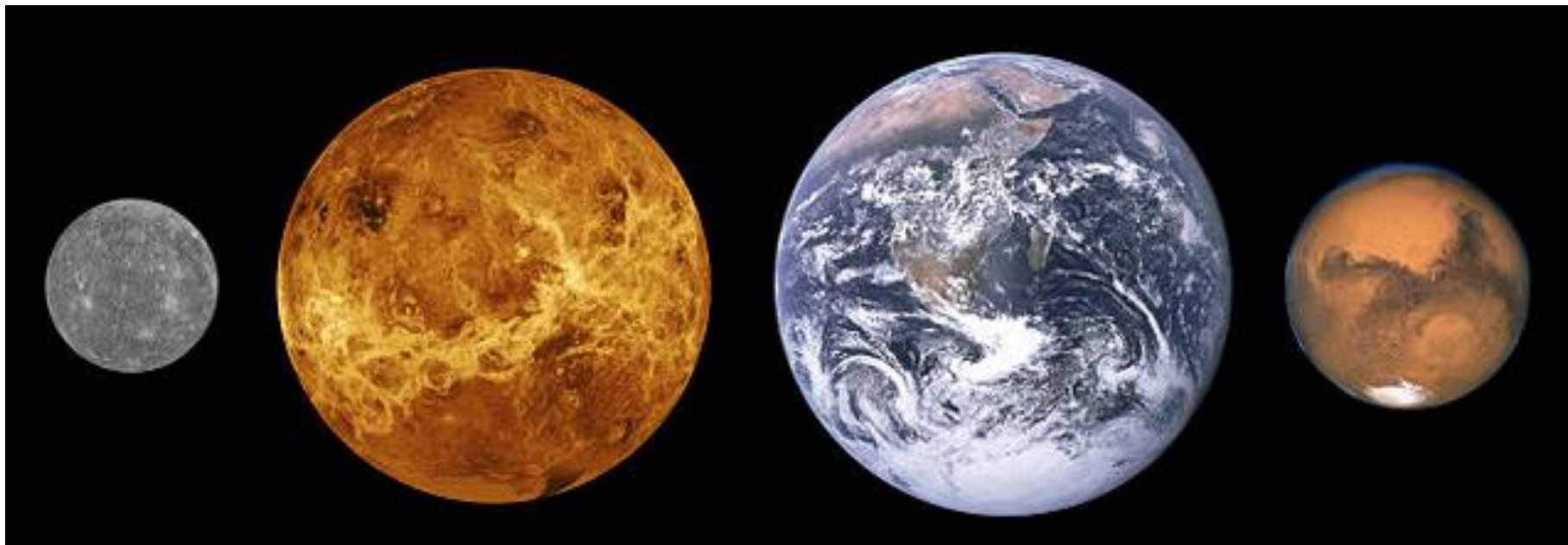


Csillagászati földrajz
2018. november 22.

A kőzetbolygók



A Naprendszer kőzetbolygói



Az ún. **belső bolygók** (Merkúr, Vénusz, Föld, Mars)

- szerkezet: fém (főleg vas) mag + vastag szilikát köpeny
- szilárd felszín → alakzatok: kanyonok/hasadékok, kráterek, hegyek, vulkánok
- másodlagos légkör (ahol van): vulkanikus és becsapódásos eredetű (nem az eredeti szoláris köd anyaga)

+ 3 hasonló szerkezetű hold:
Io (J1), Hold (T1), Europa (J2)

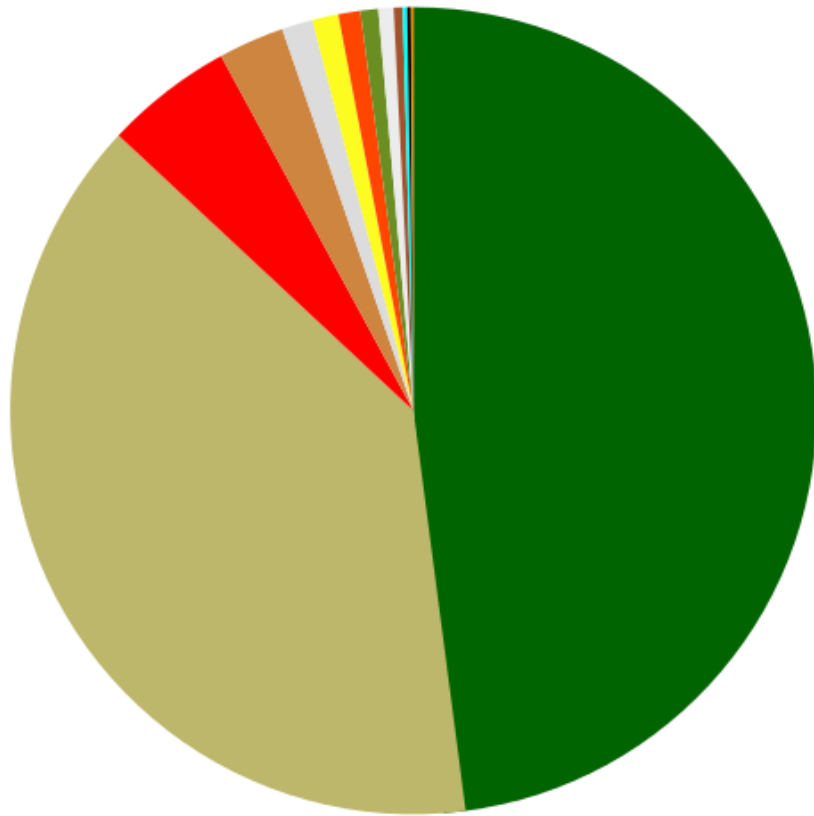
A kőzetbolygók adatai

	Fél nagy- tengely [CsE]	Keringési periódus	Excentri- citás	Pályahajlás (inklináció) [°]	Átlagos sugár [R _⊕]	Tömeg [M _⊕]	Átlagos sűrűség [g/cm ³]	Felszíni gravitáció [g]	Forgási periódus [nap]	Tengely- ferdeség [°]
Merkúr	0,39	0,24 év	0,206	7,01	0,383	0,055	5,43*	0,38	58,6	0,034
Vénusz	0,72	0,62 év	0,007	3,39	0,95	0,815	5,24*	0,904	-243**	177,36**
Föld	1	1 év	0,017	0	1	1	5,51*	1	1	23,44
Mars	1,52	1,88 év	0,093	1,85	0,532	0,107	3,93*	0,376	1,03	25,19
Hold	0,00257	27,32 nap	0,055	5,15	0,273	0,0123	3,34	0,165	27,32	6,69
Io	0,00282	1,77 nap	0,004	2,21	0,286	0,015	3,53	0,183	1,77	0
Europa	0,00448	3,55 nap	0,009	1,79	0,245	0,008	3,01	0,134	3,55	0,1

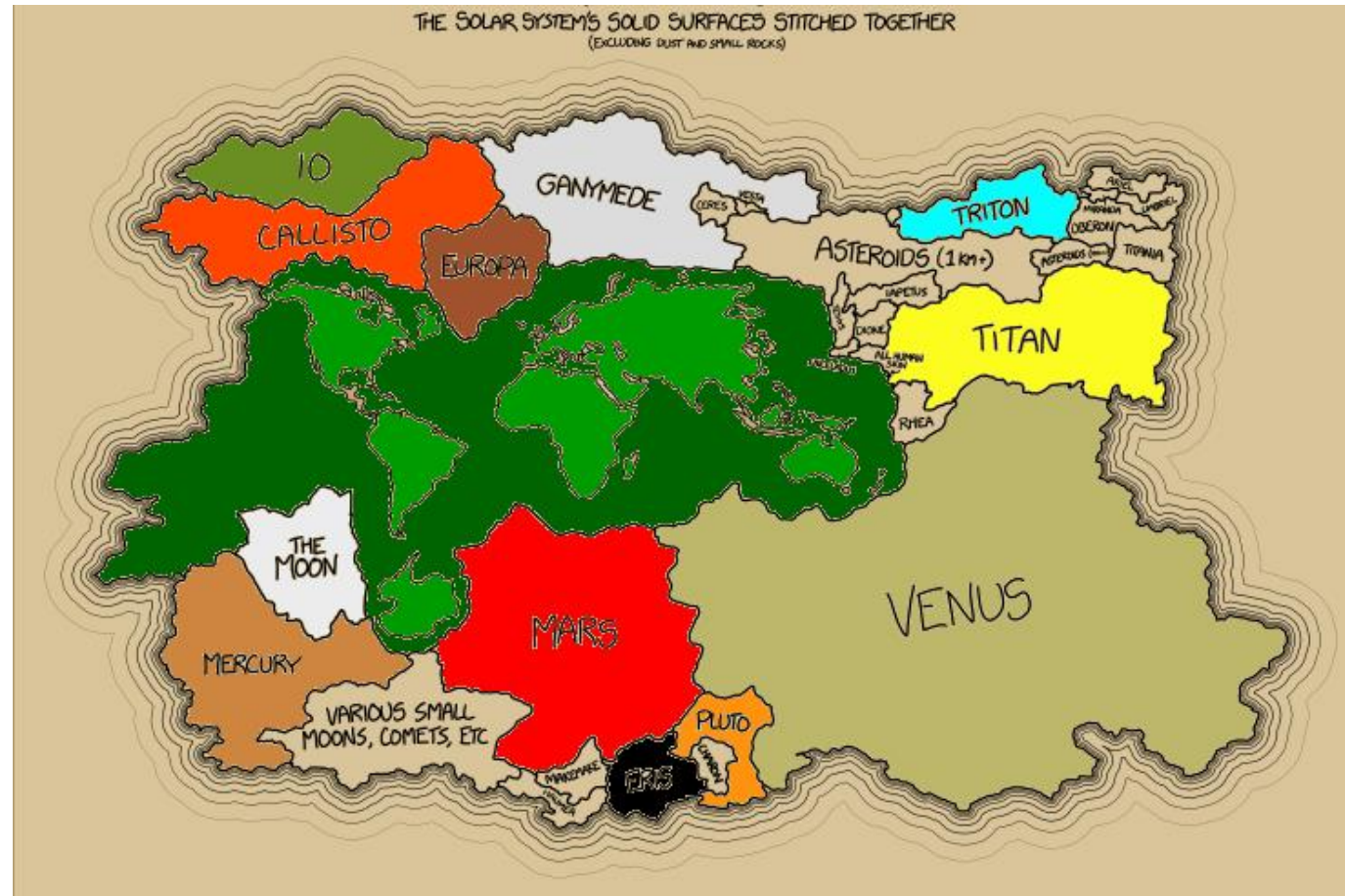
* Gravitációs kompresszió nélkül: 5,3 (♃) – 4,4 (♀) – 4,4 (♁) – 3,8 (♂)

** Retrográd

A szilárd felszínű testek relatív tömegei és felszínei a Naprendszerben



- Earth
- Venus
- Mars
- Mercury
- Ganymede
- Titan
- Callisto
- Io
- Moon
- Europa
- Triton
- Eris
- Pluto



