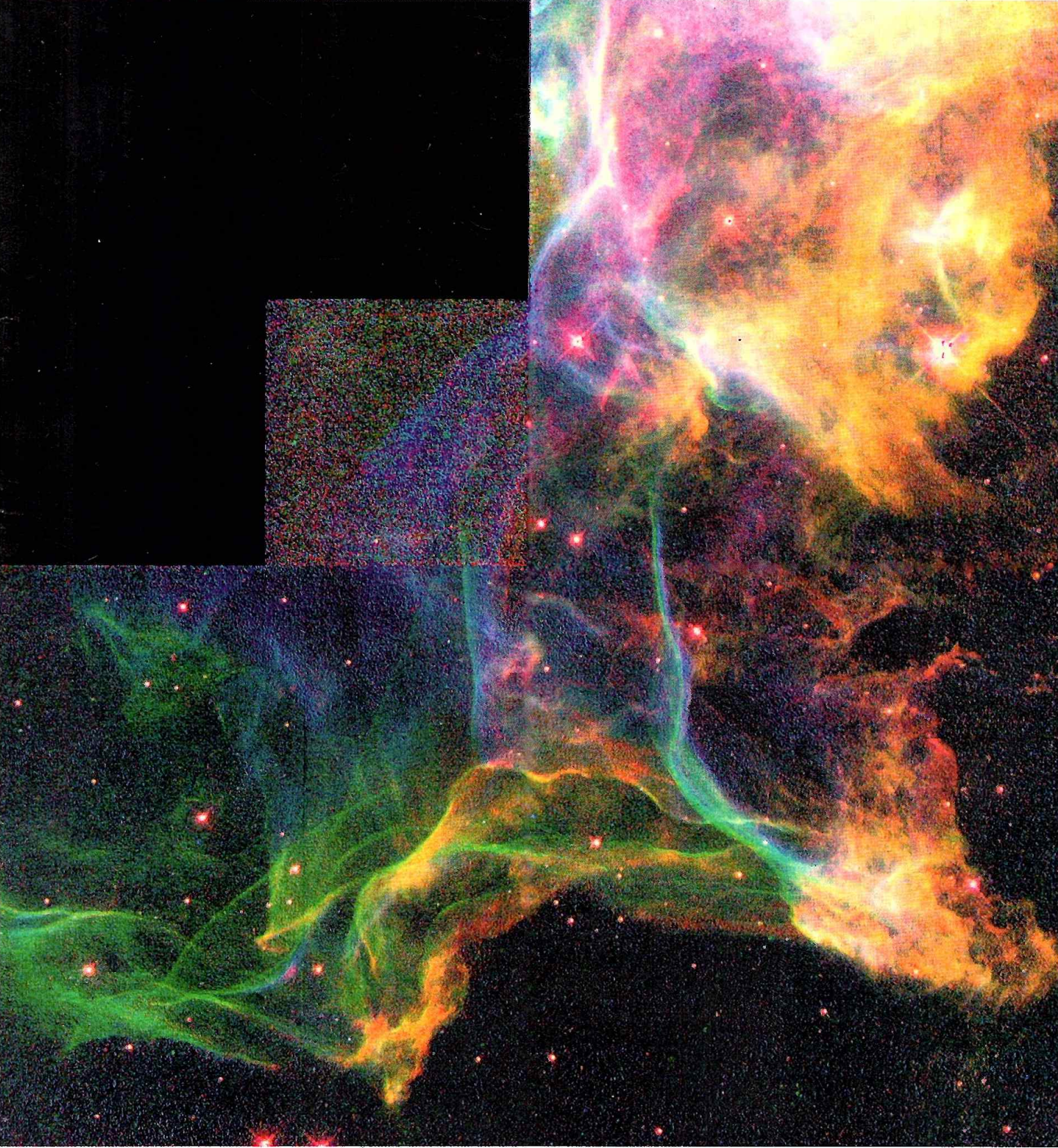


# Říše hvězd

ASTRONOMICKÝ ČASOPIS

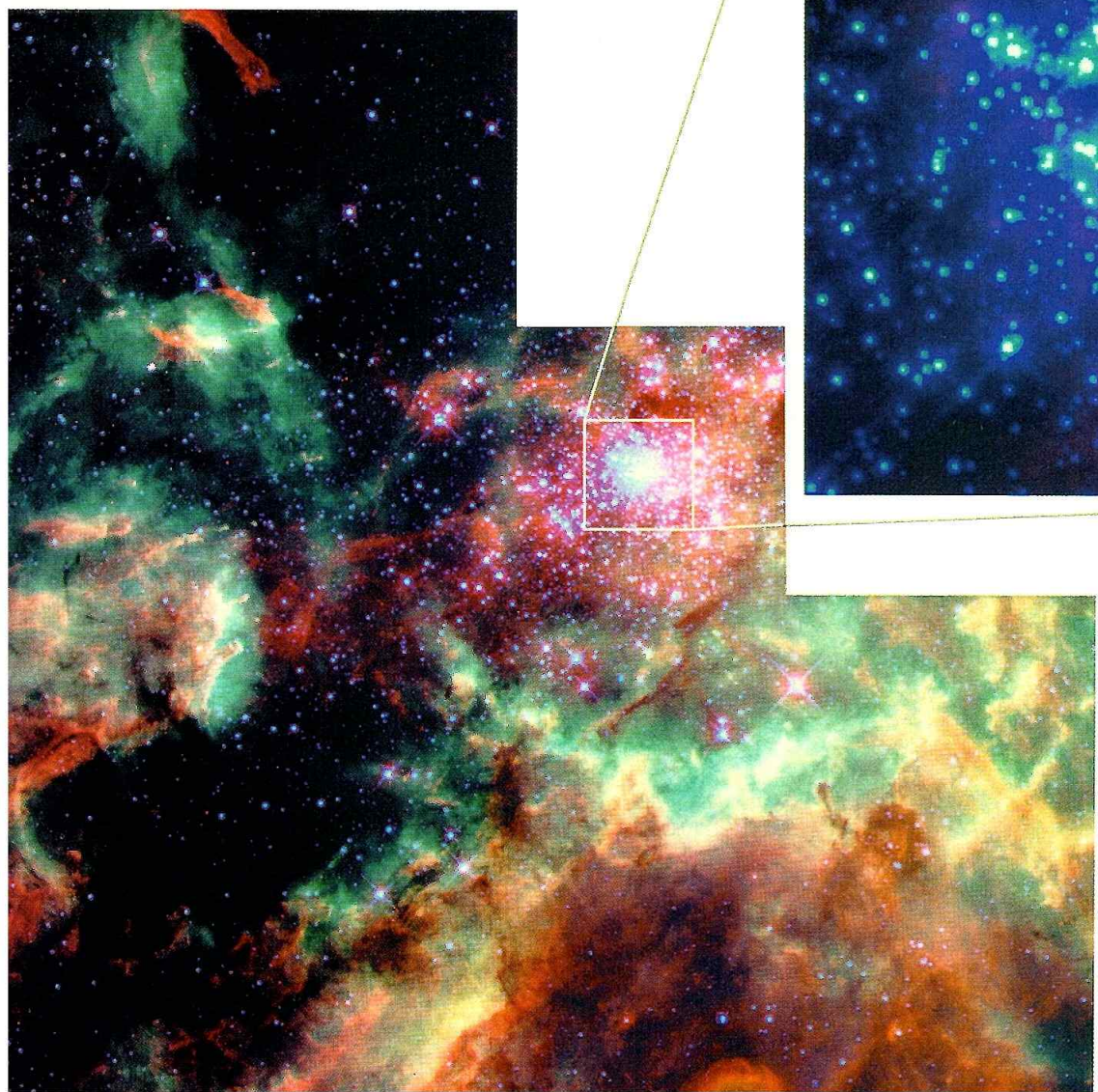
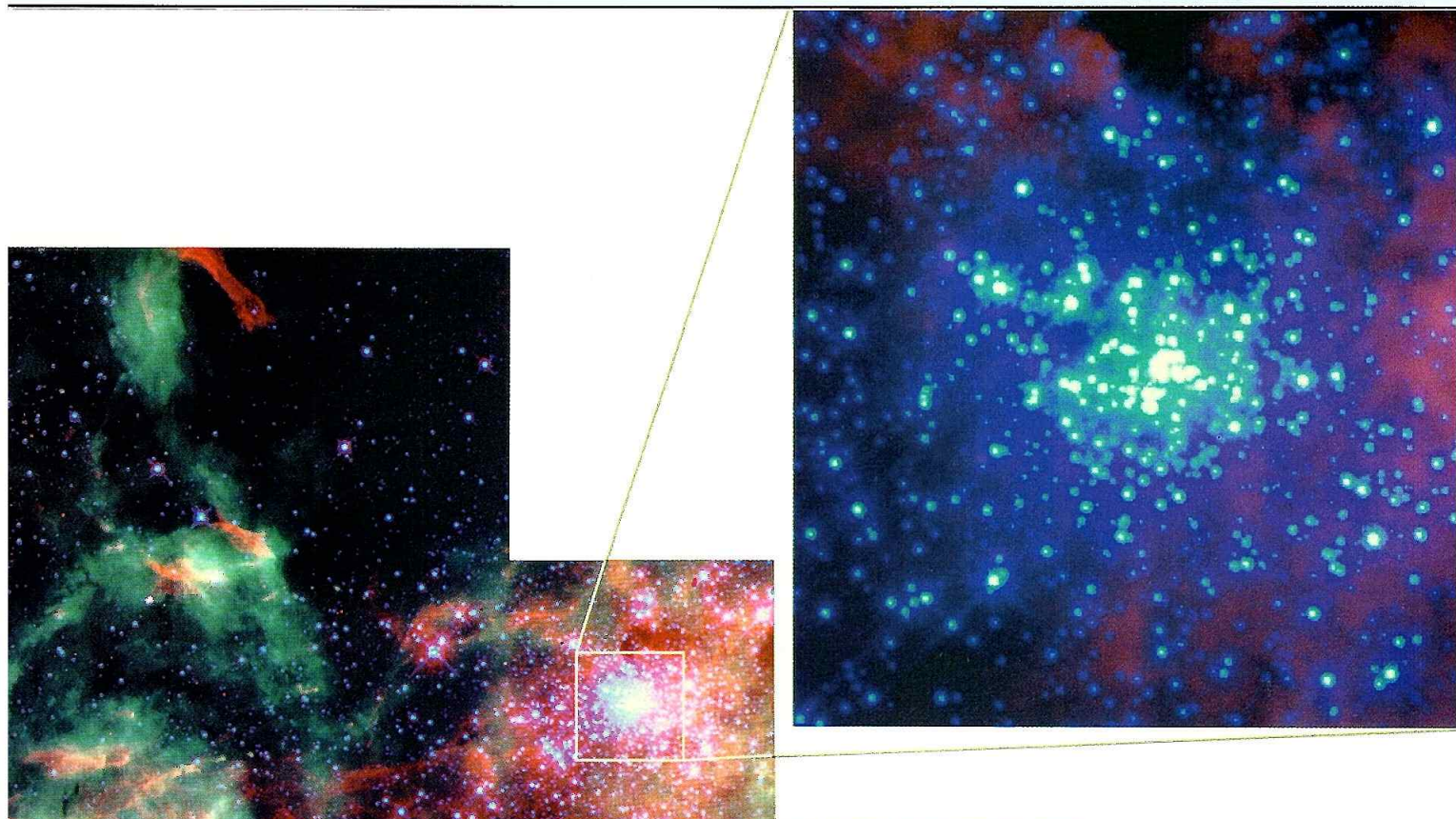
První číslo vyšlo v březnu 1920



5-6/1995  
924

**PLANETY PODOBNÉ ZEMI**  
 Má smysl pozorovat sluneční skvrny pouhým okem?  
 Lawrence H. Aller aneb jak se pozemský zlatokop změnil ve hvězdného

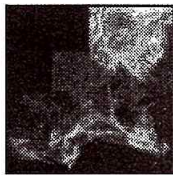
76. ročník  
**5-6/1995**  
 strany 85-124  
 cena 50 Kč/60 Sk



### PRVNÍ STRANA OBÁLKY

Pohled Hubblovým dalekohledem na rázové vlny po hvězdné explozi - Mlhovina zvaná Smyčka (Cygnus Loop) je nejjasnější částí známé Řasové mlhoviny v souhvězdí Labutě. Snímek pořízený širokoúhlovou a planetární kamerou (WFPC2) Hubblova kosmického dalekohledu zachycuje malou část tohoto pozůstatku po hvězdné explozi supernovy, která se odehrála zhruba před 15 000 lety ve vzdálenosti 2 500 světelných roků.

