

Astronomie

Cursul 8 - Mișcarea în sistemul solar

Problema celor două corpuri

Cristina Blaga

18 noiembrie 2021

Mișcarea corpurilor în sistemul solar

Mișcare directă și retrogradă

- ▶ Corpurile din sistemul solar se mișcă în câmpul gravitațional al Soarelui.
- ▶ Observată de pe Pământ, mișcarea planetelor este complicată.
- ▶ În cea mai mare parte a timpului, ele se mișcă spre răsărit, sens cunoscut în astronomie ca *direct*.
- ▶ La un moment dat se opresc, după care se mișcă în sens *retrograd*, i.e. înspre apus.
- ▶ După o nouă oprire, planetele își reiau mișcarea directă.

Puncte de întoarcere

Definiție

Punctele în care planetele își schimbă direcția de deplasare se numesc *stații* sau *puncte de întoarcere*.

Observație

În prima aproximare, pentru a explica mișcarea observată a planetelor folosim problema celor două coruri.

Problema celor două corpuri

Fie m_1 și m_2 masele a două corpuri grele și \vec{r}_{12} vectorul de poziție al lui m_2 în raport cu m_1 . Conform legii atracției universale a lui Newton, corpurile se atrag cu o forță proporțională cu produsul maselor lor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele.

Forța \vec{F}_{21} cu care m_1 acționează asupra lui m_2 este

$$\vec{F}_{21} = -G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}, \quad (1)$$

unde $G = 6.668 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2$ este constanta atracției gravitaționale, $r = ||\vec{r}_{12}||$ distanța dintre corpuri și $\frac{\vec{r}_{12}}{r}$ vesorul vectorului \vec{r}_{12} .

Mișcarea planetelor sistemului solar

Soarele, planetele, Luna sunt corpuri grele, de aceea pentru a le explica mișcarea folosim legea atracției universale.

Dacă distanța dintre corpuri este foarte mare în raport cu dimensiunile lor, dacă ele au simetrie sferică și masa este uniform distribuită în interiorul lor, le putem considera a fi puncte materiale.

Presupunem că întreaga masă a lor este concentrată în centrul de masă și distanța dintre corpuri este egală cu distanța dintre centrele de masă.

Soarele și planetele din sistemul solar îndeplinesc aceste condiții, de aceea pentru a explica mișcarea de revoluție a planetelor, ele sunt considerate puncte materiale.

Legile lui Kepler

Rezolvând problema celor două corpuri regăsim legile lui Kepler. Ele au fost deduse empiric la începutul secolului al XVII-lea de Johannes Kepler, în urma analizei pozițiilor precise ale planetei Marte, determinate din observații de Tycho Brahe în a doua jumătate a secolului al XVI-lea.

Legea I a lui Kepler (1609)

Teoremă

Planetele descriu în jurul Soarelui elipse cu Soarele aflat într-unul dintre focare.

Dacă rezolvăm problema celor două corpuri obținem că acestea descriu secțiuni conice (elipse, parabole sau un arc de hiperbolă) în jurul centrului comun de masă.

Mișcarea în jurul Soarelui

În cazul particular al sistemului solar, corpurile se mișcă în câmpul gravitațional al Soarelui, care are masă mult mai mare decât masa altor corpuri din sistem, centrul de masă al oricărei perechi Soare - corp din sistemul solar este aproape de centrul de masă al Soarelui. De aceea putem afirma că: *corpurile din sistemul solar descriu conice cu Soarele aflat într-unul dintre focare*. Focarul în care se găsește Soarele este considerat *focarul principal* al secțiunii conice.

Evadarea din sistemul solar

Pe conice deschise (parabole sau o ramură de hiperbolă) se mișcă corpurile care ar putea părăsi sistemul solar (*i.e.* comete sau asteroizi). Forma orbitei unui corp din sistemul solar se poate modifica dacă acesta trece prin apropierea unui corp de masă mare.

Parametrii secțiunii conice

Pentru a descrie forma orbitei unui corp ce se mișcă în sistemul solar se pot folosi diferenți parametrii ai conicei, de exemplu *semiaxa mare*, notată cu a și *semiaxa mică* a orbitei, notată cu b , sau cu ajutorul *semiaxei mari* și a *excentricității* orbitei, notată cu e . Între semiaxa mare, semiaxa mică și excentricitatea unei conice există relația:

$$b = a\sqrt{1 - e^2}. \quad (2)$$

Dacă notăm cu f distanța dintre centrul conicei și focalul ei, atunci $f = a \cdot e$. Dacă $e = 0$ elipsa este un cerc, pentru $e \in (0, 1)$ conica este o elipsă, pe măsură ce e crește elipsa este din ce în ce mai alungită. Dacă $e = 1$ secțiunea conică este o parabolă, iar dacă $e > 1$ este o hiperbolă.

Conice în coordonate polare

Ecuăția conicelor în coordonate polare (r, θ) , unde r este distanța dintre focarul principal și punctul de pe conică iar θ unghiul dintre dreapta determinată de focarele secțiunii conice și vectorul de poziție al planetei cu originea în focarul principal al secțiunii conice, este:

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (3)$$

unde $p = b^2/a = a(1 - e^2)$ este parametrul conicei.

Linia apsidelor

Cel mai apropiat punct de Soare situat pe orbita unui corp din sistemul solar se numește *periheliu*¹ și se notează cu P , iar cel mai îndepărtat *afeliu*², notat A .

Distanța Soare - planetă când aceasta trece la periheliul orbitei sale este $a(1 - e)$, iar când ea se află la afeliu este $a(1 + e)$.

Dreapta determinată de punctele P și A se numește *linia apsidelor*.

¹Denumirea vine din limba greacă, *peri* înseamnă cel mai apropiat, iar *Helios* este numele grecesc al Soarelui.

²Numele acestui punct derivă din cuvintele grecești *apo* cel mai îndepărtat și *Helios* numele grecesc al Soarelui.

Legea a doua a lui Kepler sau legea ariilor (1609)

Teoremă

Raza vectoare³ a unui corp din sistemul solar descrie în intervale de timp egale arii egale.

Această lege este echivalentă cu conservarea momentului cinetic în problema celor două corpuri.

³Prin *raza vectoare a corpului* înțelegem vectorul de poziție al corpului în raport cu un reper cu originea în focarul principal al secțiunii conice descrise de corp și axa Ox de-a lungul liniei apsidelor.

Elementele elipsei

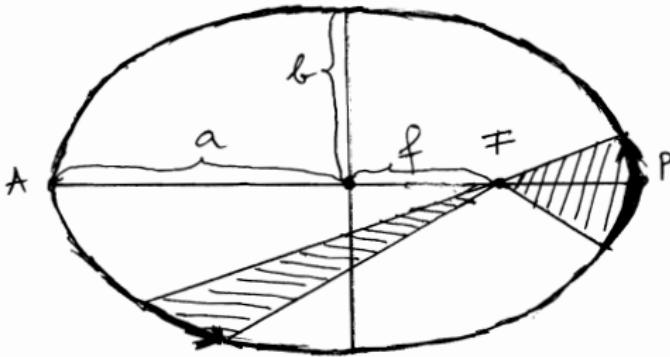


Figura: Elementele unei elipse și legea a II-a lui Kepler

Consecințe

⇒ mișcarea de revoluție în jurul Soarelui a corpurilor sistemului solar este neuniformă.

- ▶ Corpurile se mișcă cu viteză mai mare la periheliu și cu viteză mai mică la apropierea de afeliu.
- ▶ În periheliu, respectiv afeliu sunt atinse viteza maximă, respectiv minimă cu care corpul se mișcă pe traекторia lui în jurul Soarelui.

Legea a treia exactă a lui Kepler

Teoremă

Pătratul perioadei de revoluție a corpului m_1 , respectiv m_2 , crește proporțional cu semiaxa mare a orbitei sale și invers proporțional cu suma maselor corpuri din sistem.

Adică

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \quad (4)$$

unde T_i , $i \in \{1, 2\}$, sunt perioadele de revoluție a celor două corpuri în jurul centrului comun de masă, a_i , $i \in \{1, 2\}$, semiaxele mari ale orbitelor, iar m_i , $i \in \{1, 2\}$, masele celor două corpuri.

Legea a III-a a lui Kepler (1617)

Teoremă

Pătratul perioadei siderale a planetelor care se mișcă în jurul Soarelui este proporțional cu cubul semiaxelor mari ale orbitelor descrise de acestea.

