

Astronomie

Cursul 9 - Fizica planetelor clasice Inelele și sateliții mari ai planetelor

Cristina Blaga

8 decembrie 2025

Fizica planetelor mari

- Până în a doua jumătate a secolului XX proprietățile 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.

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.

În primă aproximare corpurile cerești pot fi considerate corpuri negre.

În sistemul solar, cu excepția lui Jupiter și a lui Saturn, care produc în interiorul lor energie datorită contracției 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.

- 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 pe planete 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 viteză 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 $v_e/\bar{v} \gg 1$ 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 atmosfere unei planete date sunt cele care au masa cea mai mică.
- 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.

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

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R^3} \quad (6)$$

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*.

Characteristicile planetelor terestre

Planetele terestre au

- densitate medie mare cuprinsă între 3,9 și 5,52 g/cm³,
- 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.

Characteristicile planetelor gazoase

Planetele gazoase au

- densitate medie mică de 0,687 până la 1,6 g/cm³,
- masă mare cuprinsă între 15 și 318 M_{\oplus} și
- un număr mare de sateliți naturali.

Din această clasă fac parte Jupiter, Saturn³, Uranus și Neptun. Reprezentantul clasei este Jupiter, de aceea ele sunt cunoscute și sub numele de *planete joviene*.

³Densitatea medie a planetei Saturn este 0,687 g/cm³, este mai mică decât 1 g/cm³ 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. 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

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

Structura internă a planetelor terestre

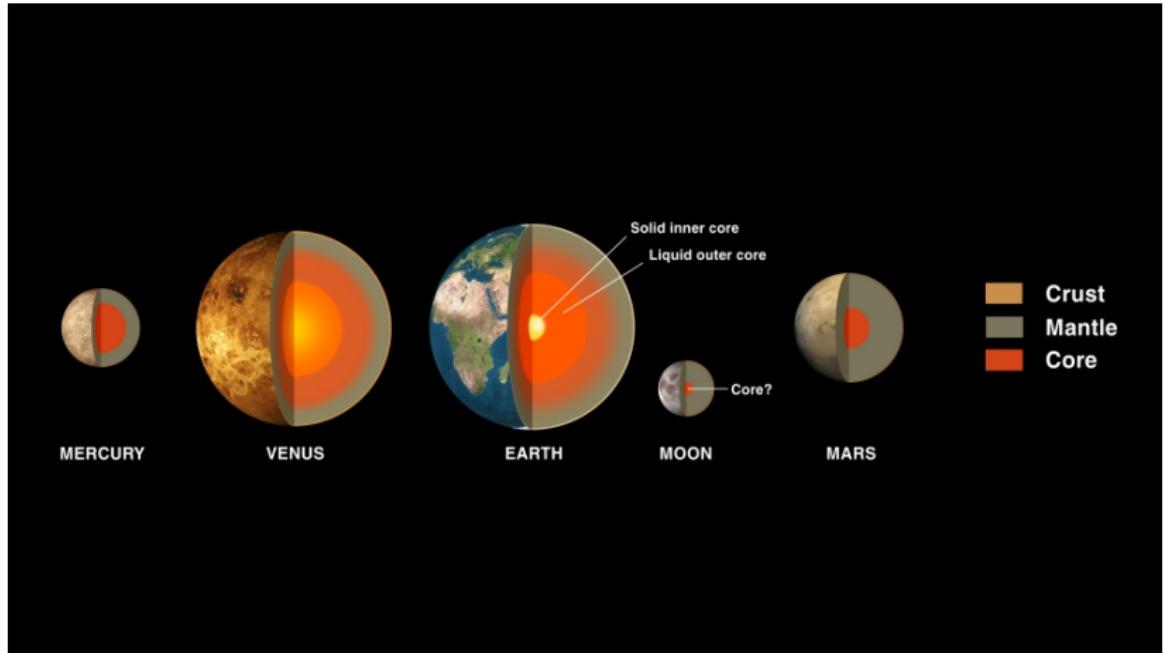


Figura: Crusta, mantaua și nucleul planetelor terestre (sursa NASA)

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 planetare⁴,
- 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**.

