

Geochemie endogenních procesů – 4. část

Kosmochemie 3

Sluneční soustava

Sluneční soustava

- planety, asteroidy, komety
- **Merkur, Venuše, Země, Mars, asteroidy** („pozemské planety“)
- **Jupiter, Saturn** („plynné planety“)
- **Uran, Neptun, (Pluto)** („vnější ledové planety“)
- **Kuiperův pás** – oblast prachu (HCO_3 - H_2O - CH_4 - NH_3) kde vznikají komety

Sluneční soustava

| | Mass (kg) | radial distance (AU) | radius (km) | density (g/cc) | 1 atm density (g/cc) | Principal atmospheric components |
|-----------|---------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Sun | 1.99×10^{30} | | 6.96×10^5 | 1.4 | | |
| Mercury | 3.35×10^{23} | 0.39 | 2.44×10^3 | 5.42 | 5.3 | — |
| Venus | 4.87×10^{24} | 0.72 | 6.05×10^3 | 5.24 | 3.95 | CO ₂ , N ₂ , Ar |
| Earth | 5.98×10^{24} | 1.0 | 6.38×10^3 | 5.52 | 4.03 | N ₂ , O ₂ , Ar |
| Moon | 7.35×10^{22} | | 1.74×10^3 | 3.3 | 3.4 | — |
| Mars | 6.42×10^{23} | 1.6 | 3.39×10^3 | 3.93 | 3.7 | CO ₂ , N ₂ , Ar |
| asteroids | 4×10^{21} | 2.8 | $\leq 10^3$ | | 3.4-3.9 [†] | |
| Jupiter | 1.90×10^{27} | 5.2 | 6.99×10^4 | 1.31 | | H, He |
| Io | 8.63×10^{22} | | 1.82×10^3 | 3.42 | | — |
| Europa | 4.71×10^{22} | | 1.55×10^3 | 3.03 | | — |
| Ganymede | 1.51×10^{23} | | 2.63×10^3 | 1.98 | | — |
| Callisto | 1.06×10^{23} | | 2.40×10^3 | 1.83 | | — |
| Saturn | 5.69×10^{26} | 9.6 | 5.95×10^4 | 0.69 | | H, He |
| Titan | 1.38×10^{23} | | 2.58×10^3 | 1.88 | | N ₂ , CH ₄ |
| Uranus | 8.73×10^{25} | 19.1 | 2.54×10^4 | 1.30 | | H, He, CH ₄ |
| Neptune | 1.03×10^{26} | 30.8 | 2.13×10^4 | 1.76 | | H, He, CH ₄ |
| Triton | 2.14×10^{22} (?) | | 1.35×10^3 | 2.08 | | — |
| Pluto | 2.88×10^{22} | 39.4 | 1.15×10^3 | ~2.0 | | — |
| Chiron | 1.74×10^{21} | | 5.93×10^2 | ~2.0 | | — |

[†]Densities of anhydrous chondrites

Sluneční soustava

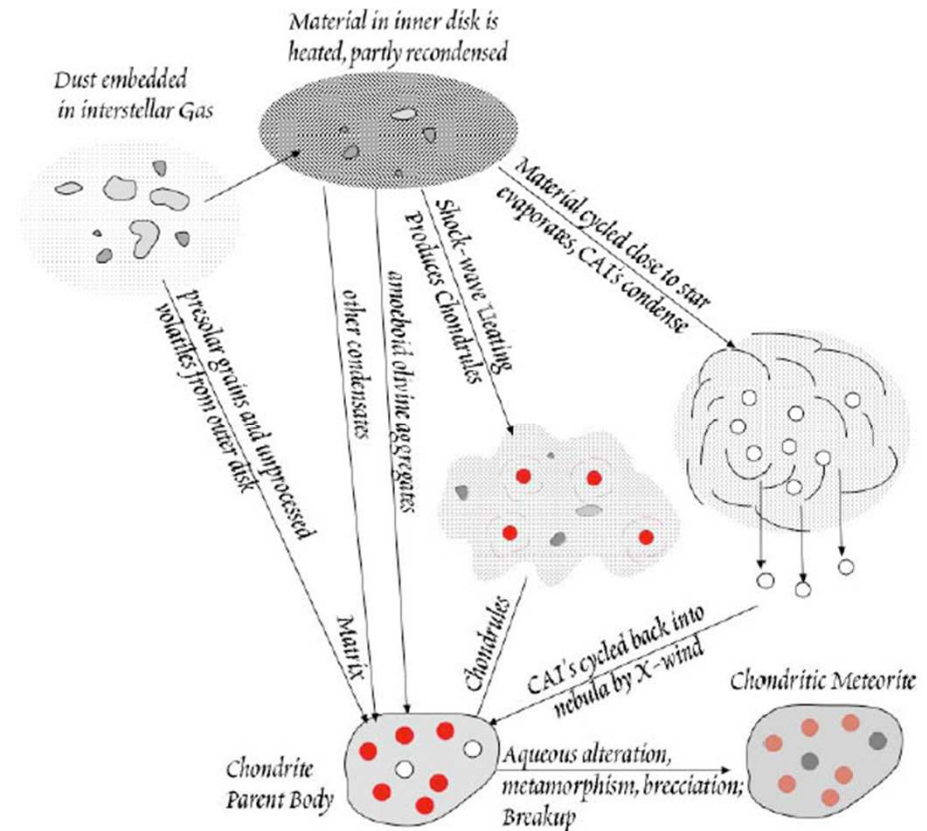
- „**pozemské planety**“ mají silikátové pláště kolem Fe-Ni jader, vysoké ochuzení o H-He
- „**plynné planety**“ mají složení podobné Slunci (H-He), jádra pravděpodobně z pevného/tekutého kovu + silikáty
- „**vnější ledové planety**“ mají plynný H-He obal, plášť H_2O - CH_4 , H_2S , NH_3 , H, He a silikáto-kovové jádro

Vznik sluneční soustavy

- planety vykazují silnou zonálnost ve složení
 - M, V, Z, M silně ochuzeny o H-He
 - J, S mají podobné složení jako Slunce
 - U, N, (P) mírně ochuzeny o H-He
- chemické složení chondritů ukazuje na heterogenitu sluneční mlhoviny (teplota, čas, místo, f O₂)
- mateřská tělesa meteoritů mohou být silně diferenciovaná