Obrázek je složený ze snímků ve třech barvách. Modře září dvakrát ionizované atomy kyslíku, které jsou zahřívány za čelem rázové vlny. Červené světlo přichází od jedné ionizovaných atomů síry, které svítí za rázovou vlnou v místech, kde už plyn po jejím průchodu poněkud vychladl. Zelené světlo je emitováno vodíkovými atomy. Většina vodíkové emise vychází ze zóny tenké jen několik astronomických jednotek bezprostředně za čelem rázové vlny. Tyto oblasti se na obrázku jeví jako ostře ohraničená zelená vlákna. - Viz též článek na str. 110. (foto - NASA/STScI/JPL)



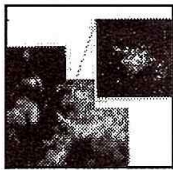
### DRUHÁ STRANA OBÁLKY

NAHOŘE - Dvojice srážejících se galaxií NGC 4038 a NGC 4039 známá jako Antennae (Tykadla) - Vzdálenost galaxie NGC 4038 od galaxie NGC 4039 je malá a jejich vzájemné gravitační působení je příčinou značných změn jejich struktury. Ve středových částech obou galaxií mohou být sledovány komplexy prachu, ionizovaný plyn a mladá hvězdy. Z okrajů obou systémů vycházejí obrovská protáhla „tykadla“ proudí hvězd a plynu, která dala systému jeho jméno. Na samém konci delšího tykadla je jasná skvrnitá oblast: skupina mladých hvězd vytvořených nedávno z plynu ve vláknu. Tato dvojice galaxií je vzdálena 80 milionů světelných let. - Viz též článek na str. 112. (foto - Royal Observatory, Edinburgh; Rosat)



### DOLE - Mlhovina 30 Doradus -

Horní snímek ukazuje R 136, hustou hvězdkupu mladých horkých hvězd ve středu mlhoviny 30 Doradus. Snímek byl pořízen planetární kamerou WFPC2, umístěnou na Hubblově kosmickém dalekohledu, při normálním rozlišení. Obrázek vlevo ukazuje mozaiku obřích oblastí HII, osvětlené ultrafialovým zářením z hvězdkupy. - Viz též článek na str. 114. (foto - NASA/STScI)



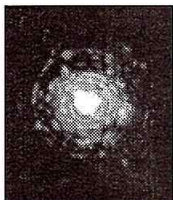
### TŘETÍ STRANA OBÁLKY

Souhvězdí Štít - Na snímku, který pořídil jablonecký astronom amatér Milan Antoš, je zachyceno souhvězdí Štít s dobře patrnými otevřenými hvězdkupami M 11 (vlevo nahoře), NGC 6712 (vlevo dole) a M 26 (dole). Snímek byl pořízen dne 19. VIII. 1993 expozicí 26 min (Sonnar 4/300 + filtr Deep Sky) na materiál Kodak TP4415 (hypersenzibilizovaný vodíkem).



### POSLEDNÍ STRANA OBÁLKY

Jedna z nejmenších hvězd ve vesmíru - Jednu z nejmenších hvězd v naší Galaxii pozoroval Hubbleův kosmický dalekohled (HST) - na snímku slabá hvězda napravo od svého jasnějšího společníka. Snímek byl pořízen HST ve viditelném oboru dne 11. června 1994 kamerou pro slabé objekty FOC. - Viz též článek na str. 111. (foto - NASA/STScI)



### OBSAH:

- 86 Planety podobné Zemi - *Mojmír Eliáš*
- 96 Žeň objevů 1994 (I.) - 2. Meziplanetární látka (I.) - *Jiří Grygar*
- 98 Má smysl pozorovat sluneční skvrny pouhým okem? - *Vojtěch Letfus*
- 99 Sledování nárazové vlny od Slunce k Zemi - *Ladislav Křivský*
- 110 Novinky z astronomie
  - Poslední objevené komety roku 1994 (110)
  - Rázové vlny po hvězdné explozi (110)
  - Nové značení komet (111)
  - Pozorování jedné z nejmenších hvězd vesmíru (111)
  - Průzkum rentgenových paprsků srážejících se galaxií (112)
  - Komise NASA pro objekty blízké Zemi (113)
  - Sonda Magellan ukončila činnost (113)
  - Planetka číslo 6000 pojmenována (113)
  - Kosmický dalekohled pozoruje mlhovinu 30 Doradus (114)
  - Zappafrank je náš aneb jak Frank Zappa k planetce přišel (115)
  - Planetka 1994 XM1 těsně minula Zemi (115)
- 116 Zprávy z oběžných drah
- 103 Noční obloha - červenec, srpen 1995
- 109 Okénko pozorovatelů
  - Pozorovatel potřebuje vědět, co se děje
- 107 Objekty vzdáleného vesmíru
- 100 Zeptali jsme se
  - Lawrence H. Aller aneb jak se pozemský zlatokop změnil ve hvězdného
- 118 Hvězdárny \* planetária \* astronomické kluby
  - 16. přehlídka SOČ ve fyzice (118)
  - Hvezdáreň v Eisenstadte (119)
  - Demonstrátorský seminář Praha 21. - 23. října 1994 (120)
  - V Benátkách nad Jizerou pokračuje astronomická tradice (121)
- 117 Osobnosti astronomie
  - Královský astronom John Flamsteed a Greenwich - *F. Jáchim*
- 110, 112, 114 Kdy, kde, co
- 118, 120 Astronomická kronika
- 111, 113, 115 Co je to, když se řekne...
- 123 Otázky & odpovědi
- 122 Vesmír se dívá
- 116 Sluneční aktivita
- 116, 121 Časové signály
- 124 Inzerce

### THE REALM OF STARS - Contents:

- 86 Planets Resembling the Earth - *Mojmír Eliáš*
- 96 Highlights in Astronomy 1994 (I) - 2. Interplanetary Matter (I) - *Jiří Grygar*
- 98 Has it any Sense to Observe Sunspots by the Naked Eye? - *Vojtěch Letfus*
- 99 Tracing of Shock Wave between the Sun and the Earth - *Ladislav Křivský*
- 110 Astronomy News
  - Last Discovered Comets Year 1994 (110)
  - Strain Waves after Star Explosion (110)
  - New Designation of Comets (111)
  - Observing of the Smallest Star in the Universe (111)
  - Investigation of X-Rays of Colliding Galaxies (112)
  - NASA Commission for Near Earth Objects (113)
  - Magellan Probe Terminated Its Activity (113)
  - Minor Planet No. 6000 Named (113)
  - Hubble Space Telescope and 30 Doradus (114)
  - Zappafrank is Ours or How Franck Zappa Came to The Minor Planet (115)
  - Close Encounter of the Minor Planet 1994 XM1 with the Earth (115)
- 116 News from Space Orbits
- 103 Night Sky - July, August 1995
- 109 Window of Observers
  - Observer Wishes to Know What is Going on
- 107 Deep-Sky Objects
- 100 We asked
  - Lawrence H. Aller or the Transformation of Terrestrial Gold-Digger Into a Stellar One
- 118 Public Observatories \* Planetaria \* Astronomical Clubs
  - 16th Review of the Student research Activity in Physics (118)
  - Eisenstadt Observatory (119)
  - Seminar of Public Observatories, Lectures in Prague, Oct. 21-23, 1994 (120)
  - Astronomical Tradition Continued in Benátky nad Jizerou (121)
- 117 Astronomical Personalities
  - Royal Astronomer John Flamsteed and Greenwich - *F. Jáchim*
- 110, 112, 114 When, Where, What
- 118, 120 Astronomical Chronicle
- 111, 113, 115 What Does It Mean, When We Say...
- 123 Questions & Answers
- 122 Astronomers Smile
- 116 Solar Activity
- 116, 121 Time Signals
- 124 Advertisement

**Das REICH DER STERNE - aus dem Inhalt:** Planeten Terrestrische - *M. Eliáš* (86); Ernte von Entdeckungen im Jahre 1994 (II.) - 2. Interplanetare Materie - *J. Grygar*; Warum Sonnenflecken mit unbewaffnetem Auge zu beobachten? - *V. Letfus* (98); Beobachtungen der Stosswellen von der Sonne zu der Erde - *L. Křivský* (99); Lawrence H. Aller - ein Goldgräber und Astronom - (100) Königer Astronomer John Flamsteed und Greenwich - *F. Jáchim* (117); Beobachter soll wissen was geschicht (109)

**Le ROYAUME DES ÉTOILES - en ce numéro:** Les planètes terrestres - *M. Eliáš* (86); Découvertes importantes en 1994 (II.) - 2. Matière interplanétaire - *J. Grygar* (96); Pourquoi observer les taches solaires avec l'oeil nu? - *V. Letfus* (98); Observations des ondes de choc du Soleil jusqu'à la Terre - *L. Křivský* (99); Lawrence H. Aller - un chercheur d'or et un astronome - (100); Astronom Royal John Flamsteed and Greenwich - *F. Jáchim* (117); Observateur doit savoir de quoi il s'agit (109)

**EI REINO DE LAS ESTRELLAS - en el contenido:** Planetas terrestres - *M. Eliáš* (86); Cosecha de descubrimientos en el año 1994 (II.) - 2. Materia interplanetaria - *J. Grygar* (96); Tienen sentido las observaciones de las manchas solares con el ojo desnudo? - *V. Letfus* (98); Observaciones de las ondas de choque desde el Sol hasta la Tierra - *L. Křivský* (99); Lawrence H. Aller - cateador de oro y después Astrónomo - (100); Astrónomo del Rei John Flamsteed and Greenwich - *F. Jáchim* (117); Observador necesita conocer lo que se observa (109)

### CITÁT MĚSÍCE

*Okrajovými podmínkami pro vesmír je, že žádné nejsou.*

*Stephen Hawking, britský fyzik (\*1942)*

# Planety podobné Zemi

*Mojmír Eliáš, Český geologický ústav, Praha*

Již déle než tři a půl století člověk podrobně studuje tělesa sluneční soustavy. Záhadnost vesmírných tuláků, planet, jitřila jeho zájmy již od nepaměti. Člověk si zprvu všiml jejich pohybu po obloze a snažil se jej popsat a vysvětlit. Nový pohled na sluneční soustavu začal vznikat až tehdy, když Galileo Galilei prvně zaměřil v roce 1609 svůj tehdy ještě poměrně nedokonalý dalekohled na Měsíc. Před jeho očima se najednou objevil nový svět, povrch pevného tělesa, které předtím žádný smrtelník nespátřil. Byla to Zemi zcela nepodobná členitá krajina. Pokrývaly ji pozemšťanům dosud neznámé nápadné útvary, kruhové krátery, které ležely jak na světlých drsných částech povrchu, označovaných jako měsíční pevniny, tak i na tmavých hladkých plochách nazývaných měsíční moře.

Od tohoto okamžiku se datuje začátek nové etapy poznávání sluneční soustavy. Nebylo jednoduché. Až do počátku kosmických letů měl člověk možnost pozorovat tělesa sluneční soustavy jen dalekohledy. I když mohutnost těchto přístrojů rychle rostla, podařilo se spatřit jen povrch Marsu, a to pouze v hrubých rysech. Výklady pozorování spíše vyvolávaly dohady a spory, než aby znamenaly jednoznačné závěry o pozorovaných jevech. Vzpomeňme například dlouhotrvající diskuzi o kanálech, o možnostech výskytu vegetace na Marsu a podobně.

Třebaže tento výzkum přinesl obvykle více otázek a vědeckých sporů než jednoznačných výsledků, znamenal často velký pokrok a dobrý základ pro další poznání. Kromě optického pozorování se podařilo získat zajímavé, i když někdy obtížně interpretovatelné výsledky také dalšími metodami, například spektroskopicky. Pomocí dalekohledů se sice do počátku šedesátých let tohoto století podařilo nashromáždit velké množství údajů, nelze je však jak počtem, tak ani kvalitou srovnávat s informacemi, které jsme získali po nástupu kosmonautiky. Ta přinesla zásadní zlom v poznávání těles sluneční soustavy.