Ea se obține din legea a III-a exactă, dacă la numitorul ultimului raport suma maselor celor două corpuri se înlocuiește cu masa Soarelui, pentru că masa oricărei planete este neglijabilă în raport cu masa Soarelui. Astfel

$$\frac{T_p^2}{a_p^3} = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} \quad (5)$$

unde T_p este perioada siderală a planetei, iar a_p semiaxa mare a orbitei ei.

Dacă exprimăm perioada orbitală a corpului în ani siderali, notată cu T , și semiaxa mare a orbitei, notată a , în unități astronomice atunci pe baza legii a treia a lui Kepler obținem

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{T_{\oplus}^2}{a_{\oplus}^3} = 1, \quad (6)$$

pentru că $T_{\oplus} = 1$ an sideral, iar $a_{\oplus} = 1$ unitate astronomică. Această aproximare nu poate fi folosită într-un sistem de două corpuri în care masele au valori apropiate, cum se întâmplă, de exemplu, în cazul sistemelor binare alcătuite din stele cu mase comparabile.

Orbitele planetelor din sistemul solar

În prima aproximare mișcarea corpurilor din sistemul solar poate fi descrisă cu ajutorul legilor lui Kepler.

Mișcarea planetelor este plană, orbitele lor se află în plane înclinate puțin față de planul eclipticii. Pentru majoritatea planetelor înclinarea planului orbital pe ecliptică este mai mică decât 3° . Cea mai mare înclinare, 7° față de ecliptică, o are planul orbitei lui Mercur.

Planetele se mișcă pe orbită de la apus la răsărit, sens considerat *direct* în astronomie. Orbitele planetelor mari sunt aproape circulare. Cu excepția planetei Mercur, a cărei excentricitate este de 0,21, excentricitatea orbitelor planetelor este mai mică decât 0,1.

Legea Titius-Bode

Pentru a obține aproximativ semiaxa mare a orbitelor planetelor sistemului solar se poate folosi sirul 0, 3, 6, 12, 24, Dacă adunăm 4 la fiecare termen din sir și suma obținută o împărțim la 10, găsim, cu o aproximatie bună, semiaxa mare a orbitelor planetelor, exprimată în unități astronomice. Termenii sirului de mai sus se obțin cu ajutorul formulei de recurență:

$$a_n(\text{ u.a.}) = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n \quad (7)$$

unde $n = -\infty, 0, 1, 2, \dots, 6$.

- ▶ Pentru $n = -\infty$ se obține valoarea aproximativă a semiaxei lui Mercur $a(\text{ u.a.}) = 0,4$. Valoarea exactă a semiaxei planetei Mercur este 0,38 unități astronomice.
- ▶ Al doilea termen al sirului, corespunzător lui $n = 0$, este $a = 0,7$ u.a. este în bună concordanță cu distanța medie de la Soare la Venus, care este egală cu 0,72 unități astronomice.
- ▶ Dacă continuăm să dăm valori lui n găsim semiaxa mare a Pământului, a planetei Marte.

Descoperirea brâului principal de asteroizi

Pe când s-a publicat legea Titius-Bode la distanță corespunzătoare lui $n = 3$, $a = 2,8$ unități astronomice de Soare, nu se cunoștea nici o planetă.

În 1800, încurajați de descoperirea planetei Uranus la o distanță medie de Soare apropiată de cea dată de legea Titius-Bode, astronomii au început căutarea planetei dintre Marte și Jupiter, acțiune care a dus descoperirea brâului principal de asteroizi⁴.

⁴Primul corp descoperit în această regiune, în 1801, numit Ceres, se mișcă pe o elipsă cu semiaxa mare egală cu 2,77 unități astronomice. Din august 2006, conform deciziei Uniunii Astronomice Internaționale, Ceres este o planetă pitică. De la descoperirea ei până la adoptarea acestei decizii, Ceres a fost considerată cea mai mare planetă mică din sistemul solar.

Orbita terestră

Pământul descrie o elipsă situată în planul eclipticii, cu Soarele într-unul dintre focare.

Semiaxa mare a orbitei terestre este egală cu 149,6 milioane km, excentricitatea ei este 0,0167.

Distanța dintre Soare și Pământ variază între 147 milioane de km și 152 milioane de km.

Pământul descrie orbita în jurul Soarelui într-un an sideral.

Viteza medie cu care Pământul se mișcă pe orbită este de 30 km/s. El trece prin *periheliul* orbitei în apropierea zilei de 3 ianuarie, iar prin *afeliul* orbitei după o jumătate de an în apropierea zilei de 3 iulie⁵. Conform cu legea a II-a a lui Kepler, viteza Pământului la periheliu este maximă, egală cu 30,3 km/s, iar la afeliu minimă, egală cu 29,3 km/s. Axa de rotație terestră este înclinată față de ecliptică cu $66^\circ 33'$.

⁵Mișcarea Pământului nu este uniformă, perioada orbitală nu are un număr întreg de zile de aceea momentul din an la care Pământul trece printr-un punct dat al orbitei sale diferă de la un an la altul.

Orientarea axei terestre față de ecliptică la trecerea Pământului prin punctele apsidale este reprezentată în figura următoare. Când Pământul trece prin periheliul orbitei, în emisfera nordică este iarnă, iar în cea sudică vară. În timpul verii din emisfera sudică, Pământul se găsește mai aproape de Soare decât atunci când în emisfera nordică este vară, de aceea valorile medii ale temperaturii înregistrate vara sunt mai mari în verile din emisfera sudică decât în verile din emisfera nordică.

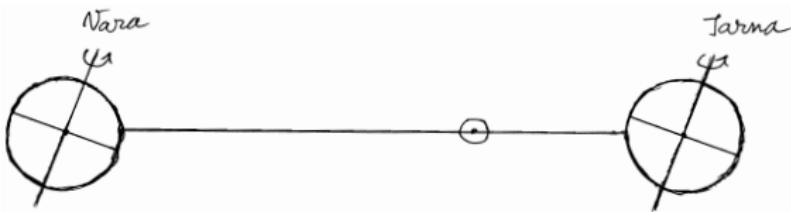


Figura: Poziția axei de rotație terestră și a ecuatorului terestru în raport cu ecliptica

Pentru un observator din emisfera nordică⁶ la trecerea Soarelui din emisfera cerească australă în cea boreală începe primăvara astronomică. Începutul ei este marcat de trecerea Soarelui prin *punctul vernal sau al echinocțiului⁷ de primăvară*, în apropierea zilei de 21 martie, numită *ziua echinocțiului de primăvară*.

⁶În continuare dăm evenimentele care marchează începutul anotimpurilor astronomice pentru un observator din emisfera nordică. Pentru observatorii din emisfera sudică când începe primăvara astronomică în emisfera nordică începe toamna astronomică.

⁷Echinocțiu este un cuvânt de origine latină, compus din *equi* = egal și *noctis* = noapte.

La traversarea ecuatorului ceresc declinația Soarelui este egală cu zero și pentru observatorii de la ecuator Soarele răsare la ora șase dimineață și apune la ora șase seara, ziua⁸ fiind egală cu noaptea. În timpul primăverii astronomice declinația Soarelui și durata zilei cresc.

⁸Prin zi înțelegem aici intervalul de timp în care Soarele este deasupra orizontului. iar noaptea intervalul în care Soarele este sub orizontul locului. ☰ 🔍

Când declinația Soarelui este maximă, egală cu înclinarea eclipticii pe ecuator, spunem că Soarele a ajuns în *punctul solstițiului⁹ de vară*. Acest fenomen are loc în apropierea zilei de 21 iunie, ziua *solstițiului de vară* și marchează începutul verii astronomice.

⁹Numele provine din limba latină și este compus din *sol* care înseamnă Soare și *stat* care înseamnă a se opri, a sta pe loc. Înainte ca Soarele să ajungă în acest punct de pe orbita lui aparentă, înălțimea deasupra orizontului a Soarelui la culminația superioară crește de la o zi la alta. După ce Soarele a trecut de acest punct de pe ecliptică, culminează superior la înălțimi deasupra orizontului din ce în ce mai mici. În ziua când Soarele trece prin acest punct culminează superior la aceeași înălțime deasupra orizontului ca în ziua dinaintea ei și în ziua care va urma, de aceea spunem că *Soarele stă*.

