

Astronomie

Cursul 11 - Planete

Cristina Blaga

9 decembrie 2021

Fizica planetelor mari

- ▶ Până în a doua jumătate a secolului XX proprietățiile fizice ale planetelor au fost stabilite folosind observații de pe Pământ.
- ▶ După lansarea primelor sonde spațiale spre Venus și Mercur, pentru studiul planetelor s-au folosit și date obținute în urma observațiilor din spațiu.
- ▶ Sondele spațiale s-au apropiat, au orbitat, uneori au coborât pe suprafața corpurilor cerești, adunând informații despre câmpul lor gravitațional și magnetic, structura internă, atmosfera și suprafața lor.

Astfel, corpurile sistemului solar din puncte luminoase *rătăcitoare* printre stelele fixe au devenit obiecte geofizice studiate cu ajutorul metodelor științelor Pământului.

Temperatura la suprafața planetelor

Pentru a estima temperatura la suprafața planetelor presupunem că acestea sunt corpuri negre în echilibru termodinamic, fără surse interne de energie.

Definiție

Corpul negru este un model folosite în termodinamică pentru a reprezenta un obiect care absoarbe toată energia incidentă, pe care, apoi, o emite în întregime în exterior.

Asemenea corpuri - cunoscute și sub numele de *radiator integral* sau *absorbant perfect* - nu există în natură, dar unele obiecte se comportă aproape ca și corpurile negre.

În primă aproximație corpurile cerești pot fi considerate corperi negre.

În sistemul solar, cu excepția lui Jupiter și a lui Saturn, care produc în interiorul lor energie datorită contractiei gravitaționale, corpurile nu au surse de energie internă. Ele emit în exterior energia primită de la Soare.

Temperatura la suprafața corpului

- ▶ Legile corpurilor negre au fost formulate la sfârșitul secolului al XIX-lea.
- ▶ Experimental s-a observat că radiația emisă de un corp negru aflat în echilibru termodinamic în diferite lungimi de undă depinde de temperatura corpului și este independentă de forma, structura internă sau materialul din care este alcătuit corpul.
- ▶ Temperatura care apare în legile care descriu radiația corpului negru se numește *temperatură efectivă* sau *la suprafața* corpului.

Legea lui Stefan sau Stefan-Boltzmann¹

Teoremă

Fluxul de energie total radiat în toate lungimile de undă de un corp negru în unitatea de timp este proporțional cu puterea a patra a temperaturii absolute a corpului

$$F = \sigma T^4$$

unde F este fluxul total emis de corp în unitatea de timp, T temperatura lui iar σ constanta de proporționalitate, numită constanta lui Stefan.

În sistemul internațional de unități F se măsoară în W/m^2 , temperatura absolută în kelvini, iar $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}$.

¹ Legea Stefan-Boltzmann a fost găsită empiric de matematicianul și fizicianul Josef Stefan în 1879 și demonstrată folosind axioamele termodinamicii de fizicianul Ludwig Boltzmann în 1884.

Legea lui Wien²

Teoremă

Produsul dintre temperatura corpului și lungimea de undă în care intensitatea radiației emise de corp este maximă este constant

$$\lambda_{max} T = \text{constant}$$

unde λ_{max} este lungimea de undă în care radiația corpului este maximă, iar constanta este egală cu $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$.

Această lege este cunoscută și sub numele de *legea deplasării* pentru că la modificarea temperaturii corpului, lungimea de undă la care se atinge maximul intensității radiației se deplasează în spectru.

²Fizicianul Wilhelm Wien a formulat această lege în urma experiențelor pe care le-a făcut în 1883-1884. Pentru contribuția sa la studiul radiației corporilor a primit premiul Nobel pentru fizică în anul 1911.

Uneori, pentru a ține minte mai ușor valoarea constantei din legea lui Wien se folosește următoarea formă a legii

$$\frac{\lambda_{max}}{1 \text{ cm}} = \frac{0,29 \text{ K}}{T},$$

în care lungimea de undă λ_{max} este exprimată în centimetri, iar temperatura T în kelvini.

Funcția lui Planck

După formularea teoriei cuantice a radiației de către Max Planck în anul 1900, cele două legi ale corpului negru enunțate mai sus au fost obținute folosind funcția lui Planck

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} d\lambda,$$

în care $B_\lambda(T)$ este intensitatea radiației emisă de corpul negru aflat la temperatura T , în unitatea de unghi solid, în unitatea de timp, în domeniul de lungime de undă $[\lambda, \lambda + d\lambda]$, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s este viteza luminii în vid, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s constanta lui Planck, iar $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K constanta lui Boltzmann.

- ▶ Temperatura efectivă la suprafața Soarelui este aproximativ $T_{\odot} = 5800$ K.
- ▶ Conform legii lui Stefan, energia care traversează unitatea de arie a Soarelui în unitatea de timp este

$$F_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4.$$

- ▶ Presupunând că Soarele este o sferă cu raza $R_{\odot} = 696000$ km, atunci în unitatea de timp prin întreaga suprafață a Soarelui trece energia

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot F_{\odot},$$

unde L_{\odot} este luminozitatea Soarelui.

- ▶ Considerând că Soarele este o sursă de energie punctiformă și că aceasta este uniform distribuită în spațiu, energia ce cade pe unitatea de arie situată la distanța a de Soare este

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi a^2}.$$

- ▶ Aceasta este energia incidentă pe unitatea de arie a planetei aflate la distanța a de Soare. O parte din energia solară primită este reflectată sau împrăștiată de păturile atmosferei planetei.

Definiție

Raportul dintre energia reflectată în toate direcțiile de planetă și energia incidentă se numește *albedo Bond* sau *albedoul planetei*.

Albedoul se notează cu A și se exprimă printr-un număr între 0 și 1.

- ▶ Cuvântul *albedo* provine din limba latină și înseamnă *albeață*. El exprimă cum reflectă corpurile radiația primită.
- ▶ Un corp albicios reflectă cea mai mare parte din radiația incidentă, albedoul lui este aproape de 1.
- ▶ Un corp negru absoarbe aproximativ întreaga energie primită, albedoul lui fiind aproape zero.
- ▶ Planetele care au atmosferă densă cu mulți nori au albedo mare (Venus $A = 0,76$, Neptun $A = 0,62$ sau Jupiter $A = 0,51$), iar cele care au atmosfere subțiri și rarefiate au albedo mic (Marte $A = 0,15$, Mercur $A = 0,11$ sau Lună $A = 0,07$).

Energia incidentă pe unitatea de arie a unei planete de albedo A aflată la distanța a de Soare este

$$L_{\text{in}} = \frac{(1 - A)L_{\odot}}{4\pi a^2}.$$

Pentru a afla temperatura efectivă în punctul de pe suprafața planetei care are Soarele la Zenit, numit *punct subsolar*, presupunem că fluxul incident este egal cu cel emis de planetă. Fluxul de radiație emis de o vecinătate de suprafață unitară a punctului subsolar este conform legii lui Stefan $F_s = \sigma T_s^4$, unde T_s este temperatura în punctul subsolar. Astfel, obținem că $(1 - A)L_{\odot}/(4\pi a^2) = \sigma T_s^4$, de unde

$$T_s = T_{\odot} (1 - A)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{a} \right)^{1/2}.$$

- ▶ De obicei temperatura medie la suprafața planetei este mai mică decât cea obținută înlocuind în formula de mai sus albedoul și semiaxa mare a planetei.
- ▶ Pentru a obține temperatura medie la suprafața planetei trebuie să ținem seama că înălțimea Soarelui deasupra orizontului nu este aceeași pentru toate locurile de la planetă, de aceea apar diferențe între temperaturile observate în locuri distincte de pe planetă.
- ▶ De exemplu, pe planeta Mercur temperatura pe semisfera orientată spre Soare poate urca până la 400 grade Celsius, în timp ce pe semisfera opusă ea poate coborî până la -180 grade Celsius.