Vznik „chondritické složky“

- chondrit → směs heterogenních komponent
 - ol. agregáty kondenzovaly ve vnitřních částech Sluneční soustavy
 - CAI vysokoteplotní kondenzáty
 - chondruly vznikly velmi rychlým tavením a následným prudkým ochlazením (pás asteroidů)
 - matrix vznikla ze velkého rozpětí T



White (2001)

Vznik planet

- pouze nepřímá pozorování
- 4 hlavní stádia
 - kondenzace prachu
 - narůstání velikosti prachových zrn z μm na km
 - akrece
 - vznik planety dlouhodobými kumulativními gravitačními silami

Vznik menších planet – 1. a 2. stádium

1. kondenzace (nejdříve silikáty + Fe) silně závislá na T (vyšší $s \searrow T$) \rightarrow největší za tzv. „sněhové linii“ (kondenzace ledu) mezi pásem asteroidů a Jupiterem \rightarrow rychlejší akrece planet
2. vytvoření větších částí (X km) gravitační nestabilita? \rightarrow rychlý proces

Vznik menších planet – 3. a 4. stádium

- 3-4. kolize menších objektů díky gravitačním silám → vzrůstající velikost = větší gravitační síly → vzrůstající vzdálenost mezi velkými tělesy
- dosažení velikosti až $0.1 M_Z$ během 1 Ma
 - následně velké zpomalení procesu → akrece Země během několika dalších 10^0 Ma

Vznik velkých planet

1. akrece jádra
(silikáty, led apod.)
2. $> 10 M_Z \rightarrow$
zachycení plynů ze
sluneční mlhoviny
3. vytvoření plynných
obrů (Jupiter,
Saturn)



Jupiter

Merkur

- nejmenší z „pozemských“ planet (0.05 M Země)
- existence magnetického pole → částečně natavené jádro
- 2 možné hypotézy složení
 - akrece → blízkost Slunce → Fe jako kov, vysoké koncentrace Ca-Al-Th, nízké K-Na
 - akrece ze zárodků planet → podobné složení jako Země → kráterování → vyšší hustota než Země

Merkur

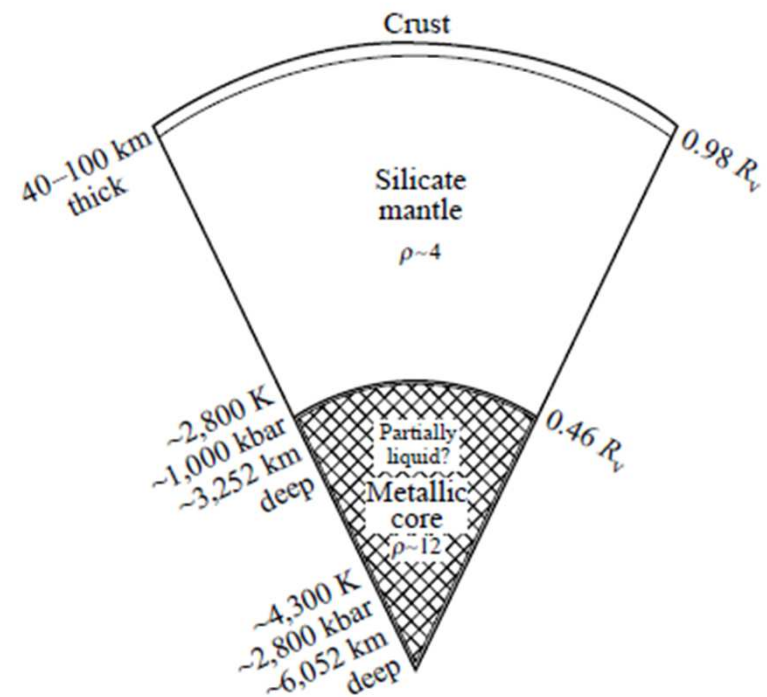
- nejspíše velké Fe-Ni jádro (70 % celkové hmotnosti) → vysoký celkový Fe/Si
- nicméně povrch velmi chudý na FeO (~ 3 hmot. %) + TiO₂ → nejspíše převaha anortozitů
- v oblasti S pólu pravděpodobně přítomnost ledu (sonda Messenger)



Merkur, sonda Messenger, NASA

Venuše

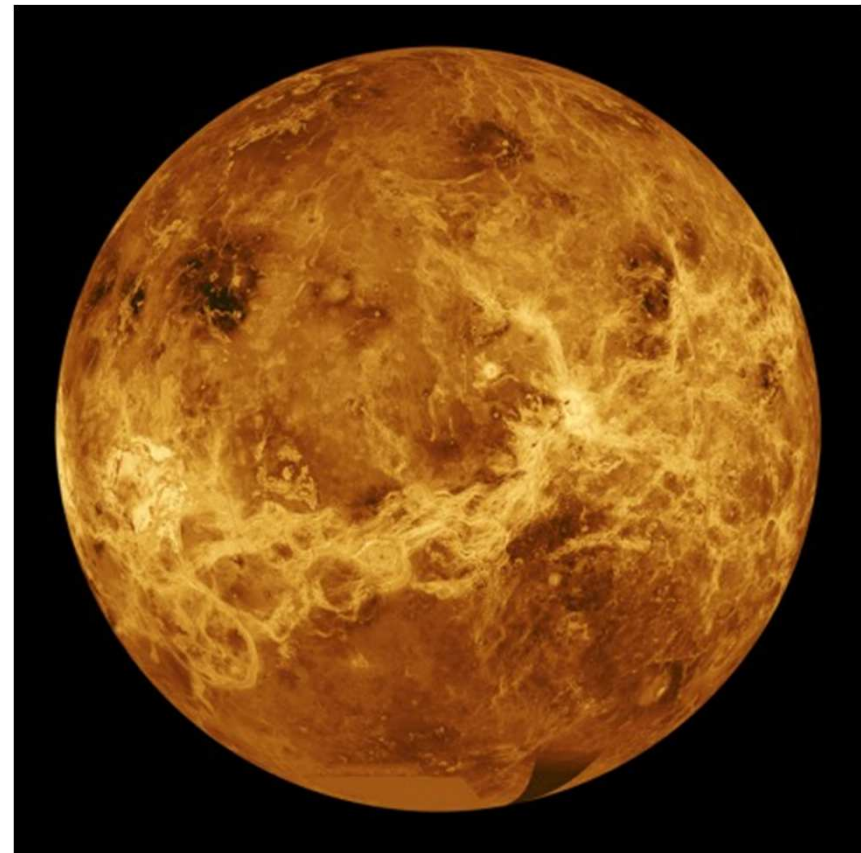
- absence magnetického pole a deskové tektoniky
- atmosféra
 - CO₂ (96.5 %)
 - N₂ (3.5 %)
 - +/- H₂O, SO₂, HCl, HF
- povrch → alkalické a tholeitické bazalty, karbonatity???