Când Soarele se află la declinație pozitivă maximă el descrie cel mai lung arc deasupra orizontului, înregistrându-se cea mai lungă zi a anului. Durata zilei scade apoi, ea devine egală cu noaptea când Soarele ajunge în *punctul autumnal* sau al *echinocțiului de toamnă*, în apropierea zilei de 23 septembrie, *ziua echinocțiului de toamnă*. Atunci, Soarele traversează ecuatorul ceresc trecând din emisfera cerească nordică în cea sudică, moment care marchează începutul *toamnei astronomice*.

Declinația Soarelui și durata zilei continuă să scadă până când Soarele ajunge în punctul *solstițiului de iarnă*, în apropierea zilei de 22 decembrie, *ziua solstițiului de iarnă*. Declinația Soarelui are atunci valoarea cea mai mică, Soarele descrie cel mai scurt drum deasupra orizontului și se înregistrează cea mai scurtă zi a anului. Trecerea Soarelui prin acest punct marchează începutul *iernii astronomice* în emisfera nordică.

Durata anotimpurilor astronomice diferă de cea a anotimpurilor obişnuite. Pentru un observator din emisfera nordică¹⁰ primăvara astronomică are 92,75 zile, vara 93,65 de zile, toamna 89,85 de zile și iarna 88,99 de zile¹¹. Observăm că, în emisfera nordică, iarna are durata cea mai mică, atunci distanța Soare-Pământ este minimă și viteza de deplasare aparentă a Soarelui atinge valoarea ei maximă.

¹⁰În emisfera sudică este toamnă când în cea nordică este primăvară, de aceea toamna astronomică are 92,75 zile, iarna 93,65 de zile, s.a.m.d..

¹¹Suma duratei lor este egală cu un an tropic, deoarece anotimpurile astronomice se definesc folosind mișcarea aparentă a Soarelui.

Declinația Soarelui variază în cursul unui an între $[-\varepsilon, \varepsilon]$, unde ε este unghiul diedru între ecliptică și ecuator. Acum ε este egal cu $23^\circ 27'$. Înălțimea deasupra orizontului la care culminează și azimutul unui astru observat de la o latitudine geografică dată depind de declinația lui. Un astru de declinație δ observat de la latitudinea geografică nordică φ , care culminează superior la Sud de Zenit, traversează meridianul locului spre Sud la înălțimea deasupra orizontului, notată h , calculată cu ajutorul relației

$$h = \delta + (90^\circ - \varphi).$$

De aceea pentru un observator de pe Pământ, Soarele a cărui declinație variază continuu în cursul unui an culminează superior la înălțimi diferite deasupra orizontului. În localitățile situate pe tropicul Racului, la latitudinea geografică $\varphi = +23^{\circ}27'$, Soarele culminează superior la Zenitul localității o dată pe an, când Soarele trecere prin punctul solstițiului de vară. Numele paralelului geografic este dat de constelația în care intră Soarele la producerea acestui fenomen în urmă cu 2000 de ani¹².

¹²În prezent datorită precesiei Soarele intră în constelația Gemenii la începutul verii astronomice.

Când Soarele trece prin punctul solstițiului de iarnă, el culminează superior la Zenitul localităților de pe tropicul Capricornului, de latitudine geografică $\varphi = -23^{\circ}27'$. Pentru observatorii de pe Pământ aflați între cele două tropice Soarele culminează superior la Zenit de două ori pe an. Soarele nu ajunge niciodată la Zenitul localităților situate între tropice și poli. În emisfera nordică el culminează superior la înălțime deasupra orizontului maximă în ziua solstițiului de vară.

Azimutul astronomic al punctelor de răsărit și apus ale astrului de declinație δ observat de la latitudinea φ sunt date de formula:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}. \quad (8)$$

Declinația Soarelui variază în cursul unui an, de aceea pentru un observator de la latitudinea geografică dată, Soarele răsare și apune, de regulă, din puncte diferite de pe orizont în zile diferite din an. Când Soarele este în punctele echinoctiale, declinația lui este zero, azimutul lui la răsărit fiind 90° , iar la apus 270° . În aceste zile Soarele răsare din punctul cardinal est și apune în vest.

Pentru un observator din emisfera nordică, între echinocțiul de primăvară și solstițiul de vară punctul de răsărit al Soarelui se mișcă pe orizont spre nord-est, iar cel de apus spre nord-vest. Când declinația Soarelui este maximă între punctele de răsărit și de apus ale Soarelui distanța măsurată pe orizont prin sud este maximă. Apoi, punctul de răsărit al Soarelui migrează spre sud-est, trecând prin est la echinocțiul de toamnă. Soarele răsare din punctul de pe orizont cel mai apropiat de sud când Soarele este în punctul solstițiului de iarnă.

Atunci distanța dintre punctele de răsărit și de apus ale Soarelui, măsurată pe orizont prin sud este minimă și Soarele descrie pe boltă arcul de lungime minimă, pentru că apune în punctul de apus cel mai apropiat de sud. După solstițiul de iarnă punctele de răsărit și apus ale Soarelui se deplasează pe orizont spre est, nord-est, respectiv vest, nord-vest.

Mișcarea geocentrică a planetelor

Mișcarea planetelor observată de pe Pământ este destul de complicată. Ea este rezultatul suprapunerii mișcării lor față de Soare cu mișcarea Pământului în jurul Soarelui. Pentru a explica mai ușor mișcarea planetelor văzută de pe Pământ presupunem că planete și Pământul se mișcă pe cercuri situate în planul eclipticii. În funcție de poziția orbitei planetei față de cea terestră planetele se împart în planete *interioare* și *exterioare*. Planetele interioare se mișcă între Soare și Pământ, iar cele exterioare în afara orbitei terestre.

Semiaxa mare a orbitei **planetelor interioare** este mai mică decât o unitate astronomică. Observate de pe Pământ ele se văd mereu în vecinătatea Soarelui. Unghiul Soare-Pământ-planetă este numit *elongația* planetei. În cazul planetelor interioare elongația planetei nu poate lua orice valoare, ea este mai mică decât 23° în cazul planetei Mercur și mai mică decât 46° pentru planeta Venus. Valoarea maximă a elongației planetelor interioare se atinge când direcția Pământ-planetă este tangentă orbitei descrise de planetă, i.e. este unghiul sub care se vede raza orbitei planetei de pe Pământ.

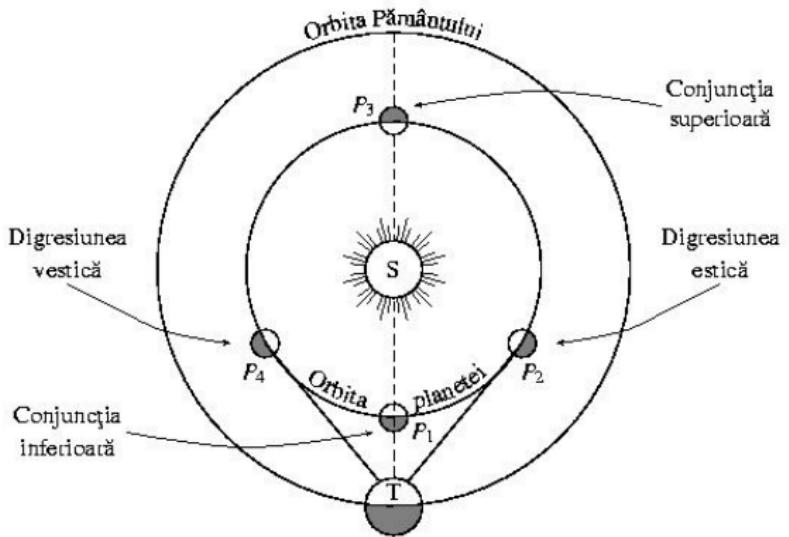


Figura: Configurații ale planetelor interioare

Planetele exterioare au orbitele în afara orbitei terestre, *i.e.* semiaxa mare a orbitelor lor este mai mare decât o unitate astronomică. Elongația planetelor exterioare variază între 0° și 360° , *i.e.* că, în anumite perioade ale anului, aceste planete pot fi văzute la orice oră din noapte.