- ▶ În cazul unei planete care se rotește lent în jurul axei proprii, cum este Mercur a cărui perioadă de rotație siderală este 58,6 zile, presupunem că energia primită de la Soare de planetă este emisă în exterior de semisfera planetei orientată spre Soare.
- ▶ Din $\pi R_p^2 \cdot L_{\text{in}} = 2\pi R_p^2 \cdot \sigma T_p^4$, unde R_p este raza planetei, πR_p^2 secțiunea eficace a planetei, T_p temperatura efectivă a planetei, obținem

$$T_p = T_{\odot} \left(\frac{1 - A}{2} \right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{a} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

- ▶ Dacă planeta are o rotație rapidă în jurul axei proprii, cum este Saturn care are perioada de rotație siderală egală cu 10 ore și 46 de minute, atunci presupunem că energia primită de la Soare de planetă este emisă spre exterior de întreaga planetă. Din $\pi R_p^2 \cdot L_{\text{in}} = 4\pi R_p^2 \cdot \sigma T_p'^4$, unde R_p raza, πR_p^2 secțiunea eficace și T_p' temperatura efectivă a planetei, obținem

$$T_p' = T_{\odot} \left(\frac{1 - A}{4} \right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{a} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Observăm că temperatura efectivă la suprafața planetei depinde de albedoul și de distanța de la Soare la planetă și este independentă de raza planetei.

Planeta	Distanța Soare (u.a.)	Albedo	T_s (K)	T_p (K)	T'_p (K)	T_{obs} (în K)
Mercur	0,39	0,06	624	525	441	80 ... 580
Venus	0,72	0,76	324	272	229	750
Pământ	1,00	0,36	352	296	249	287
Marte	1,52	0,16	306	257	216	160 ... 290
Jupiter	5,20	0,52	144	121	102	124
Saturn	9,54	0,50	107	90	76	94
Uranus	19,18	0,66	69	58	49	50
Neptun	30,06	0,62	57	47	40	60

Tabela: Compararea temperaturii estimate la suprafața planetelor din sistemul solar în punctul subsolar (T_s), la suprafața unei planete în rotație lentă (T_p), respectiv rapidă (T'_p) cu valorile observate T_{obs} . Distanța medie Soare-planetă este exprimată în unități astronomice, iar temperatura în grade Kelvin.

- ▶ Din tabel observăm că temperatura la suprafața planetelor scade cu depărtarea de Soare. O explicație pentru diferența dintre valorile temperaturii estimate și observate la planeta Venus este încălzirea atmosferei planetei prin *efectul de seră*. Atmosfera planetei este transparentă la radiația de lungime de undă mică și opacă la radiația de lungime de undă mare. Ca urmare, radiația cu lungime de undă mare emisă de suprafața planetei este reflectată de păturile superioare ale atmosferei înapoia spre suprafață și contribuie la încălzirea planetei.

- ▶ La Jupiter și Saturn temperatura observată este puțin mai mare decât cea estimată pentru cazul planetei în rotație rapidă datorită energiei suplimentare produse de aceste planete.
- ▶ La Jupiter energia suplimentară provine din contracția gravitațională a planetei. În atmosfera planetei Saturn s-a observat o cantitate de heliu este mai mică decât cea din atmosfera lui Jupiter. Ploile de heliu în atmosfera lui Saturn ar putea eplica deficitul de heliu observat în atmosfera lui Saturn. Energia eliberată la condensarea picăturilor de heliu sau în alte fenomene termodimanice care însotesc aceste ploi poate fi energia suplimentară emisă de Saturn.

Atmosfera planetelor

Atmosfera primară

- ▶ Din punct de vedere fizic și chimic atmosferele planetelor sunt astăzi foarte diferite.
- ▶ Dar la formarea planetelor în atmosfera lor - numită *atmosferă primară* - au intrat aceleași gaze și anume hidrogen, heliu și compuși ai hidrogenului.
- ▶ În timp, datorită mișcării browniene unele particule au evadat din câmpul gravitațional al planetelor, ducând la scăderea densității atmosferei.

Atmosfera secundară a planetei

- ▶ În unele cazuri pierderea gazelor din atmosfera primordială a planetei a fost compensată prin capturarea gravitațională a unor particule care au ajuns în vecinătatea ei, prin evaporarea gazelor de la suprafața ei sau prin emisia unor particule în timpul proceselor ce au loc la suprafața planetei.
- ▶ În felul acesta s-a format *atmosfera secundară* a planetei, în care pot intra gaze ușoare, dar și particule mai grele, cum sunt apă în stare gazoasă, azotul molecular sau dioxidul de carbon.

Particulele dintr-un gaz au o mișcare dezordonată cu o vitează medie ce poate fi calculată cu ajutorul teoriei cinetico-moleculară a gazelor. Conform acesteia o particulă de masă m dintr-un gaz în echilibru termodinamic la temperatura T are viteza medie

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (3)$$

unde k este constanta lui Boltzmann. O particulă de gaz poate părăsi atmosfera unei planete dacă viteza ei este mai mare sau egală cu *viteza de evadare* din câmpul gravitațional al planetei

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (4)$$

unde M este masa, iar R raza planetei.

Raportul dintre viteza de evadare din câmpul gravitațional al planetei și viteza medie a particulelor din atmosfera ei

$$\frac{v_e}{\bar{v}} \cong \sqrt{\frac{mM}{RT}} \quad (5)$$

poate fi folosit ca și criteriu de stabilitate a atmosferelor planetelor.

Dacă $v_e/\bar{v} \ll 1$ atunci particulele de gaz rămân în vecinătatea planetei intervale mari de timp și atmosfera ei este stabilă.

Dacă ordonăm planetele în funcție de stabilitatea atmosferei obținem următorul sir descrescător: Jupiter, Saturn, Neptun, Uranus, Pământ, Venus, satelitul lui Neptun - Triton, Marte, cinci sateliți ai lui Saturn și Jupiter, Mercur, Pluto și Luna.

- ▶ Observăm că valoarea raportului din (5) depinde de planetă - prin masă M , rază R , temperatură T - și de particulă.
- ▶ Cu cât masa particulei este mai mare cu atât valoarea raportului este mai mare. Rezultă că, particulele care părăsesc primele atmosferă unei planete date sunt cele care au masa cea mai mare.
- ▶ În atmosfera planetelor gigante - Jupiter și Saturn - au fost detectate spectroscopic gaze grele precum metan, amoniu sau hidrogen molecular, fapt care dovedește că în atmosfera planetelor respective aceste gaze sunt în cantități suficient de mari pentru ca benzile specifice lor să apară distinct în spectrul atmosferei lor.