Kosmonautika člověku především tělesa sluneční soustavy přibližuje. Znamená též základní změnu metodiky výzkumu. Zatímco v období studia planet pomocí dalekohledů byl jejich výzkum doménou astronomie a další vědní odvětví přispívala jen okrajově, s nástupem kosmonautiky se

situace zcela změnila. Čidla kosmických sond poskytla dříve nedosažitelné informace, na jejichž vyhodnocení se začaly podílet další vědní disciplíny. Patří k nim zejména geologie, geofyzika, meteorologie, klimatologie nebo i biologie a další vědy. Astronomická hlediska se nadále uplatňují ve fyzikálním pohledu na tato tělesa, ve fyzice planet. Zcela nový základ dostala planetární kartografie. Zatímco v období výzkumu pomocí dalekohledů bylo možno mapovat přehledně pouze Měsíc a mapy dalších těles byly vlastně jen subjektivně interpretované náčrtky, snímky z kosmických sond dovolují i u měsíců vzdálených planet konstrukci podrobných map. S přípravou kosmického výzkumu se začala rychleji formovat nová věda, planetologie. Její náplní je studium složení, vzniku a vývoje planet a jejich měsíců, případně i dalších, menších těles sluneční soustavy. Cílem tohoto komplexního výzkumu je poznání nejen planet samotných, ale sluneční soustavy jako celku.

Provedené výzkumy zřetelně ukázaly, že chceme-li porozumět dobře i jen jediné planetě, musíme poznat zákonitosti, které ovládají sluneční soustavu jako celek. Poznatky o dalších tělesech sluneční soustavy umožňují, abychom byli schopni pochopit složitý vývoj planet od jejich vzniku přes období vrcholné aktivity až k okamžikům, kdy jejich energie vyhasíná a stávají se pasivními tělesy, která jsou modelována jen vnějšími vlivy. Platí to i o hlubším poznání Země. Z hlediska trvání lidského života jsou takové změny na Zemi prakticky nepozorovatelné a celý problém se může jevit jako neřešitelný. Ve skutečnosti však tomu tak není. Analyzujeme-li poznatky, které se pomocí kosmických sond podařilo získat o ostatních planetách podobných Zemi (případně o dalších pevných tělesech ve sluneční soustavě, například o kometách, meteoroidech a zejména o některých měsících), zjistíme, že každé z těchto těles představuje v současné době jeden ze článků složitého vývoje. Tento přístup nám dovolu- je i hlubší poznání samotné Země, jejího životního prostředí a celkového vývoje.

Tento výzkum zdaleka není samoučel- ný, jak by se mohlo na první pohled zdát. Země skutečně představuje jen jedno z těles sluneční soustavy, třebaže svými speci- fickými rysy (voda, kyslíkatá atmosféra, pří-

tomnost života) je mezi planetami jedineč- ná. Tato jedinečnost se však netýká jen Země, výlučné je svým způsobem každé z těles sluneční soustavy. Na druhé straně jsou všechna vystavena stejným vlivům a na ně vázaným pochodům, které je mohou výrazně ovlivnit. Z těchto společných vli- vů, i když nebudeme diskutovat tak obecný jev, jakým je tíha, jmenujme alespoň pů- sobení Slunce a širší kosmické vlivy. Dále je pro nás velmi nepříjemnou skutečností, že Země, stejně jako další tělesa sluneční soustavy, může být nyní, podobně jako v minulosti, cílem kosmického bombardo- vání, které pravděpodobně již vícekrát v ge- ologické minulosti nepříznivě ovlivnilo nejen vývoj zemského povrchu, ale i ži- vota.

Odvětví planetologie, které se zabývá touto složitou problematikou a formovalo se v poměrně nedávné minulosti, nazval v roce 1959 George Gamov srovnávací plan- etologie. Obsahem srovnávací planetolo- gie je poznání vývoje těles sluneční sousta- vy v jejich vzájemných souvislostech z nej- různějších hledisek. Je to typicky interdis- ciplinární vědní odvětví, které vychází na jedné straně z astronomie (fyziky planet, ne- beské mechaniky a podobně) a na druhé straně z věd jako jsou meteorologie, biolo- gie a hlavně geologické vědy (všeobecná a historická geologie, mineralogie, petrogra- fie, geochemie, geofyzika a další).

Srovnávací planetologie je velmi složitá vědní disciplína a vyžaduje od vědců, kteří se jí zabývají, široký přehled i schopnosti mnohostranné spolupráce. V České repub- lice má již dlouhou tradici. Nedávno zesnu- lý profesor Otakar Matoušek (zemřel ve věku nedožitých 95 let 4. ledna 1994 ve Švédsku) patřil k prvním vědcům, kteří se snažili již ve dvacátých letech tohoto stole- tí moderními geologickými metodami ana- lyzovat vývoj měsíčního povrchu. O roz- voj srovnávací planetologie se pak přede- vším zasloužil v šedesátých letech svými pracemi Konrád Beneš, profesor geologie na Vysoké škole báňské v Ostravě.

Cílem tohoto článku není vyčerpávající shrnutí problematiky srovnávací planetolo- gie. To by vyžadovalo mnohem rozsáhlejší publikaci a k jejímu studiu by čtenář potře- boval hluboké vědomosti v nejrůznějších vědních oborech. Chci upozornit jen na vybranou problematiku, která má význam

pro hlubší pochopení stavby a složení planet terestrického (pozemského) typu a některých měsíců, které se svými vlastnostmi těmto planetám blíží.

### Základní charakteristika těles sluneční soustavy

Sluneční soustava se skládá z velmi různých těles, z nichž každé, především planety, představuje svým způsobem jedinečný objekt. Z hlediska srovnávací planetologie je možno podle složení tato tělesa rozdělit do tří velkých skupin. Jsou to:

a) **terestrická tělesa** (tělesa zemského typu) - Merkur, Venuše, Země, Mars, Měsíc a s určitými výhradami též Jupiterův měsíc Io a některé planety. Na jejich složení se významným způsobem podílejí minerály křemičitany (silikáty). Tato tělesa mají více nebo méně vyvinuté hutné jádro s význačným podílem kovového železa. Prodělala přerozdělení (diferenciaci) látek podle hustoty (mají vyvinuto jádro, plášť a kůru). Vzhledem k ostatním planetám jsou terestrické planety poměrně malé, zato však mají vysoké hustoty. Jen výjimečně kolem nich obíhají měsíce. Pokud tyto planety obaluje atmosféra, vznikla druhotně, odplyněním (degazací) nitra tělesa. Vyskytují se v porovnání s dalšími tělesy sluneční soustavy relativně blízko Slunce. Vyznačují se relativně pomalou rotací.

b) **obří a velké planety** (tělesa typu Jupiteru) s výrazně vyvinutými hustými primárními atmosférami, vzniklými v době vzniku (akrece) planety. Za zástupce obřích planet jsou považovány především Jupiter a Saturn. Obě tyto planety se vyznačují vysokými hmotnostmi a představují více než 90 % hmotnosti těles sluneční soustavy mimo Slunce. Tato obrovská tělesa se skládají hlavně z plynů, jejichž složení je blízké složení Slunce - převládá vodík, podstatně je zastoupeno hélium. Silikátové nebo kovové jádro představuje jen malou část jejich hmotnosti. Jak Jupiter, tak i Saturn mají rozsáhlou soustavu měsíců. Významným znakem těchto planet jsou dále pr-

tence, zvláště typicky vyvinuté u Saturnu. Dalším společným rysem je jejich nízká hustota. Tento typ planet se pohybuje ve středních až velkých vzdálenostech od Slunce. Charakteristické jsou také rychlou rotací. Někdy se jako samostatný typ nebo podtyp oddělují velké planety s méně hustými atmosférami, Uran a Neptun. Ty mají rovněž značné hmotnosti a relativně nízké hustoty. Podle modelů se předpokládá, že jejich jádra se svými vlastnostmi blíží jádrům obřích planet. U těchto těles pravděpodobně nedošlo k tak mohutné akreci plynu. Na složení jejich atmosfér se rovněž podílí hlavně vodík s héliem. Tato tělesa mají rovněž soustavy měsíců a prstence vyvinuté přinejmenším v náznacích. Pohybují se ve velkých vzdálenostech od Slunce. Typická je rychlá rotace, v případě Neptunu retrogradní.

c) **ledová tělesa**, ke kterým řadíme planetu Pluto a většinu měsíců velkých planet. Mají ledový povrch, pod kterým je plášť, který pravděpodobně tvoří voda. V nitru předpokládáme silikátové jádro. Jejich velikost je velmi proměnlivá a kolísá od rozměrů terestrických planet až po tělesa kilometrových rozměrů. Tato tělesa nelze považovat za neměnná, některá prodělala specifický geologický vývoj. Dynamika geologických pochodů je u nich především založena na objemových změnách při mrznutí vody.

V tomto přehledu se zaměříme jen na terestrické planety, které představují ucelený soubor těles se specifickými vlastnostmi. Předmětem vzájemného srovnávání terestrických planet je především jejich složení a vnitřní stavba, dále magnetické pole, povaha planetárních atmosfér, povrch těles a geologické procesy, které ovlivňují jeho vývoj a konečně vývoj těles samotných. Při vzájemných srovnáních je důležitým objektem Země. Je dosud nejpodrobněji prostudovaným tělesem, které dosáhlo mezi planetami nejvyššího vývojového stupně a slouží proto jako určitý standard při porovnávání.

### Složení a vnitřní stavba terestrických planet

Jak složení, tak i vnitřní stavbu těchto těles můžeme dosud nejdůkladněji zjišťovat jen na Zemi. V omezené míře se podařilo důležité planetární vlastnosti studovat též na Měsíci. U všech ostatních těles odhadujeme jejich průměrné chemické složení především z průměrné hustoty. Při těchto úvahách je nutno zvážit okolnost, že průměrná hustota závisí nejen na látkovém složení, ale i na stupni stlačení materiálu skládajícího příslušné těleso. Čím je stlačení vyšší, tím je i při stejném složení materiálu vyšší průměrná hustota. Určit míru stlačení je velmi obtížné, zejména proto, že naše znalosti o vnitřní stavbě planet jsou dosud velmi neúplné. Dále chybějí přesnější informace o chování mnohých látek za vysokých teplot a tlaků. Z těchto důvodů je nutno naše představy považovat jen za modelové.

Průměrné hustoty terestrických planet klesají s rostoucí vzdáleností od Slunce. Tento rozdíl zvláště vynikne, použijeme-li opravu na pravděpodobné stlačení (viz tab. 1).

U terestrických planet se předpokládá, že průměrná hustota závisí na poměrném zastoupení železa a jeho sloučenin a silikátů v planetě. Tyto úvahy dále vycházejí z předpokladu, že železo je podle chemického složení Slunce a meteoritů nejběžnějším těžkým prvkem ve sluneční soustavě. Z rozdílu mezi hustotami povrchových hornin, které jsou odrazem složení kůry, a celkovou hustotou tělesa vyplývá, zda má určité těleso odlišné složení ve svých hlubších částech. Hustoty vnitřních částí planety je možno odvodit z rozdílu gravitačního potenciálu zkoumaného tělesa a gravitačního potenciálu homogenní koule.

Informace o tom, jak je hmota v kulovitém tělese planety rozložena, poskytuje hodnota momentu setrvačnosti. Moment setrvačnosti udává závislost změn hustoty na vzdálenosti od středu kulovitého tělesa. Moment setrvačnosti  $I$  kulovitého tělesa o poloměru  $r$  a hmotnosti  $M$  je dán vztahem

$$I = k.M.r^2$$

Faktor momentu setrvačnosti  $k$  je pro dokonale homogenní kouli  $k = 0,4$  a u koule s hmotou soustředěnou do středu  $k = 0,0$ . U duté koule by hodnota tohoto koeficientu byla vyšší než 0,4. Z hodnoty koeficientu  $k$  se dá proto určit, zda má planeta jádro a jak je toto jádro vyvinuté.

