. 4. Krajina Venuše s vrcholem Maat Mons generovaná z radarových údajů sondy Magellan. Vertikální škála je zvětšena desetkrát. (Foto: NASA/NSSDC.)

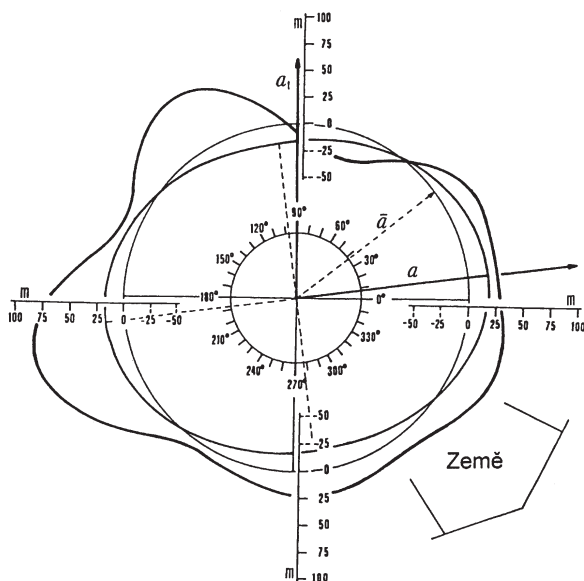
okolí svého stanoviště, Vegy 1 a 2 vypustily balonové sondy určené ke studiu atmosféry. Ještě předtím pozorování Marineru 10 v roce 1974 potvrdila názor řady astronomů, vycházející z pozemských pozorování — totiž že samotná oblačná pokrývka vykazuje systematické proudění kolem planety s periodou 4 až 5 dní v záporném smyslu, tedy stejném, jako je smysl rotace.

Povrch Venuše podrobněji zmapovaly radarem dvě její umělé družice, obě americké provenience. V letech 1978 až 1980 zmapoval Pioneer Venus Orbiter 93 % povrchu. Nejnověji provedla detailní mapování i celkový výzkum sonda Magellan v letech 1990 až 1992. Nerovnosti pevného povrchu vcelku připomínají pevninské a oceánské oblasti zemské kůry. Níže položené rovinaté oblasti zaujímají 60 % povrchu. Jsou analogiemi pozemských oceánských pánví, ovšem bez vody. 24 % připadá na vyvýšené bloky, obdoby pevninských desek zemské kůry, které jako ostrovy vystupují nad nižší oblasti, a to až do výšek 11 km nad dohodnutou kulovou plochu s poloměrem 6051,5 km. Asi 16 % pod touto plochou zabírají sníženiny a údolí. Největší vyvýšenou oblastí je Afrodite Terra s rozlohou jako Jižní Amerika. Ishtar Terra má rozlohu Austrálie, leží poblíž severního pólu Venuše a zvedají se z ní nejvyšší hory planety, Maxwell Montes. Beta Regio jsou dva vulkanické vrcholy se základnou o průměru 2100 km. Magellan zachytil 16 000 sopečných kuželů, z nichž Maat Mons má rekordní výšku 8,5 km. V terénu se pozoruje působení tlaků i tahů, záhyby, zlomy, smyky. Menší útvary jsou relativně mladé, poslední velká přeměna povrchu nastala před $400 \cdot 10^6$ lety; poté vulkanismus i tektonické děje zeslábly, Venuše je však stále geologicky aktivním tělesem. Útvary nesou většinou jména žen, jeden z kráterů se jmenuje Božena Němcová. Zaznamenané horniny na povrchu jsou podobné pozemským bazaltům, v jiných místech žulám. Kůru planety tvoří zřejmě jediná litosférická deska. Je podstatně mocnější než zemská (asi

400 km), takže teplo radioaktivního rozpadu hornin neuniká a nitro se zahřívá víc než nitro Země (obr. 3, 4).