A kőzetbolygók általános eltérései

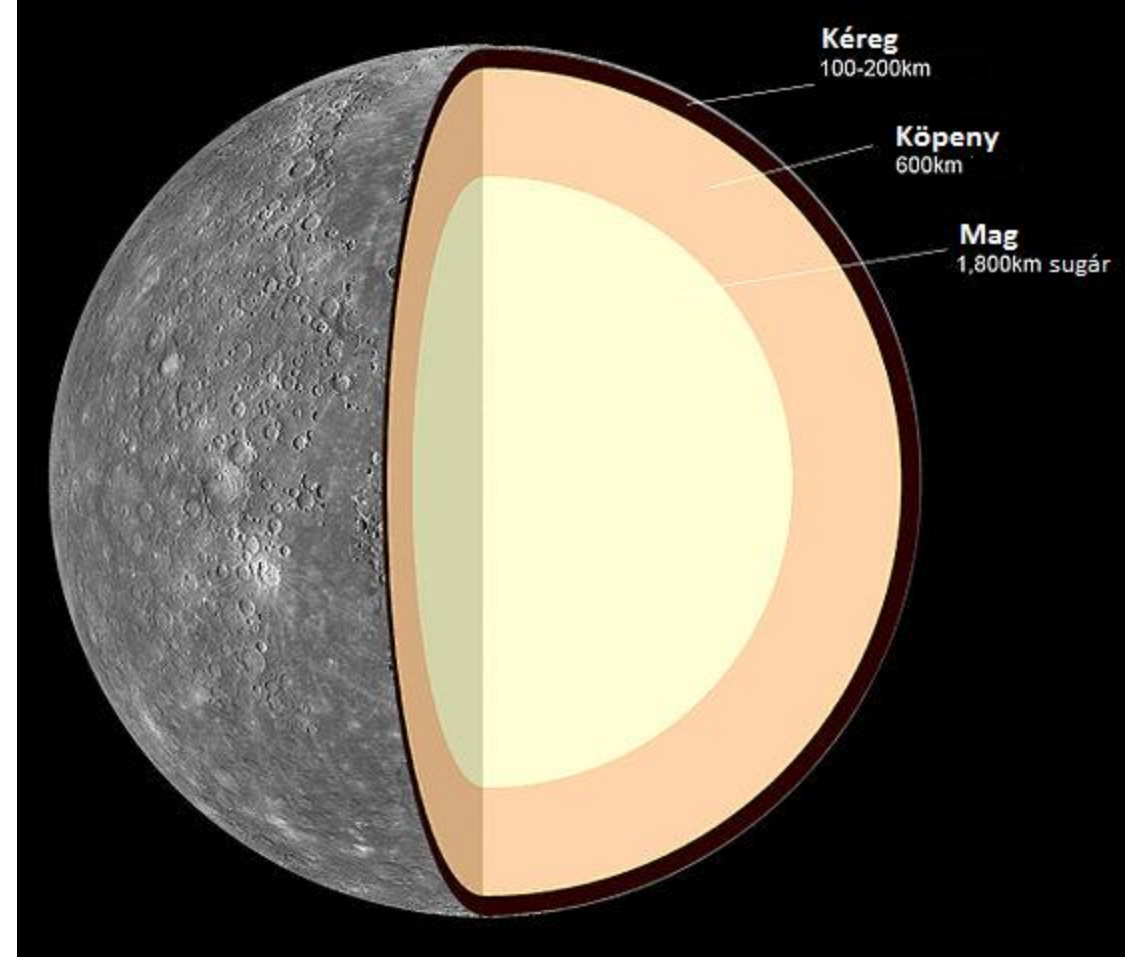
- Különböző **naptávolság**
 - vegyi differenciálódás olvadáspont szerint (lásd: múlt óra)
 - különböző mértékű hő a napból → eltérő felszíni hőmérsékletek, hatás a légkörökre
- Különböző **méret**
 - a nagyobbak (Vénusz, Föld, Mars) légkört tudtak megtartani
 - eltérő mértékben hűltek ki
 - kezdeti belső hő + radioaktív hőtermelés $\propto R^3$ (térfogat)
 - sugárzásos hűlés $\propto R^2$ (felszín)
 - a nagyobb lassabban hűl ($\propto R$) → eltérő vulkáni aktivitás
- Esetenként **árapály-erők**
 - forgás-keringés rezonanciák (Merkúr 2:3, holdak 1:1)
 - árapály-vulkánosság (Io), árapály által fűtött folyékony óceán (Europa)

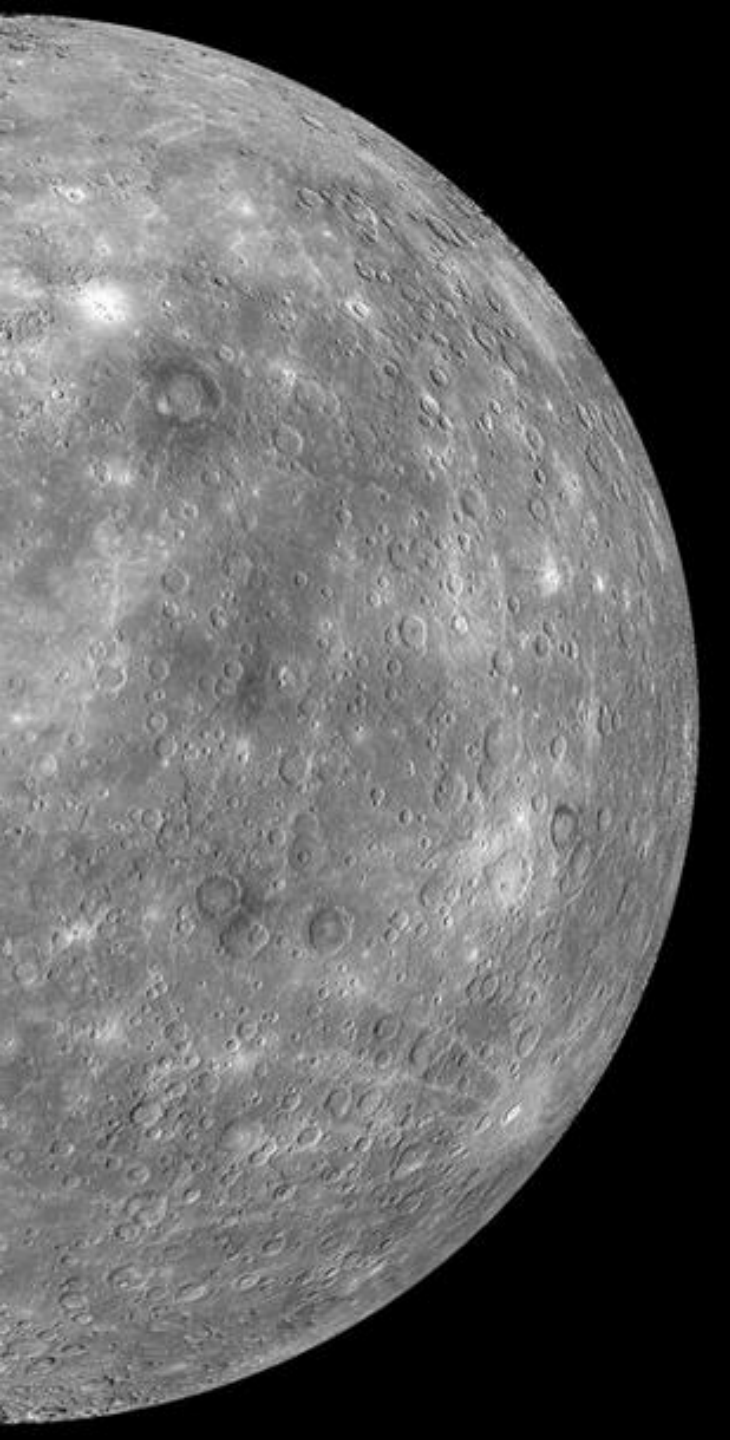
The image features two overlapping spheres representing the planet Mercury. The sphere on the left is dark grey and covered in numerous small, light-colored impact craters. The sphere on the right is more colorful, showing a mix of brown, tan, and blue-grey tones, with some larger, more prominent craters and a bright, sunlit area at the top. The word "Merkúr" is written in a bold, yellow, sans-serif font across the center of both spheres.

Merkúr

A Merkúr szerkezete

- összetétel (nagy sűrűségből):
70% fém, 30% szilikát
- hatalmas mag: a térfogat 55%-a (Földé: 17%)
 - lehetséges magyarázatok:
 - ütközés: eredetileg nagyobb volt, de egy ütközés letépte a kéreg és köpeny nagy részét
 - párolgás: korán keletkezett, így olyan magas volt a hőmérséklet, hogy a kőzet jó része elpárolgott
 - súrlódás: az eleinte sűrű szoláris köd kisöpörte a könnyű részecskéket a formálódó anyagból
- feltehetőleg a mag olvadt, ugyanis viszonylag erős a mágneses tér (földi ~1%-a)
 - lehetséges ok: a nagy excentricitásból adódó árapály-erők
 - következmény: van magnetoszféra (a mágneses tér kizárja a napszelet)





A Merkúr felszíne

Holdéhoz hasonló: rengeteg becsapódási kráter

- évmilliárdok óta „geológiailag” inaktív
- **elhanyagolható légkör** → enyhe erózió
 - napszél (↔ magnetoszféra)
 - mikrometeoritok
 - felszíni hőingadozás → óriási (a bolygók közt a legnagyobb)
min. 100 K (-170 °C), max. 700 K (430 °C)
 - nincs légkör → közvetlen hűlés/fűtés
 - lassú tengelykörüli forgás (1 merkúri nap = 2 merkúri év)
 - nagy excentricitás + közeli Nap

Felszíni alakzatok:

- gyűrt hegységek, felföldek, síkságok, sziklás vidékek, szakadékok, völgyek...