Interiorul planetelor

Descrierea structurii interne a planetelor este o problemă complexă. Pentru Pământ ea a fost rezolvată folosind observații suplimentare față de cele pe care le putem folosi la restul planetelor. De exemplu, modul în care se propagă undele seismice, ne permite să aflăm caracteristicile regiunilor traversate de unde.

Ipoteze

Modelele simple pentru interiorul planetelor au la bază câteva principii.

- ▶ Planetele sunt considerate corpuri cu simetrie sferică, i.e. sunt neglijate fenomene precum rotația planetei în jurul axei proprii sau existența câmpului magnetic propriu care produc turtirea, respectiv alungirea planetei.
- ▶ Dacă planeta are simetrie sferică, atunci mărimile fizice care descriu structura ei depind numai de distanța dintre punctul considerat în interiorul ei și centrul planetei.

Rezultă că, în coordonate sferice³, mărimile fizice care descriu interiorul planetei depind numai de coordonata radială a punctului considerat.

³Pozitia unui punct din spațiu este precizată cu ajutorul a trei coordonate. În coordonate sferice pozitia punctului M este precizată cu ajutorul tripletului (r, θ, φ) , unde r este distanța de la punct la originea axelor de coordonate O , θ unghiul dintre OM și Oz , iar φ unghiul dintre Ox și OM' , M' fiind proiecția punctului M pe xOy .

Masa unui strat sferic

Alegând un strat sferic aflat la o distanță arbitrară r de centrul planetei, de grosime infinitesimală dr , masa stratului considerat este

$$dM(r) = 4\pi r^2 dr \rho(r) \quad (6)$$

unde $dM(r)$ este masa, $\rho(r)$ densitatea iar $4\pi r^2 dr$ volumul lui⁴.

⁴Volumul stratului sferic este diferența dintre volumul sferei de rază $r + dr$ și a sferei de rază r . Dacă dr este foarte mic, termenii de ordin 2 și 3 în dr sunt neglijabili în raport cu dr și obținem $4\pi r^2 dr$.

Ecuăția de continuitate a masei

Presupunând că în interiorul planetei nu există schimb de materie între straturile ei obținem

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (7)$$

relație cunoscută sub numele de *ecuația de continuitate sau ecuația de conservare a masei*.

Ipoteze

Dacă în interiorul planetei nu există curenți de convecție, vârtejuri sau turbulențe, atunci, orice element de volum este în echilibru sub acțiunea forțelor de presiune și a greutății proprii. În interiorul planetei presiunea depinde de distanța de la elementul de volum la centrul planetei⁵, accelerarea gravitațională care acționează asupra elementului de volum este

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2},$$

unde $M(r)$ masa sferei de rază r .

⁵Distanța de la elementul de volum la centrul planetei este egală cu distanța de la centrul de simetrie al cilindrului la centrul planetei.

Dimensiunile cilindrului sunt mici de aceea această distanță este egală cu r .

Ecuăția echilibrului hidrostatic

Presupunând că orice element de volum unitar, notat $\mathcal{V}(r) = 1$, din interiorul plantei se află în echilibru, egalând forța de presiune $dP(r)/dr$ cu forța de atracție gravitațională care acționează asupra elementului de volum unitar, de masă $m(r) = \rho(r) \cdot \mathcal{V}(r)$, obținem relația

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho(r) \quad (8)$$

cunoscută sub numele de *ecuația echilibrului hidrostatic*.

Ecuăția de stare

Pentru a putea rezolva ecuațiile (7) și (8) trebuie să precizăm legătura dintre presiunea și densitatea din interiorul planetei $P = P(\rho)$, relație cunoscută sub numele de *ecuația de stare sau constitutivă*. Stabilirea acestei legături este punctul forte al modelelor planetelor.

Condiții la limită

- ▶ Condițiile la limită care se atașează ecuațiilor de mai sus sunt în centrul și la suprafața planetei.
- ▶ În centrul planetei $r = 0$ masa este $M(0) = 0$.
- ▶ La suprafața planetei $r = R$ unde R este raza ei, presiunea se anulează $P(R) = 0$ și $M(R) = M_{pl}$, unde M_{pl} este masa planetei.
- ▶ Rezolvând problema la limită obținem distribuția masei și presiunii în interiorul planetei.

Masa planetei

- ▶ La planetele care au sateliți, masa totală poate fi calculată folosind legea a treia a lui Kepler.
- ▶ La planetele Mercur și Venus, masa planetei a fost determinată cu ajutorul sondelor spațiale care s-au înscris pe orbită în jurul lor.
- ▶ Raza planetelor se poate estima cunoscând diametrul lor unghiular și distanța până la ele.

Densitatea medie a planetelor

Cunoscând masa și raza planetei putem afla densitatea medie a planetei.

Definiție

Prin definiție *densitatea medie* a planetei este raportul dintre masa și volumul ei

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R^3} \quad (9)$$

unde $V = 4\pi R^3/3$ este volumul planetei.

În funcție de densitatea medie planetele se împart în

- ▶ planete *terestre* și
- ▶ planete *gigante* sau *gazoase*.

Caracteristicile planetelor terestre

Planetele terestre au

- ▶ densitate medie mare cuprinsă între 3900 și 5520 kg/m³,
- ▶ masă relativ mică în intervalul [0,06 , 1] M_{\oplus} , unde $M_{\oplus} \approx 6 \cdot 10^{24}$ kg este masa Pământului și
- ▶ un număr mic de sateliți naturali sau nu au nici un satelit.

În clasa planetelor terestre intră Mercur, Venus, Pământ și Marte. Reprezentantul acestei clase este Pământul.

Caracteristicile planetelor gazoase

Planetele gazoase au

- ▶ densitate medie mică de 687 până la 1600 kg/m³,
- ▶ masă mare cuprinsă între 15 și 318 M_{\oplus} și
- ▶ un număr mare de sateliți naturali.

Din această clasă fac parte Jupiter, Saturn⁶, Uranus și Neptun. Reprezentantul clasei este Jupiter, de aceea ele sunt cunoscute și sub numele de *planete joviene*.

⁶Densitatea medie a planetei Saturn este 687 kg/m³, este mai mică decât 1000 kg/m³ densitatea apei în condiții normale de presiune și temperatură, înseamnă că dacă am avea o cadă suficient de mare umplută cu apă, planeta ar pluti la suprafața apei.

Interiorul planetelor este alcătuit din straturi diferite. Spre centrul planetei densitatea și presiunea cresc. În centrul planetei se atinge presiunea maximă. Aceasta poate fi estimată cu ajutorul ecuației echilibrului hidrostatic (8). Presupunând că densitatea în interiorul planetei este constantă, $\rho(r) = \bar{\rho}$ la orice distanță r de centrul planetei, masa sferei de rază r din interiorul planetei este

$$M(r) = \frac{4\pi r^3}{3} \bar{\rho}.$$

Integrând ecuația echilibrului hidrostatic din centrul planetei la suprafața ei, separând variabilele și considerând că la suprafața planetei presiunea se anulează, găsim

$$\int_{P_c}^0 dP = -\frac{4\pi G}{3} \bar{\rho}^2 \int_0^R r dr$$

unde P_c este presiunea din centrul planetei. Rezultă că

$$P_c = \frac{2\pi G}{3} \bar{\rho}^2 R^2 = 1,4 \cdot 10^{-10} \bar{\rho}^2 R^2. \quad (10)$$

În cazul Pământului densitatea medie este $\bar{\rho} = 5200 \text{ kg/m}^3$ iar raza 6371 km. Înlocuind în (10) găsim că presiunea centrală din centrul Pământului este egală cu $1,7 \cdot 10^6$ atmosfere⁷. Cu ajutorul unor modele mai precise s-a găsit $P_c = 3,7 \cdot 10^6$ atmosfere.