Treatise in Geochemistry Vol 1

Venuše vs Země

- 100x větší atmosféra v porovnání se Zemí (a mnohem rychlejší)
- dominance CO₂, ale podobné relativní zastoupení C-N
- $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ kolem 1.15 (Země kolem 300 v důsledku rozpadu $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$)
- podobný K/U poměr
- velmi mladý povrch



Geochemie Venuše

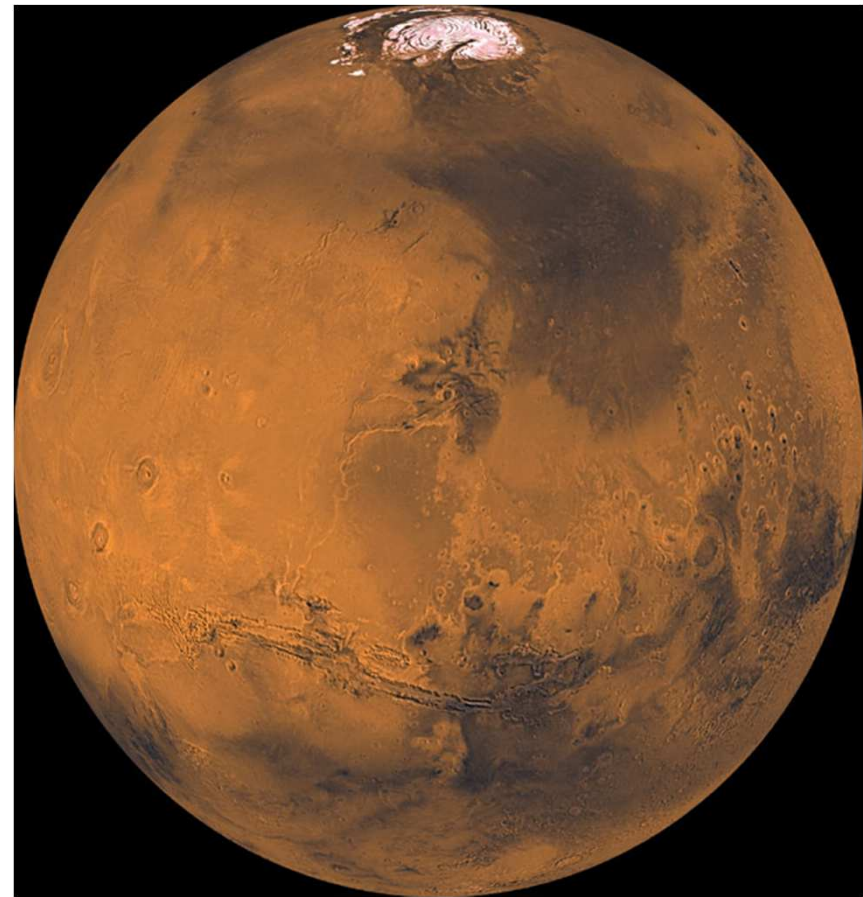
- sondy Venus 13, Venus 14, Vega 2 → vrty ~ 1 cm³, od 3 cm hloubky, XRF analýzy

| Oxide | Mass percent ^a | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | Venera 13 ^b | Leucitic basalt ^c | Venera 14 ^b | Vega 2 ^{d,e} | N-MORB ^f |
| SiO ₂ | 45.1 ± 3.0 | 46.18 | 48.7 ± 3.6 | 45.6 ± 3.2 | 48.77 |
| TiO ₂ | 1.59 ± 0.45 | 2.13 | 1.25 ± 0.41 | 0.2 ± 0.1 | 1.15 |
| Al ₂ O ₃ | 15.8 ± 3.0 | 12.74 | 17.9 ± 2.6 | 16 ± 1.8 | 15.9 |
| FeO ^g | 9.3 ± 2.2 | 9.86 | 8.8 ± 1.8 | 7.7 ± 1.1 | 9.82 |
| MnO | 0.2 ± 0.1 | 0.19 | 0.16 ± 0.08 | 0.14 ± 0.12 | 0.17 |
| MgO | 11.4 ± 6.2 | 8.36 | 8.1 ± 3.3 | 11.5 ± 3.7 | 9.67 |
| CaO | 7.1 ± 0.96 | 8.16 | 10.3 ± 1.2 | 7.5 ± 0.7 | 11.16 |
| Na ₂ O ^h | 2 ± 0.5 | 2.36 | 2.4 ± 0.4 | 2.0 | 2.43 |
| K ₂ O | 4.0 ± 0.63 | 6.18 | 0.2 ± 0.07 | 0.1 ± 0.08 | 0.08 |
| SO ₃ | 1.62 ± 1.0 | 0.09 | 0.88 ± 0.77 | 4.7 ± 1.5 | |
| Cl | <0.3 | | <0.4 | <0.3 | |
| Total | 98.1 | 96.16 | 98.7 | 95.4 | 99.15 |

^a Error values for *Venera 13, 14*, and *Vega 2* data are $\pm 1\sigma$. ^b Surkov *et al.* (1984). ^c Volkov *et al.* (1986). ^d Surkov *et al.* (1986). ^e In addition to Cl, Surkov *et al.* (1986) also report the following upper limits (in mass %): Cu, Pb < 0.3; Zn < 0.2; Sr, Y, Zr, Nb, Mo < 0.1; As, Se, Br < 0.08. ^f Wilson (1989). ^g All Fe reported as FeO for all analyses. ^h Calculated by Surkov *et al.* (1984, 1986).