⁴Raza 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 17,2 g/cm³. Ea scade până la 9,4 g/cm³ 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/m^3 .
- 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 $3,4 \text{ g/cm}^3$. Ea ajunge la suprafața Pământului la $2,8 \text{ g/cm}^3$. Temperatura medie la suprafața Pământului este de 270 grade Kelvin.

Structura internă a planetelor gazoase (gigante)

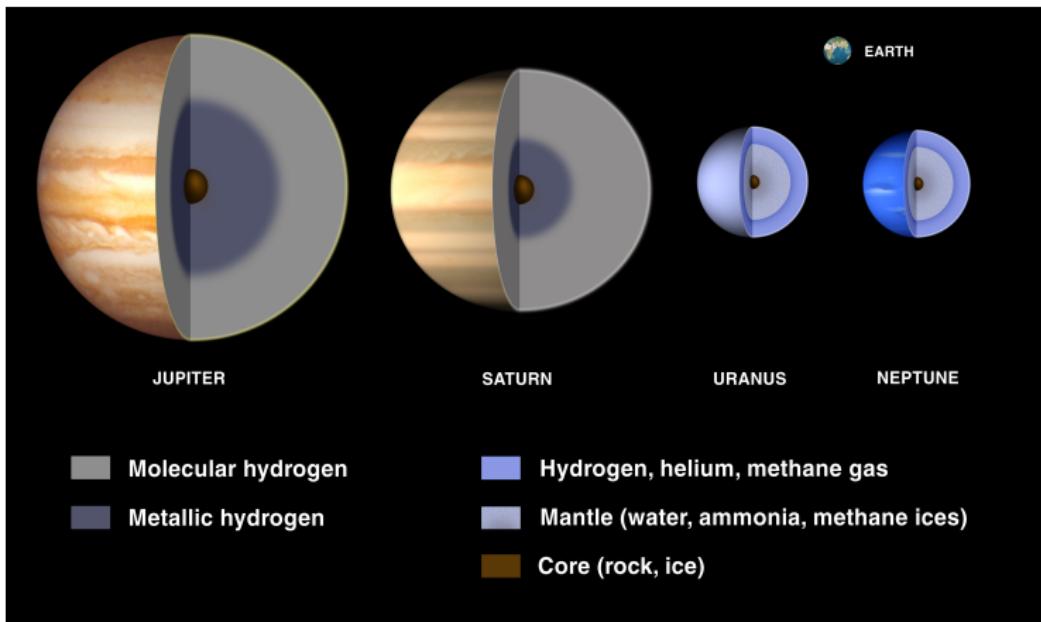


Figura: Interiorul planetelor joviene sau gigante (sursa NASA)

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 este egală cu $1,2 \cdot 10^7$ atmosfere. Densitatea medie scade din centrul planetei la granița dintre nucleu și stratul următor de la 15 g/cm^3 la 4 g/cm^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 $1,3 \text{ g/cm}^3$ la $1,1 \text{ g/cm}^3$.
- 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 atmosferă⁵. La suprafața planetei Jupiter temperatura este de 170 grade Kelvin.

⁵În 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 turtirea planetei, ε care prin definiție este diferența dintre raza ecuatorială și cea polară a planetei exprimată în raze ecuatoriale.

La Saturn - turtirea este aproximativ 0,1, efectul rotației planetei în jurul propriei axe trebuie considerat în modelele propuse pentru interiorul acestei planete.

La Pământ raportul turtirea planetei este 1/300 și în primă ap proximație putem considera că Pământul este un corp cu simetrie sferică.

Înălțimea munților de pe o planetă

Ecuația 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 $P_{max} = 10^8 \text{ Pa}$ ⁶, 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 $g = GM/R^2$.

⁶Aceasta 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.