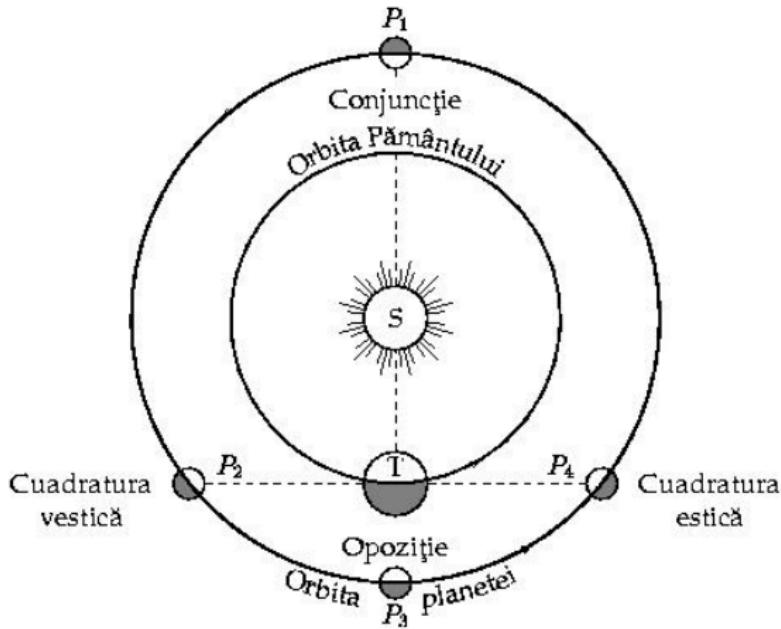


Figura: Configurații ale planetelor exterioare

Observată de pe Pământ mișcarea planetelor printre stele nu are loc întotdeauna în sens direct. La schimbarea sensului de mișcare planetele descriu bucle pe bolta cerească. În figura următoare este reprezentată mișcarea unei planete exterioare (P) observată de pe Pământ (T). Perioada orbitală a Pământului este mai mică decât a planetelor exterioare, de aceea în intervale de timp egale Pământul descrie arce mai mari decât planeta. Traекторia planetei observată de pe Pământ este compusă din proiecțiile planetei pe cer, puncte notate cu P'_i . Când planeta se găsește în P_i , $i = \overline{1, 7}$, pentru un observator de pe Pământ ea pare a fi în poziția P'_i , $i = \overline{1, 7}$. Din figură se observă că planeta descrie o buclă atunci când depăsește planeta, cu alte cuvinte *stațiile* sau *punctele de întoarcere* ale planetelor exterioare se produc în apropierea opozitiei planetei în raport cu Soarele.

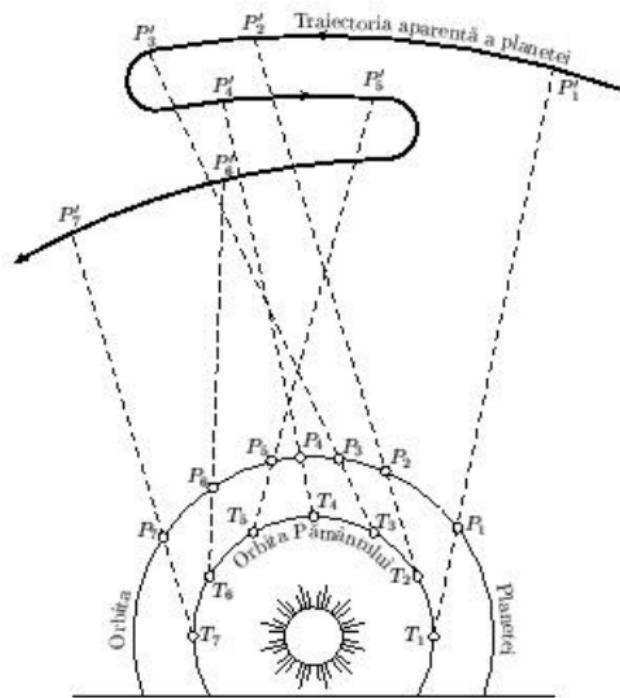


Figura: Mișcarea directă și retrogradă a planetelor exterioare

Astronomie

Cursul 9 - Mișcarea în sistemul solar

Problema celor două corpuri

Cristina Blaga

23 noiembrie 2021

Mișcarea geocentrică a planetelor

Definiție

Mișcarea planetelor observată de pe Pământ este numită **mișcare geocentrică**.

- ▶ Pentru a explica mai ușor mișcarea planetelor văzută de pe Pământ presupunem că planete și Pământul se mișcă pe cercuri situate în planul eclipticii.
- ▶ În funcție de poziția orbitei planetei față de cea terestră planetele se împart în planete *interioare* și *exterioare*. Planetele interioare se mișcă între Soare și Pământ, iar cele exterioare în afara orbitei terestre.

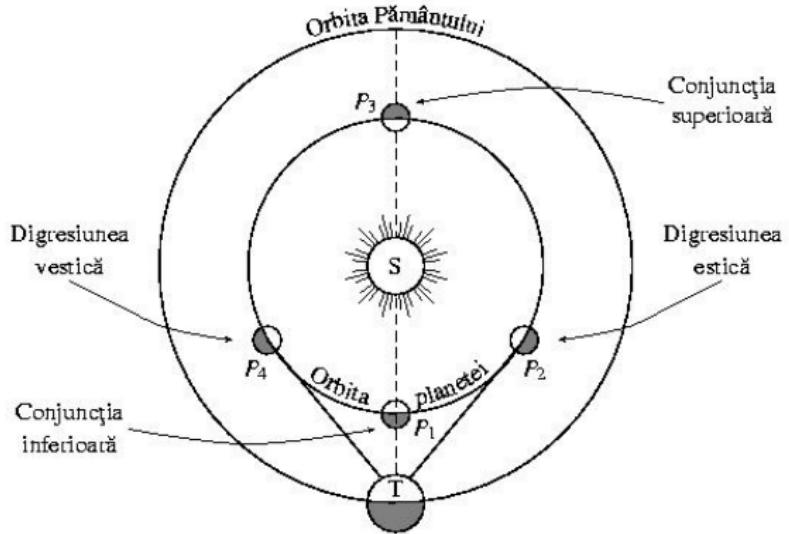
Planete interioare ($a < 1\text{u.a.}$)

Definiție

Unghiul Soare-Pământ-planetă se numește elongația planetei.

- ▶ Observate de pe Pământ, Mercur și Venus se văd mereu în vecinătatea Soarelui.
- ▶ Valoarea maximă a elongației planetelor interioare se atinge când direcția Pământ-planetă este tangentă orbitei descrise de planetă, *i.e.* este unghiul sub care se vede raza orbitei planetei de pe Pământ.

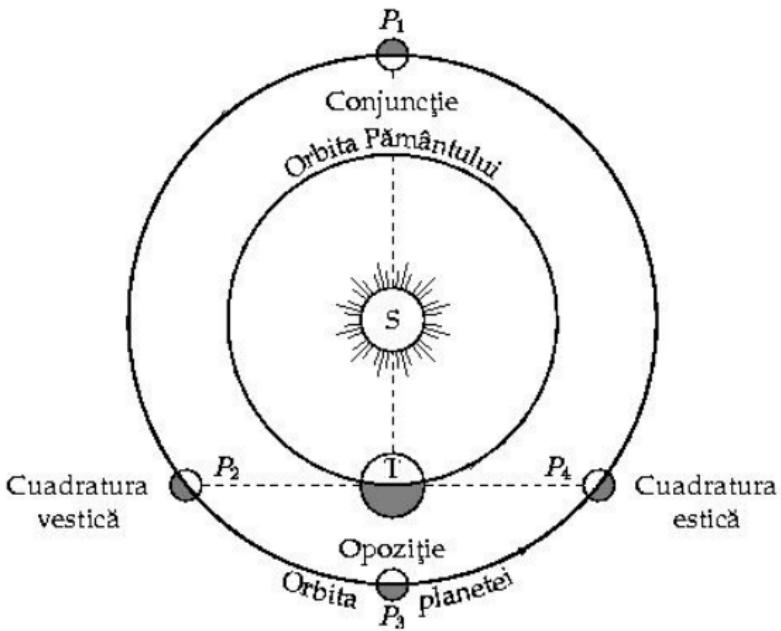
Configurații ale planetelor interioare



Planetele exterioare ($a > 1\text{u.a.}$)

- ▶ Planetele Marte, Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun au orbitele în afara orbitei terestre.
- ▶ Elongația planetelor exterioare variază între 0° și 360° , i.e. că, în anumite perioade ale anului, aceste planete pot fi văzute la orice oră din noapte.

Configurații ale planetelor exterioare



Perioada sinodică

Definiție

Timpul scurs între două configurații consecutive de același tip ale unei planete în raport cu Soarele, observate de pe Pământ se numește **perioada sinodică** a planetei.

Observație

Presupunem că planeta și Pământul descriu orbite circulare situate în planul eclipticii.

Fie T_1 și T_2 , $T_1 < T_2$, perioadele orbitale ale planetelor.