(Űrszondák a Merkúrhez)

Nagy energia szükséges az eléréséhez (több, mint elhagyni a Naprendszert)

→ eddig összesen 2 űrszonda, nincs leszállóegység

- *Mariner-10*, NASA, 1974-75
 - heliocentrikus pálya, összesen 3 Merkúr-megközelítés
 - feltérképezi a felszín 45%-át, mágneses teret mér
 - a hintamanőver első alkalmazása (Vénusz segítségével jut oda)
- *MESSENGER*, NASA, 2011-15
 - 3 megközelítés után bolygó körüli pálya, több mint 4000 keringés
 - a felszín teljes felmérése
 - jeget talál az É-i pólus mélyedéseiben
 - odajutás: hintamanőverek sorozata (1 Föld, 2 Vénusz, 3 Merkúr)
 - vége: belecsapódik a bolygó felszínébe
- (*BepiColombo*, EU-Japán: egy hónapja indult, 2025-ben ér oda)

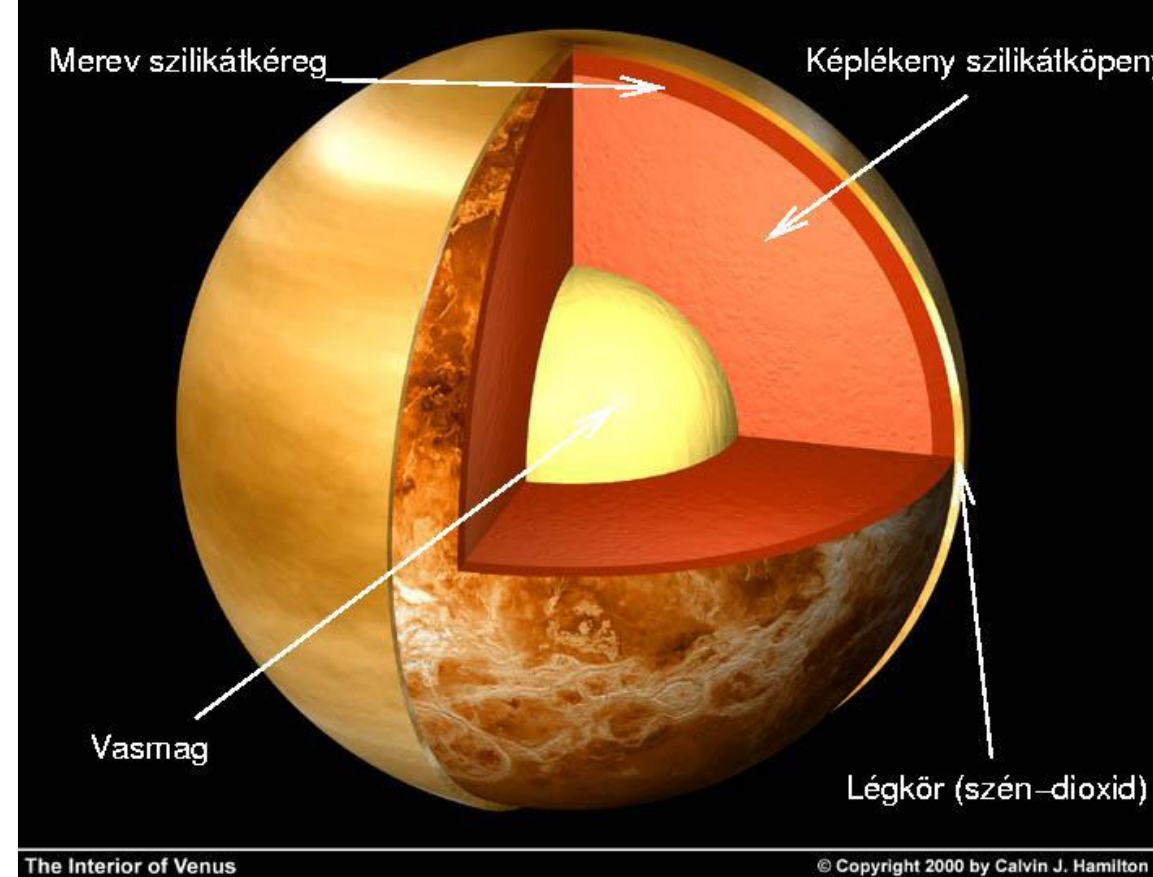




Vénusz

A Vénusz szerkezete

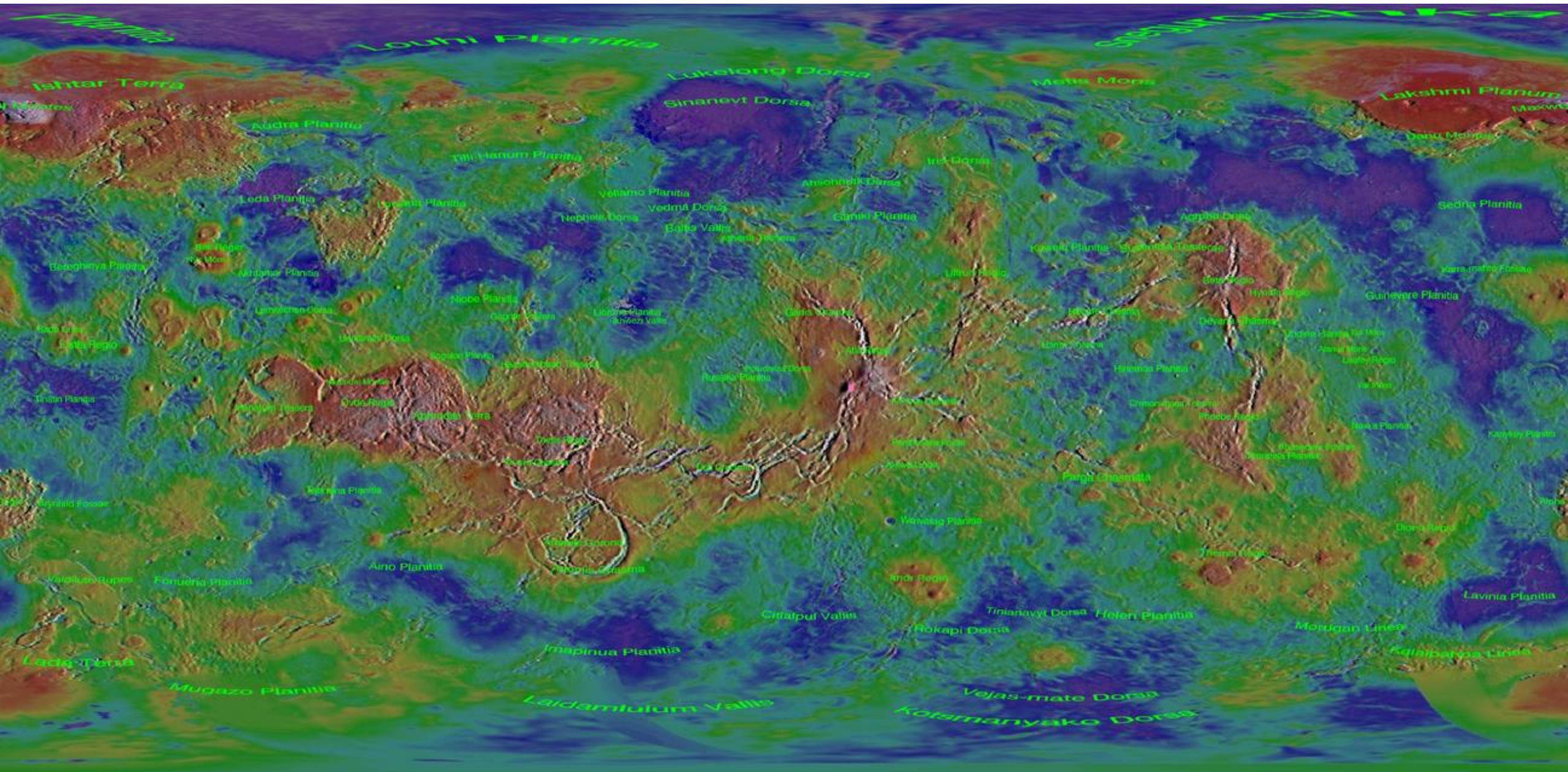
- a Földéhez hasonló méret és sűrűség
→ hasonló belső szerkezet
(vasmag – szilikátköpeny – szilikátkéreg)
- eltérések a Földtől:
 - **nincs (globális) tektonika**
lehetséges ok: túl erős, vastag kéreg (70 km)
→ nem lépés alábukni (+ nincs víz, ami síkosítaná)
 - **nincs számottevő* mágneses tér**
→ **nincs dinamóhatás**, mert
 - vagy megszilárdult már a mag egésze
 - vagy folyékony a mag egésze (nincs szilárd belső)
 - vagy nincs konvekció a külső, folyékony magban, mert a tektonika hiánya miatt a köpeny nagyon forró, így nincs elég hőmérsékletkülönbség a konvekcióhoz



* Van egy gyenge ($B_{\oplus}/1000$) indukált mágneses tér: a napszél és a vénuszi ionoszféra kölcsönhatása

A Vénusz felszíne:

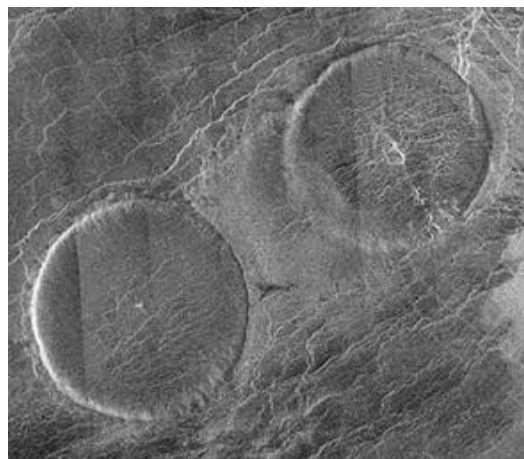
vulkáni síkságok (80%) + 2-3 magasabb kontinens (Ishtar Terra, Aphrodite T., Lada T.)
+ pajzsvulkános eredetű kisebb „regio”-k



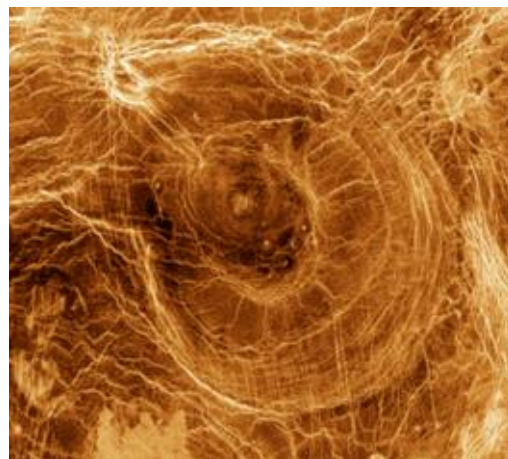
Vulkánosság a Vénuszon

A felszíni alakzatok + a légkör kéntartalma jelentős **vulkánosságra** utalnak

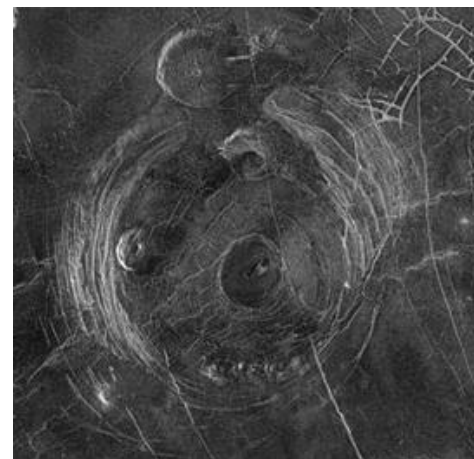
- vulkánok száma többszöröse a földiének (pl. 167 óriásvulkán: átmérő > 100 km)
Mert: nincs tektonika \rightarrow van idejük felépülni + a vastag kéreg elbírja
- a légkör SO_2 tartalma megfigyelhetően változik \rightarrow jelenleg is aktív vulkánosság
- kráterek, hegyek, völgyek, vulkánok mellett egyedi felszíni alakzat-típusok, pl.:



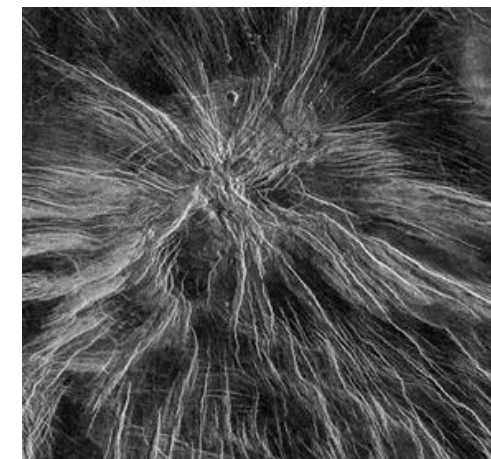
farra (palacsinta): 20-50 km átmérőjű és 100-1000 m magasságú, lapos felszínű vulkáni alakzat



arachnoid: pókhálóhoz hasonló alakzat sugárirányú és koncentrikus repedésekből



corona: általában medencék által körülvett, gyűrű alakú repedések



nova: csillagszerű, sugárirányú repedésrendszer

Bechapódási kráterek a Vénuszon

~ 1000 bechapódási kráter ismert

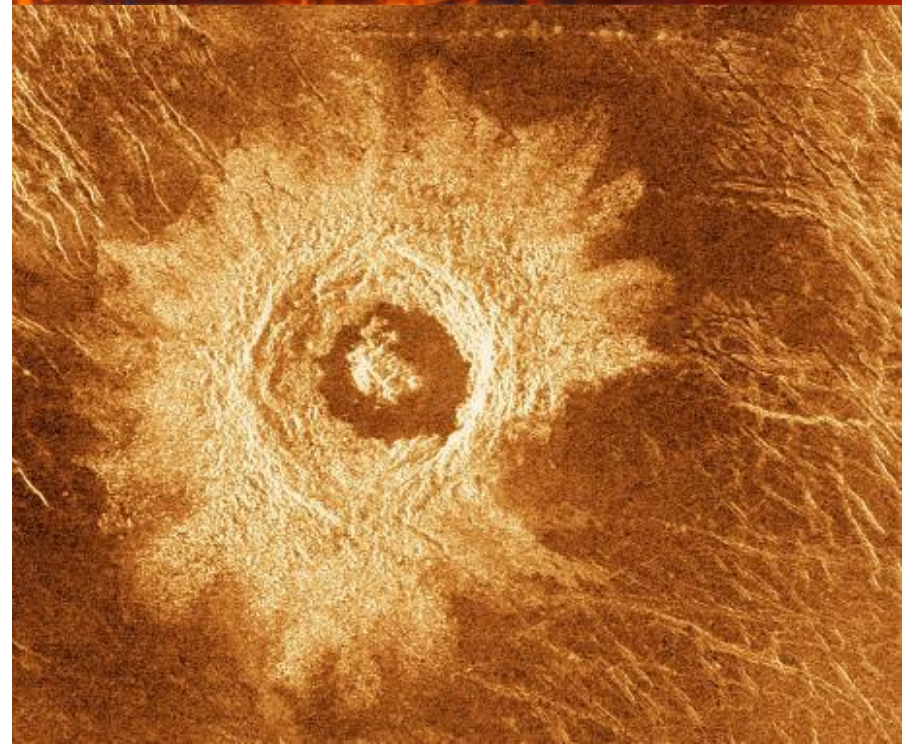
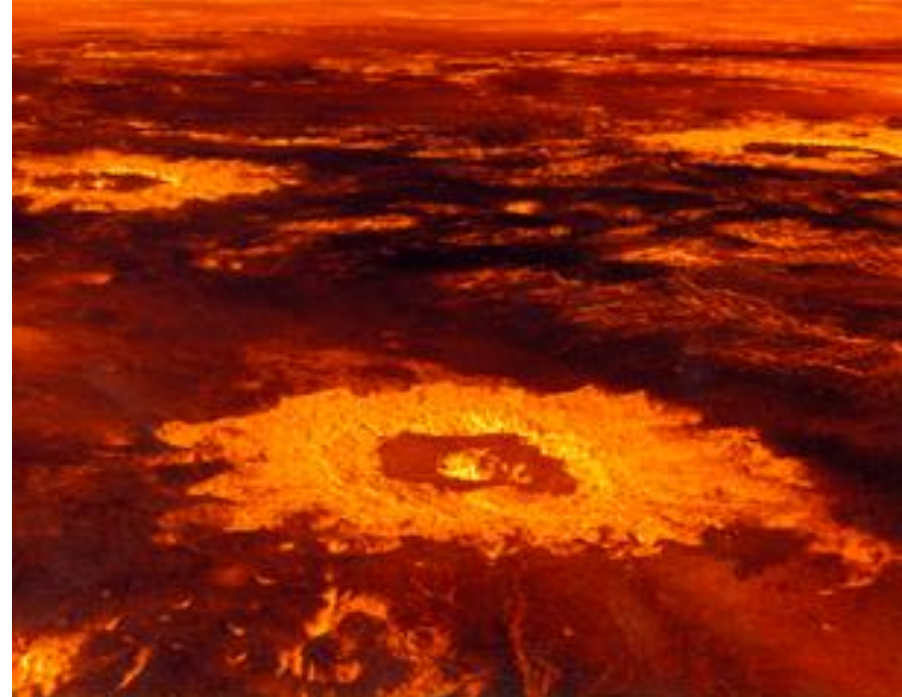
- nincsenek* kicsik (< 3 km)
→ a sűrű légkörben a kisebb testek elégnek vagy nagyon lefékeződnek

* kivéve: a felszín közelében darabokra esett testek maradványaiból

- a többség eléggé fiatal, nem erodált
→ a Vénusz felszíne kb. félmilliárd éves
→ néhány százmillió évvel ezelőtt **újraformálódott**

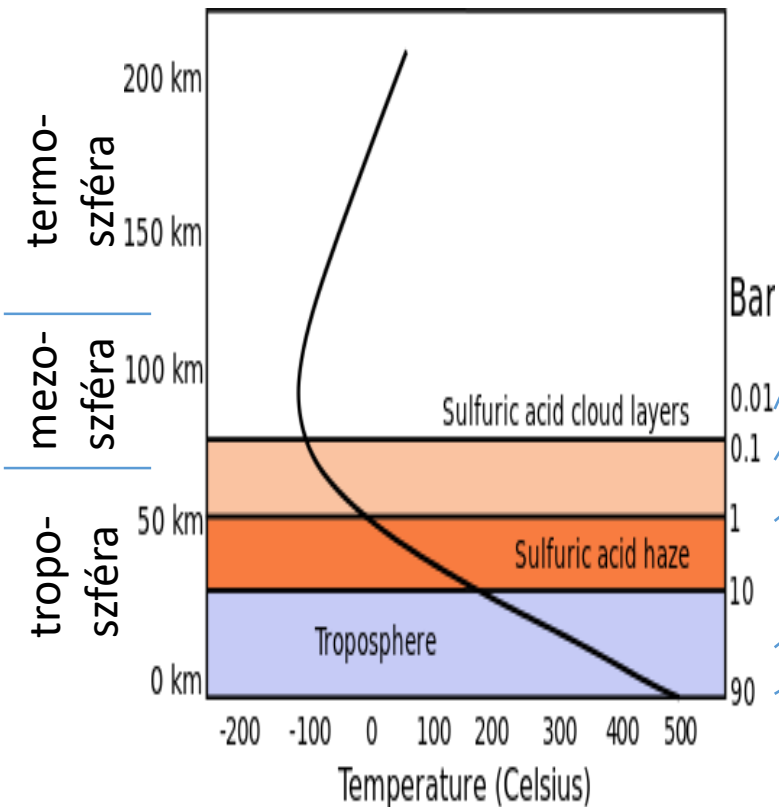
Elmélet: tektonika híján a bolygó nem tud hatékonyan hűlni

- időszakonként a felgyülemlt hő radikálisan és globálisan újraformálja a felszínt

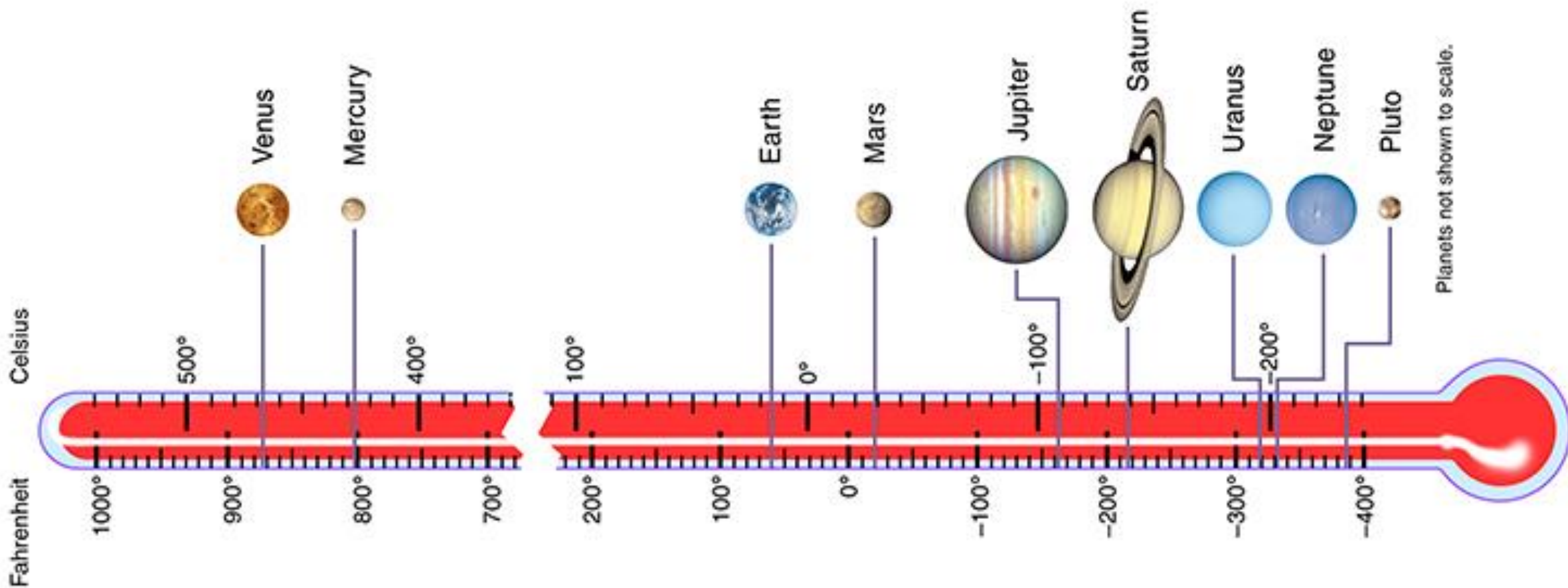


A Vénusz légköre

- tömege 93-szorosa a földiének
- összetétel: 96,5% CO_2 , 3,5% N_2 , nyomokban egyéb gázok (SO_2 , Ar, H_2O , CO, He, Ne)