⁷În sistemul internațional de unități, unitatea de măsură pentru presiune este *pascalul*, notat Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Atmosfera este o unitate de măsură derivată. Ea reprezintă presiunea exercitată de aer la nivelul mediu al mării în condiții normale de temperatură (20°). O atmosferă standard $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} \approx 10^5 \text{ Pa}$.

Structura internă a planetelor terestre

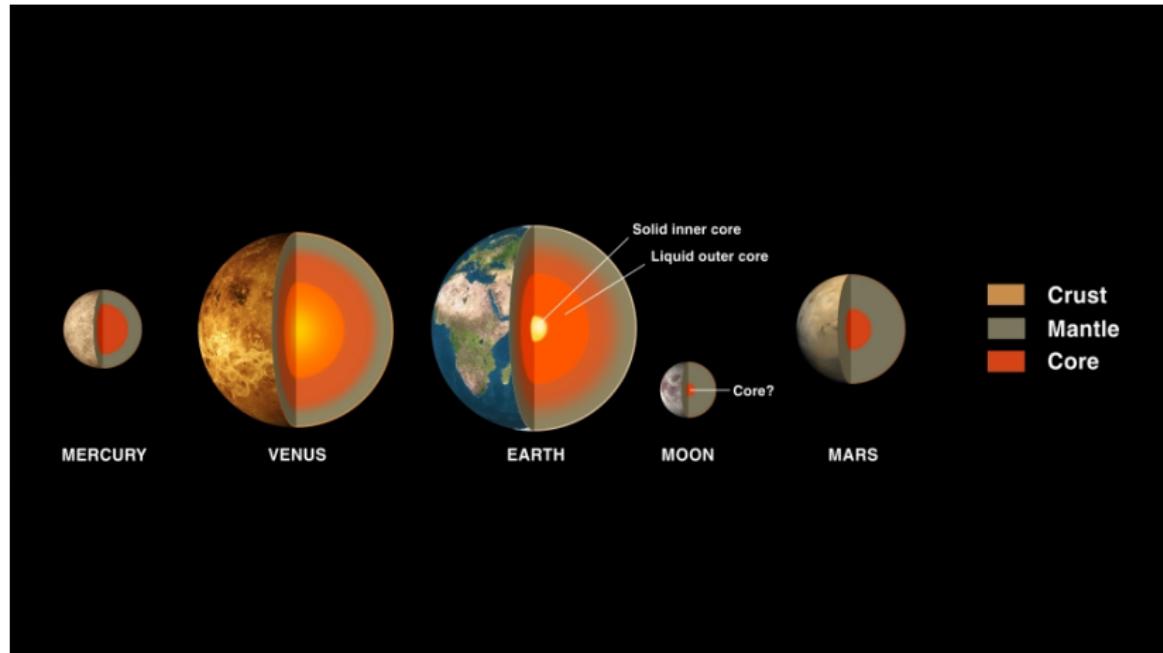


Figura: Crusta, mantaua și nucleul planetelor terestre (sursa NASA)

Structura internă a planetelor terestre este asemănătoare cu cea a Pământului. Ele au

- ▶ un **nucleu** de rază cuprinsă între 0,4 și 0,7 raze planetare⁸,
- ▶ o **manta** de grosime 0,3-0,5 raze planetare și
- ▶ o pătură subțire de câțiva zeci de kilometri grosime, numită **crusta** sau **scoarța planetei**.

⁸Raza nucleului planetei Mercur este de aproximativ 0,75 din raza planetei. La Venus și la Pământ raza nucleului este 1/2 din raza planetei, iar la Marte aproximativ 0,4 din raza planetei.

Interiorul Pământului

- ▶ Nucleul Pământului are aproximativ 0,5 raze terestre.
Nucleul interior - care are raza egală cu aproximativ 0,2 raze terestre - este solid. În stratul sferic ce îl înconjoară materia este în stare lichidă. Nucleul conține aproximativ 32,5 % din masa Pământului. El este un amestec de fier, nichel și o cantitate mică de sulf și oxigen.
- ▶ Densitatea din centrul Pământului este de aproximativ 17200 kg/m^3 . Ea scade până la 9400 kg/m^3 la granița dintre nucleul exterior și manta.

- ▶ Între nucleul și mantaua Pământului există un strat subțire, de grosime până la 200 km, în care densitatea scade de la 9400 la 5600 kg/m³.
- ▶ Mantaua Pământului conține 67,1 % din masa planetei. Ea este alcătuită din fier și magneziu combinate cu siliciu și oxigen. Preponderent este oxidul de siliciu și fier cunoscut sub numele de olivină.
- ▶ Crusta Pământului conține aproximativ 0,4 % din masa Pământului, are o grosime de 40 de km în zona continentală și 10 km în zona oceanelor.
- ▶ La granița dintre dintre mantaua și crusta Pământului densitatea este de 3400 kg/m³. Ea ajunge la suprafața Pământului la 2800 kg/m³. Temperatura medie la suprafața Pământului este de 270 grade Kelvin.

Structura internă a planetelor gazoase (gigante)

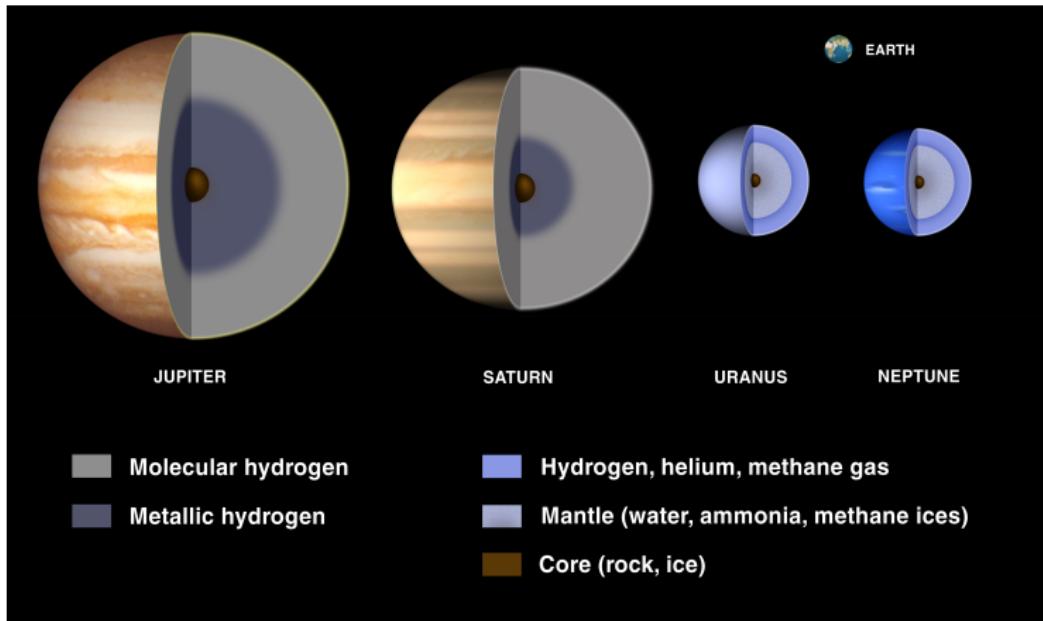


Figura: Interiorul planetelor joviene sau gigante (sursa NASA)