Přesnější údaje o vnitřní stavbě planety poskytuje seizmický výzkum - studium ší-

▼ Tab. 1

Některé charakteristiky terestrických planet a Měsíce					
(Upraveno a doplněno podle J. A. Wooda (1984) a J. K. Beattyho - E. Chalkina (1990))					
charakteristika planety	Merkur	Venuše	Země	Měsíc	Mars
střední vzdálenost od Slunce [km]	57,91	108,20	149,60	149,60	227,94
hmotnost tělesa [kg]	3,303.10 <sup>23</sup>	4,870.10 <sup>24</sup>	5,976.10 <sup>24</sup>	7,349.10 <sup>22</sup>	6,421.10 <sup>23</sup>
rovníkový poloměr [km]	2439	6051	6387	1738	3393
hustota - současná [kg . m <sup>-3</sup> ]	5430	5250	5520	3340	3950
hustota - před stlačením [kg . m <sup>-3</sup> ]	5400	2900-4700	4000-4500	3300	3700-3800
faktor momentu setrvačnosti K	0,337	0,341	0,331	0,329	0,378
planetární evoluční index (PEI)	0,3	7,0	6,2	0,2	0,7
intenzita magnetického pole [γ]	220	0 až 30	31 000	<0,02	60
průměrná teplota povrchů [K]	100 až 625	735	295	100 až 385	250
perioda rotace	58,646d	242,982d	23h56m04s	27,32d	24d37m23s

ření zemětřesných vln. Tato metoda v současné době mohla být použita jen na Zemi a z části též na Měsíci. Na ostatních tělesech bude čekat na své uplatnění až do doby, kdy se na ně podaří dopravit nutná zařízení. Celkový obraz o hlubších částech planet doplňují údaje o magnetických polích, o tepelném toku a výsledky měření tíhových.

Dosavadní poznatky ukazují, že tělesa terestrických planet a velkých měsíců jsou hustotně rozrůzněna do tří vrstev: kůry, pláště a jádra. Vznik uvedené slupkovité struktury lze zjednodušeně vysvětlit dvěma základními představami o vzniku těchto těles - heterogenní nebo homogenní akrecí. Představa o heterogenní akreci předpokládá postupné hromadění hmot počínaje nejhustšími a konče hmotami s nízkou hustotou. Podle této představy mohla vrstevná struktura terestrických planet a jim příbuzných měsíců vzniknout v podstatě přímo. Za pravděpodobnější se však považuje hypotéza, že terestrické planety vznikaly homogenní akrecí. V tom případě je možno zjednodušeně předpokládat, že se současně hromadily hmoty nejrůznější hustoty a oddělily se v samotném tělese až později působením tíhy, tak zvanou gravitační diferenciací. Vychází se přitom z předpokladu, že se tělesa při svém vzniku nebo krátce po něm tak zahřála, že se roztavila a taveniny se oddělily podle své specifické hmotnosti. Je velmi pravděpodobné, že v počátečním období měly na zahřátí tvořící se planety značný podíl impaktující částice, dále pak tíhové smršťování hromadící se látky a v dalších fázích pak teplo uvolňované rozpadem radioaktivních izotopů.

Jak dokazuje jednak hodnota faktoru momentu setrvačnosti  $k = 0,331$ , jednak výsledky seizmického výzkumu, Země je dobře diferencovaná, počínaje relativně lehkými silikáty v zemské kůře a konče hutným jádrem obsahujícím značné množství železa. Podobně Merkur má relativně lehčí kůru, pravděpodobně ochuzenou o určitý podíl železa. Vysoká hodnota faktoru  $k = 0,337$  ukazuje na značný stupeň diferenciace a na dobře vyvinuté, relativně velké a hutné jádro, obsahující pravděpodobně vysoký podíl železa. Podobný ráz vnitřní stavby mají i Venuše a Mars. U Měsíce je stupeň této diferenciace nejnižší ( $k = 0,392$ ).

Ze srovnání modelů vnitřní stavby terestrických planet vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od Slunce a s celkovým poklesem hustoty klesá i relativní velikost planetárního jádra a zároveň se snižuje i poměr železa k silikátům (tedy obecně roste podíl lehčích prvků v celkovém složení planety) - viz tab. 2.

### Vnitřní stavba terestrických planet

(Upraveno podle Heada a kol., 1977)

část planety	Merkur	Venuše	Země	Měsíc	Mars
kůra [%]	7,5	3,0	1,0	6,0	1,8
plášť [%]	12,3	48,1	55,3	70,3	64,4
jádro [%]	80,2	48,9	43,7	23,7	33,8

▲ Tab. 2

### Magnetická pole planet

Na první pohled se může zdát překvapující, že významné údaje o povaze nejhlubší části Země, zemského jádra, získáváme zkoumáním jevů probíhajících v její vysoké atmosféře. Zdrojem těchto informací jsou výsledky studia polárních září. Ty vznikají jako důsledek vzájemné interakce zemského magnetického pole s částicemi vyvrženými ze Slunce. Předpokládá se totiž, že hlavní složka magnetických polí planet, tedy i Země, vzniká procesy působícími v jádře planet, případně ve styčné oblasti jádro - plášť. U Země tato představa vychází z předpokladu, že ve vnější části jádra existuje tavenina. Její konvektivní pohyb vyvolává magnetohydrodynamické procesy, jejichž působení je možno přirovnat k činnosti mohutného dynamu. Pro přítomnost taveniny ve vnější části jádra svědčí skutečnost, že na rozhraní jádra a pláště mizejí příčné zemětřesné vlny. Ty se totiž v kapalinách nešíří. Studium magnetického pole planety je tedy klíčem k poznání jak její vnitřní stavby, tak i dynamiky jádra samotného. Toto studium přináší i poznatky o tepelném vývoji planety v její vzdálené minulosti. Ukážeme si to na příkladech jednotlivých terestrických planet.

Magnetické pole o značné intenzitě mají Země a Merkur. Freeman předpokládá, že magnetický moment tělesa je úměrný násobkům rychlosti rotace a objemu jádra umocněných na 1,25. Podle tohoto vztahu je možno s jistotou pravděpodobností určit velikost té části kovového jádra, ve které dochází ke konvektivnímu proudění vyvolávajícímu magnetohydrodynamické jevy, které podle některých představ polarizují a zesilují slabé galaktické nebo sluneční magnetické pole. Velmi zajímavým objevem bylo zjištění magneticky aktivního jádra Merkuru, který byl podle ostatních hledisek považován za těleso z geologického hlediska mrtvé a o němž zároveň víme, že velmi pomalu rotuje.

Při analýze magnetických polí terestrických planet je nutno uvažovat i o působení složek magnetického pole, jejichž vznik byl vyvolán korovou magnetickou remanencí, to jest magnetizací, která se vyskytuje v nepřítomnosti magnetického pole. Takový typ

magnetizace byl zjištěn na Měsíci. Tato složka magnetického pole může být buď odezvou dnes již neexistujícího vnitřního magnetického pole nebo důsledkem působení vnějších magnetických polí. (V případě Měsíce není vznik jeho magnetického pole jednotně vysvětlován. Předpokládá se, že remanentní pole vzniklo v minulosti působením vnitřního pole nebo že je důsledkem magnetizace vyvolané například slunečním větrem.)

Velmi slabé magnetické pole bylo zjištěno u Marsu. U Venuše magnetické pole prakticky chybí.

Problematika magnetických polí jednotlivých planet vyžaduje ještě další výzkumy, podobně jako je nutno dále zvažovat interpretace prováděné podle těchto zjištění.

### Planetární atmosféry

Současné složení atmosfér terestrických planet je obecně dáno vztahem mezi složkami uvolněnými při diferenciaci a odplynutím planety a složkami zachycenými planetou ze slunečního větru. Složení planetárních atmosfér je dále ovlivněno vzájemnými reakcemi mezi jednotlivými složkami atmosféry a litosféry (například redukce nebo oxidace určitých minerálů, jejichhydratace a podobně), případně i s hydrosférou a biosférou planety (jako na Zemi) - viz tab. 3. Složení atmosféry ovlivňují také pochody vyvolané disociačními reakcemi ve vysoké atmosféře a spojené s případným unikem některých složek atmosféry do meziplanetárního prostoru. U terestrických planet, na rozdíl od planet velkých, se tedy nezachovaly primární atmosféry, obsahující složky zachycené planetou v období akrece nebo kondenzace.

Vývoj a složení atmosféry určité planety jsou podstatně ovlivněny její hmotností a tím i její geologickou aktivitou. Čím je určitá planeta geologicky aktivnější (tedy čím intenzivnější byla její degazace a čím intenzivnější vulkanismus probíhal nebo probíhá na jejím povrchu), tím je její atmosféra hustší. Významným faktorem je i teplota atmosféry. Ta určuje jak stupeň jejího zachování, tak i její dynamiku. Teplota atmosféry souvisí mimo jiné s teplotou povr-

### Atmosféry terestrických planet

(Upraveno podle J. A. Wooda (1984) a J. K. Beattyho - E. Chaikina (1990))

planeta	povrchová teplota [K]	tlak na povrchu [N.m <sup>-2</sup> ]	CO <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> O [%]	N <sub>2</sub> [%]	O <sub>2</sub> , O [%]	Ar [%]
Venuše	760	100,81	96,4	0,14	3,4	<0,1	?
Země	288	1,013	0,03	<1	78	21	0,9
Mars	368	0,00527	95,3	<0,1	2,7	0,1-0,4	1,6

▲ Tab. 3

chu planety, která je určena především vzdáleností planety od Slunce (to je intenzitou slunečního záření dopadajícího na povrch planety). Z dalších vlivů se uplatňují tepelný tok planety, její albedo, působení skleníkového nebo ledárnového efektu a podobně. Tyto vlivy, jak například ukázalo studium vývoje atmosféry v geologické minulosti Země, se časem jak kvalitativně, tak i kvantitativně mění.

Měsíc má relativně malou hmotnost, je již dlouhou dobu geologicky pasivní a proto nemá atmosféru ve vlastním smyslu slova. Na jeho povrchu byly zjištěny jen projevy slunečního větru a krátkodobě přítomné výrony plynů z měsíčního nitra (přechodné jevy, známé například z kráteru Alphonsus a další). Podobně nemá atmosféru též Merkur. U něho zachování atmosféry negativně ovlivnila blízkost Slunce a tím i vysoká teplota. Mars má řídkou atmosféru složenou především z CO<sub>2</sub>. Její nízká hustota je projevem omezené dega-

zace a relativně málo intenzivní geologické činnosti. Opakem atmosféry Marsu je atmosféra Venuše. Ta je výsledkem intenzivní degazace a vulkanické činnosti. Rozdíly v geologických projevech obou planet (obr. 1) se dají nejspíše vysvětlit jejich odlišnou hmotností. Složení Venušiny atmosféry navíc ovlivňuje vysoká teplota planetárního povrchu, působení skleníkového jevu a volný přístup složek slunečního větru do atmosféry, která není chráněna blokujícím působením planetárního magnetického pole.

Specifické je složení zemské atmosféry, která se vyznačuje vysokým obsahem dusíku a kyslíku a nízkým obsahem oxidu uhličitého. Pro vznik dnešního složení atmosféry Země má nezastupitelný význam fotosyntéza, která způsobila snížení původně vysokého obsahu oxidu uhličitého. Organismy se dále podílely na vazbě CO<sub>2</sub> do minerálů, uhličitánů. Vlastnosti zemské atmosféry jsou dány též přítomností hydro-

sféry, zvláště ve formě oceánů. Ty jsou důležitým zásobníkem pro některé složky atmosféry (obr. 1).