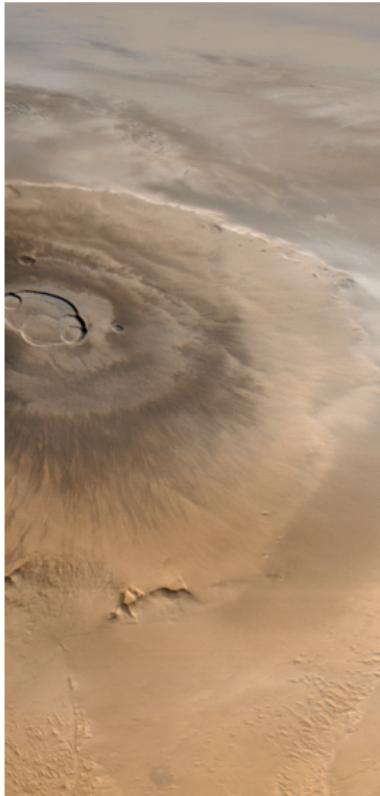


Figura: Muntele Olimp-cel mai înalt munte din sistemul solar

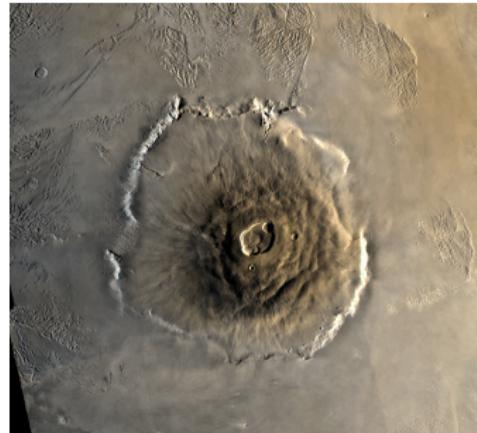


Figura: Muntele Olimp-munte de încrețire

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 radar⁷, pentru că suprafața ei nu vede din spațiu din cauza norilor groși din atmosfera ei.

⁷Cunoscând 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 cutedele 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.

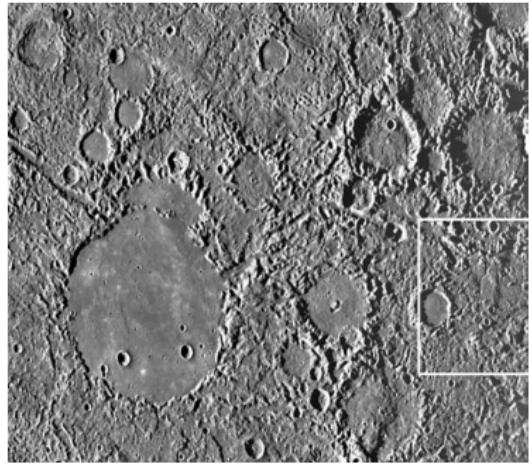


Figura: Detalii din suprafața planetei Mercur

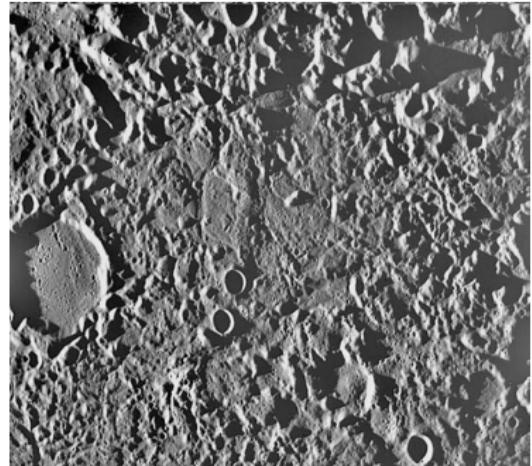


Figura: Detaliu la detaliul din suprafața planetei Mercur

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 şlefuieste și modelează relieful planetei.