- **szuperrotáció**: a felső légkör a bolygó forgásánál sokkal gyorsabban kering (~4 földi nap) → 350 km/h szelek
- **kénsavfelhők**
 - teljesen eltakarják a felszínt → csak radarmérésekkel „látható”
 - villámok: a földi aktivitás legalább fele
- 50 km körül földfelszíni jellegű nyomás és hőmérséklet
- 11 km: legmagasabb pont → 45 bar, 655 K (Maxwell Montes)
- **felszín: 92 bar, 740 K (467 °C), sűrűség: 50·földi (65 kg/m³)**
 - ok: a N.r. legerősebb üvegházhatása (→ legforróbb felszín)
 - izotermikus: ~ ugyanaz éjszaka és nappal, egyenlítőn és póluson
 - szuperkritikus CO_2 fúj/folyik lassan, porral és kavicsokkal teli



A Vénusz „kilóg a sorból”: felszíni hőmérséklet nem a Naptól mért távolság szerint alakul

(Űrszondák a Vénuszhoz)

Több tucat sikeres űrszonda

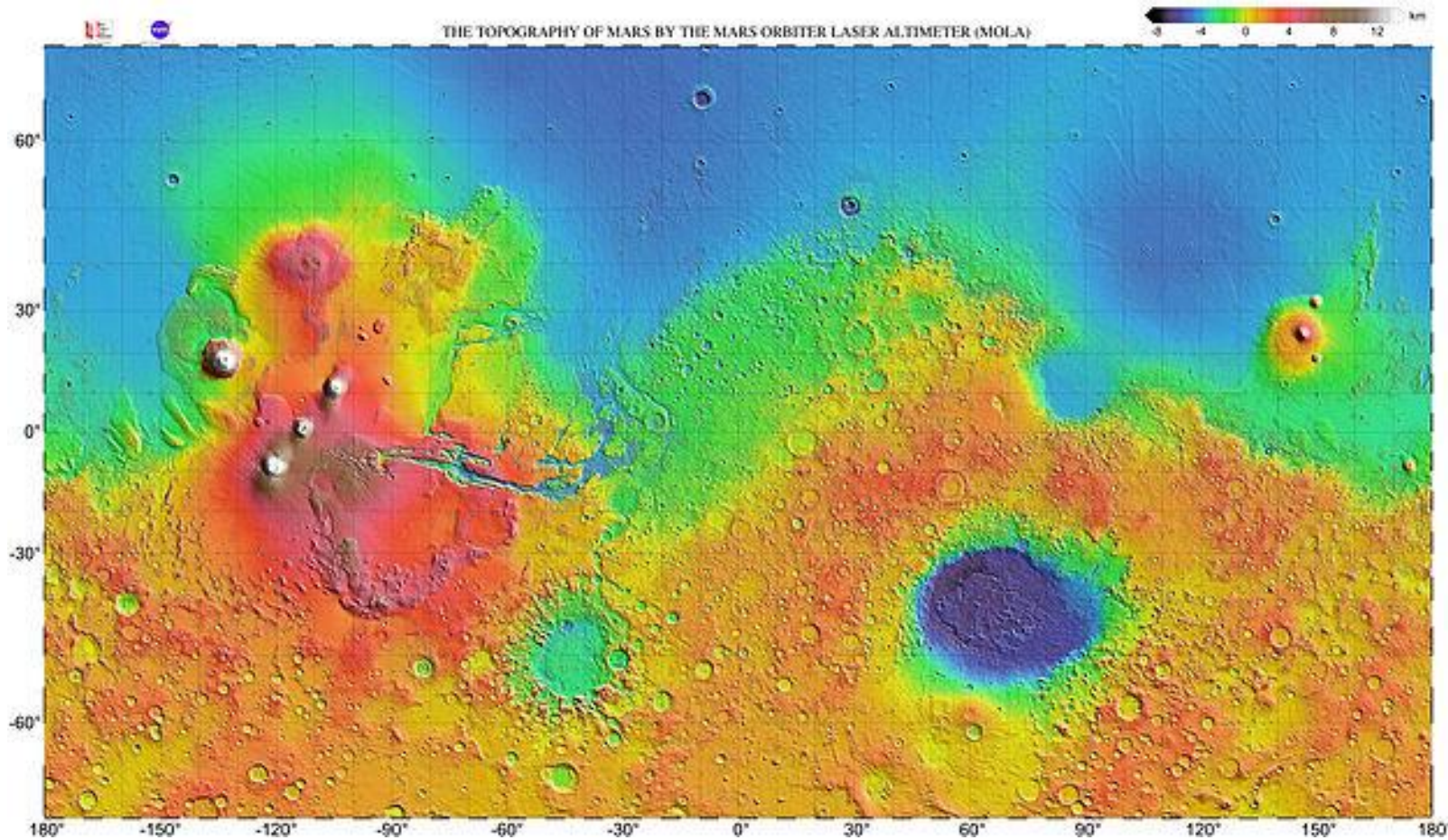
- első meglátogatott bolygó: *Mariner-2* (USA), 1962 [*Venyera-1*, 1961]
- első sikeres leszállás idegen bolygón: *Venyera-7* (SzU), 1970 → később még 9
- *Magellan* (USA), 1991-95: feltérképezés nagy felbontású radarfelvételekkel
- *Venus Express* (EU), 2006-14: légkör és egyébek





Mars

A Mars felszíne



Északi medence:

- vélhetőleg a N.r. legnagyobb ismert becsapódási krátere: 10000 x 8000 km, a felszín 40%-a (Pluto méretű objektum becsapódása → lávafolyások)
- régen feltehetően óceán hullámzott

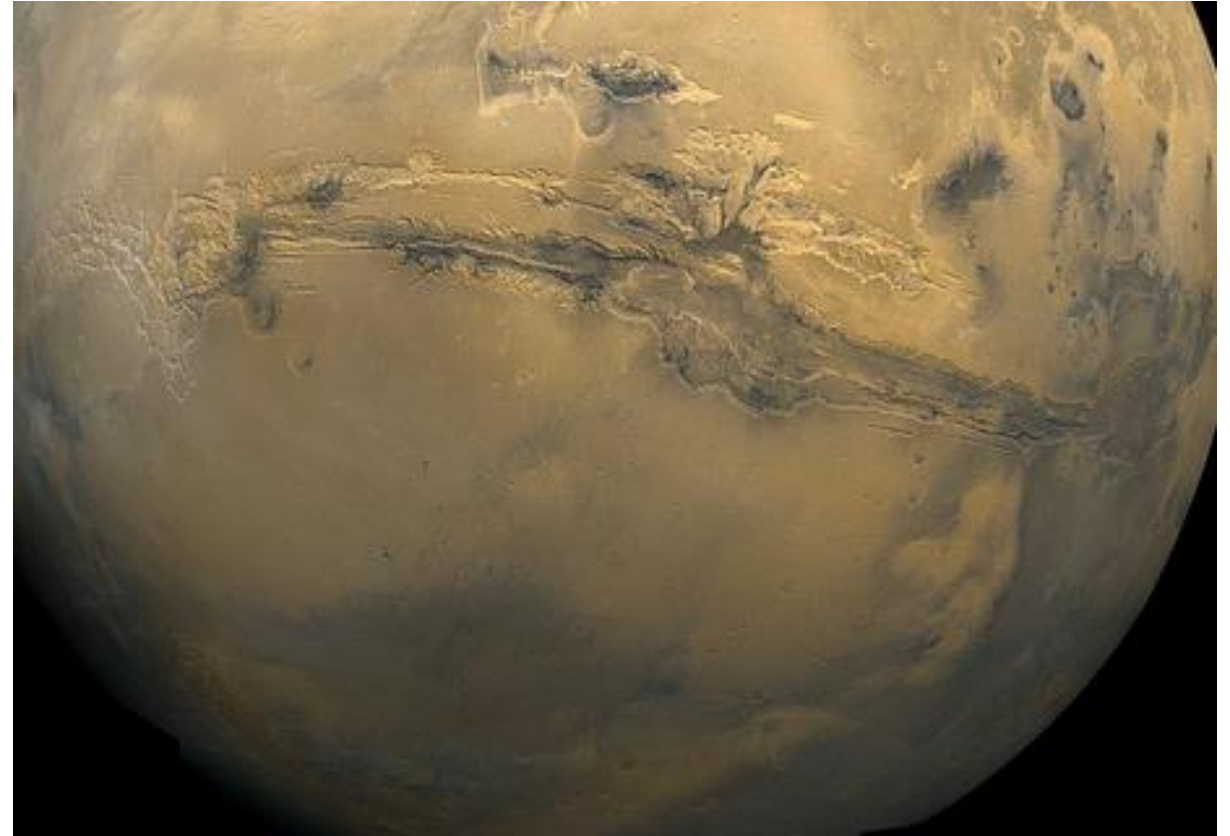
Déli felföld:

- ősi vulkanikus hátság
- átlagszintje 2-3 km-rel magasabban van
- rajta nagy vulkáni hátságok (balra: Tharsis-hátság) hatalmas pajzsvulkánokkal



Olympus Mons

- a N.r. (második) legmagasabb hegye:
21-22 km magas, 550-600 km széles
- hatalmas pajzsvulkánok:
 - nincs tektonika → mindig ugyanott törnek ki
 - kisebb gravitáció, vastagabb kéreg → elbírja



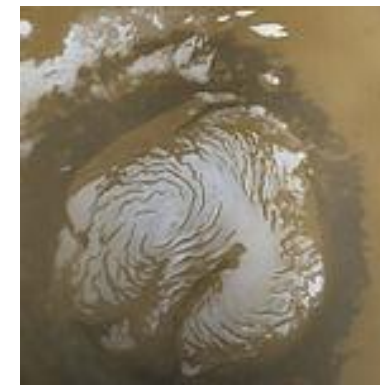
Valles Marineris

- a N.r. (egyik) legnagyobb kanyonja:
4000 km hosszú, 200 km széles, 7 km mély
- geológiai (tektonikus?) eredetű törésvonal
 - a Tharsis-hátság kiemelkedésekor megrepedt
 - később az erózió szélsítette