Structura internă a planetei Jupiter

- ▶ Planetele gazoase au structură asemănătoare cu Jupiter.
- ▶ În compoziția lor intră hidrogen, heliu, alte gaze ușoare și compuși ai hidrogenului, precum metan, amoniac și apă.
- ▶ Nucleul planetei Jupiter are raza de aproximativ 0,2 raze joviene și masa 10-15 mase terestre. El conține apă, metan și amoniac la presiune și temperatură foarte ridicată. Presiunea centrală obținută înlocuind în (10) $\bar{\rho} = 1330 \text{ kg/m}^3$ și $R = 69911 \text{ km}$ este egală cu $1,2 \cdot 10^7$ atmosfere. Densitatea medie scade din centrul planetei la granița dintre nucleu și stratul următor de la 15000 kg/m^3 la 4000 kg/m^3 .

- ▶ Stratul următor are o grosime de aproximativ 0,5-0,6 raze joviene. Datorită condițiilor speciale - presiune și temperatură foarte mare - hidrogenul și heliul din compoziția lui se comportă ca și metalele topite, i.e. conduc foarte bine curentul electric și sunt opace la radiația din domeniul vizibil, ele sunt numite *hidrogen* și *heliu metalic*.
- ▶ La granița dintre acest strat și cel următor există o regiune îngustă în care densitatea are un salt de la 1300 kg/m^3 la 1100 kg/m^3 .
- ▶ Ultimul strat din interiorul lui Jupiter are o grosime de aproximativ 0,2-0,3 raze joviene și este alcătuit din molecule de hidrogen, heliu și alte gaze. Planetele gazoase nu au o suprafață de separare solidă între interiorul și atmosfera planetei.

Observație

Prin convenție, granița dintre interiorul și atmosfera planetelor gazoase este suprafața de presiune egală cu o atmosferă⁹. La suprafața planetei Jupiter temperatura este de 170 grade Kelvin.

⁹În condiții normale de temperatură, presiunea de la suprafața Pământului la nivelul mării este egală cu o atmosferă. De aceea, pentru a defini suprafața planetelor gazoase s-a ales ca valoare a presiunii o atmosferă.



- ▶ Nucleul planetei Saturn are raza mai mică decât planeta Jupiter, raza lui este de aproximativ 0,1 raze saturniene.
- ▶ Uranus și Neptun au dimensiuni mici față de Jupiter și Saturn, de aceea structura lor diferă de cea a lui Jupiter. Raza nucleului lor este aproximativ 0,3 raze planetare, iar stratul de hidrogen și heliu metalic lipsește pentru că presiunea și temperatura din interiorul lor nu sunt suficient de mari pentru a duce la apariția acestui strat.

Rotația planetei

Pentru a obține modele mai realiste pentru planetele care au rotație rapidă în jurul axei proprii trebuie să ținem seama de efectul rotației ei. Asupra unei particule de masă m de pe planetă, aflată la distanța r de axa de rotație acționează o forță centrifugă, pe direcția perpendiculară pe axa de rotație, orientată în sens opus sensului în care se găsește axa de rotație. Mărimea acestei forțe este $F_{cf} = m\omega^2 r$, unde $\omega = 2\pi/T$, T fiind perioada de rotație siderală a planetei.

Dacă particula considerată se află pe suprafața planetei la latitudinea¹⁰ φ , atunci ea se găsește la distanța $r = R \cos \varphi$ de axa de rotație a planetei, unde R este raza medie a planetei. Notând O centrul planetei, P poziția punctului considerat pe planetă, OP va fi raza vectoare a punctului considerat.

¹⁰Pentru a defini latitudinea unui punct de pe planetă introducem următorul sistem de coordonate cu originea în centrul planetei - notat O . Axa Oz este paralelă cu axa de rotație a planetei. Planul perpendicular pe axa de rotație care trece prin O - notat xOy - este planul ecuatorial al planetei. Dacă P este un punct de pe planetă, latitudinea lui este egală cu măsura unghiului dintre OP și planul xOy .

Descompunem forța centrifugă pe direcția razei vectoare OP și pe direcția perpendiculară la ea și observăm că sub acțiunea componentei tangențiale a forței centrifuge -

$F_{\perp} = F_{cf} \sin \varphi = m\omega^2 r \sin \varphi$ - particulele de la suprafața planetei se mișcă spre planul ecuatorial al planetei, fapt care duce la bombarea planetei la ecuator și turtirea ei la poli.

Efectul rotației planetei asupra formei de echilibru a planetei este cu atât mai mare cu cât raportul dintre accelerarea centrifugă și cea gravitațională este mai mare. Accelerarea centripetă care acționează asupra unei particule aflate la ecuatorul planetei este $a_{cf} = \omega^2 R$. Accelerarea gravitațională la suprafața ei este $a_g = GM/R^2$, unde G este constanta atracției gravitaționale iar M masa ei.

În cazul planetei Saturn¹¹ valoarea acestui raport este de aproximativ 0,05, turtirea planetei - diferența dintre raza ecuatorială și cea polară a planetei exprimată în raze ecuatoriale - este aproximativ 0,1, de aceea efectul rotației planetei în jurul propriei axe nu poate fi neglijat în modelele propuse pentru interiorul acestei planete. În cazul Pământului raportul $a_{cf}/a_g \approx 0,001$, turtirea planetei este 1/300 și în primă aproximație putem considera că Pământul este un corp cu simetrie sferică.

¹¹Raza medie a planetei este 58232 km iar perioada de rotație siderală 10 ore și 42 minute.

Înălțimea munților de pe o planetă

Ecuatia echilibrului hidrostatic se poate folosi pentru a estima înălțimea maximă pe care o pot atinge munții de pe o planetă. Dacă presupunem că presiunea pe unitatea de arie la baza muntelui este $P = \rho gh$ și că rocile suportă o presiune maximă de $P_{max} = 10^8 \text{ Pa}$ ¹², atunci înălțimea munților de pe planetă îndeplinește condiția

$$h \leq h_{max} = \frac{P_{max}}{\rho g} \approx 1,5 \cdot 10^{15} \frac{R^2}{M} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

unde $g = GM/R^2$.

¹²Aceasta este presiunea maximă suportată de rocile de granit din care sunt alcătuite continetele de pe Pământ.