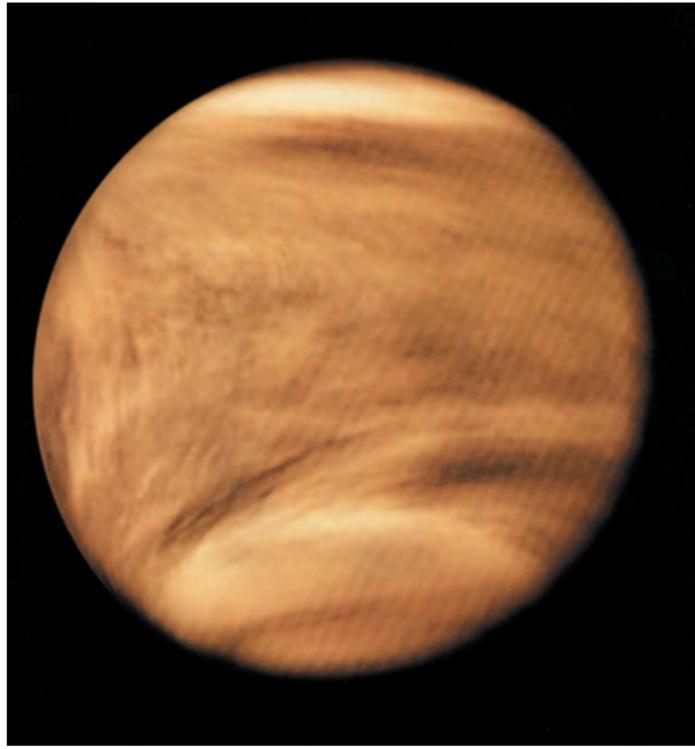


Figura: Planeta Venus acoperită de nori

Caracteristice pentru Venus sunt blocurile de piatră, aseamănătoare cu niște lespezi uriașe slefuite 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 suprafeței 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.

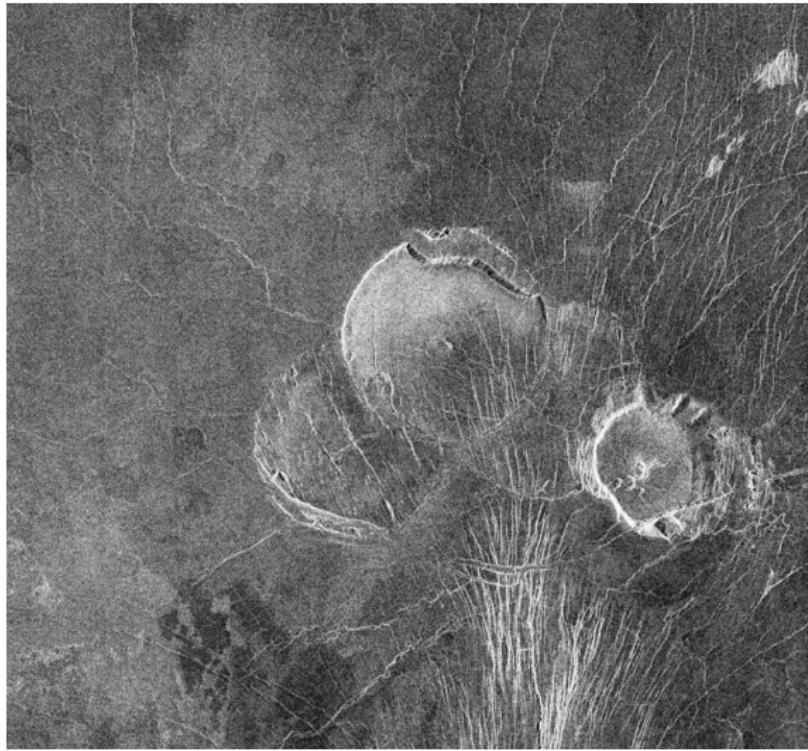


Figura: Cratere de impact și vulcanice pe suprafața planetei Venus

Marte

Pe suprafața planetei Marte s-au observat podișuri întinse presărate cu crater vulcanice și de impact, canioane și văi adânci. În emisfera nordică densitatea de crater 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 uriaș⁸ de aproximativ 4000 km lungime și 500 km lățime. Canionele și văile de pe planetă par a fi săpate de apă⁹.