Víz a Marson

Jelenleg nem lehet folyékony víz (túl kicsi légköri nyomás), de

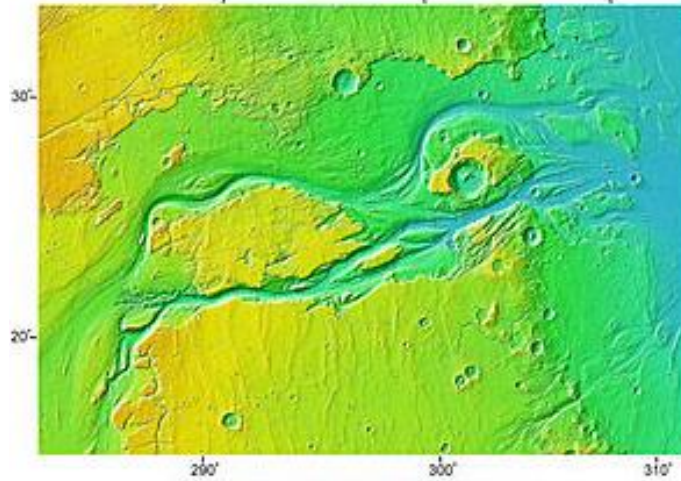
- sok vízjég van a pólusi jégsapkákban és a felszín alatt
- ősi és közelmúlt felszíni vízfolyások nyomai, pl.:



É-i és D-i jégsapka: több száz km átmérő, 2-3 km vastag



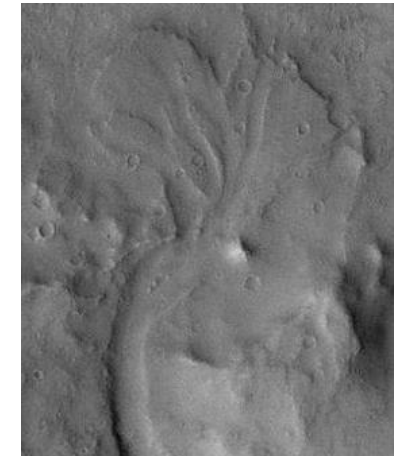
völgyhálózatok: a földi folyóvölgy-medencékre hasonlító objektumok (rövid idő alatt, régen)



kifolyási csatornák: hatalmas mennyiségű víz hirtelen kiszabadulva óriási csatornákat váj (néhányik elég fiatal → feltehetőleg felszín alatti víztárolókból)



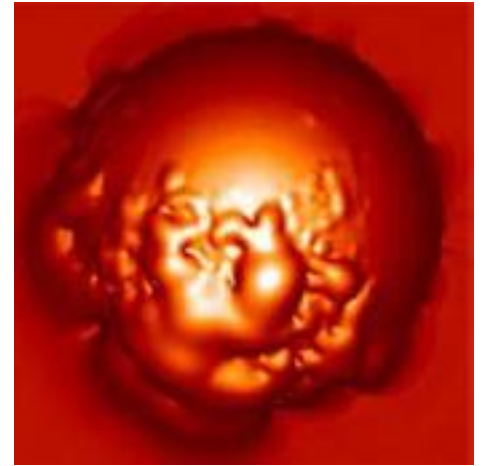
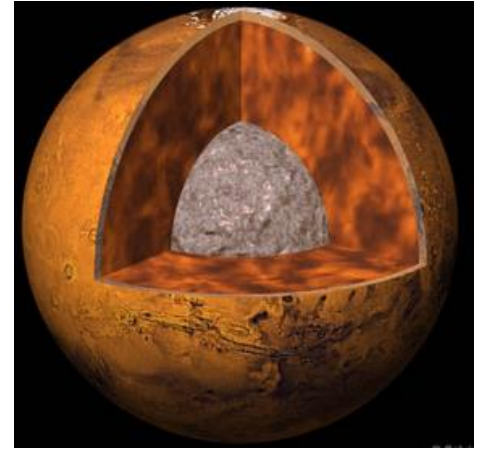
vízmosások (?): szűk csatornák kisebb hálózatai (mind fiatalok)



deltatorkolatok, hordalékkúpok (kráterekben)

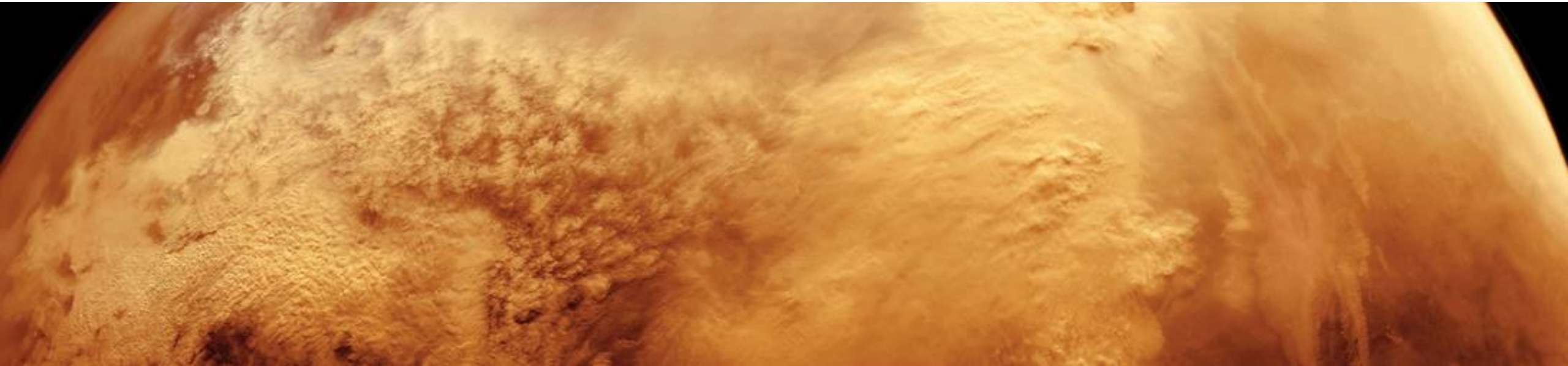
A Mars „geológiája”

- Belső:
 - 1800 km sugarú **mag** (Fe, Ni + 16% S → könnyebb elemekben gazdagabb)
 - + szilikát **köpeny**
 - + átlag 50 km (max. 125 km) vastag **kéreg** (É: ~30 km, D: ~60 km)
- Már nincs globális **mágneses tér**, de a régi **emlékei** bezáródtak a kéregbe (remanens tér: $B_{\oplus}/300$)
 - van részleges magnetoszféra
 - pólusváltások nyomai
 - gyorsan kihűlt a bolygó → hamar leállt a dinamó
- Felszín: **vulkánosság** nyomai (relatív közelmúltban is), de jelenleg passzív
- Kőzet: főleg bazalt; talaj: rengeteg por (vörös színe: vas-oxid (rozsdá))
- Korszakok: Noachis (4,6-3,7 Gév) → Hesperia (3,7-3,0 Gév) → Amazonis (3,0-0 Gév):
 - déli felföldek
 - sok nagy becsapódás
 - sok felszíni víz (óceán)
 - vulkáni hátságok
 - lávasíkságok
 - a víz mennyisége csökken
 - változatos folyamatok: erózió, becsapódás, vulkán
 - a felszíni víz eltűnik



A Mars légköre

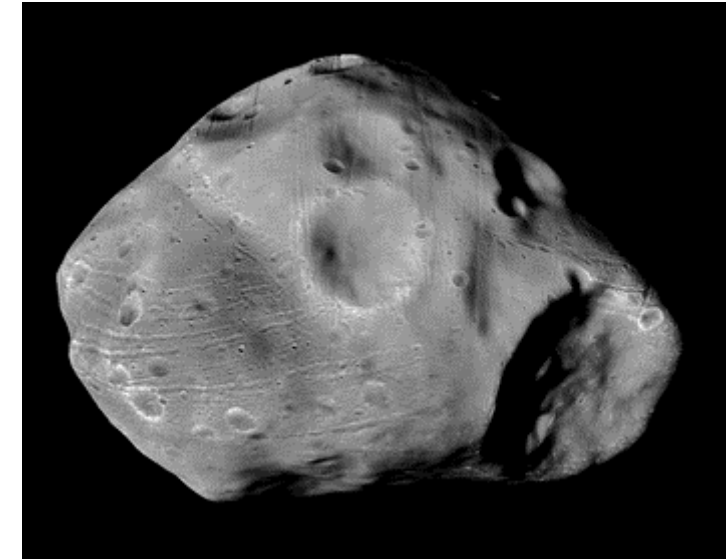
- **ritka**: a felszíni nyomás a földiének néhány tized %-a (változó, átlag 0,6%)
- de **vastag**: kisebb gravitáció, könnyebb molekulák
 - alsó légkör: 0-40 km; középső légkör: 40-100 km; felső légkör: 100-200 km
- összetétel: 96% CO_2 , ~2% N_2 , ~2% Ar, nyomokban O_2 , CO, H_2O , (CH_4) + elég sok por
- jelentős napi hőingás: 130 K – 300 K (ritka légkör nem tárol sok hőt)
- erős szelek (néhány 10 km/h) → porviharok



A Mars holdjai

- méret: ~20-25 km átmérő
- keringési távolság: ~9400 km (felszíntől 5760 km)
- keringési idő: 7 h 39 m → felszínnél gyorsabb: Ny-ról K-re látszik mozogni
- 2 m/évszázad sebességgel közeledik a Marshoz → évmilliók múlva szétesik (képen a barázdák: repedések az árapály-erő hatására)
- max. látszó fényesség: –9-10 mag.; max. látszó méret ~10'

Phobosz



Deimosz



- méret: ~10-15 km átmérő
- keringési távolság: ~23 500 km
- keringési idő: 30 h 21 m → „rendes irány”, K-ről Ny-ra látszik mozogni
DE: sokáig látszik az égen (2,7 nap)
- max. látszó fényesség: –5 mag.; látszó méret ~2,5'

Valószínűleg mindketten befogott aszteroidák

(Űrszondák a Marshoz)