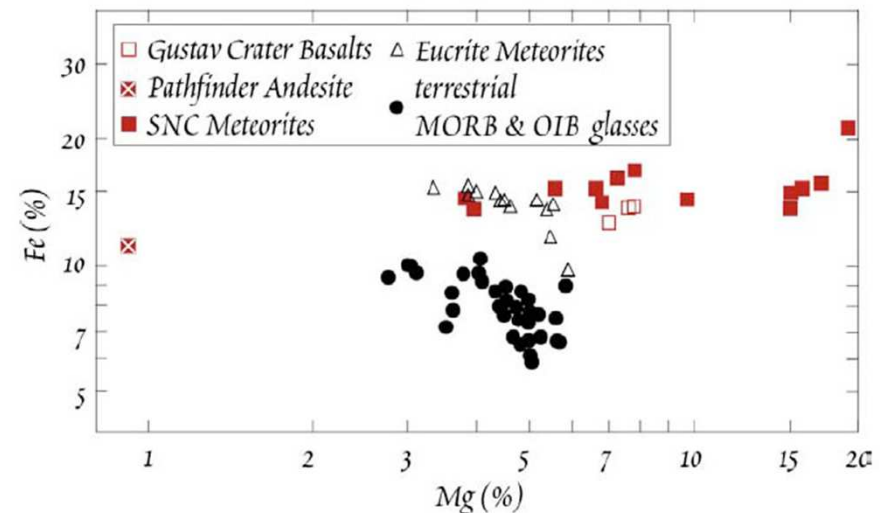
Mars

- SNC meteority
- ochuzený o volatilní složky
- řidší CO_2 N_2 atmosféra
- původně velké množství H_2O
- Fe-Ni jádro, ale menší než Země



Mars vs. Země

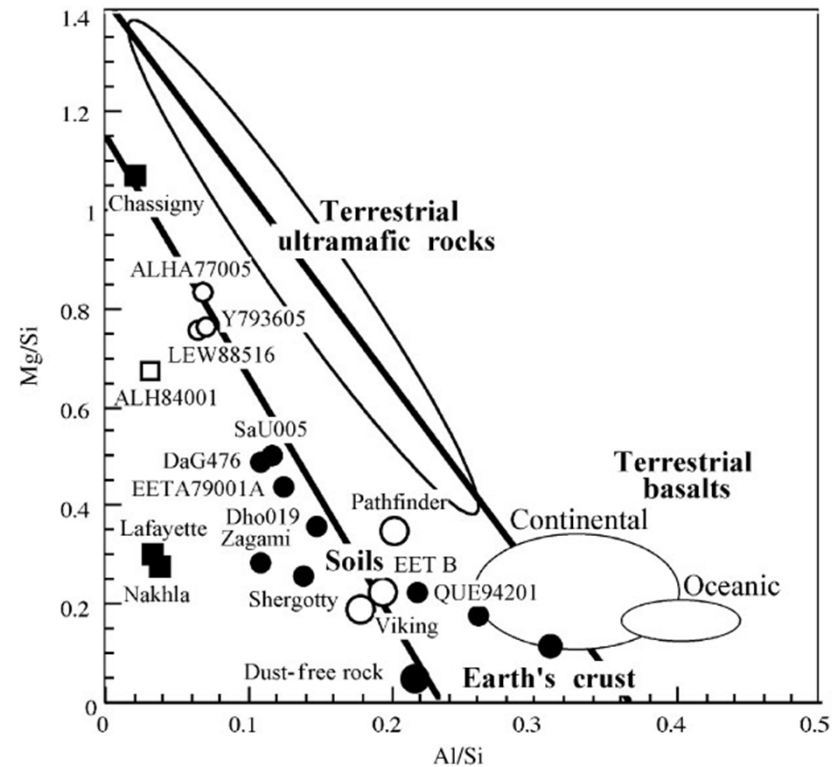
- více FeO, HSE, vyšší K/U
- vyšší $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, nižší $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} \rightarrow$ důsledek obohacení o Rb-Pb



White (2001) after Halliday et al. (2001), Wänke et al. (2001) a McSween et al. (1994).

Mars vs. Země

- nižší koncentrace Al
- SNC meteority mají vyšší delta ^{17}O
- vyšší koncentrace Mn, Cr, W, P v plášti Marsu oproti Zemi
- jádro bohaté S
- kůra → basalty, andezity??, prach