⁸El este numit *Valles Marineris* în amintirea celor care au contribuit la succesul misiunilor Mariner care au studiat planeta.

⁹Conform unor modele pe suprafața planetei s-au format torrenti 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, caldă 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 torrentii 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 eruptionslele succesive contribuie la înălțarea aceluiași vulcan. Pentru a rezista la presiunea munților de pe planetă crusta ei trebuie să aibă o grosime mare. Podișurile 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.

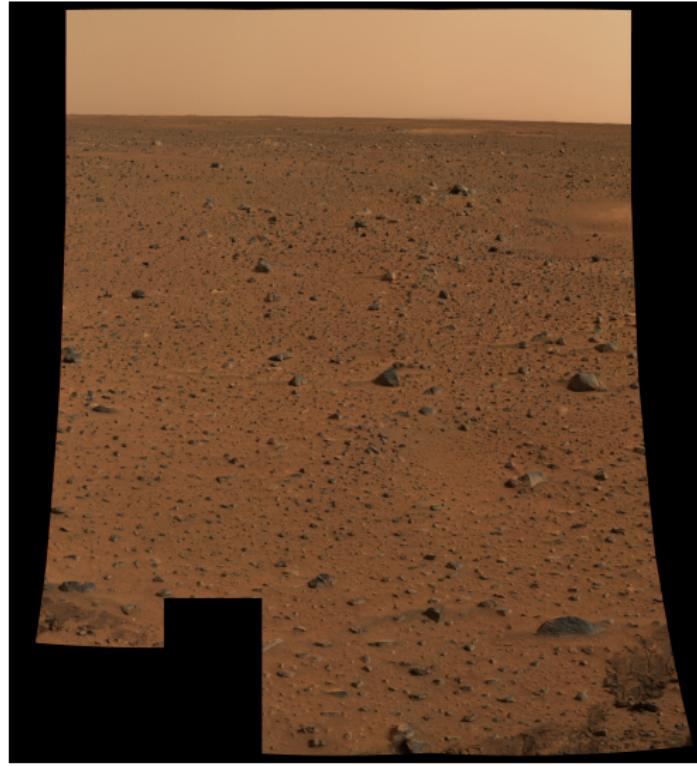


Figura: Suprafața lui Marte fotografiată de misiunea spațială Spirit

Inelele planetelor

- În 1610, după descoperirea sateliților lui Jupiter, Galileo Galilei a cercetat cu atenție vecinătatea planetei Saturn și a avut impresia că vede doi sateliți care se mișcă la distanță foarte mică de planetă. Câțiva ani mai târziu a remarcat dispariția lor.
- El descoperise inelele lui Saturn care se află în planul ecuatorial al planetei și au grosime neglijabilă în raport cu diametrul planetei.
- Când Pământul traversează planul ecuatorial al planetei, inelele ei nu se mai văd de pe Pământ. Așa se explică de ce Galileo Galilei a observat dispariția lor.

Limita Roche

- Inelele lui Saturn au fost studiate de Christiaan Huygens care în 1655 a emis ipoteza că ar fi vorba despre un inel de materie solid care nu atinge planeta.
- În 1675 Giovanni Cassini a observat că inelul lui Saturn este alcătuit din două părți distincte, zona de separare fiind cunoscută astăzi sub numele de *diviziunea Cassini*.
- Natura, structura și stabilitatea acestor inele a preocupat multe minti luminate. În 1850 Edouard Roche studiind efectul forței mariice a unei planete asupra unui satelit lichid a observat că există o limită pe care dacă satelitul o trece este distrus.

Definiție

Limita Roche este regiunea din vecinătatea planetei în care corpurile sunt fragmentate din cauza efectului mareic¹⁰ produs de planetă.