Közel 50 eszköz indult el felé, közel harmaduk sikeres → sok hiba

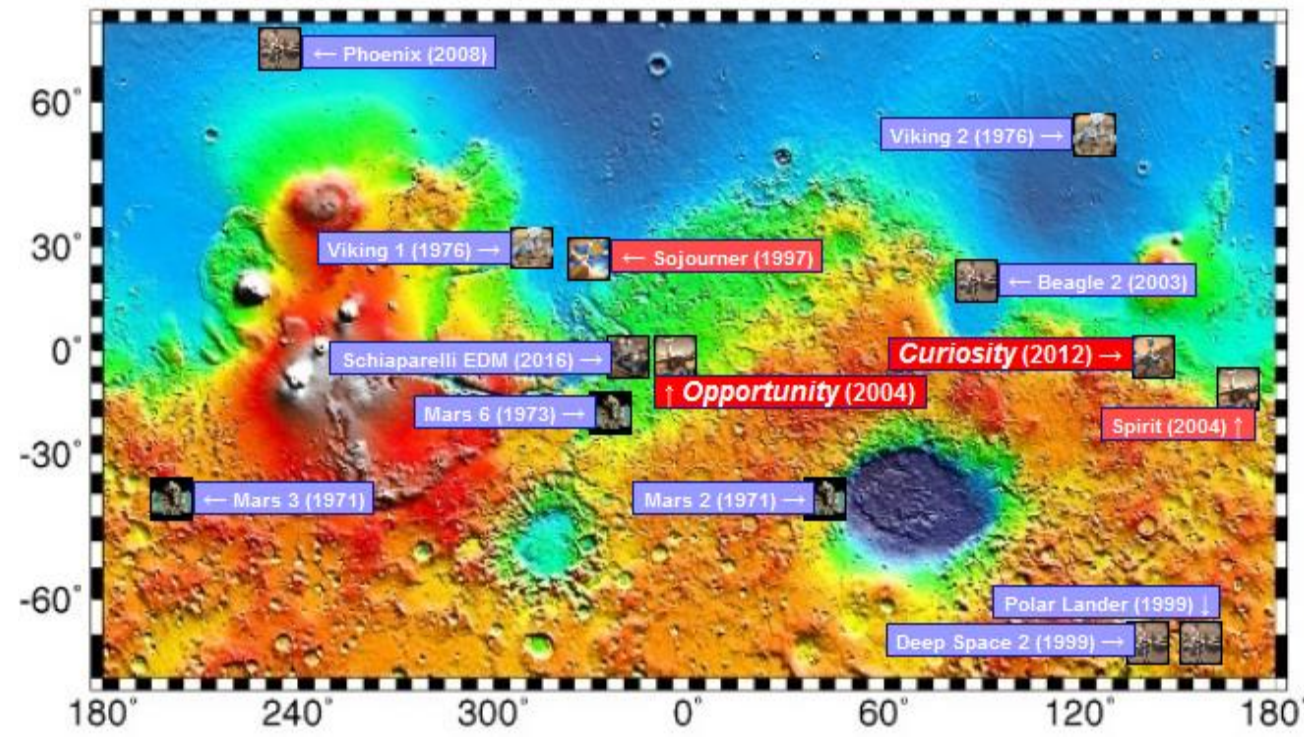
- 60-as évek, 2. fele, USA: sikeres megközelítések (Mariner 4, 6, 7)
- 1971, USA: sikeres műhold (Mariner 9 → alapos feltérképezés)
- 70-es évek 1. fele, SzU: kevésbé sikeres leszállások (Marsz-program)
- 70-es évek közepe, USA: sikeres műholdak és leszállások (Viking-1: 6 évig aktív, Viking-2: 3 évig)



(...)

Jelenleg

- 6 műhold
- 1,5 aktív marsjáró (Opportunity (2004-18?), Curiosity (2011-))
- mindenféle tervek (emberes leszállásra?)...



TABULA SELENOGRAPHICA

in qua
Lunarium Macularum exacta Descriptio secundum Nomenclaturam
Præstantissimorum Astronomorum

HEVELII quam RICCIOLI

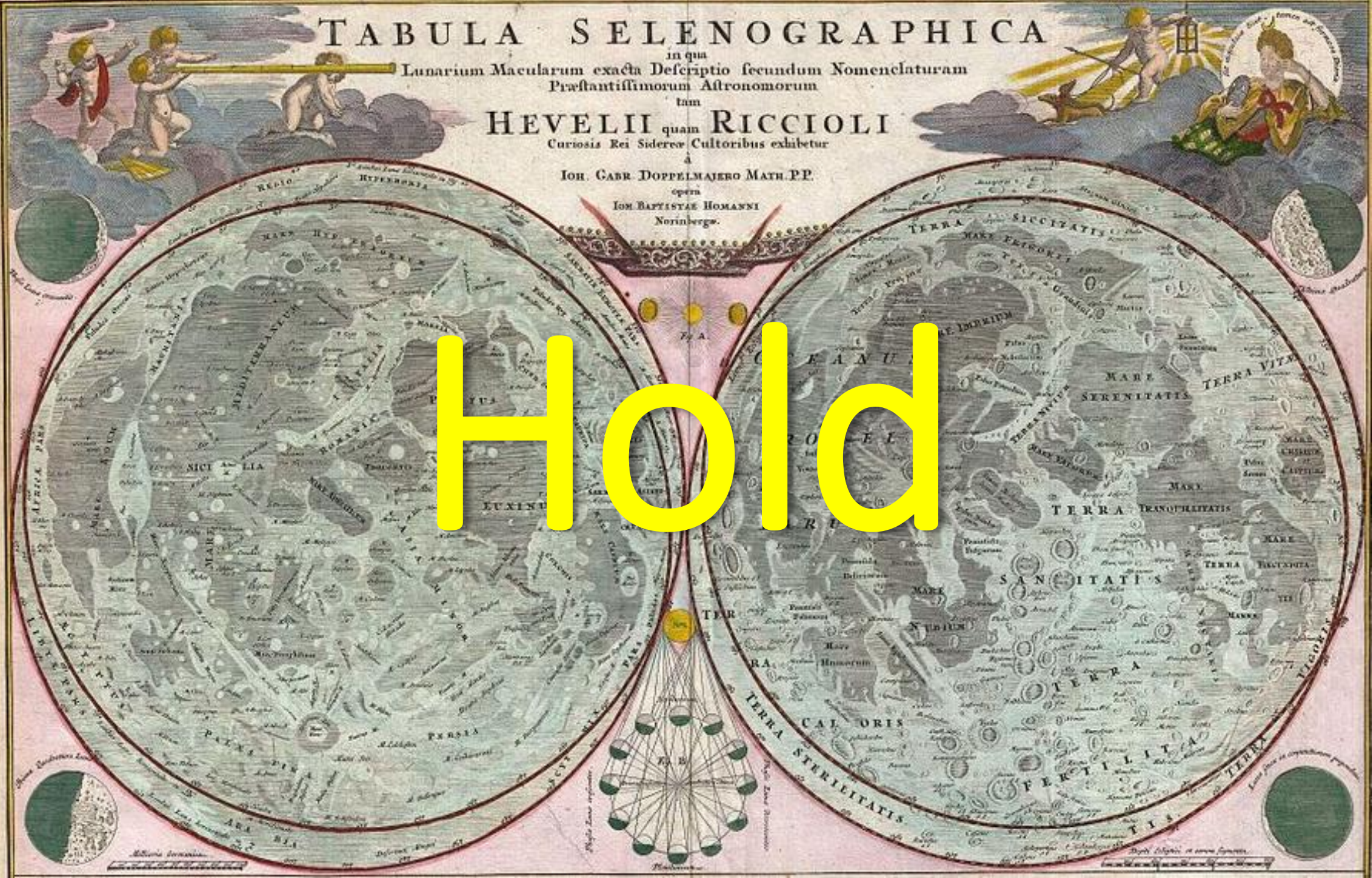
Curiosis Rei Sideræ Cultoribus exhibetur

IOH. GABR. DOPPELMAJERO MATH. PP.

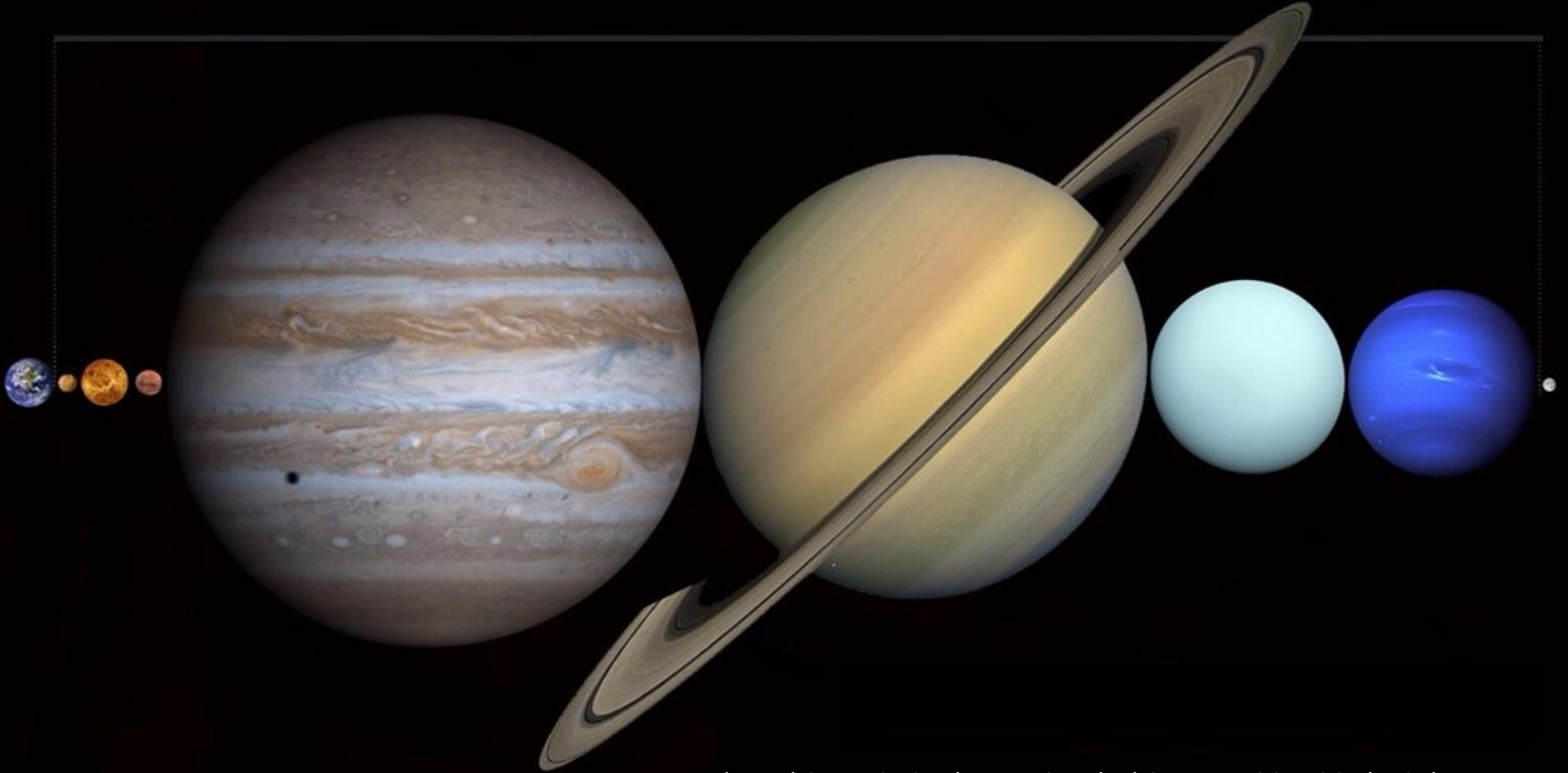
opere

IOH. BAPTISTÆ HOMANNI
Norinbergæ.