Atmosféra Venuše má řádově stokrát větší hmotnost než zemská, asi 10^{-4} hmotnosti planety. Skládá se z 97% z oxidu uhličitého, 1 až 3% dusíku a příměsí — mj. oxidu siřičitého, kyslíku a vodní páry. Oxid uhličitý se do atmosféry nepochybně dostal při vulkanické aktivitě. Na rozdíl od Země, kde je dnes vázán v uhličitanech, zůstal v atmosféře Venuše. Uhličitany na Zemi jsou totiž chemickými usazeninami vod či mechanickými usazeninami organického původu a voda v kapalném skupenství i organismy na Venuši chyběly. Oxidu uhličitého je v atmosféře Venuše řádově tolik, kolik je ho na Zemi vázáno v horninách. O vodu v kapalně fázi přišla Venuše záhy zřejmě proto, že se atmosféra promíchávala do značné výšky (nyní 144 km) vertikálním prouděním a ve výšce se voda ultrafialovým zářením Slunce rozkládala na vodík a kyslík, které unikaly do meziplanetárního prostředí. Naproti tomu na Zemi chladná a suchá stratosféra ležící nad troposférou zabránila vertikálnímu proudění a rozkladu vody. Oxid uhličitý se stopami vodní páry vytváří na Venuši výrazný skleníkový efekt, který je příčinou vysoké povrchové teploty.

Při sestupu k planetě bychom ve výškách 70 až 47,5 km prolétali třemi vrstvami oblačnosti tvořené kapičkami síry a kyseliny sirové. Ve výšce 63 km bychom přestali vidět sluneční kotouč a hlouběji je již jen rozptýlené světlo. V dolní oblačné vrstvě teplota dosahuje $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pod oblaky je slabá mlha, jinde naopak výborná dohlednost až 80 km. Ve výšce 10 km je teplota již $410\text{ }^{\circ}\text{C}$, od výšky 7 km bychom zahlédli útvary povrchu. Při přistání je atmosférický tlak $90 \cdot 10^5\text{ Pa}$, teplota obvykle přes $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, dohlednost 3 km, vítr jen slabý a osvětlení jako při silně zataženém pozemském obloze.

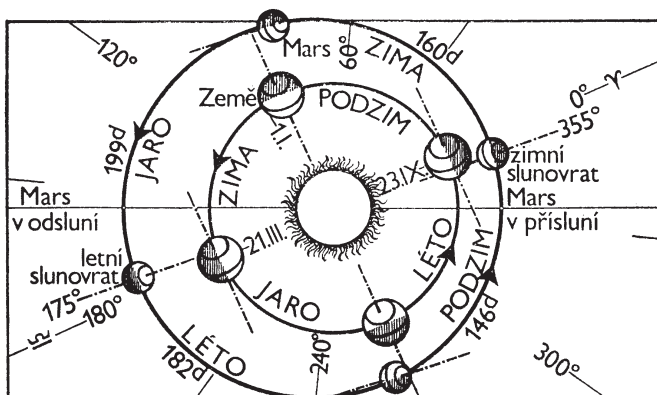


Obr. 5. Undulace hladinové plochy Venuše v rovině rovníku. Směry k Zemi platí pro konjunkce 1950–1985. Podle M. Burši.

Venuše má suverénně nejdelší periodu rotace ze všech planet (viz tab. 2). Vzhledem ke Slunci se otočí za 116,76 dne. Slunce se nad oblaky planety pohybuje k východu, tedy opět zpětně. Vzhledem k Zemi se Venuše otočí za 145,95 dne. Pět slunečních dnů Venuše se velmi blíží její synodické době oběhu a za tuto dobu se Venuše čtyřikrát otočí vzhledem k Zemi. Při dolní konjunkci je tedy Venuše k Zemi natočena vždy téměř stejným poledníkem. Mohli bychom předpokládat, že tento jev vzniká gravitačním efektem Země. Tomu však nenasvědčuje orientace rovníkového vzduť hladinové plochy Venuše (viz obr. 5). Řešení problému zatím tedy chybí. Je to tím podezřelejší, když si připomeneme jinou rezonanci v případě Merkura.