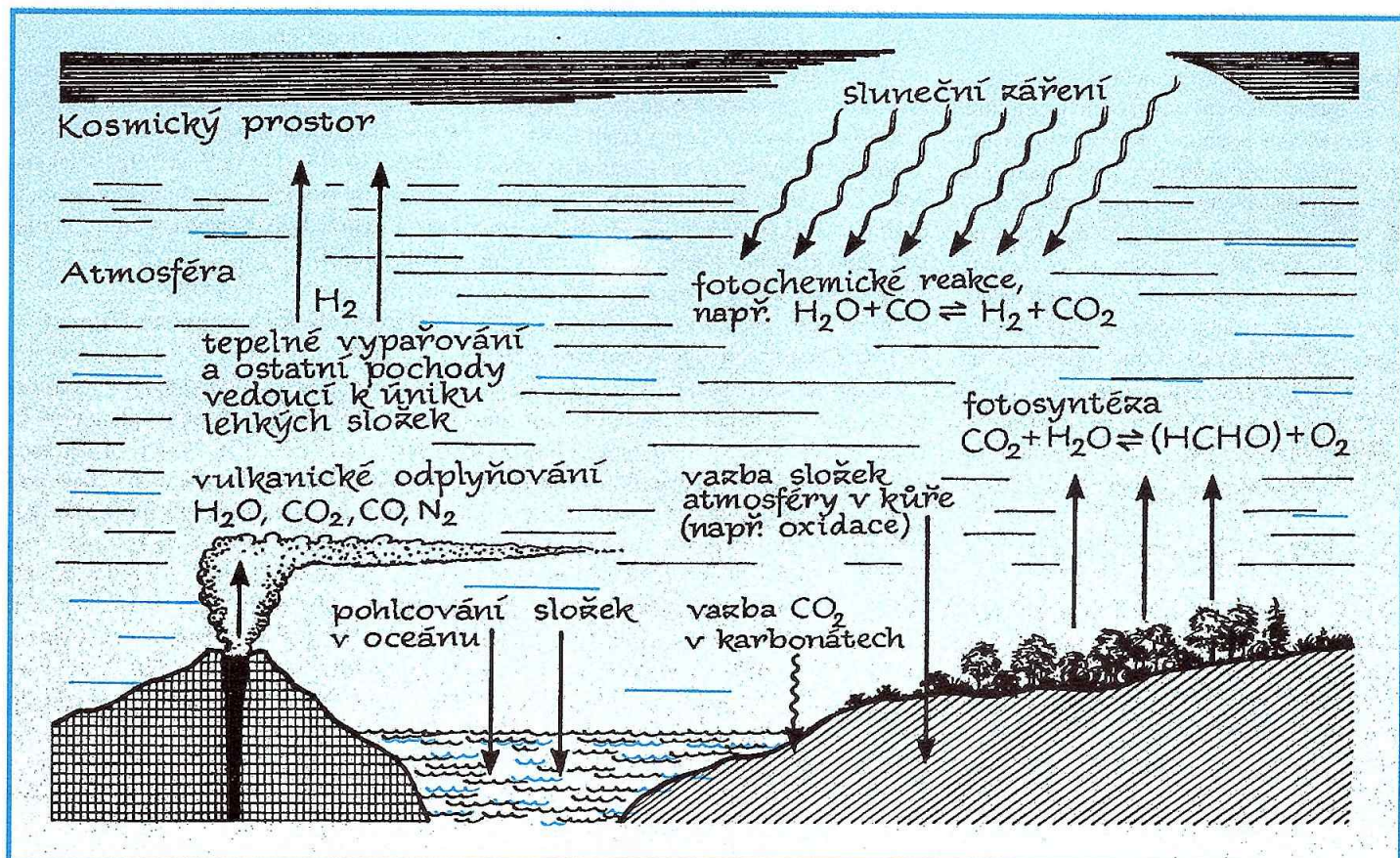
Složení atmosfér Venuše, Země a Marsu je pravděpodobně do určité míry určeno i původními odlišnostmi ve složení planet. Předpokládá se, že tyto rozdíly byly vyvolány rozdílnými teplotami v místech jejich akrece.

Hmotnosti jednotlivých planet ovlivnily nejen vznik atmosfér, ale také jejich udržení, respektive rychlost, s jakou jednotlivé složky atmosféry unikají do meziplanetárního prostoru. Například ochuzení Marsu o vodu se někdy vysvětluje jako důsledek fotodisociace vodních par a následného úniku takto uvolněného vodíku do meziplanetárního prostoru. Kyslík, který se těmito procesy uvolnil, byl vázán v Marsově litosféře oxidačními procesy.

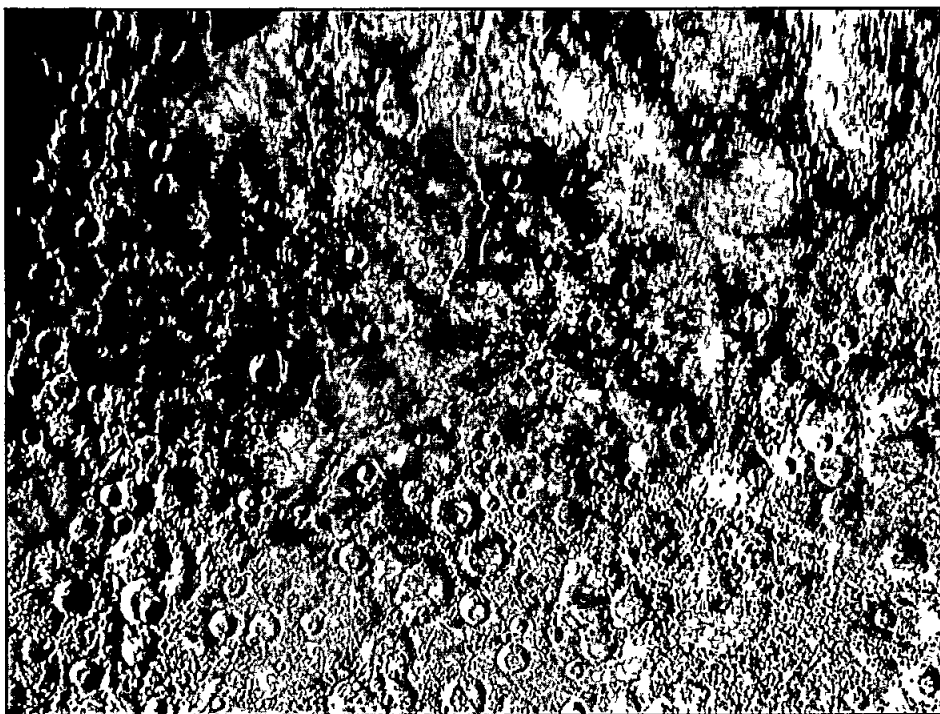
Třebaže naše znalosti o planetárních atmosférách nejsou ani zdaleka úplné, je zřejmé, že typ obecné cirkulace atmosféry závisí na intenzitě dopadajícího slunečního záření, tepelném toku, teplotě atmosféry, rotační periodě a na struktuře atmosféry. Ve sluneční soustavě je možno odlišit tři základní typy *atmosférické cirkulace*. Jsou to:

1. *cirkulace v jedné buňce* sahající od pólu k rovníku, se silným zahříváním subsolární atmosféry a se slabým působením Coriolisovy síly (Venuše)

2. *cirkulace Barnardova* typu vyvolaná



▲ Obr. 1 - Schema vzniku a vývoje druhotné atmosféry na terestrických planetách.



▲ Obr. 2 - Merkur - Mozaika snímků povrchu Merkuru pořázená sondou Mariner 10 zobrazuje oblast Borealis Planitia s kruhovými impaktními pánvemi Goethe (vlevo nahoře, skutečný průměr 340 km) a další nepojmenovanou (uprostřed snímku, skutečný průměr asi 1 000 km). Obě pánve byly po svém vzniku zalaty taveninou a proto se projevují jako hladké plošiny. Celou plochu zobrazenou na snímku pokrývají impaktní krátery. Povrch Merkuru je ukázkou geologicky mrtvé krajiny, kde kromě impaktů kosmických těles a kosmického zvětrávání nepůsobí žádné další geologické procesy.

jednotným spodním hraničním zahříváním a silným působením Coriolisovy síly (Jupiter)

3. cirkulace hybridního typu (Země, Mars).

## Povrch planet

Povrchové útvary na planetách odrážejí protichůdné působení vnitřních a vnějších geologických pochodů. K vnitřním (endogenním) geologickým pochodům patří především vulkanismus a horotvorná činnost. K vnějším (exogenním) geologickým pochodům počítáme působení tíhy, atmosféry, biosféry a hydrosféry a mimoplanetární vlivy (impakty, kosmickou erozi, vlivy záření). Působení všech těchto procesů je velmi mnohotvárné a ve stručném přehledu obtížně postižitelné. Všimneme si proto jen některých projevů, které jsou důležité z hlediska srovnávací planetologie (tab. 5).

### Impakty kosmických těles

Nejprimitivnějšími povrchovými útvary, které jsou rozšířeny v různém počtu a velikosti na povrchu všech terestrických planet a měsíců, jsou impaktní krátery. Tyto prohlubně převážně kruhovitě nebo elipsoidálního obrysu (obr. 2), nejrůznějších rozměrů (od mikrometrů po rozlehlé impaktní pánve o průměru více než 2 000 km), lemované valy vyvrženého materiálu, představují jizvy po dopadech kosmických tě-

les na povrch planety nebo měsíce, které byly provázeny mohutným výbuchem, s krátkodobým výrazným zvýšením tlaku a teploty. Tyto extrémní podmínky vedly ke specifickým přeměnám hornin na povrchu příslušného tělesa. Tyto změny souborně označujeme jako impaktní přeměnu (metamorfózu). Vznikají při ní vysokoteplotní a vysokotlaké minerální fáze a drcené horniny, které i po částečné destrukci impaktní struktury ukazují na její příslušnost.

Impaktní struktury tedy vznikají působením vnějších, kosmických vlivů. Jejich přítomnost proto není nijak vázaná na stupeň geologického vývoje planety. Mohou tudíž vznikat i na geologicky velmi jednoduchých tělesech bez projevů vnitřní geologické činnosti. Postihují zejména tělesa bez atmosféry. Atmosféry vytvářejí přirozený štít proti dopadům (zároveň chrání povrchy planet i před nepříznivými účinky záření různých vlnových délek), a to tím lépe, čím jsou hustší. Na tělesech geologicky vyvinutějších jsou impaktní krátery rychleji ničeny geologickými pochodů jak endogenními (sopečná činnost, tektonické pochodů), tak i exogenními (působení vody, větru, svahové pohyby a tak dále). Na geologicky primitivních tělesech jsou impaktní krátery rozrušovány jen dalšími impakty, které na místě zničených kráterů vytvářejí krátery další. Četnost vzniku impaktních kráterů se během vývoje sluneční soustavy měnila. Výzkum Měsíce prokázal, že před  $4 \cdot 10^9$  roky byly dopady kosmických

těles na povrchy planet a měsíců 100-krát až 1 000-krát častější, než jsou dnes. Pak se tok dopadajících kosmických těles postupně ustálil a po dobu  $3 \cdot 10^9$  roků je zhruba stejný jako dnes. Proto počet impaktních kráterů určité velikosti na jednotku plochy je měřítkem stáří planetárního povrchu. Příkladem tohoto jevu je povrch Měsíce, který má relativně starší měsíční pevniny hustěji pokryté impaktními krátery než povrch mladších měsíčních moří. Relativní zastoupení impaktních kráterů různé velikosti může proto sloužit k určení relativního stáří povrchu těles, zejména geologicky primitivních (viz obr. 3).

Intenzivní bombardování, které proběhlo před  $4,0 \cdot 10^9$  roky a je výrazně patrné na měsíčních pevninách a na povrchu Merkuru, se považuje za projevy dozvuků akrece. Do konce tohoto období spadá i vznik velkých impaktních pánví (například Mare Serenitatis nebo Mare Imbrium na Měsíci, Caloris na Merкуру a podobně). Na Marsu jsou staré části povrchu, intenzivně pokryté krátery, zčásti zakryté pozdějšími projevy sopečné činnosti nebo větrem přemístěnými uloženinami. Vulkanická činnost překryla i převážnou část impaktních kráterů na Venuši. Na Zemi, kde působí různé geologické pochody nejintenzivněji, jsou impaktní krátery dosti vzácné.

Obecně tedy platí, že čím intenzivnější geologický vývoj planeta prodělala nebo prodělává, tím méně jsou na jejím povrchu zachovány impaktní krátery a tím je i tento povrch mladší (obr. 9).