Hold



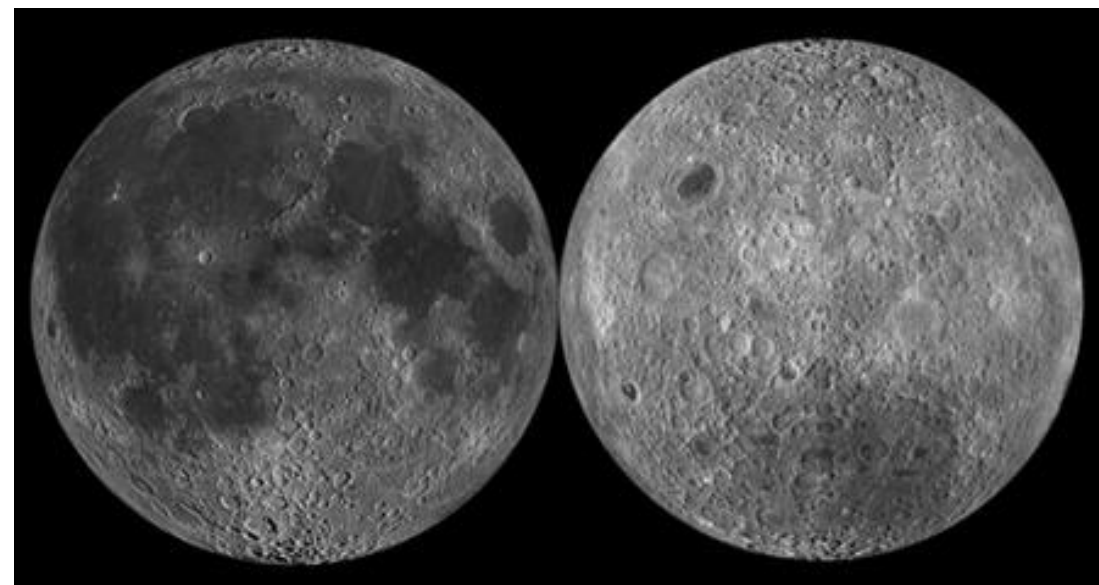
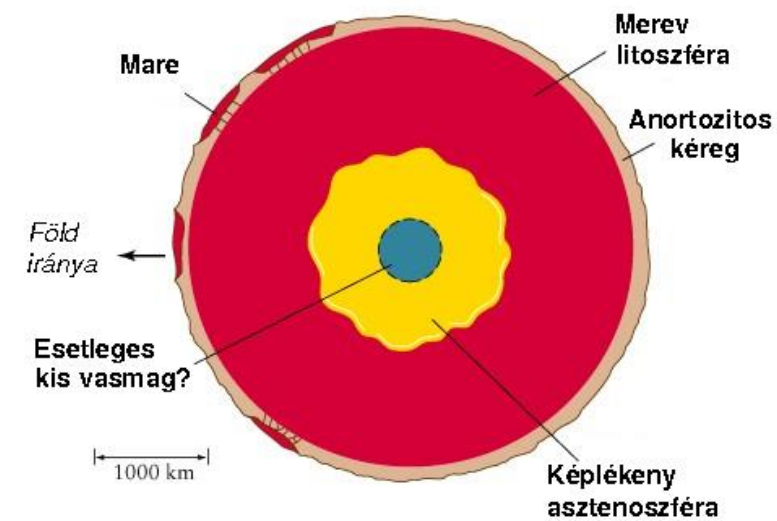
A Hold távolsága a Földtől: kb.* éppen beférne közéjük a Naprendszer összes többi bolygója!



* Ha átlagos bolygósugarakat és átlagos Hold-Föld távolságot veszünk

A Hold „geológiája”

- Belső (szeizmikus mérések alapján):
 - kéreg: 60-100 km (a földi oldalon vékonyabb)
 - vasmag nincs vagy kicsi
→ **nincs saját mágneses tér** és magnetoszféra
- Felszín:
 - kétféle terület:
 - világos felföldek: **terrák** (85%)
 - sötét medencék: **mare**-területek
 - **nincs saját légkör**
 - hőingadozás: -160 °C-tól +130 °C-ig
 - (nappal a napszél által töltött por lebeg)
 - struktúrák: kráterek, gyűrűs hegyek, hasadékvölgyek, dómok...



Föld felőli oldal

Túlsó oldal

A Hold kőzetei

Kőzetminták 9 helyről + keringő egységek mérései (röntgen- és gamma-spektroszkópia)
→ globális elemösszetétel: sok Ti, Al, Ca + kevés alkálifém, illó + a többi mint földköpeny (Si, Fe, Mg)



bazalt (mare-bazalt):
a medencék anyaga
→ kiömlési kőzet, azaz
gyorsan hűlt le
(medencefeltöltés pl.
becsapódásokkor)



gabbró (anortozit):
a terrák anyaga
→ mélységi kőzet, azaz
lassan hűlt le
(kéreg megszilárdulása)



törmelékkő (breccsa):
összeállt kőzetegyveleg
→ holdpor által összekötött
kristályos kőzet,
becsapódáskor keletkezik



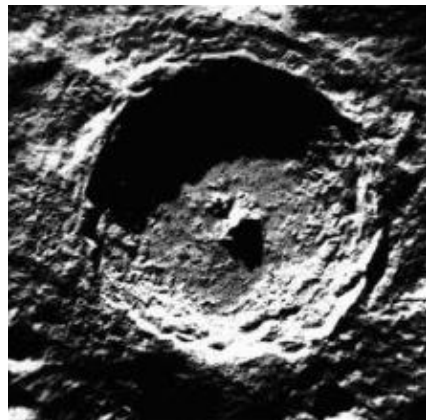
holdpor (regolit):
10-100 m vastag réteg
→ erózió (becsapódás,
hőingadozás, stb.
hatására), apró
szemcsés (<0,1 mm)

Becsapódási kráterek

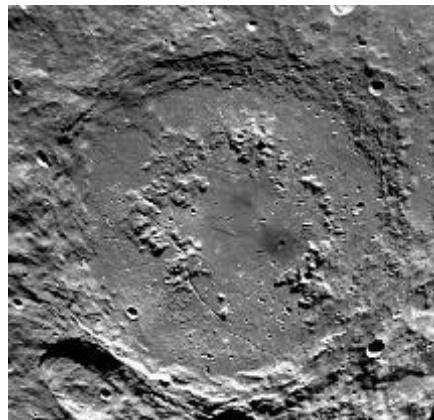
Egyszerűsített magyarázat: becsapódáskor az anyag megolvad
→ mérettől függően különböző stádiumokban szilárdul vissza



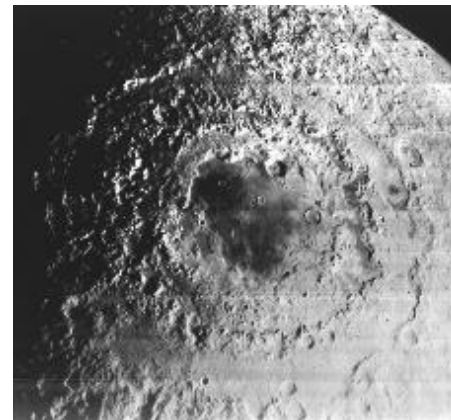
gödörkráter
< 20 km



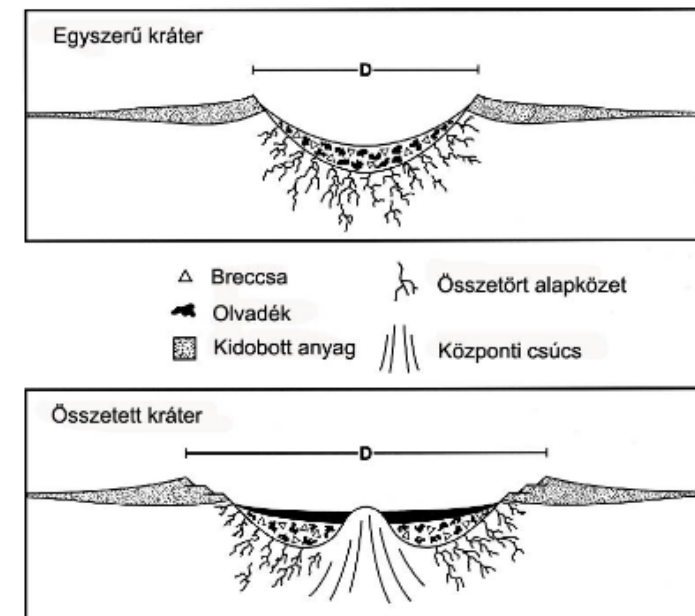
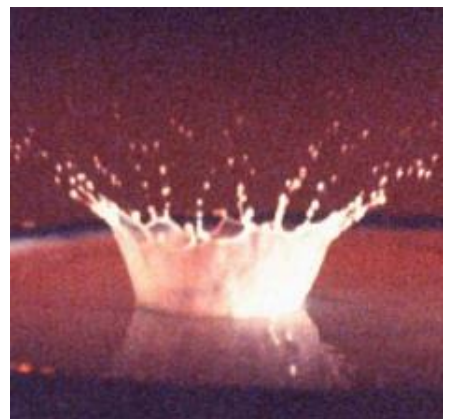
központi csúcsos
20 km – 250 km



központi gyűrűs
250 km – 400 km



többszörös gyűrűs
> 400 km



Kormeghatározás

kráterezettség alapján:

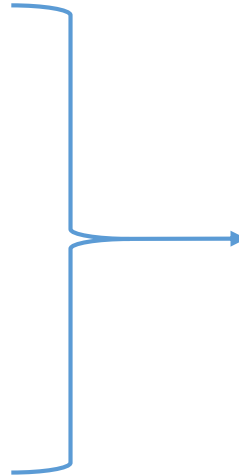
- több kráter → idősebb (felföldek)
- kevesebb kr. → fiatalabb (medencék)

(+ Idősebb kráter
lepusztultabb)

A Hold története

Tények:

- nem létező vagy kicsi vasmag
- sok magas olvadáspontú anyag
- kevés alacsony olvadáspontú anyag
- a zöme a földköpenyhez hasonlít
- O-izotópok arányai megegyeznek a Földével (és minden mástól eltérnek)



Konklúzió:

- *nem* befogásos eredetű (Fölhöz túl hasonló)
- *nem* a Földdel együtt keletkezett (nincs vasmag)
- hanem a **Földből szakadt ki**



Becsapódás: nagyon régen egy Mars méretű bolygó-embrió („Theia”) csapódott a Földbe, a kiszakadó köpenyanyagból gyűrű lett, az illók elszöktek, a maradék összeállt

Korszakok:

- Prenectaris, 4,5-4,2 Gév: ősi kéreg képződése vastag lávaóceánból (meteorbombázás? indukciós fűtés?)
- Nectaris, 4,2-3,8 Gév: nagy medencék kialakulása („erős kései bombázás”)
- Imbrium, 3,8-3,2 Gév: medencék lávaelöntése
- Eratosthenes, 3,2-1,2 Gév: régi, lepusztultabb kráterek képződése
- Copernicus, 1,2- Gév: fiatal, sugársávok kráterek képződése

(Űreszközök a Holdra)

- 1959: Luna-program: első megközelítések ...
... 1966: első leszállás, első keringés
- 1961-től: Apollo-program:
1969 és 1972 között emberes holdraszállások (6)
- máig összesen 70+ sikeres szonda
(és kb. ugyanennyi sikertelen)