Rieder et al. (1997), McSween, 2002

Mars - kůra

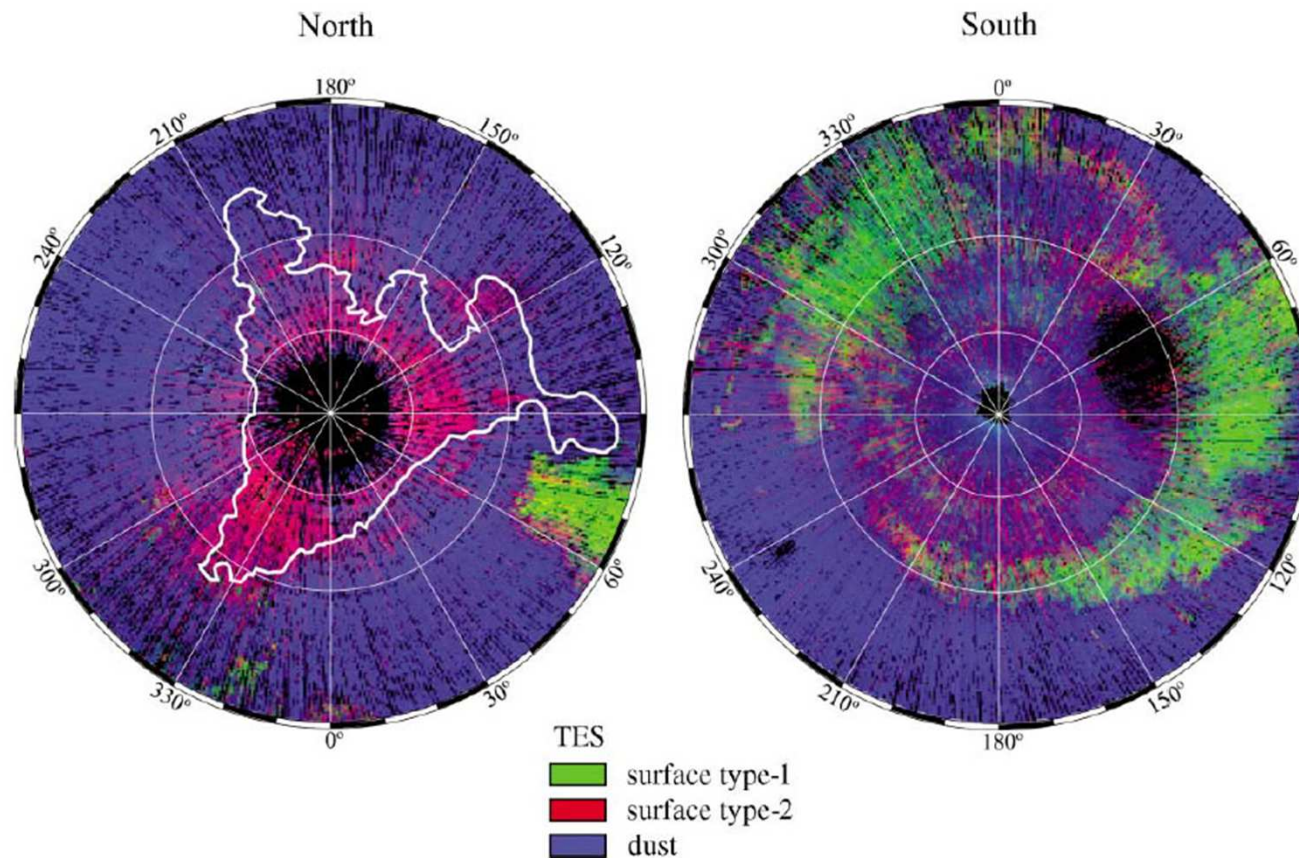
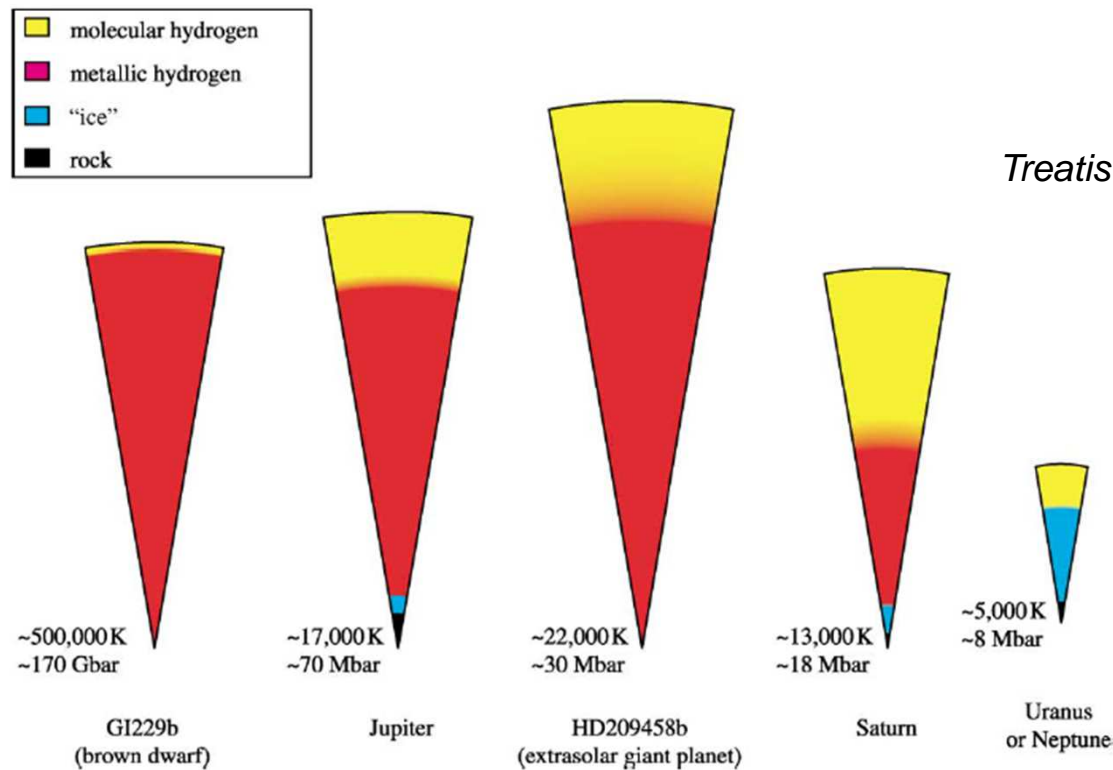


Figure 10 Polar projections showing the global distributions of materials having the composition of basalt (green), andesite (red), and dust (blue). Compositions are based on TES spectra from Mars Global Surveyor (after [Wyatt and McSween, 2002](#)).

Velké planety

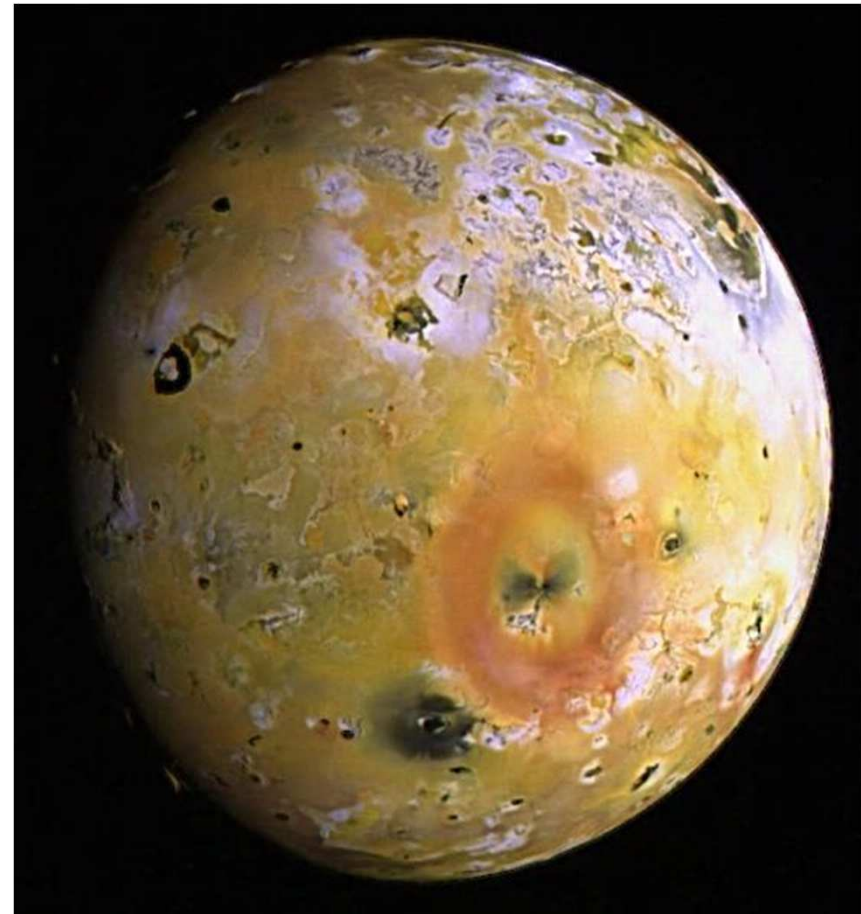
- Jupiter, Saturn → převaha H +/-He
 - +/- CH₄, NH₃, H₂O, H₂S (koncentrace stoupá Jupiter → Neptun)
 - Neptun → spíše N₂ než NH₃