Cunoșcându-le exprimăm timpul scurs între două alinieri successive ale planetelor.

Perioada sinodică

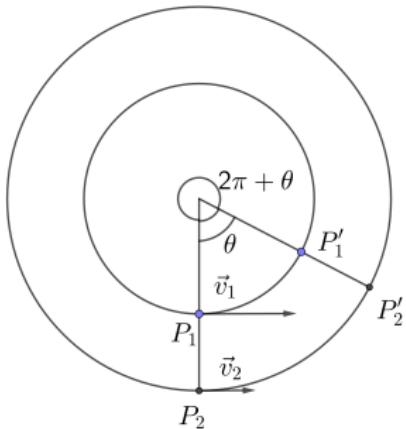


Figura: Perioada sinodică a planetei

- ▶ Presupunem că planetele pleacă din P_1 , P_2 . Ele vor fi din nou aliniate după o perioadă sinodică S , în P'_1 , P'_2 .
- ▶ Planetele se mișcă cu vitezele unghiulare

$$n_i = 2\pi/T_i, i = \overline{1, 2}.$$

- ▶ În intervalul de timp S , prima planetă a parcurs unghiul $2\pi + \theta$, iar a doua unghiul θ .

Așadar pentru prima planetă are loc

$$2\pi + \theta = n_1 \cdot S$$

iar pentru a doua

$$\theta = n_2 \cdot S$$

relații din care, după înlocuirea vitezelor unghiulare ale planetelor, obținem

$$2\pi + \frac{2\pi}{T_2} \cdot S = \frac{2\pi}{T_1} \cdot S \quad | : (2\pi S)$$

După efectuarea împărțirii și simplificarea expresiei găsim

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} . \quad (1)$$

Pentru o *planetă interioară* T_1 este perioada orbitală a planetei (T_{pl}), T_2 este perioada orbitală terestră (T_{\oplus}), iar perioada sinodică a planetei se calculează cu ajutorul formulei

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{pl}} - \frac{1}{T_{\oplus}} . \quad (2)$$

Înlocuind în formula de mai sus perioada orbitală a planetei Venus, 224,701 zile, obținem perioada sinodică a lui Venus egală cu 583,96 de zile.

În cazul *planetelor exterioare* $T_1 = T_{\oplus}$, $T_2 = T_{pl}$, iar perioada sinodică S este dată de formula

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_{pl}} . \quad (3)$$

În cazul planetei Marte perioada siderală este 686,98 de zile iar cea sinodică de 779,87 zile.

Orbitele sateliților artificiali ai Pământului și a sondelor spațiale

Problema celor două corpuri poate fi folosită pentru a descrie mișcarea sateliților artificiali ai Pământului. Dacă Pământul și satelitul sunt corpuri cu distribuție uniformă de masă le putem înlocui cu puncte materiale situate în centrele lor de masă. În timpul mișcării lor sunt îndeplinite legile lui Kepler. Masa sateliților care se mișcă în câmpul gravitational terestru este mult mai mică decât masa Pământului, de aceea centrul de masă al sistemului alcătuit din Pământ și satelit este aproape de centrul de masă terestru și Pământul joacă în acest caz rolul jucat de Soare la mișcarea planetelor din sistemul solar.

Considerăm un satelit de masă m_s care se mișcă pe o orbită circulară, de rază r , în jurul Pământului. Masa Pământului se notează cu M_{\oplus} , iar raza lui cu R_{\oplus} . Masa satelitului este mult mai mică decât masa Pământului, de aceea suma dintre masa Pământului și masa satelitului este aproximativ egală cu masa Pământului. În acest caz, din legea a treia a lui Kepler, perioada orbitală a satelitului devine

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM_{\oplus}}}. \quad (4)$$

Viteza liniară a satelitului pe orbita circulară este egală cu

$$v_c = \frac{2\pi r}{T} = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{r}}. \quad (5)$$

Sateliții artificiali ai Pământului se mișcă la diferite distanțe de suprafața lui. Notăm cu $H = r - R_{\oplus}$ distanța de la satelit la suprafața Pământului. Un satelit care se mișcă la altitudinea $H = 100$ km are perioada orbitală egală cu 1 oră 26 minute și viteza liniară de 7,85 km/s. Perioada orbitală a satelitului crește pe măsură ce altitudinea lui crește. Sateliții care se descriu orbite circulare în planul ecuatorului terestru la 35790 km distanță de suprafața Pământului au perioada orbitală egală cu perioada de rotație a Pământului și se numesc *sateliți geostaționari*. Cum perioada lor orbitală este egală cu perioada de rotație a Pământului, sateliții geostaționari se mișcă solidar cu punctul de pe Pământ deasupra căruia se găsesc la un moment dat. Ei sunt folosiți frecvent ca sateliți de telecomunicații sau de telefonie mobilă.

Un satelit artificial al Pământului care se mișcă fără propulsie în câmpul gravitațional terestru poate evada din acest câmp dacă energia lui cinetică este mai mare decât energia lui gravitațională. Energia cinetică a satelitului de masă m este $E_c = mv^2/2$, iar energia gravitațională $E_g = GMm/r$, unde v este viteza satelitului, iar r distanța dintre centrul de masă al satelitului și centrul Pământului. Dacă cele două energii sunt egale, viteza obținută din conservarea energiei se numește *viteză de evadare* și este egală cu:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}. \quad (6)$$

Observăm că $v_e = \sqrt{2}v_c$. Dacă înlocuim r cu raza Pământului obținem viteza de evadare de la suprafața Pământului sau *prima viteză cosmică*, egală cu 11,2 km/s. Satelitul care are această viteză descrie o parabolă cu centrul în centrul Pământului de aceea viteza de evadare se numește și *viteză parabolică*.

Pentru a micșora costurile misiunilor spațiale interplanetare se folosesc orbite *asistate gravitațional*, de exemplu *orbitele Hohmann*. Acestea sunt orbite eliptice cu periheliul pe orbita planetei de pe care pleacă sonda spațială și cu afeliul pe orbita planetei la care trebuie să ajungă. Pe orbita Hohmann sonda nu are nevoie de combustibil pentru propulsie, mișcarea este kepleriană, perioada de mișcare a sondei spațiale fiind determinată din legea a treia a lui Kepler.

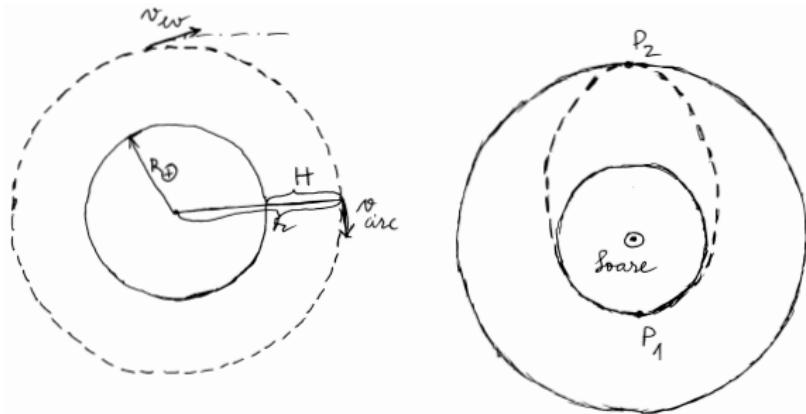


Figura: Satelit artificial al Pământului pe orbită circulară (linie întreruptă) și parabolică (linie punctată (stânga). Orbită Hohmann între planetele P_1 și P_2 (dreapta)

De exemplu, o sondă spațială trimisă de pe Pământ spre Marte, care se mișcă pe o orbită Hohmann are perioada orbitală de 1,4 ani siderali. Momentul la care sonda spațială este trimisă pe o orbită Hohmann spre Marte trebuie ales astfel încât, după 0,7 ani când ajunge la nivelul orbitei lui Marte să întâlnească planeta.

Sistemul Soare - Pământ - Lună

Dacă facem abstracție de Pământ, Luna este obiectul ceresc pe care îl cunoaștem cel mai bine. Ea se află la o distanță de Pământ suficient de mică, astfel încât unele trăsături ale ei pot fi observate cu ochiul liber. Studiind mișcarea ei astronomii din antichitate au dedus că Luna se mișcă în jurul Pământului, la o distanță mult mai mică decât distanța Pământ-Soare și că raza Lunii este mult mai mică decât raza Soarelui. Luna este un corp opac, fără surse proprii de lumină, de aceea este vizibilă de pe Pământ dacă îndreaptă spre acesta, partea ce reflectă lumina primită de la Soare.