Folosind acest criteriu munții de pe Pământ pot avea cel mult 10 kilometri, iar pe Marte cel mult 26 kilometri. Vârful Everest cu înălțimea de 8848 m este cel mai înalt munte de pe Pământ, iar cel mai înalt munte din sistemul solar este muntele Olimp de pe Marte, care are aproximativ 25 kilometri înălțime.

Relieful planetelor terestre

Suprafața planetelor terestre a fost cartografiată cu ajutorul sondelor spațiale. Hărțile planetelor Mercur și Marte au fost obținute prin fotografiarea lor. Prima hartă a planetei Venus a fost realizată cu ajutorul metodelor radar¹³, pentru că suprafața ei nu vede din spațiu din cauza norilor groși din atmosfera ei.

¹³Cunoscând poziția precisă a sondei și măsurând intervalul de timp în care se întoarce semnalul radar trimis de pe sondă spre planetă determinat distanța de la sondă la suprafața planetei.

Mercur

Pe suprafața lui Mercur s-au observat cratere de impact, asemănătoare cu cele de pe Lună, cu diametru mai mare și mai puține la număr decât cele lunare. Pe Mercur sunt puține lanțuri muntoase, specifice lui sunt cutele scoarței, care seamănă cu niște valuri solidificate, ce pot atinge înălțimi de 1 kilometru și lungimi de sute de kilometri. Ele traversează mai multe forme de relief, lucru ce ne spune că au apărut după ce s-a format relieful planetei. O cauză posibilă a apariției lor poate fi răcirea relativ rapidă a planetei. Nu există cratere vulcanice pe Mercur, probabil pentru că crusta groasă a planetei nu poate fi străpunsă de lava vulcanică.

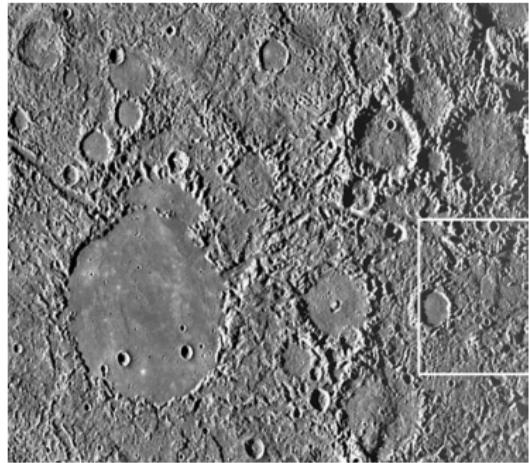


Figura: Detalii din suprafața planetei Mercur

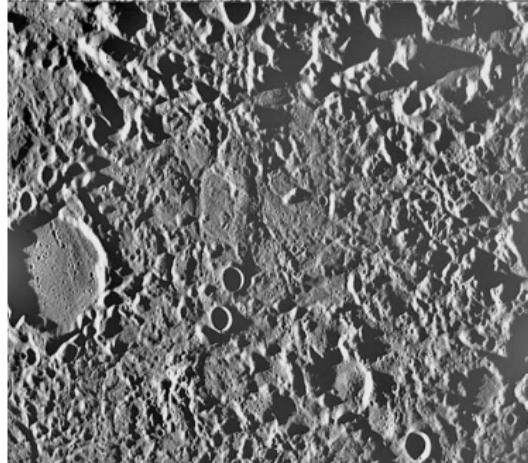


Figura: Detaliu la detaliul din suprafața planetei Mercur

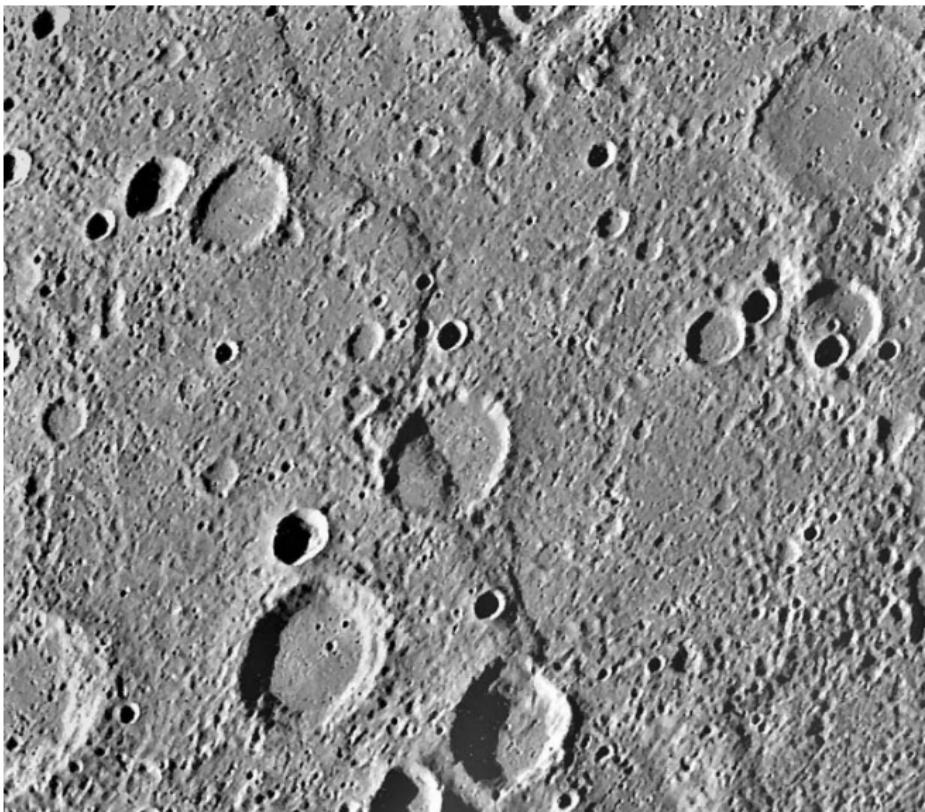


Figura: Încreștură de scoarță care traversează relieful lui Mercur

Venus

Pe suprafața planetelor Venus și Marte s-au observat cratere de impact și vulcanice. Relieful lor este supus eroziunii datorită condițiilor de la suprafața și din atmosfera lor. Venus are atmosferă densă, în care temperatura este foarte ridicată datorită efectului de seră. Vântul și curenții de aer observați în atmosfera planetei erodează continuu relieful ei. Atmosfera lui Marte este rarefiată, dar în atmosfera lui s-au observat furtuni de nisip, în timpul cărora vântul bate cu viteză foarte mare antrenând nisipul care șlefuieste și modelează relieful planetei.