Mars

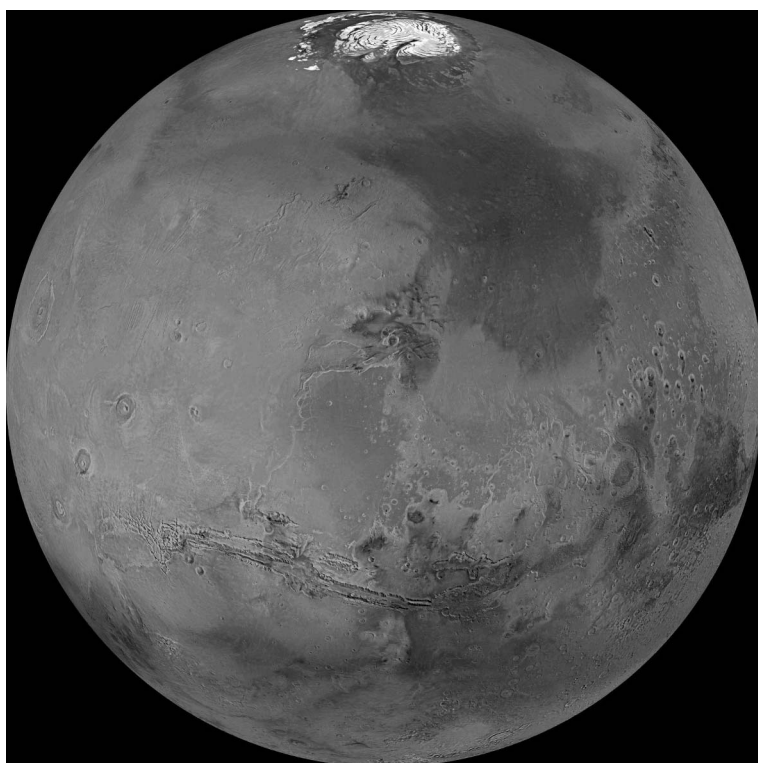
Má sice průměr zhruba poloviční než Země, v řadě znaků se jí však velmi podobá: dobou rotace, sklonem osy, střídáním ročních dob (viz obr. 6) i některými povrchovými útvary. Mars má řídkou, ale často čile se pohybující atmosféru. Atmosférický tlak na povrchu je však natolik nízký, že nedovoluje přítomnost vody v kapalném skupenství. Z původní hydrosféry zůstaly jen sporé zbytky a také výrazné stopy někdejší vodní eroze na četných místech povrchu. Dnes je Mars pokryt pouští. Detailní obraz planety poskytly sondy Mariner 9 — první umělá družice Marsu, Viking 1 a 2 s oběžnou a přistávací částí, z novějších Mars Pathfinder přistál přímo z příletové dráhy a vozík Sojourner zkoumal blízké okolí. Zejména Mars Global Surveyor planetu všestranně a detailně sleduje (viz obr. 7).



Obr. 6. Dráhy Země a Marsu a roční doby, schéma. Označení ročních dob platí pro severní polokoule obou planet. Ilustrace autor.

Severní a jižní polokoule Marsu jsou výrazně odlišné. To není nic neobvyklého, připomeňme si Tichý oceán a odlišnost přivrácené polokoule Měsíce od odvrácené. Marsova jižní polokoule je pokryta plošinou s impaktními krátery a podobá se povrchu Měsíce. Krátery jsou však plošší než na Měsíci, protože jsou zčásti zarovnány vlivem eroze a usazování působením větru, zčásti i mrazu. Pozorujeme zde i stopy vulkanických

procesů — krátery, kráterové řady aj. Plošinu s krátery přerušují pánve; největší je Hellas Planitia o průměru 2000 km a hloubce 6 km proti střední výškové úrovni, navíc s mocnými usazeninami. Blízko rovníku se táhne významná údolní soustava Valles Marineris o délce téměř 5000 km a s relativní hloubkou 7 km, místy až 8 km. Vznikla zřejmě tektonickými procesy v kůře, která je dosti silná, na jihu dosahuje tloušťky 80 km a na severu 35 km, jak ukazují gravimetrická a laserová výšková měření. Podobně jako na Venuši se ani na Marsu nesetkáváme s deskovou tektonikou pozemského typu.



Obr. 7. Celkový záběr Marsu ze sondy Viking. (Foto: NASA/NSSDC.)

Severní polokoule je převážně rovinatá — především se na ní rozkládá Vastitas Borealis — Rozsáhlá severní planina. Je to dno bývalého mělkého oceánu. Někdejší přítomnost tekuté vody byla možná proto, že planetu obklopovala hustší atmosféra, nepochybně vulkanického původu, o povrchovém tlaku asi $1 \cdot 10^5$ až $3 \cdot 10^5$ Pa. Vulkanická činnost později zeslábla a část ovzduší se rozptýlila do meziplanetárního prostoru, část vymrzla a usadila se na povrchu. Voda se uvolňovala z vrstev nasycených ledem a ohřátých vulkanickými procesy, rozlámáním vrstev obsahujících podzemní vodu a prvotně ovšem odplyněním hornin především při vulkanické činnosti. Oceán byl nejvíce rozvinutý v nejstarším Marsově geologickém období, tzv. noachianu, které skončilo asi před $2,8 \cdot 10^9$ lety. Podle některých autorů bylo na Marsu tehdy tolik vody, že by celý povrch pokrývala vrstvou silnou asi 500 m. Soustřeďovala se ovšem