Fazele Lunii

Aspectul Lunii se schimbă de la o zi la alta spunem că Luna are faze. Forma sa se modifică treptat de la o seceră luminoasă subțire, care amintește de conturul literei *D* din care lipsește linia verticală, la un disc luminos, ca apoi, treptat, din discul luminos al Lunii să rămână o seceră luminoasă subțire care are conturul literei *C*. Pentru a explica fazele Lunii folosim figura următoare în care, pentru a simplifica lucrurile, presupunem că Luna are o mișcare circulară, pe un cerc cu centrul în centrul Pământului, situat în planul eclipticii, iar Soarele este la distanță suficient de mare de Pământ și de Lună, astfel încât razele lui să cadă sub forma unui fascicul paralel care se reflectă pe emisferele lor îndreptate spre Soare.

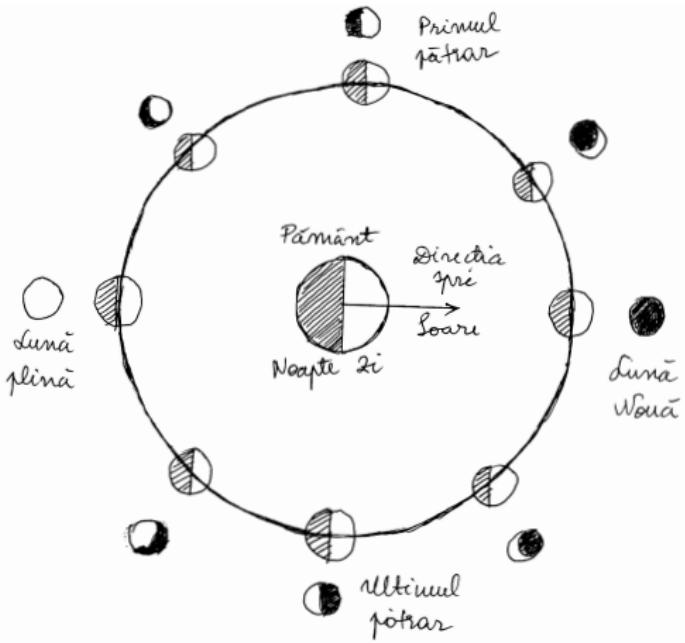


Figura: Fazele Lunii

Lună nouă

- ▶ Când Luna se află între Soare și Pământ, Luna nu se vede de pe Pământ pentru că ea îndreaptă spre noi partea opusă celei pe care cad razele Soarelui.
- ▶ Spunem că Luna este în faza de *Lună nouă*.
- ▶ Luna și Soarele se mișcă printre stele spre răsărit, Soarele descrie în medie 1° pe zi, iar Luna aproximativ 13° pe zi. Datorită mișcării sale spre răsărit, Luna răsare în fiecare zi cu aproximativ 50 de minute mai târziu decât în ziua precedentă.
- ▶ Când Luna este în faza de Lună nouă ea se află pe direcția Soarelui, de aceea cele două corpuri cerești răsar aproape simultan.

Primul pătrar

- ▶ În fiecare zi, Luna se mișcă spre răsărit mai mult decât Soarele, de aceea a doua zi după Luna nouă, ea răsare după ce Soarele a răsărit.
- ▶ La una-două zile după faza de Luna nouă, Luna începe să se vadă pe cer sub forma unei seceri luminoase foarte subțiri, numită popular *Crai nou*.
- ▶ Când jumătate din partea iluminată a Lunii este îndreptată spre noi, ea are forma unui semidisc luminos, și spunem că Luna este la *primul pătrar*¹.

¹Denumirea acestei faze a Lunii este dată de timpul scurs de la Luna nouă până la această fază și anume o *pătrime* din intervalul de timp ce trece între două faze consecutive de Lună nouă.

Lună plină

- ▶ La aproximativ două săptămâni de la Luna nouă, Luna este în faza de *Lună plină* sau *al doilea pătrar*.
- ▶ Atunci, Luna îndreaptă spre noi jumătatea pe care se reflectă razele Soarelui.
- ▶ Între faza de Luna nouă și cea de Lună plină, Luna este *în creștere*, pentru că o fracțiune din ce în ce mai mare din jumătatea Lunii iluminate de Soare este îndreptată spre Pământ.
- ▶ După ce a trecut de faza de Lună plină, Luna *descrește*, pentru că din ce în ce mai puțin din partea Lunii orientată spre Soare este îndreptată spre Pământ.

Ultimul pătrar

- ▶ După o săptămână de la Luna plină, Luna are forma unui semidisc luminos, spunem că este în faza de *ultim pătrar*.
- ▶ După încă o săptămână, în care Luna și-a modificat forma spre o secere luminoasă din ce în ce mai subțire, Luna ajunge pe direcția Soarelui, în faza de Lună nouă și se reia ciclul fazelor Lunii.

Luna e mincinoasă

Observăm că între fazele de Lună plină și Lună nouă, Luna este în creștere, conturul ei are forma literei D, prima literă din descreștere, iar între faza de Lună plină și Luna nouă, când Luna descrește, ea are conturul literei C, literă cu care începe creștere, de aceea spunem că, în limba română², *Luna minte*.

²În alte limbi, de exemplu în limba germană, când Luna crește are forma literei gotice z, de la *zunehmend* care înseamnă crescător, iar când descrește are conturul literei gotice a, prima literă din cuvântul *abnehmend*, care înseamnă descrescător. De aceea spunem că, în limba germană, Luna nu minte.

Luna sinodică

Definiție

Intervalul de timp scurs între două faze consecutive de același tip ale Lunii se numește *lună* sau *perioadă sinodică*.

O lună sinodică are în medie³ 29,53059 zile solare medii.

³Datorită perturbațiilor asupra mișcării Lunii, intervalul de timp după care ea revine într-un punct al orbitei sale, variază periodic în jurul unei valori medii. Aceasta este dată ca perioadă medie a mișcării, pentru că rămâne aproape constantă pe perioade foarte lungi de timp.

Lumina cenușie a Lunii

Când Luna are forma unei seceri luminoase subțiri, pe lângă partea Lunii ce reflectă lumina Soarelui, vedem și restul globului lunar luminat slab de *lumina cenușie a Lunii*. Sursa luminii cenușii este lumina Soarelui reflectată de Pământ, pentru că atunci când Luna este aproape de faza de Lună nouă, pe fața ei întunecată ajung razele Soarelui care sunt reflectate de păturile superioare ale atmosferei terestre orientate spre Soare.

Limbul Lunii vs. terminatorul Lunii

Definiții

Curba care separă discul luminos al Lunii de spațiul interplanetar se numește *limbul Lunii*, iar cea care delimită cea luminoasă de cea întunecată a Lunii se numește *terminator*.

Limbul Lunii este un arc de cerc, iar terminatorul un arc de elipsă sau o dreaptă.

Definiție

Punctele de intersecție a celor două curbe se numesc *puncte de întoarcere*.

Luna siderală

Observată de pe Pământ, Luna se mișcă printre stelele constelațiilor zodiacale, spre răsărit, în același sens ca Soarele, cu aproximativ 13° pe zi.

Definiție

Intervalul de timp scurs între două trecheri succeseive ale Lunii prin dreptul aceleiași stele se numește *lună* sau *perioadă siderală*.

O lună siderală are în medie 27,32166 zile. solare medii.

Perioada sinodică

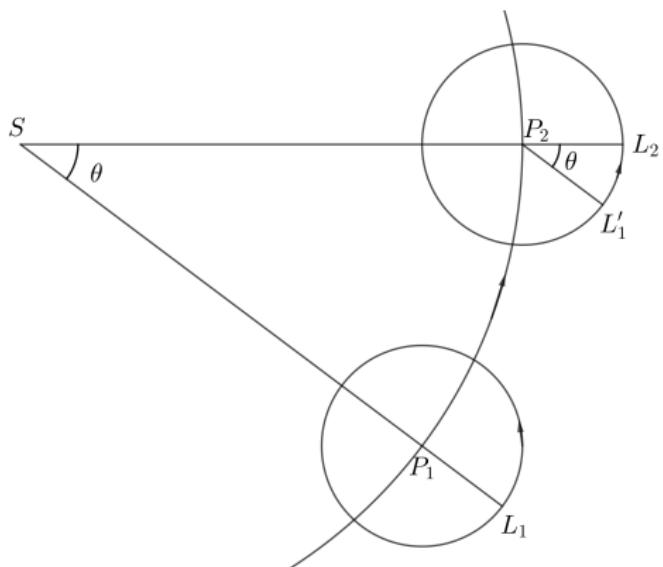


Figura: Luna sinodică vs. luna siderală

- ▶ Presupunem că Luna și Pământul descriu orbite circulare din planul eclipticii.
- ▶ Fie $P_1 L_1 \parallel P_2 L'_1 \Rightarrow$ între cele două configurații trece o **lună siderală**, P_{sid} .
- ▶ Fie L_1 și L_2 două faze de Lună plină \Rightarrow consecutive între cele două configurații trece o **lună sinodică**, P_{sin} .