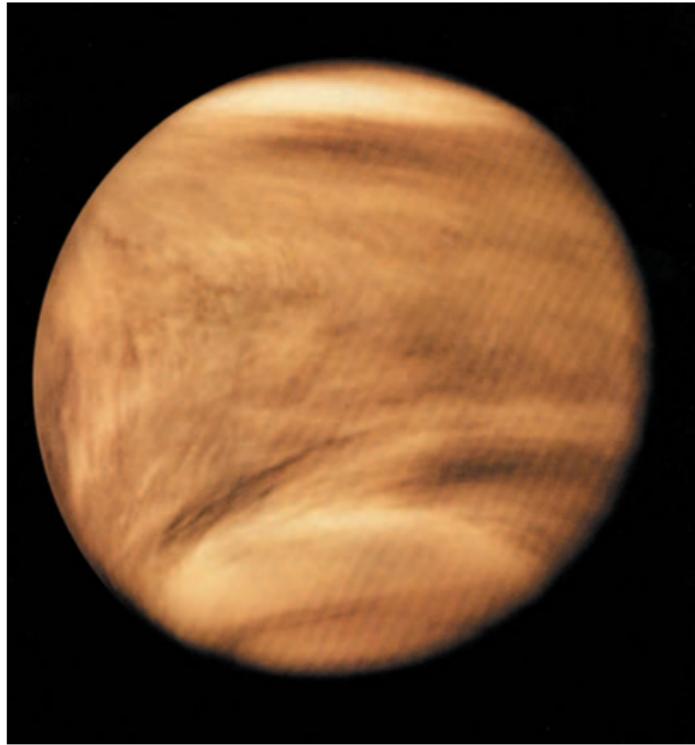


Figura: Planeta Venus acoperită de nori

Caracteristice pentru Venus sunt blocurile de piatră, asemănătoare cu niște lespezi uriașe șlefuite de vânt. Craterele de impact de pe Venus au suprafață mică și diferență de nivel față de formele de relief din vecinătate de până la 500 de metri. Pe Venus s-au observat vulcani aproape plăti, i.e. vârful lor nu se poate distinge, în zona centrală se vede un platou care pare a fi rezultatul prăbușirii suprafetei planetei peste camera de magmă a vulcanului. Relieful planetei este în transformare, pe suprafața ei s-au pus în evidență vulcani activi, plăcile tectonice în care este împărțită suprafața ei se îndepărtează unele de altele cu câțiva centimetri pe an.