¹⁰ *Efectul mareic* este apărut datorită dependenței forței gravitaționale de distanța de la planetă la diferitele puncte ale corpului mic.

- Pentru a obține limita Roche considerăm un corp de dimensiuni mici care se mișcă în câmpul gravitațional al unei planete.
- Fie o planetă omogenă de masă M , rază R și centru de masă O , în jurul căruia se mișcă un corp de masă mult mai mică. Presupunem că corpul mic este alcătuit din două sfere omogene tangente exterior de masă m și rază r mult mai mici decât masa, respectiv raza planetei. Centrele de masă ale sferelor sunt notate cu O_1 , respectiv O_2 .

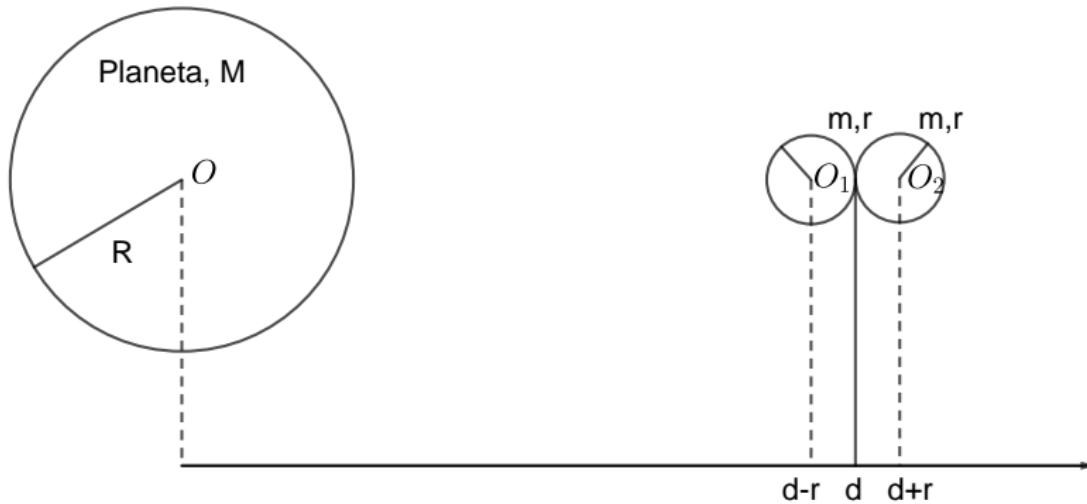


Figura: Limita Roche

- Distanța $OO_1 = d - r$, iar $OO_2 = d + r$, unde $r \ll d$. Forța cu care planeta acționează asupra primei sfere este orientată spre O pe direcția O_1O are mărimea

$$G \frac{Mm}{(d - r)^2},$$

iar cea cu care acționează asupra celei de-a doua este orientată spre O are punctul de aplicație în O_2 și modulul egal cu

$$G \frac{Mm}{(d + r)^2}.$$

Diferența dintre forțele cu care sunt atrase cele două sfere de către planetă este

$$\Delta F = \frac{GMm}{(d-r)^2} - \frac{GMm}{(d+r)^2} = \frac{GMm}{d^2} \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{r}{d}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{d}\right)^2} \right). \quad (7)$$

Diferența ΔF de mai sus trebuie comparată cu forța de legătură dintre sfere egală cu

$$f = G \frac{m^2}{4r^2}.$$

Pentru a afla aproximativ ΔF dezvoltăm în serie Taylor descăzutul și scăzătorul din relația (7) pentru $r/d \ll 1$.