Na Zemi nejsou stopy po nejstarší generaci impaktních kráterů vůbec známé. Nejstarší dosud zjištěná zemská kůra (Grónsko, Minesota - USA) je  $(3,7 \text{ až } 3,9) \cdot 10^9$  let stará a nenesie stopy po impaktních procesech. Lze ji geneticky srovnávat s kůrou geologicky mladší.

### Magmatická a sopečná činnost

Charakteristickým a významným geologickým procesem, který formuje planetární litosféry, je působení magmatu v hloubce (magmatismus) a jeho výlevy na planetární povrch, projevující se jako sopečná (vulkanická) činnost. Zdrojem energie pro tyto procesy je zpravidla teplo uvolňované při rozpadu radioaktivních izotopů prvků v plášťích těles. Podíl magmatické a vulkanické činnosti je významným ukazatelem vnitřní aktivity planety a jejího tepelného vývoje. Pro planety a měsíce je velmi významný bazaltový („čedičový“) vulkanismus. Jeho projevem jsou zvláště bazaltové plošiny a štítové sopky.

Bazaltové plošiny vznikly plošně rozsáhlými, opakovanými výlevy (tab. 4). Pokrý-

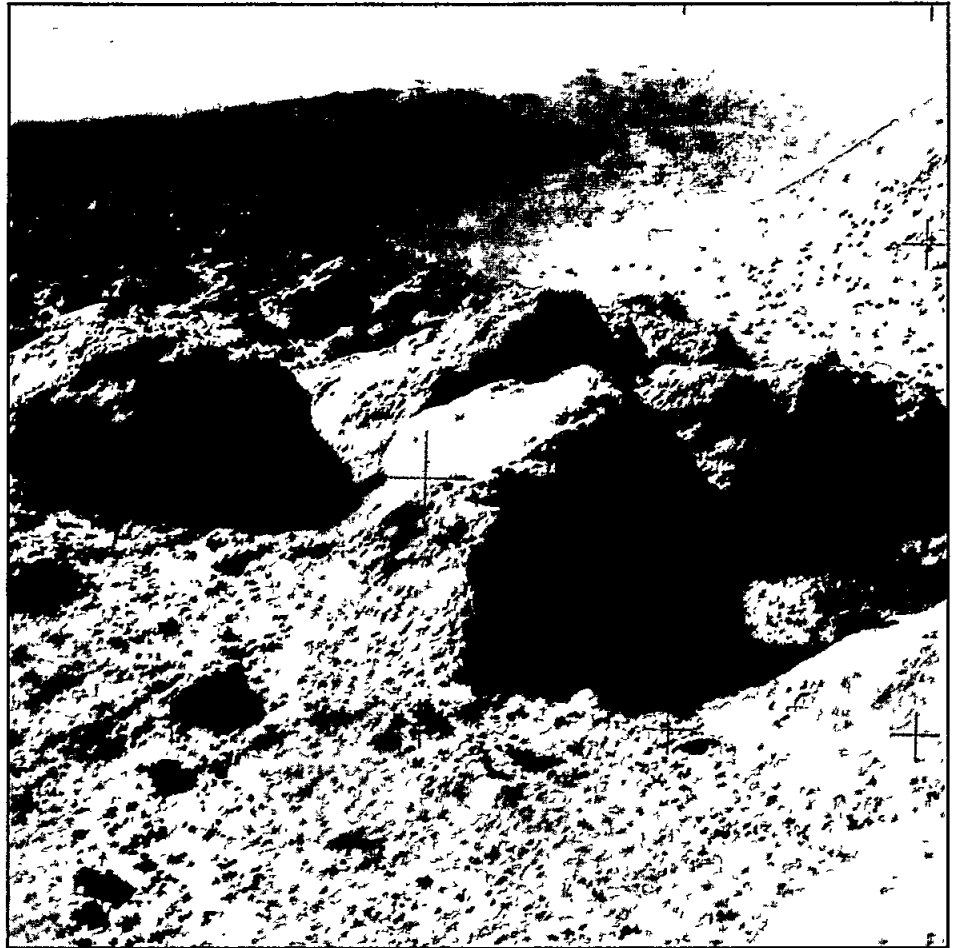


vají významnou část celkové plochy povrchu terestrických planet. Patří k nim měsíční moře (17 % povrchu), hladké plošiny na Merkuru (více než 21 % dosud zobrazeného povrchu), nízce položené plošiny na Venuši (více než 27 % povrchu), plošiny na Marsu, řídky pokryté impaktními krátery (více než 30 % povrchu) a konečně dno oceánů na Zemi a bazaltové plošiny na kontinentech (více než 60 % povrchu). I když je vznik těchto útvarů různý, jejich rozsah je opět jedním z měřítek geologické aktivity planety.

Štítové sopky mají tvar rozsáhlých, zpravidla plochých kuželů, které vznikají nad vzestupnými proudy (tepelnými trubnicemi) v planetárním pláští. Patří k nim největší sopečné útvary ve sluneční soustavě (Olympus Mons na Marsu, Beta Regio na Venuši, Havajské ostrovy na Zemi a jiné). Rozsah a výška těchto útvarů jsou zpravidla omezeny tloušťkou (únosností) kůry planety a v neposlední řadě i její pohyblivostí (obr. 4). Mars a Venuše mají mnohem tlustší kůru než Země. Rozsah štítových sopek na těchto planetách dále ukazuje, že oproti Zemi jejich litosféra není pohyblivá a jednotlivé sopečné útvary mají dostatek času, aby se vyvinuly do obřích rozměrů. Oproti tomu pohyblivá litosféra na Zemi nedovoluje vznik jednotlivých velkých útvarů, ale dochází spíše ke vzniku menších útvarů v řadách (například Havajské ostrovy).

Vzájemné srovnání terestrických planet ukazuje, že s velikostí (hmotností) u nich roste stupeň sekundární diference, intenzita vulkanické činnosti a zároveň i rozmanitost jejího projevu. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že větší (a tím i hmotnější) planety obsahují více radioaktivních látek, které jsou zdrojem tepelné energie pohánějící geologické pochody, jež jsou u hmotnějších planet rozmanitější a zároveň i intenzivnější. Mimoto jsou velké planety lépe tepelně izolované, protože mají výhodnější poměr mezi plochou povrchu a objemem.

Z rozsahu (intenzity) vulkanické činnosti a z jejího trvání jsou odvozeny dvě relativní míry geologické aktivity planet. Výše jsme již uvedli, že určitým měřítkem geologické aktivity planety je poměr plochy planetárního povrchu hustě pokryté impaktními krátery (to je té části povrchu, která se formovala v raných vývojových fázích planety a od té doby nebyla dalšími geologickými pochody změněna) k ploše přeměněné vulkanickými a dalšími pochody (to je té části povrchu planety, která byla změněna). Mírou je tak zvaný planetární evoluční index (PEI), který bude pro Venuši pravděpodobně vyšší než 7,0; pro Zemi je 6,2, pro Mars 0,7, pro Merkur 0,3 a pro Měsíc 0,2.



▲ Obr. 3 - Měsíc - Oblast Rima Hadley. Vzhled měsíčního povrchu v okolí místa přistání Apolla 15. Měsíční povrch pokrývá různě mocná vrstva tak zvaného měsíčního regolitu - větších a menších horninových úlomků až drobného prachu. Tyto částice vznikly rozbitím hornin při impaktech různé mohutnosti a působením kosmického zvětřování - abraze vyvolané mikrometeority, tokem částic slunečního větru nebo kosmického záření, případně změnami teploty.

Druhým ukazatelem je doba, po kterou na tělese existovala sopečná činnost. Určit trvání sopečné činnosti je pro některá tělesa dosud obtížné. Země je stále vulkanicky aktivní. Problémem zůstává Venuše, na které podle některých úkazů (občas zjišťované zvyšování obsahu oxidu siřičitého) by mohla vulkanická činnost rovněž ještě probíhat. Na Měsíci skončila vulkanická činnost před (3,0 až 2,5).10<sup>9</sup> roky. Je pravděpodobné, že na Marsu a na Merkuru došlo k ukončení sopečné činnosti někdy mezi těmito krajními hodnotami. Zároveň je zřejmé, že na Marsu trvala sopečná činnost déle než

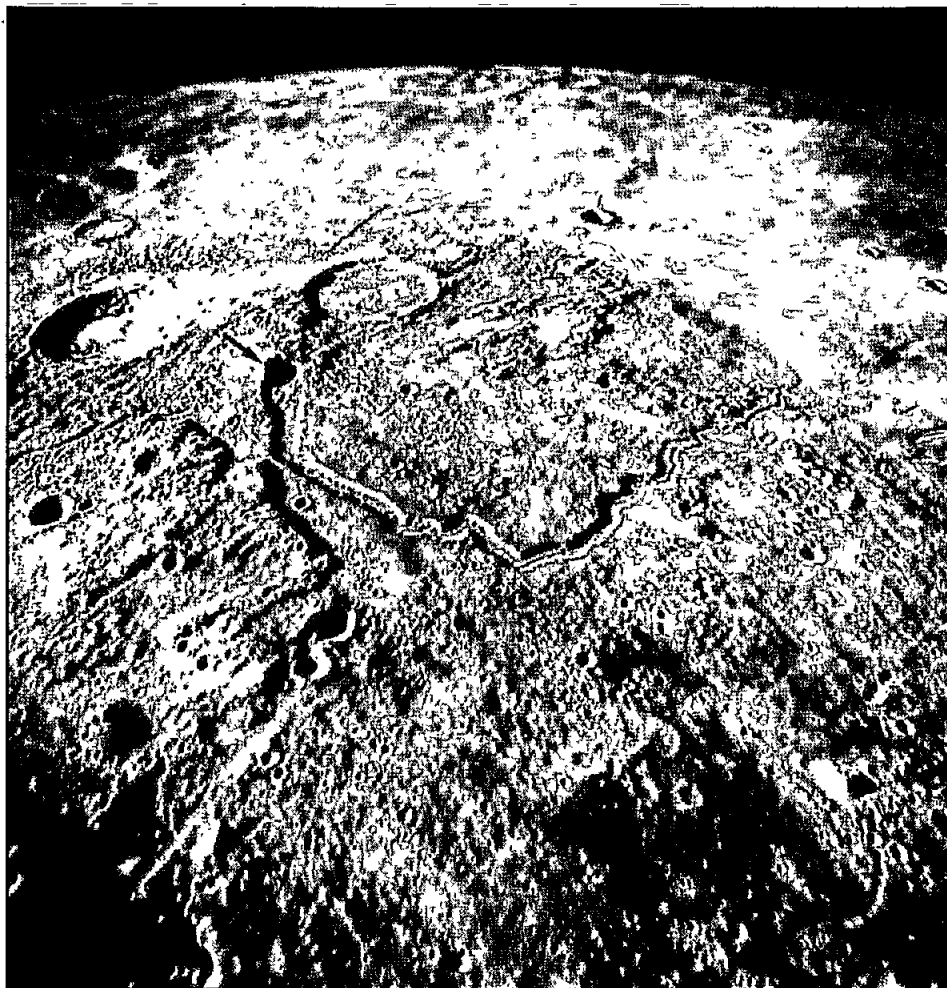
na Merkuru. I v tomto případě se potvrzuje obecná závislost, že hmotnější a větší planeta je geologicky aktivnější a déle činná.

Zcela specifické projevy vulkanismu má Jupiterův měsíc Io. Produktem tohoto vulkanismu - lávových proudů z jícnu dobře definovaných sopek a plyných výronů - jsou především roztavená síra a oxid siřičitý. Toto těleso terestrického typu je poměrně malé a málo hmotné. Přitom jeho PEI index je velmi vysoký, pravděpodobně vůbec nejvyšší ve sluneční soustavě a těleso je stále vulkanicky činné, i když ve srovnání s dalšími terestrickými planetami by

▼ Tab. 4

Zastoupení základních povrchových geologických a geomorfologických jednotek (Podle různých pramenů, upraveno)					
jednotka	Merkur	Venuše	Země	Měsíc	Mars
impaktní krátery [%]	79,3	>0,1	>0,1	83,3	52,4
vulkanity celkem [%]	20,7	99,9	63,7 <sup>*)</sup>	17,7	43,8
plošné výlevy [%]	20,7	94,3	60,5	17,7	42,2
štítové sopky [%]	-	5,6	3,2	-	1,6
vrásová pohoří [%]	-	-	31,8	-	-
polární ledy [%]	-	-	4,8	-	4,8

<sup>\*)</sup> U Země je též započtena plocha oceánského dna.