Treatise in Geochemistry Vol 1

Měsíce Jupiteru

- **Io**
 - nejvíce geologicky aktivní planeta (400 aktivních vulkánů) → vliv Jupiteru
 - silikátový plášť okolo tekutého jádra
- **Europa**
 - atmosféra s převahou O_2
 - pod vrstvou ledu se pravděpodobně nacházejí oceány → živé organismy?



Io, NASA

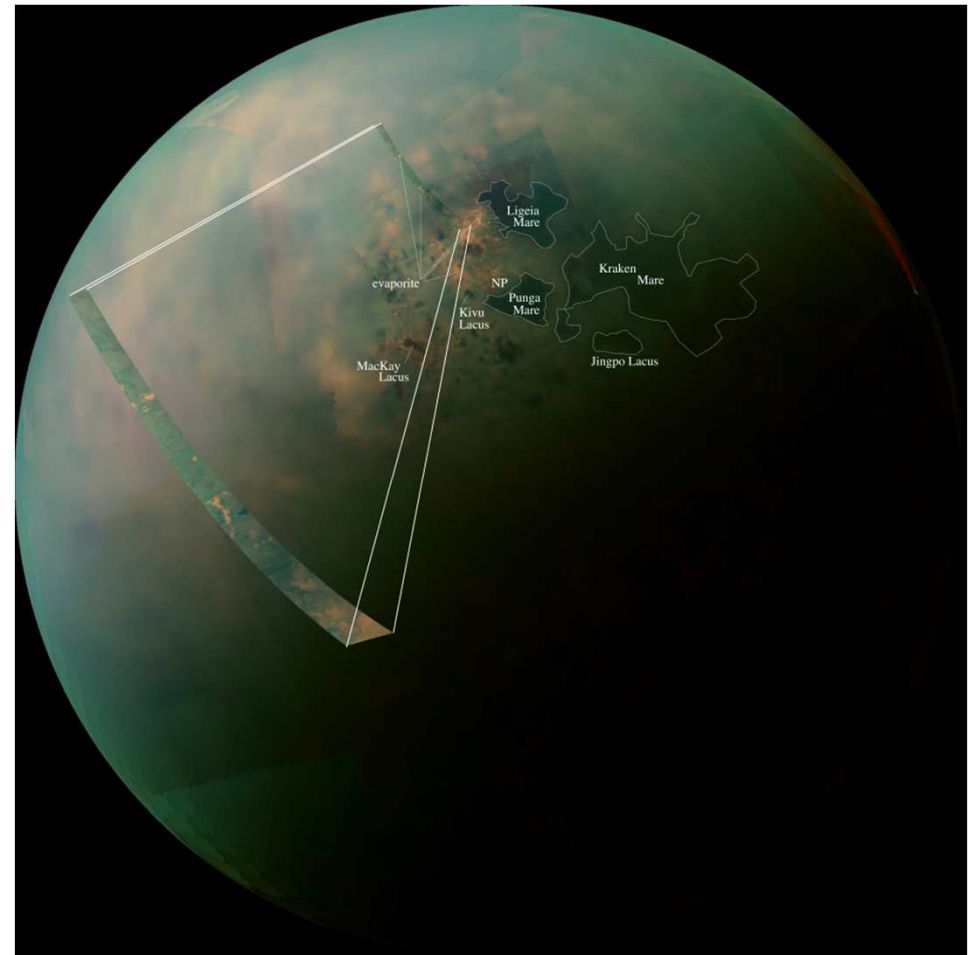
Měsíce Saturnu

■ Titan

- jádro → silikáty, plášť a kůra → H₂O led
- atmosféra N₂+/-CH₄, uhlovodíky
- tekutá „jezera“ CH₄-C₂H₆ v blízkosti pólů, v okolí jsou evapority

■ Iapetus

- minimum informací
- 2 odlišné hemisféry (světlá/tmavá), tmavá pravděpodobně prach z měsíce Phoebe



Titan, NASA

Měsíc

- zachování počáteční historie
- narozdíl od ostatních planet je chemismus Měsíce velmi podobný Zemi (např. izotopické složení O) → velká příbuznost