v nejhlubších místech, takže oceán na severu mohl mít hloubku přes 1 km. Z pevnin do něho ústila přívalová údolí šířek několika set km s průtokem až $0,5 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a s rychlostí proudu 90 až 360 km/h, tedy hodnotami až o dva řády vyššími než u obdobných útvarů na Zemi. Nešlo tedy o plynulý přítok, ale o jednotlivé vodní přívaly. Planeta postupně vysychala a hustota ovzduší klesala, takže voda dnes může být přítomna v tuhé nebo plynné fázi, jen výjimečně v kapalné: v prasklinách hornin nebo na nejhlubších místech povrchu Marsu.

Rovník prochází významnou nejvýše položenou oblastí Tharsis, výdutí v kůře planety, z níž vystupují mohutné vulkanické kužely. Nejmhutnější je Olympus Mons o průměru 550 km, s vrcholem ve výši 23 085 m nad okolní krajinou a 27 km nad dohodnutou nulovou hladinou. Na obvodu má 7 km vysokou odlomovou hranu. Ještě vyšší vrchol 23 944 m, ale menší relativní výšku má Ascraeus Mons. Stáří sopek je asi $2 \cdot 10^9$ let. Jde o štítové sopky havajského typu, s kužely tvořenými lávovými výlevy. Těleso planety vykazuje větší výškové rozdíly než Země; dosahují 31 km, zatímco na Zemi 20 km.

V okolí pólů najdeme dnes usazeniny ledu a zmrzlého oxidu uhličitého — polární čepičky. Zvětšují se s příchodem místního podzimu a zimy, na jaře sublimují. Těkavější složkou obou polárních čepiček je „suchý led“ — zmrzlý oxid uhličitý. Ten totiž kondenzuje při teplotě kolem $-125 \text{ }^\circ\text{C}$ a obvyklém atmosférickém tlaku na povrchu a na tyto hodnoty teplota skutečně klesá. Jeho zastoupení vzhledem k vodnímu ledu není zatím přesně známo a mění se v průběhu ročních dob. Severní polární čepička má zmrzlé usazeniny mocnosti až 2,5 km a množství vodního ledu odpovídá polovině grónského ledovce, tedy $1,2 \cdot 10^5 \text{ km}^3$. Jižní polární čepička se jeví menší než severní, má však větší rozsah; je totiž z větší části zakryta vrstvami navátého prachu. Její tloušťka dosahuje až 3 km, objem $2 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ a tvoří ji převážně zmrzlý oxid uhličitý. Větší zalednění a výraznější usazování zmrzlého oxidu uhličitého v okolí jižního pólu je způsobeno tím, že terén je tam o 6,5 km výš než okolí, a také tím, že zimní slunovrat na jižní polokouli nastává blízko Marsova odsluní, kdy je Mars od Slunce o 42 milionů kilometrů dál než v přísluní.

Dnešní ovzduší planety je řídké jako na Zemi ve výšce 35 km, na povrchu je tlak kolem 700 Pa. Skládá se z 90 % CO_2 , 2,7 % N_2 , dále Ar, O_2 , malého množství vodní páry a často značného množství prachu, který se zvedá do výšky přes 50 km při globální prachové bouři. Pozorujeme též místní prachové bouře, často ovlivněné terénem. Vítr může dosáhnout rychlosti až $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Oblačnost z ledových krystalků, podobná pozemským cirrům, se vyskytuje ve dvou výškových úrovních ve výškách 5 až 10 km a 20 až 40 km. Některá mračna jsou i z krystalků CO_2 . Průměrná denní teplota v místech přistání sond Viking byla $-34 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-30,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Sonda Pathfinder o 20 let později zjistila větší oblačnost a teplotu o 10 K vyšší. Nejvyšší teplota měřená touto sondou dosáhla $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, nejnižší $-79 \text{ }^\circ\text{C}$, tlak byl 675 Pa a vítr dosáhl rychlosti nejvýše $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z izotopového složení kyslíku v ovzduší vyplývá, že existuje trvalá výměna mezi atmosférickým kyslíkem a jeho zásobárnou pod povrchem, kde je možná kyslík vázán ve vodě. Odtud byl také odvozen dnešní minimální objem vody na Marsu: $4,5 \cdot 10^5 \text{ km}^3$. Z poměrů izotopů dusíku může vyplývat objem vody ještě větší, a to $4,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$.