Pentru aceasta calculăm polinoamele Taylor atașate funcțiilor

$$f_1(x) = \frac{1}{(1-x)^2} \quad \text{și} \quad f_2(x) = \frac{1}{(1+x)^2} \quad (8)$$

în vecinătatea punctului $x = 0$,

$$f_1(x) = f_1(0) + \frac{1}{1!} f'_1(0)(x - 0) + \mathcal{O}(x^2) = 1 + 2x + \mathcal{O}(x^2), \quad (9)$$

$$f_2(x) = f_2(0) + \frac{1}{1!} f'_2(0)(x - 0) + \mathcal{O}(x^2) = 1 - 2x + \mathcal{O}(x^2). \quad (10)$$

Înlocuind în (7) obținem

$$\Delta F = \frac{GMm}{d^2} \left[1 + 2\frac{r}{d} - 1 + 2\frac{r}{d} + \mathcal{O}\left(\frac{r}{d}\right)^2 \right] = \frac{GMm}{d^2} 4\frac{r}{d} + \mathcal{O}\left(\frac{r}{d}\right)^2.$$

Cum $r/d \ll 1$, neglijând termenii de ordinul doi în r/d , găsim

$$\Delta F \approx 4 \frac{GMm}{d^3} r. \quad (11)$$

Reamintim că forța de legătură dintre sfere este

$$f = G \frac{m^2}{4r^2}.$$

- Dacă $\Delta F \leq f$ legătura dintre cele două sfere de masă m nu poate fi ruptă.
- Dacă $\Delta F > f$ forța cu care este atrasă prima sferă de către corpul central este mai mare decât forța de leagătură dintre sfere și ele se desprind una de cealaltă.

Definiție

Valoarea lui d pentru care forța perturbatoare este egală cu forța de legătură se numește *limita Roche* sau *distanța Roche*.

Limita Roche

Se notează cu d_R și are expresia aproximativă

$$d_R \approx \sqrt[3]{16r^3 \frac{M}{m}} \approx 2,52 \sqrt[3]{\frac{\bar{\rho}_p}{\bar{\rho}_c}} R \quad (12)$$

unde $\bar{\rho}_p$ este densitatea medie a planetei, $\bar{\rho}_c$ densitatea medie a corpului mic, iar R raza planetei.

Dacă în interiorul corpului mic există forțe care contribuie la rigidizarea corpului, coeficientul din fața radicalului din relația (12) are altă valoare. De exemplu, dacă se consideră un satelit solid și forțele mărețice care acționează asupra lui se obține

$$d_R \approx 1,44 \sqrt[3]{\frac{\bar{\rho}_p}{\bar{\rho}_c}} R. \quad (13)$$

Constanta de proporționalitate depinde de cât de puternice sunt forțele de legătură din interiorul corpului mic.

Sateliții artificiali ai planetelor sunt corpuri rigide, ei se pot mișca pe orbite cu raze mai mici decât limita Roche fără a se fragmenta, dar de regulă sateliții naturali cu rază mai mare de 40 km se mișcă în afara limitei Roche a planetei.

Despre inelele planetelor care se află în interiorul limitei lor Roche, se presupune că sunt alcătuite din particule care nu s-au putut condensa pentru a forma un satelit din cauza efectului mareic al planetei.

- De pe Pământ au fost descoperite inelele planetelor Saturn, Uranus și Neptun, dar din spațiu s-a observat existența inelelor de materie din vecinătatea lui Jupiter.
- Dimensiunea particulelor din inelele planetelor diferă de la o planetă la alta. Cele mai mici sunt în inelul lui Jupiter, cu diametru de $1\text{-}2 \mu$, iar cele mai mari în inelul lui Saturn, cu diametre între câțiva centimetri și câțiva metri.
- În inelele lui Uranus și Neptun se găsesc particule de dimensiuni mici, cu diametru de câțiva microni până la câțiva centimetri.

- În interiorul limitei Roche au fost descoperiți sateliți mici ai planetelor, cu masă mică și rază sub 40 km, care contribuie la stabilitatea inelelor planetelor. În funcție de rolul pe care îl joacă ei pot fi împărțiți în clase diferite.
- *Sateliții ciobănești* mențin pe orbite stabile particulele din inelele în vecinătatea cărora se mișcă, ca și câinii de întors oile care au grija ca oile din turmă să nu se îndepărteze de ea și să se piardă.