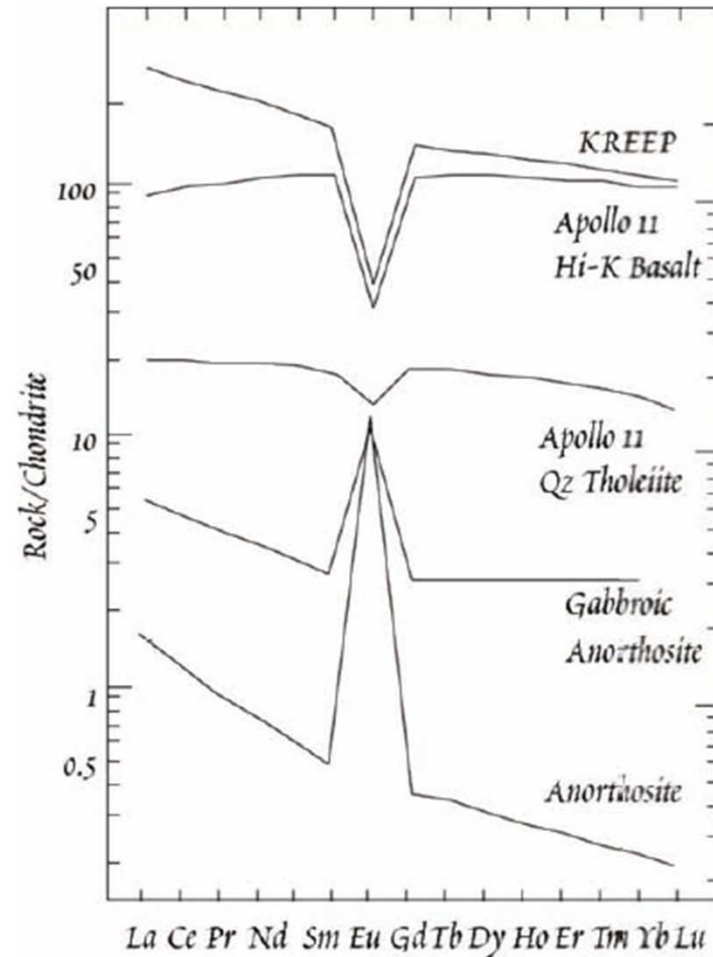
Geologie Měsíce

- 6 expedic → 382 kg materiálu
- „měsíční meteority“ → velmi vzácné, stáří většinou mezi 2.0 a 3.9 Ga
- Geologie Měsíce
 - anortozity-gabra „vysočiny“, impaktové vyvrženiny („vrchoviny“)
 - bazaltické lávy „oceány“ (většina vznikla v důsledku impaktů mezi 3.1 a 3.9 Ga → „magma oceans“)

Geochemie Měsíce

| | Bulk Earth | Bulk Moon | Silicate Earth | Silicate Moon |
|--------------------------------|------------|-----------|----------------|---------------|
| SiO ₂ | 30.38 | 43.4 | 45.0 | 44.4 |
| TiO ₂ | 0.14 | 0.3 | 0.201 | 0.31 |
| Al ₂ O ₃ | 3.00 | 6.0 | 4.45 | 6.14 |
| FeO | 5.43 | 10.7 | 8.05 | 10.9 |
| MgO | 25.52 | 32 | 37.8 | 32.7 |
| CaO | 2.40 | 4.5 | 3.55 | 4.6 |
| Na ₂ O | 0.24 | 0.09 | 0.36 | 0.09 |
| K ₂ O | 0.02 | 0.01 | 0.029 | 0.01 |
| Fe | 28.43 | 2.166 | 87.5 | |
| Ni | 1.75 | 0.134 | 5.4 | |
| S | 1.62 | | 5 | |
| core% | 32.5% | 2.3% | | |
| mantle% | 67.5% | 97.7% | | |

Terrestrial composition from McDonough and Sun (1995), assuming the light element in the core is S. Lunar composition from Taylor (1992).



White (2001)

Geochemie Měsíce

Bazaltické lávy

- podobné spíše komatiitům s nízkým #Mg
- bohaté FeO (>16 hmot. %)
- několik typů podle obsahu TiO₂ (<1.5, 1.5-6.0 a >6 hmot. % TiO₂)
- nejvyšší datované stáří – 4.23 Ga (Apollo 14 breccia), nejmladší naopak ~ 2.7 Ga, většina však mezi 3.1-3.9 Ga

Geochemie Měsíce

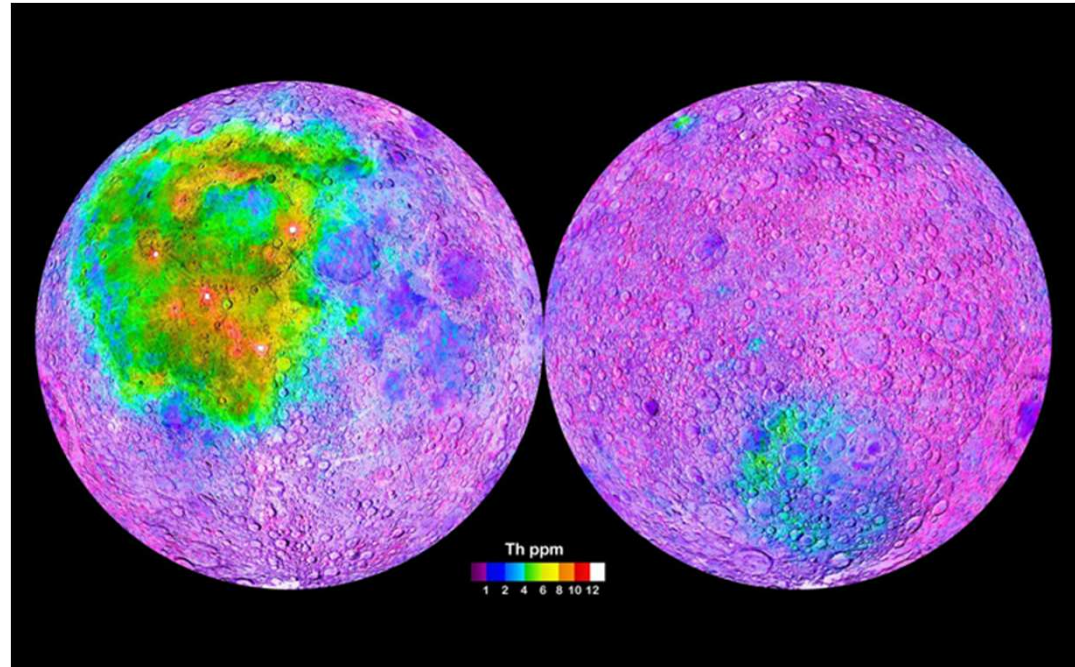
Bazaltické lávy

- oproti pozemským bazaltům extrémní ochuzení o H_2O a velmi silné ochuzení o Cs, K, Rb, Zn, In, Bi, Cd apod.
- plášť Měsíce je výrazně ochuzený o HSE (cca 20x) o HSE → dlouhotrvající „chondritický vývoj“