- ▶ Atunci dacă notăm cu θ unghiul descris de Pământ în acest interval de timp și cu T durata unui an sideral, atunci

$$\theta = \frac{360^\circ}{T} \cdot P_{sin}. \quad (7)$$

- ▶ Într-o lună sinodică, Luna a parcurs $L_1 L'_1 L_2$, egal cu $2\pi + \theta$. Ea descrie un arcul de 2π într-o perioadă siderală, de aceea are loc

$$2\pi + \theta = \frac{2\pi}{P_{sid}} \cdot P_{sin},$$

relație în care dacă înlocuim unghiului θ cu expresia dată de (7), obținem

$$\frac{1}{P_{sin}} + \frac{1}{T} = \frac{1}{P_{sid}} \quad (8)$$

unde $T = 1$ an sideral = 365,25636 zile solare medii.

Faza Lunii poate fi calculată dacă se cunoaște vârsta ei, i.e. timpul care a trecut de când Luna a fost în faza de Lună nouă. Prin definiție, *faza Lunii sau a unei planete*, notată P , este calculată cu ajutorul formulei

$$P = \frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \quad (9)$$

în care ϕ , numit *unghi de fază*, este unghiul cu vârful în centrul Lunii sau al planetei considerate, ale cărui laturi trec prin centrul Soarelui, respectiv centrul Pământului.

Distanța medie Pământ-Lună este aproximativ 400 de ori mai mică decât distanța medie Soare-Pământ, de aceea putem scrie că

$$\phi = 180 - \eta \quad (10)$$

unde η este *elongația Lunii*, unghiul dintre centrul Soarelui și centrul Lunii măsurat din centrul Pământului. Atunci, faza Lunii se poate calcula cu ajutorul relației:

$$P = \frac{1}{2}(1 - \cos \eta). \quad (11)$$

Elongația Lunii crește de la 0° la 360° într-o lună sinodică, de aceea dacă vîrstă Lunii este A , atunci elongația ei este

$$\eta = \frac{360^\circ}{P_{sid}} \cdot A.$$

Orbita Lunii

Pentru a afla distanța medie Pământ-Lună folosim paralaxa orizontală a Lunii. Paralaxa orizontală a Lunii, unghiul sub care se vede din centrul Lunii raza terestră, este egală cu $57'2,2''$. Paralaxa orizontală a Lunii este un unghi de măsură mică, de aceea sinusul lui poate fi aproimat cu măsura unghiului exprimată în radiani, relație care ne conduce la

$$r_L = 60,3 \cdot R_{\oplus},$$

unde r_L este distanța Lună-Pământ, iar R_{\oplus} raza Pământului.

Înlocuind raza medie terestră, $R_{\oplus} = 6371$ km, putem estima distanța Pământ-Lună $r_L = 384400$ km. Diametrul unghiular mediu⁴ al Lunii este egal cu $31'5''$. Cunoscând diametrul unghiular al Lunii și distanța Pământ-Lună, putem obține raza Lunii

$$R_L = 0,272 \cdot R_{\oplus} = 1738 \text{ km.}$$

⁴Orbita Lunii diferă puțin de un cerc, de aceea diametrul ei variază între $29'22''$ și $33'31''$. Pentru a afla distanța medie la Lună folosim valoarea medie a diametrului Lunii văzute de pe Pământ.

Orbita Lunii este o elipsă cu Pământul într-unul dintre focare. Semiaxa mare a orbitei lunare este de 384400 km, iar excentricitatea ei este egală cu 0,05490. Punctul de pe orbita lunară cel mai apropiat de Pământ se numește *perigeu*, notat *P*, iar cel mai îndepărtat *apogeu*, notat *A*. Punctele *A* și *P* se mai numesc și apside, de aceea dreapta determinată de ele este *linia apsidelor*. Planul orbitei Lunii este înclinat față ecliptică cu $5^{\circ}9'$. Dreapta de intersecție a planului orbitei Lunii cu planul eclipticii se numește *linia nodurilor*. Punctele în care linia nodurilor taie orbita Lunii se numesc *nodurile orbitei lunare*. Ele se notează cu *N* și *N'*.

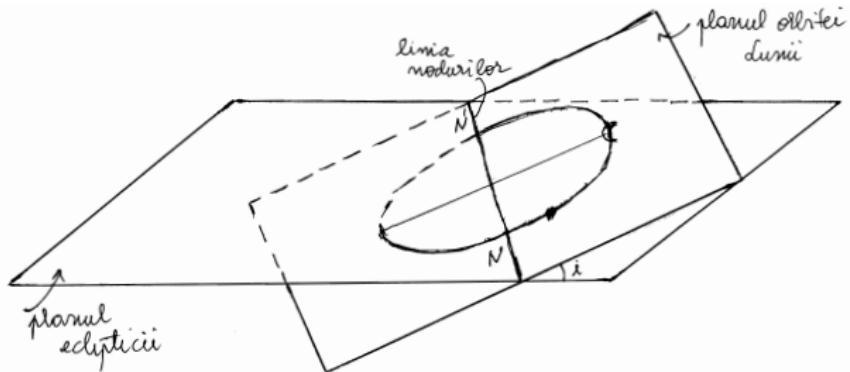


Figura: Înclinarea planului orbitei Lunii și linia nodurilor.

Punctul *N* este *nodul ascendent*, punctul prin care trece Luna din emisfera cerească sudică în cea nordică, iar *N'* este *nodul descendenter*, punctul prin care trece Luna la traversarea eclipticii din emisfera nordică în cea sudică.

Forța de atracție gravitațională cu care Pământul acționează asupra Lunii este cea care ține Luna pe orbita descrisă mai sus. Acțiunea Soarelui, a planetelor mari și a corpurilor din sistemul solar perturbă mișcarea Lunii. Ca urmare, linia apsidelor se mișcă în planul orbitei Lunii, în sens direct, de la apus spre răsărit, mișcare cunoscută sub numele de *rotația orbitei Lunii* (vezi figura de mai sus). Perioada acestei mișcări este de 8,85 ani. Linia nodurilor se rotește în planul orbitei Lunii, în sens retrograd, cu o perioadă egală 18,6 ani. Perioada acestei mișcări este egală cu perioada nutației, pentru că ea este consecința nutației astronomice.

La apropierea Lunii de nodurile orbitei sale sunt posibile eclipsele de Lună și de Soare. De aceea introducem *luna draconitică*, timpul scurs între două trecheri consecutive ale Lunii prinț-unul dintre nodurile orbitei sale. Aceasta are în medie 27,21222 zile solare medii. Între două trecheri consecutive ale Lunii la perigeul orbitei sale trec, în medie 27,55455 zile, perioadă cunoscută sub numele de *lună anomalistică*.

Rotația și librațiile Lunii

Pe suprafața Lunii se pot vedea pete întunecate. Studiind mișcarea lor putem afla informații despre rotația Lunii. Considerăm o pată întunecată de pe Lună și studiem mișcarea ei în raport cu un reper solidar legat de Lună. Observăm că poziția petei în raport cu reperul considerat nu se modifică. Acest lucru este posibil dacă în intervalul de timp considerat Luna se rotește în jurul axei sale cu un unghi egal cu cel cu care se deplasează pe orbită în jurul Pământului.

Înseamnă că perioada de rotație a Lunii în jurul axei proprii este egală cu perioada de revoluție în jurul Pământului, adică rotația și revoluția Lunii sunt sincrone. Ca urmare, Luna îndreaptă spre Pământ o jumătate din suprafața ei, numită *față vizibilă* sau *văzută* a Lunii. Cealaltă jumătate a Lunii se numește *față invizibilă* sau *nevăzută* a Lunii. Datorită unor oscilații mici în jurul centrului ei, de pe Pământ putem vedea mai mult de o jumătate din suprafața Lunii, și anume, aproximativ 59% din suprafața ei.