▲ Obr. 4 - Měsíc - Šikmý pohled z orbitálního modulu Apollo 15 na vulkanickou plošinu Aristarchus s význačným impaktním kráterem Aristarchus. Je to velmi jasný kráter o průměru 40 km, z něhož vycházejí výrazné jasné paprsky. Předpokládá se, že tento kráter vznikl asi před 450 miliony roky. Dalším nápadným útvarem je Vallis Schröteri, nejdelší sinusovitě údolí na Měsíci. Začíná v kráteru o průměru 6 km (tzv. „Kobří hlava“), rozšiřuje se až na 10 km a táhne se do vzdálenosti více než 250 km. Místy je na dně tohoto až 1 000 m hlubokého údolí patrný další zařezaný kanál. Způsob vzniku této struktury není zcela jasný. Předpokládá se, že je z části podmíněna tektonicky a že to je ve své podstatě lávový kanál, jedna z přírodních cest lávy do měsíčního moře Oceanus Procellarum (v pozadí).

podle své velikosti mělo být už dávno vyhaslé. Je zřejmé, že zdrojem tepelné energie tohoto tělesa nemůže být radioaktivní ohřev. Vědci došli k závěru, že zdrojem tepla zde bude slapový ohřev vyvolaný slapovými vlivy Jupiteru.

### Tektonická činnost

Podle výskytu morfostrukturních forem na povrchu planet (to je tektonicky podmíněných povrchových útvarů) má každá z terestrických planet svůj vlastní tektonický styl. Ten je způsoben stupněm geologického vývoje planety, povahou litosféry (zda je litosféra planety tvořena jen jednou nepohyblivou deskou nebo se skládá ze souboru vzájemně vůči sobě pohyblivých desek) a pochody probíhajících v plášti (astenosféře). Tektonické pochody není možné chápat odděleně od pochodů magmatických (spojených s vystupováním magmatu do kůry) a vulkanických. U méně vyvinutých planet je nutno zvažovat i vlivy

impaktů, zvláště velkých, při kterých se uvolnilo značné množství energie.

Kromě Země je nutno všechna ostatní terestrická tělesa charakterizovat jako jednodesková, s tuhou, zpravidla nepohyblivou litosférou a pravděpodobně i s nepohyblivou nebo velmi omezeně pohyblivou astenosférou. U některých těles, například u Marsu, není vyloučeno, že za výjimečných okolností mohlo dojít k mimořádných důvodů (například při obřím impaktu, při

▼ Tab. 5

Modelování povrchu planet					
Vliv	Merkur	Venuše	Země	Měsíc	Mars
biosféra	-	-	+	-	-
led, sníh	-	-	+	-	+
tekoucí voda	-	-	+	-	+
mraz	-	-	+	-	+
říha	+	-	+	+	+
impakty	+	+	+	+	+
tektonika (obecná)	+	+	+	+	+
horotvorné pochody	-	-	+	-	-
vulkanismus	+	+	+	+	+

vyrovnávání nerovnováhy v kůře a plášti planety) k pootočení desky tvořící litosféru jako celku. Pohybující se litosférické desky a projevy na ně vázané (vznik oceánů a kontinentů s pásemnými pohořími) byly zjištěny jen na nejvyvinutější terestrické planetě - Zemi. Všimněme si však jednotlivých těles a stupně jejich vývoje.

Příkladem tělesa s jednoduchou tektonikou je Měsíc. Na jeho povrchu je možno vyčlenit tyto typy tektonického porušení:

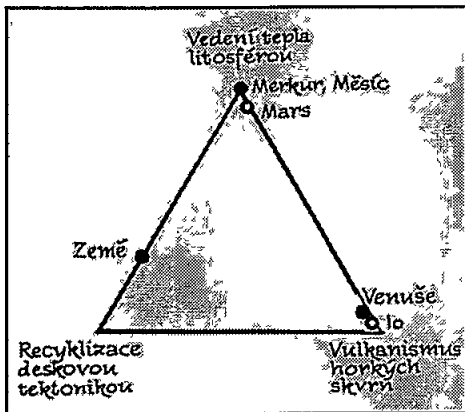
a) *měsíční tektonickou sítí* - soustavu trhlin nebo zlomů uspořádaných ve směrech SZ-JV, JZ-SV a S-J. Tyto poruchy se projevují rozpukáním, protažením a rovnoběžným uspořádáním povrchových tvarů, omezením polygonálních kráterů a podobně. Měsíční tektonická síť se považuje za velmi starou a její vznik se připisuje slapovým silám. Některé z takto vzniklých poruch mohly být při mladších pohybech oživeny.

b) *poruchy vázané na vznik impaktních kráterů*, impaktních pánví a kruhovitých moří. Mají jednak prstencovitý průběh, jednak je jejich uspořádání paprscité. Tyto systémy se projevují jako zlomové stěny, zlomová údolí, lineární rýhy a podobně.

c) *poruchy vzniklé smršťováním výplně lávových moří*, jako jsou mořské valy, vytvořené stlačením při poklesu smršťující se lávy.

Na měsíčním povrchu nejsou pásemná pohoří ani hluboká zlomová údolí, která by svědčila pro rozsáhlé tahové pohyby. Tyto projevy neznáme ani z Merkuru, přestože toto těleso prodělalo poněkud složitější tektonický vývoj než Měsíc. O větší složitosti svědčí přítomnost laločnatých srážů a přemysků vytvořených jednosměrně působícími tlaky vázanými na stlačení (kompresi). Podle současných představ jsou tyto kompresní projevy odezvy smršťování velkého železného jádra planety.

Tektonika Marsu má ještě komplikovanější ráz. Na jeho povrchu dominují rozsáhlé příkopové struktury, které připomínají pozemská riftová údolí (Valles Marineris, některé příkopy v oblasti Tharsis). Tyto struktury vznikly jako důsledek tahových sil, spojených se vznikem kleneb. Klenby se formují při změnách struktury litosféry,



▲ Obr. 5 - Geologické pochody na planetách jsou určovány způsoby přenosu tepla z nitra tělesa na jeho povrch.

podmíněných rozsáhlými výstupnými proudy horkého plášťového materiálu nesoucího teplo do litosféry. Ta se ohřívá, roztahuje a vyklenuje. Roztažení přes určitou mez se projeví popraskáním a zaklesnutím ker podle takto vzniklých zlomů. Takovými pochody vznikají dlouhá protažená údolí - rifty. Hluboké zlomy, které rifty omezují, mohou sloužit jako přírodní cesty magmatu pro sopečnou činnost. Ačkoliv vznik těchto struktur bývá považován za počáteční stadium tektoniky litosférických desek, vlastní projevy tektoniky nebyly na Marsu nalezeny.

Kromě riftových údolí a kleneb se na povrchu Marsu setkáváme i s řadou jednodušších systémů zlomových poruch podobně jako na Merkuru a Měsíci.

Podobné tektonické formy jako na Marsu se vyskytují i na Venuši. Při radarovém mapování byly na povrchu Venuše rovněž nalezeny rifty vázané na klenby. V horských oblastech Venuše se podařilo zjistit i stopy pohybů, připomínajících pohyby kompresní. I přes určité náznaky se na povrchu Venuše nepodařilo prokázat jevy spojené s pohyby litosférických desek.

Pro Venuši, kromě běžných zlomových porušení, jsou příznačné tektonomagmatické útvary - struktury vzniklé spojením tektonických pochodů s výstupy magmatu. Typicky se projevují jako oválné korony s klenbovitou stavbou a zlomovým porušením.

Nejsložitější obraz tektonické stavby poskytuje Země. Pro naši planetu je z geologického hlediska významný neustálý pohyb litosférických desek, který ovlivnil celý vývoj Země. Typickým projevem pohybu litosférických desek je vznik a případné rozšiřování riftů, spojené se vznikem a vývojem oceánů na straně jedné a tvorbou pásemných pohoří při uzavírání oceánů na straně druhé. Od pohybu litosférických desek je možno odvodit naprostou převahu geologických jevů na Zemi, včetně vulkanické a magmatické činnosti.

Složitost tektonického porušení planety roste s její vyšší hmotností, velikostí a tím i s větší vnitřní energií. V prvním přiblížení je možno planety považovat za tepelné stroje. Geologické procesy, které jsou tepelnou energií poháněny, vedou k postupné ztrátě tepla. Pro geologicky jednodušší planety tvořené jednou litosférickou deskou je převládajícím procesem vedoucím ke ztrátě tepla vulkanická činnost, vázaná zejména na tepelné trubice - výstupové proudy z planetárního pláště, které se na povrchu planety projevují jako horké skvrny. Na geologicky složitější vícedeskové planetě, na Zemi, je teplo mimo termální trubice a horké skvrny spotřebováváno na pochody spojené s pohybem litosférických desek. Tento druhý způsob uvolňování tepla z planety u Země převažuje (obr. 5).

Mimo teplo uvolňované rozpadem radioaktivních izotopů se na ohřevu planet mohou podílet i některé další zdroje tepla, jako jsou slapové tření, teplo uvolňované při chemických reakcích nebo při pohybu

po dislokacích. U vlastních planet terestrického typu jsou příspěvky z těchto tepelných zdrojů zanedbatelné. Jak bylo uvedeno již výše, slapový ohřev se pravděpodobně uplatňuje u Jupiterova měsíce Io.

### Dvojtvárnost planetárního povrchu

Pro terestrické planety je typické různě význačné bimodální rozdělení výšek povrchového reliéfu. Toto rozdělení odráží průměrné výšky pevnin, vysočin a podobně na straně jedné a průměrné hloubky moří, oceánů nebo nízko položených plošin na straně druhé. Vznik těchto útvarů se na jednotlivých planetách od sebe liší. Tak třeba měsíční moře vznikla zaplavením velkých prohlubnění impaktního původu bazaltovou lávou. Podobně tomu bylo i na Merkuru. Na Zemi se vytvořily oceány při pochodech spojených s pohyby litosférických desek a s rozšiřováním oceánského dna. Objasnění příčin shod a rozdílů ve tvárnostech jednotlivých planet je předmětem dalších výzkumů.



▲ Obr. 6 - Mars - Chryse Planitia. Pohled k jihu pod úhlem 65° z přistávacího modulu sondy Viking 1, zachycující bloky vyvěřelých hornin v jemnozrnném, navátém písku. Krajina připomíná pozemské chladné pouště. Povrch bloků je opracován větrnou abrazí.

## Působení exogenních geologických pochodů

U těles bez atmosféry (Měsíc, Merkur) se na modelování planetárního povrchu nejvíce podílejí kosmické vlivy. Kromě již uvedených pochodů spojených s impakty je to eroze mikrometeority a vlivy záření nejrozličnějších vlnových délek od záření kosmického až po tepelné záření ze Slunce.