Geochemie Měsíce

Měsíční kůra

- drtivá většina vzorků „postižena“ impaktivními procesy
- anortozity, gabra, brekcie, impaktity
- KREEP → K-REE-P bohatá „hypotetická“ komponenta detekovaná pomocí sond

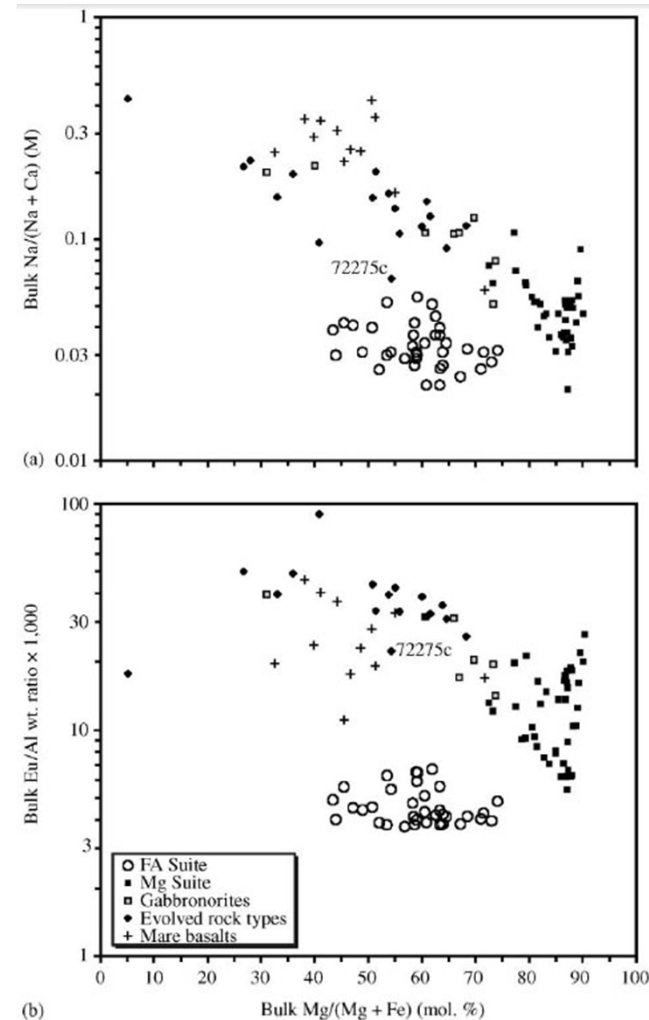


http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=2482

Geochemie Měsíce

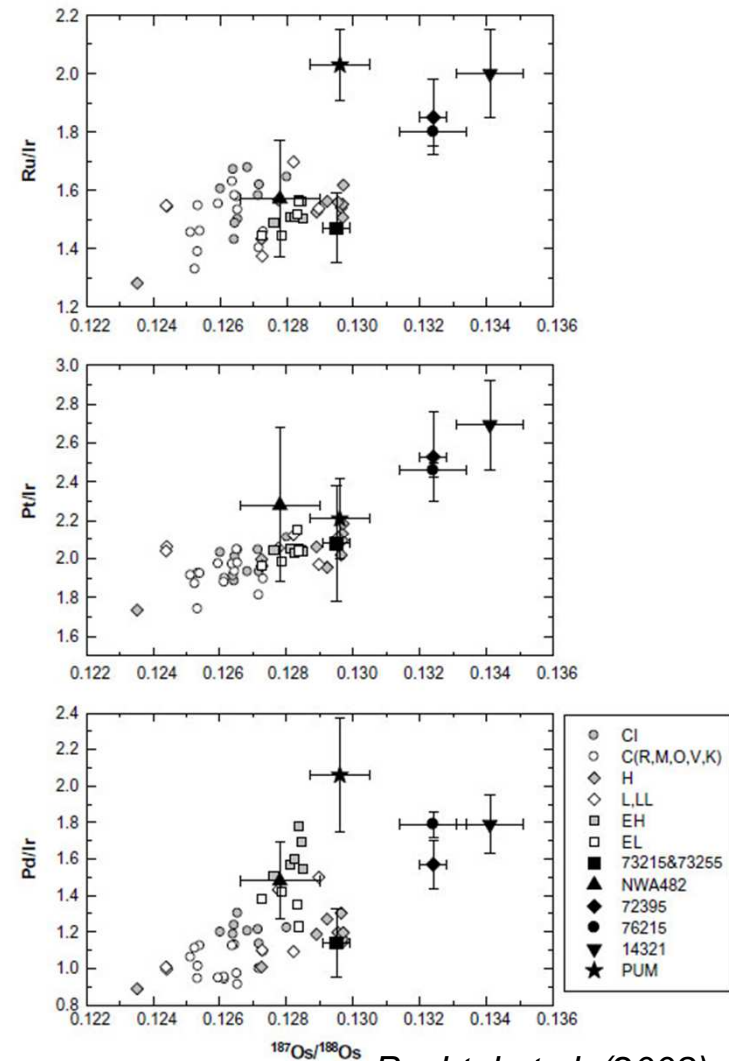
Měsíční kůra

- 2 hlavní typy
 - Fe-anorthozity
 - Mg-gabroidy
- Fe-anorthozity → krystalizace „magma ocean“, stáří ~ 4.3-4.56 Ga
- Mg-gabroidy → vznik procesem FC (kumuláty), stáří 4.1-4.5 Ga



Geochemie Měsíce Impaktity

- drtivá většina stáří impaktů ~ 3.9 Ga \rightarrow následně mezi 3.1 až 3.9 až 10x nižší intenzita
- Geochemie HSE
 - mísení HSE-chudého (měsíční horniny) a HSE-bohatého materiálu (meteority)
 - zdroj impaktů představují rozdílné typy meteoritů



Puchtel et al. (2008) - GCA

Hypotéza Velkého impaktu Vznik Země a Měsíce

- podobný chemismus Měsíce a Země jasně ukazuje na stejný zdrojový materiál
- při závěrečných stádiích akrece se Země srazila s planetou o trochu větší velikosti než Mars → část planety se „smísila“ se Zemí ze zbytku prachu se vytvořil Měsíc
- ochuzení Měsíce o PGE → v době kolize již bylo vytvořeno zemské jádro