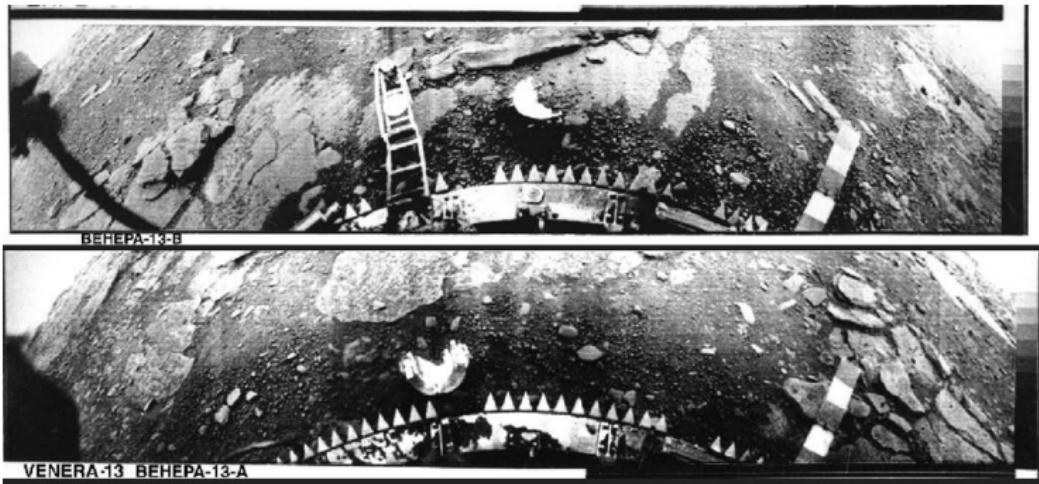


Figura: Primele imagini ale suprafeței planetei Venus

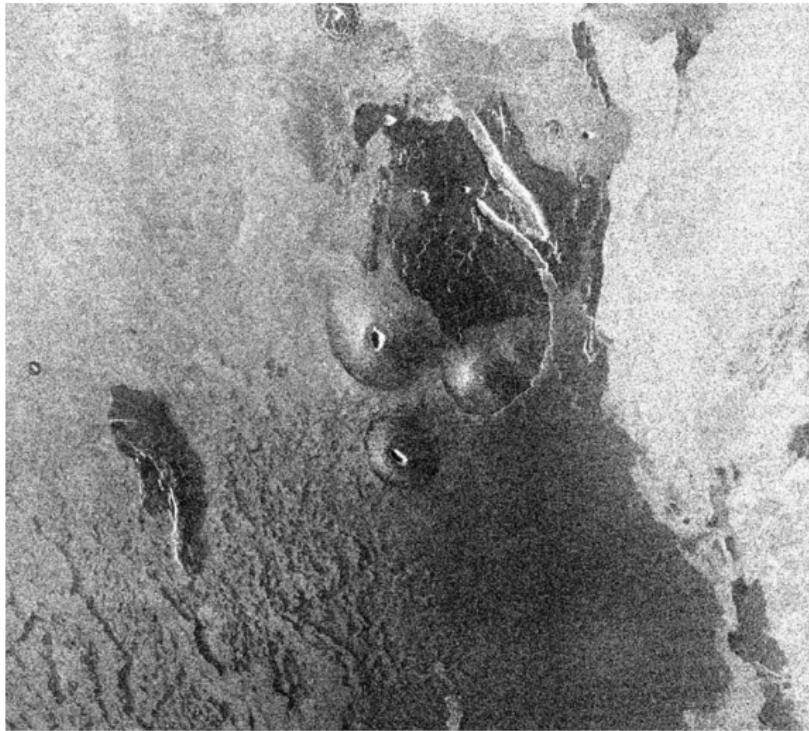


Figura: Cratere de impact pe suprafata planetei Venus

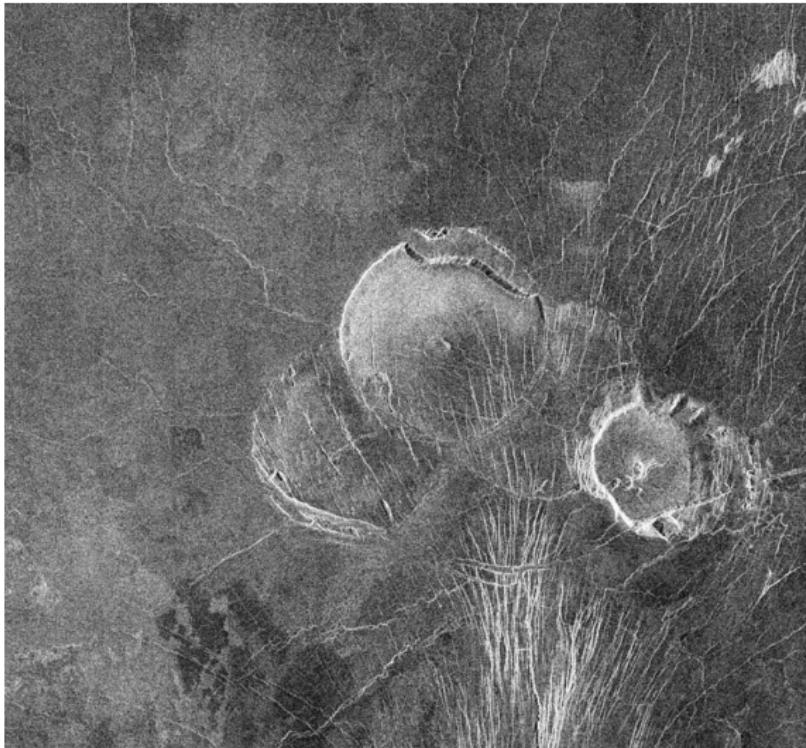


Figura: Cratere de impact și vulcanice pe suprafața planetei Venus

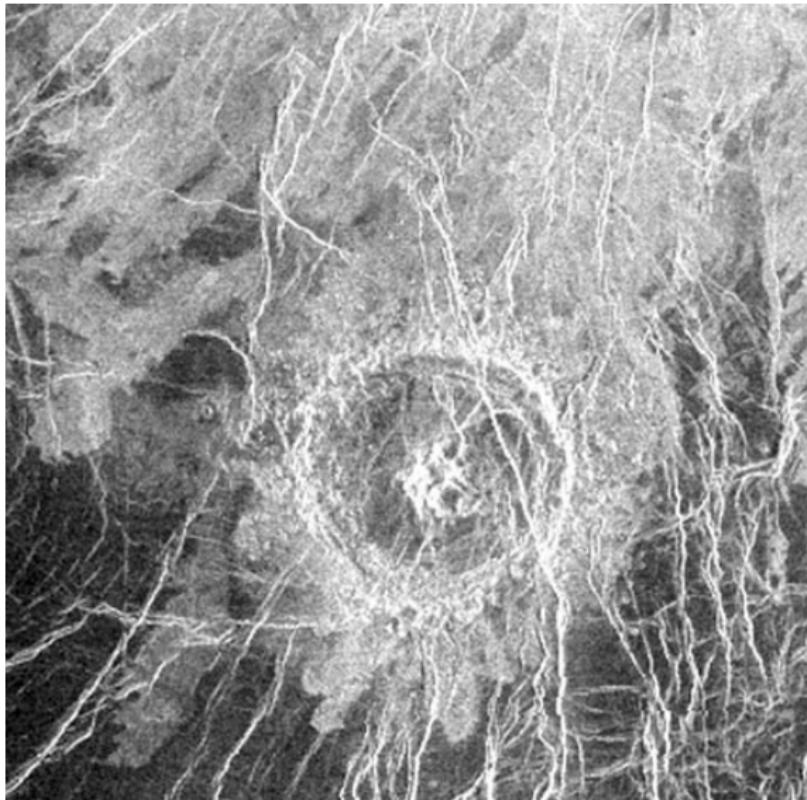


Figura: Eroziunea solului la suprafața planetei Venus

Marte

Pe suprafața planetei Marte s-au observat podișuri întinse presărate cu cratere vulcanice și de impact, canioane și văi adânci. În emisfera nordică densitatea de cratere vulcanice este mai mare decât în cea sudică. Aici se găsește și cel mai înalt vârf din sistemul solar *muntele Olimp*, care are 25 km înălțime și un diametru de 700 km la bază. În apropierea ecuatorului planetei se află un canion uriaș¹⁴ de aproximativ 4000 km lungime și 500 km lățime. Canionele și văile de pe planetă par a fi săpate de apă¹⁵.

¹⁴ El este numit *Valles Marineris* în amintirea celor care au contribuit la succesul misiunilor Mariner care au studiat planeta.

¹⁵ Conform unor modele pe suprafața planetei s-au format torenți de apă în urma unor ploi abundente, care au avut loc la puțin timp după formarea planetei. Conform acestor teorii planeta a avut la început o atmosferă densă, căldă și bogată în vaporii de apă. Când temperatura din atmosferă a scăzut, vaporii de apă s-au condensat, au căzut pe suprafața planetei și au produs torenții a căror urmă o vedem astăzi pe planetă.

De pe Marte lipsesc dovezile mișcării plăcilor tectonice observate pe Pământ, dar pe Marte sunt cei mai înalți munți vulcanici din sistemul solar. O explicație ar putea fi lipsa mișcării plăcilor tectonice, atunci căldarea vulcanului rămâne deasupra camerei de magmă și eruptionsle succesive contribuie la înălțarea aceluiași vulcan. Pentru a rezista la presiunea munților de pe planetă crusta ei trebuie să aibă o grosime mare. Podisurile din emisfera sudică sunt presărate cu cratere de impact. Marginile lor sunt tocite și uneori pe versanții exteriori se observă urmele scurgerii materialului topit în urma ciocnirii plastice dintre planetă și corpul venit din afara ei.

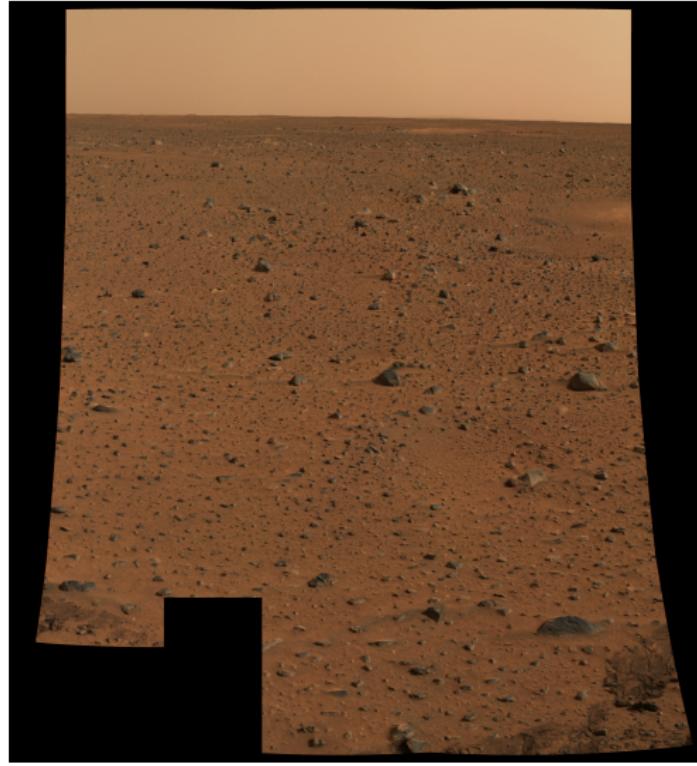


Figura: Suprafața lui Marte fotografiată de misiunea spațială Spirit

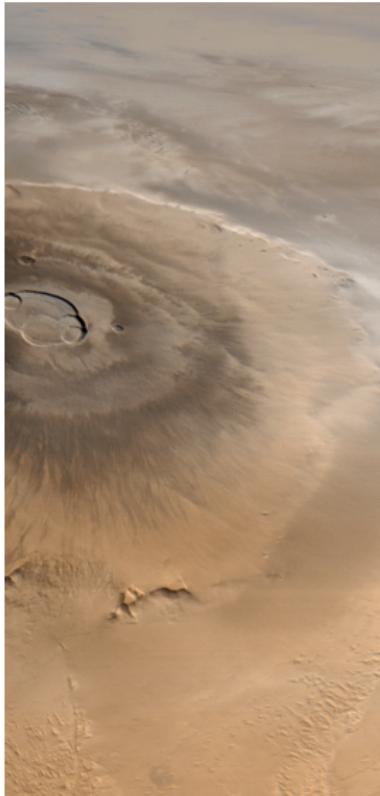


Figura: Muntele Olimp-cel mai înalt munte din sistemul solar



Figura: Muntele Olimp-munte de încrețire