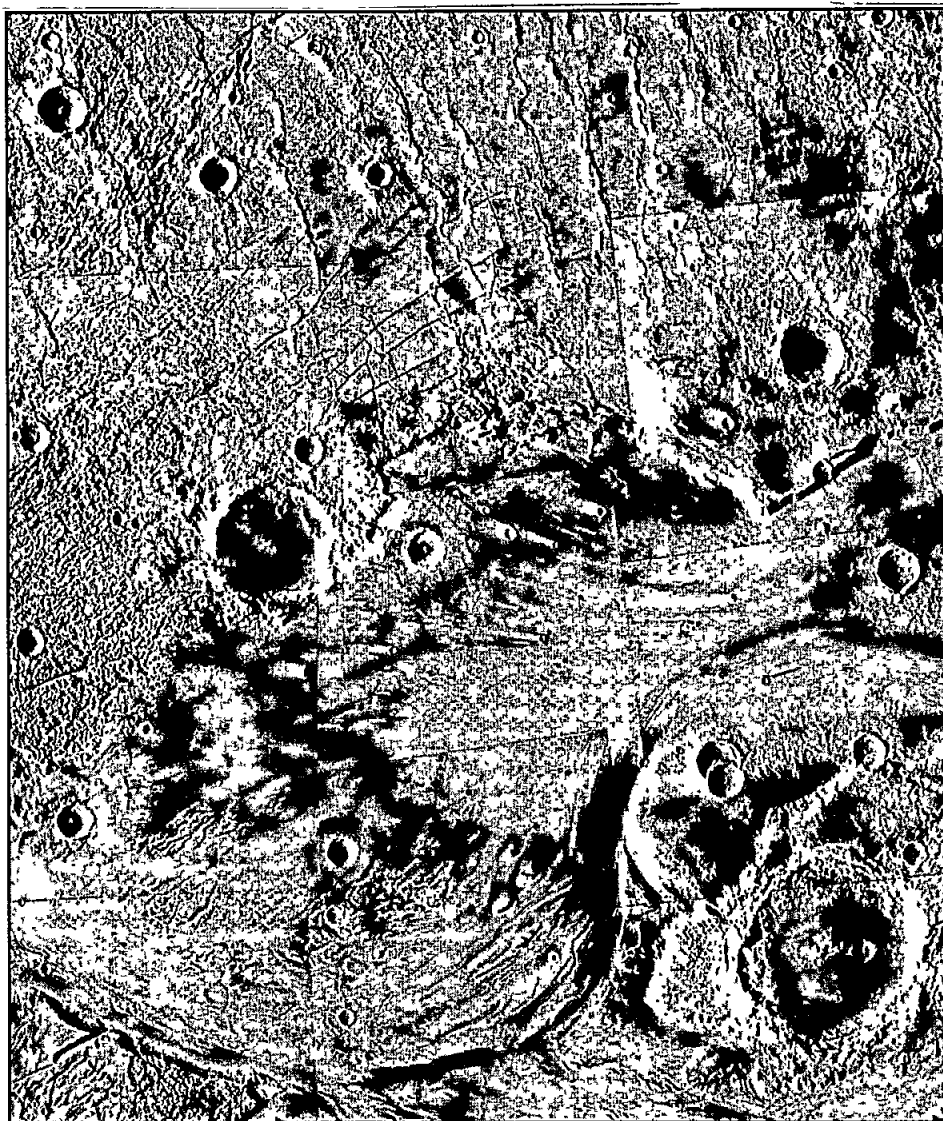
Atmosféry neplní jen funkci ochranného štítu planety před dopady menších kosmických těles a před působením záření určitých vlnových délek, ale jsou též významným geologickým činitelem působícím jak destrukci povrchu (zvětrávání, eroze a odnos uvolněných částic), tak i tvorbou uloženin. Atmosféry tedy představují i konstruktivní prvek při tvorbě planetárního povrchu. Nejčastějším geologickým činitelem na povrchu planet s atmosférou je vítr. Ten ovlivňuje vývoj povrchu Marsu, Venuše a Země. Jeho činnost se projevuje přemísťováním sypkých hmot - jednak odvíváním písku a prachu ze zvětralin (jako reziduum hrubého materiálu po tomto odvátí může vzniknout kamenitá poušť), jednak jeho usazováním ve formě pokryvů, přesypů, návějí nebo závějí (obr. 6). Význačnou formou větrných (eolických) usazenin jsou stěhující se přesypy prachu a písku. Převívaní materiálů po povrchu Marsu je jednou z příčin často pozorovaných sezonních změn v některých jeho oblastech. Další nápadnou formou větrných uloženin jsou vlečky za překážkami. Větry též přemísťují nesouvislé sopečné vyvrženiny.

Rozpad povrchových hornin zvláště ovlivňují rychlé změny teploty, například střídavé působení mrazu a vysokých teplot způsobených osluněním. Působení mrazu při rozrušování hornin zesiluje přítomnost mrznoucí vody, ať už ve větším množství (Země) nebo ve formě vlhkosti (Mars). Podobný účinek na rozpad hornin mají i tlaky vyvolané krystalizací solí.

Relativně omezené je působení tekoucí vody, které bylo zjištěno jen na Zemi a částečně na Marsu. Procesem zcela specifickým pro Zemi je pak geologická činnost moří a oceánů. Geologická činnost ledu se projevuje mimo Zemi jen v polárních oblastech Marsu (obr. 7, 8).

Typické jen pro Zemi je také působení biosféry i geologická činnost člověka, která pro naši planetu mnohdy není tím nejlepším. Netýká se naštěstí ostatních planet, jež tak zůstávají neporušenými geologickými rezervacemi.

Pro všechny planety terestrického typu je příznačné geologické působení tíhy, které se projevuje přemísťováním hmot po svaahu, řícením a sesouváním.



▲ Obr. 7 - Mars - Mozaika snímků z orbitálních modulů sond Viking zachycuje severozápadní části oblasti Chryse. Snímek zobrazuje příklad složitého utváření povrchu planety, na jehož modelaci se podílelo více geologických pochodů. V horní části snímku je vulkanická plošina podobná měsíčním mořím, s typickými hřbety, posetá impaktními krátery o průměru od 100 km až po mez rozlišitelnosti (asi 180 m). Starší velké krátery jsou rozrušené erozí. V dolní části snímku je zachyceno opuštěné řečiště s nivou, se systémem meandrů, které migrovaly. Nivu z větších částí pokrývají větrné (eolické) uloženiny.

## Závěry

Vzájemné srovnání základních charakteristik terigenních planet ukazuje zřetelný vztah mezi hmotností planety a její geologickou aktivitou. Ta se projevuje především v intenzitě magmatické a vulkanické činnosti, v intenzitě a povaze tektonického porušení, stejně jako v působení atmosféry a hydrosféry. Pro Zemi je navíc příznačný vliv biosféry. Čím je planeta geologicky aktivnější, tím intenzivněji je přepracováván její povrch a tím je geologicky mladší. Nejnápadněji se to projevuje při srovnávání (obr. 9) Merkura a Měsíce na straně jedné a Venuše a zejména Země na straně druhé.

S rostoucí hmotností planety :

1. klesá relativní četnost impaktních kráterů pokrývajících staré povrchy tělesa a roste zastoupení mladého povrchu modelovaného endogenními a exogenními geologickými pochody

2. roste relativní zastoupení plochy povrchu vytvořeného vulkanickými procesy

3. zvyšuje se význam a složitost tektonických pochodů

4. těleso si déle uchovává svou geologickou aktivitu (magmatismus, vulkanismus, tektonika)

5. s intenzivnější degazací roste objem a hustota druhotné atmosféry endogenního původu. U Země a Marsu se objevila hydrosféra. Pro Zemi je příznačná biosféra.

Všechny terestrické planety prodělaly

a) rané období planetární diferenciace, při níž se oddělily jádro, plášť a kůra (asi krátce po akreci před  $4,5 \cdot 10^9$  roky). Tepelná energie byla v tomto období uvolňována především impakty a též gravitačně podmíněným smršťováním hromadícího se materiálu.

b) období intenzivního bombardování s vrcholem intenzity asi před  $4,0 \cdot 10^9$  roky,

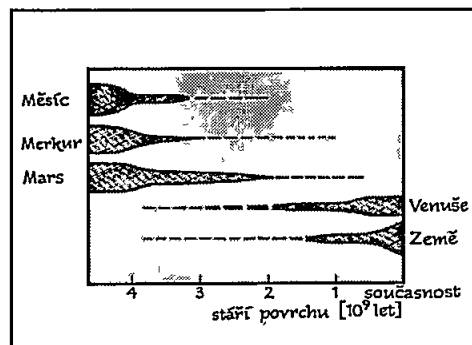


◀ Obr. 8 - Země - Šikmý letecký snímek soutoku řek Yukon a Koyukuk na Aljašce. Snímek zachycuje současná říční koryta a rozsáhlou říční nivu v akumulacní oblasti, včetně systému opuštěných meandrů. Tato krajina jeví značné podobnosti s údolím říčního toku na Marsu na předchozím snímku.

kdy též vznikaly velké impaktní pánve. Velké bombardování se spojuje se závěrečnými fázemi akrece

e) období mohutného bazaltového vulkanismu (někdy označované jako období druhé diferenciacce) hlavně před  $(4,0 \text{ až } 3,0) \cdot 10^9$  roky. Tepelná energie v tomto a v dalších vývojových obdobích planet pochází z rozpadu radioaktivních izotopů.

V dalším svém vývoji se jednotlivé planety liší. Měsíc a Merkur na tomto stupni prakticky ukončili svůj vývoj a jsou po dobu  $(2,0 \text{ až } 3,0) \cdot 10^9$  let geologicky mrtvými tělesy. Na Marsu, Venuši a Zemi byly zdroje tepelné energie natolik dostačující, že dovolily intenzivnější magmatickou, vulkanickou a tektonickou činnost. Na Zemi postoupil vývoj nejdále. Vytvořila se soustava litosférických desek, které svými pohyby určovaly vývoj planety jako složitého systému a jsou příčinou jedinečnosti podmínek na Zemi během celého vývoje této planety.



▲ Obr. 9 - Pravděpodobné stáří povrchu terestrických planet. (Pozn.: Stáří povrchu Země je značně ovlivněno stářím dna oceánů  $>200 \cdot 10^6$  let.)

Vývojový stupeň, kterého určitá planeta dosáhla, tedy úzce souvisí s jejím tepelným vývojem. Ten je opět závislý na hmotnosti a velikosti planety, na jejím složení, které je funkcí vzdálenosti planety od Slunce. Složení planety se odráží i ve velikosti jádra, při jehož vzniku se uvolnilo tím více gravitační energie, čím je jádro větší a hmotnější. V počátečních vývojových obdobích ovlivnila tepelný vývoj planety i rychlost a intenzita akrece. Pro další etapy byl velmi významný obsah radioaktivních prvků v planetárním plášti.

Dosud nedovedeme dobře ocenit význam vzdálenosti planety od Slunce na její pozdější vývoj. Není dosud jasno, zda například celkem malý rozdíl ve vzdálenosti Slunce - Venuše a Slunce - Země nevyvolal zcela odlišné trendy ve vývoji atmosféry, což se později odrazilo ve vývoji hydrosféry a biosféry na Zemi.

Voda není jen podmínkou života. Ovlivňuje i bod tání magmatu, je důležitou složkou mnoha minerálů, významným činitelem při zvětrávání, přenosu a usazování. Zprostředkuje řadu chemických reakcí. Její přítomnost znamená zcela odlišné podmínky na určitém tělese a odlišný vývoj proti tělesům, kde není přítomna. Voda má klíčový význam pro existenci biosféry, která je rovněž významným faktorem.

Podobně je nutno pečlivě zvažovat i vlivy způsobené tektonikou litosférických desek. Uvědomíme si to tehdy, když uvážíme, jaká kvanta látky jsou na Zemi tímto procesem recyklována a jak tyto procesy ovlivňují přenos hmot, chemické slo-

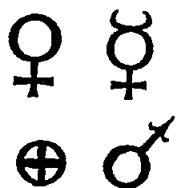
žení vody, atmosféry nebo povahu hornin.

Na Zemi není možné zanedbat geologické působení člověka, které skutečně dosáhlo planetárního rozměru. Člověk při své činnosti přemístí za rok na celém světě téměř o jeden řád více hmoty než všechny geologické procesy dohromady (a to včetně pohybu litosférických desek, vulkanismu a tak dále).

Výzkum sluneční soustavy ukazuje, co znamená získání a odpovědné vyhodnocení nových dat. I když je kosmický výzkum sluneční soustavy v začátcích, přinesl již velmi mnoho nového jak pro poznání sluneční soustavy jako celku, tak o jejích jednotlivých tělesech. Pro nás je nejdůležitější, že přináší nové poznatky o Zemi. Čím více naší planetě porozumíme, tím lépe budeme moci využívat možnosti, které nám poskytuje a tím intenzivněji budeme moci chránit i životní prostředí, aby se zlepšily naše životní podmínky. A k tomuto cíli se snaží přispět i srovnávací planetologie.

(kresby - Pavel Přihoda, foto - archiv autora)

□



Dr. Mojmir Eliáš (\*1932), vědecký pracovník Českého geologického ústavu. Vedle práce ve svém oboru regionální geologie Karpat je specialistou na srovnávací geologii planet sluneční soustavy. Je předsedou planetární sekce České astronomické společnosti.