Půda planety má toto složení: 50 % kyslíku, 10 až 30 % křemíku, 15 až 16 % železa, 2 až 7 % hliníku (zatímco v zemské kůře je hliník třetí v pořadí zastoupení), dále Ca, K, P, Ti atd. Typické červenavé zbarvení Marsu je způsobeno hojným výskytem oxidů železa, v nichž je železo přítomno ve trojmocné formě.

Magnetické pole Marsu je asi 800krát slabší než pozemské a stále ještě není jisté, zda má dipólový charakter se zdrojem v jádře, nebo zda jde o remanentní magnetizaci vrchních vrstev kůry jako pozůstatku silnějšího, dnes už neexistujícího pole. Podle posledních výsledků se zatím jako pravděpodobnější jeví druhá možnost.

Otázka života na Marsu zůstává stále ještě otevřená. V úvahu přicházejí jednobuněčné organismy, které by se mohly vyskytovat v puklinách hornin nebo ve větších hloubce. Pokud tam živé organismy existovaly, mohly by se časem objevit jejich mikrofosilie. Na Zemi je známo několik meteoritů SNC, nazvaných podle míst pádu (Shergotty v Indii, Nakhla v Egyptě a Chassigny ve Francii) a pocházejících zřejmě z kůry Marsu. Materiál byl při impaktu zčásti vymrštěn do meziplanetárního prostředí a po delší době úlomek dopadl na Zemi. Struktury pozorované v jednom meteoritu příbuzného typu, ALH 84001 (podle Allan Hills v Antarktidě, nález v roce 1984), byly interpretovány jako fosilované nanobakterie. Novější studie však docházejí vesměs k názoru, že jde o anorganické útvary.

L i t e r a t u r a

• Knihy:

- [1] KANT, I.: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. Johan Fridrich Petersen, Königsberg und Leipzig 1755.
- [2] LAPLACE, P. S.: *Exposition du système du Monde*. Imprimerie Cercle-Social, Paris 1796.
- [3] DERMOTT, S. F. (ed.): *The Origin of the Solar System*. Willey, New York 1978, příspěvek sborníku: Cameron, A. G. W., str. 49–74.
- [4] BURŠA, M.: *Země ve sluneční soustavě*. Ministerstvo obrany ČR — Generální štáb AČR, topografické oddělení, Praha 2000.
- [5] BOUŠKA, V. (vedoucí autor. kolektivu): *Geochemie*. Academia, Praha 1980.
- [6] RÜKL, A.: *Atlas of the Moon*. Aventinum, Prague 1990.
- [7] CAMERON, A. G. W., WARD, W. R.: *The origin of the Moon*. Sborník Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 7th (1976), str. 120–122.
- [8] BOUŠKA, V. a kol.: *Přírodní skla*. Academia, Praha 1987.
- [9] MURRAY, B., BURGESS, E.: *Flight to Mercury*. Columbia University Press, New York, 1977.
- [10] HEUSELER, H., JAUMANN, R., NEUKUM, G.: *Mars — Pathfinder, Sojourner a dobývání rudé planety*. Mladá fronta, Praha 1999. (Něm. originál *Die Mars Mission. Pathfinder, Sojourner und die Eroberung des Roten Planeten*. Vydalo BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 1998, přeložil ELIÁŠ, M.)

• Časopisy:

- [11] CAMERON, A. G. W., PINE, M. R.: *Numerical Models of the Primitive Solar Nebula*. *Icarus* 18 (1973), str. 377.
- [12] CAMERON, A. G. W.: *The Origin of the Moon and the Single Impact Hypothesis V*. *Icarus* 126 (1997), str. 126–137.
- [13] Kozmos, ročníky XXIX.–XXXII. (1998–2001). Vydává SÚH, Hurbanovo.
- [14] Astropis, ročníky VII., VIII. (2000–2001). Vydává Společnost Astropis, Praha.
- [15] *National Geographic*, sv. 199, č. 2 (Feb. 2001), str. 30–51.