Luna se mișcă în câmpul gravitațional terestru. Forma de echilibru a Lunii este un elipsoid triaxial, cu semiaxa mare în planul orbitei Lunii, îndreptată spre centrul Pământului.

Mișcarea de rotație a Lunii este uniformă, cea de revoluție nu este uniformă, de aceea semiaxa mare a elipsoidului Lunii nu trece întotdeauna prin centrul Pământului. Când semiaxa mare a elipsoidului lunar nu trece prin centrul Pământului forțele de atracție gravitațională terestră care acționează asupra Lunii tind să modifice direcția semiaxei mari pentru a o aduce la orientarea inițială. Revenirea globului lunar la poziția inițială are loc prin oscilații mici în jurul centrului Lunii. Aceste oscilații, numite *librațiile Lunii*, ne permit să vedem de pe Pământ mai mult de o jumătate din suprafața globului lunar.

Orbita Lunii este o elipsă cu Pământul aflat într-unul dintre focare. Conform legii a II-a lui Kepler, viteza cu care Luna se mișcă pe orbita sa nu este constantă, ea este maximă la perigeu și minimă la apogeu. Amplitudinea acestei mișcări, numită *librație în longitudine*, este de $7,6^\circ$.

Axa de rotație a Lunii este înclinată cu $6,7^\circ$ față de normala la planul orbitei Lunii. De aceea, planul ecuatorului Lunii este înclinat față de planul orbitei Lunii și Luna îndreaptă spre Pământ o jumătate dintr-o lună siderală, emisfera care conține polul nord al Lunii, iar celaltă jumătate de lună siderală, emisfera polului sud al Lunii, aşa cum se poate vedea din figura următoare. Aceasta este *librația în latitudine*. Datorită ei putem vedea regiunile din vecinătatea polilor Lunii. Amplitudinea ei este de $6,7^\circ$.

Distanța dintre Pământ și Lună este suficient de mică, astfel încât emisfera îndreptată de Lună către Pământ, să nu fie aceeași pentru toți observatorii de pe Pământ, cum se poate vedea din figura alăturată. Datorită rotației diurne un observator de pe Pământ ocupă poziții diferite în raport cu Luna, la momente diferite din zi. De aceea, fața pe care Luna o îndreaptă spre el când se află la răsărit, de exemplu, diferă de cea îndreptată spre el când Luna se află aproape de apus. Aceasta este *librația diurnă*. Amplitudinea ei este de aproximativ 1° .

Aceste librații sunt determinate de geometria mișcării Lunii în jurul Pământului, de aceea se numesc *librații geometrice*. În afara lor s-au observat oscilații mici ale globului lunar în jurul centrului Lunii, datorate modificării distribuției materiei în interiorul Pământului sau a Lunii. Acestea sunt numite *librații fizice* și sunt greu de modelat. Din observații s-a dedus că amplitudinea lor este mult mai mică decât a celor de natură geometrică.

Pentru a afla faza Lunii la un moment dat accesați pagina:
<https://moon.nasa.gov/moon-in-motion/moon-phases/>
La secțiunea dedicată librațiilor Lunii (*Our Wobbly Moon*) urmărind video-ul demonstrativ puteți vedea cum Luna se apropie și se îndepărtează de noi, pentru că diametrul ei unghiular variază și cum la marginea Lunii se văd regiuni diferite la momente diferite, datorită librației în latitudine.

Astronomie

Cursul 10 - Eclipse de Lună și de Soare

Cristina Blaga

2 decembrie 2021

Eclipse de Soare și de Lună

- ▶ Pământul și Luna sunt corpuri opace, fără surse de lumină proprii. Ele primesc lumină de la Soare.
- ▶ Pe direcția Soarelui, în sens opus lui, în spatele Pământului și al Lunii, apar regiuni de umbră în care ajunge o parte din lumina Soarelui.
- ▶ Când Luna traversează zona de umbră a Pământului are loc o *eclipsă de Lună*, iar când Pământul trece prin regiunea de umbră a Lunii spunem că se produce o *eclipsă de Soare*.

- ▶ În timpul unei eclipse de Lună, strălucirea Lunii scade, pentru că la traversarea regiunii de umbră a Pământului, Luna își pierde sursa de lumină.
- ▶ În timpul eclipselor de Soare luminozitatea Soarelui **nu** se modifică lucru ce poate fi observat din afara regiunii de umbră a Lunii, strălucirea Soarelui scade pentru observatorii care văd discul Lunii acoperind parțial sau total discul Soarelui.

Eclipse și ocultații

Definiții

La trecerea unui corp ceresc opac prin conul de umbră al altui corp ceresc opac spunem că are loc o *eclipsă*, iar când un corp ceresc opac trece prin fața unei stele spunem că se produce o *ocultație*.

Observație

Eclipsele de Soare sunt ocultații de Soare, dar ele au fost denumite aşa de astronomii antichității, care le-au observat și explicat corect, motive pentru care le numim în continuare eclipse de Soare.

Eclipse de Lună

- ▶ Eclipsele de Lună sunt cunoscute și sub numele de *întunecimi de Lună*, pentru că la intrarea în conul de umbră terestru suprafața Lunii se întunecă.
- ▶ Considerând că Soarele și Pământul sunt corpuri sferice, *conul de umbră terestru* mărginit de tangentele exterioare ale Soarelui și Pământului are înălțimea medie¹ de aproximativ 217 raze terestre.
- ▶ Orbita Lunii, considerată circulară, are raza egală cu 60 de raze terestre, de aceea Luna trece din când în când prin conul de umbră terestru.

¹Distanța dintre Pământ și Soare variază în timpul unui an din cauza excentricității orbitei terestre. Pentru calculul înălțimii medii a conului de umbră terestru folosim distanța medie Soare-Pământ.

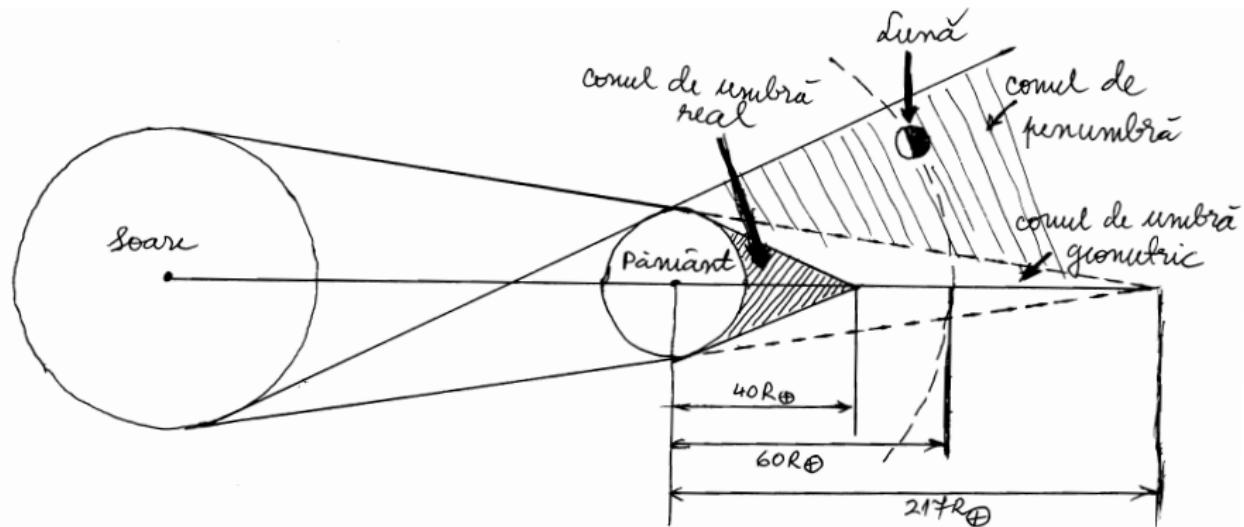


Figura: Conul de umbră geometric, adevărat și conul de penumbră al Pămâtului

Conurile de umbră ale Pământului

- ▶ Din cauza refracției astronomice la trecerea lor prin atmosfera terestră razele de lumină tangente Pământului sunt deviate de la direcția lor inițială și formează un con de umbră cu înălțimea medie de aproximativ 41 raze terestre. Conul de umbră astfel obținut se numește *con de umbră adevărat*.
- ▶ Conul de umbră determinat de tangentele exterioare la Pământ și Soare se numește *con de umbră geometric*.
- ▶ În spatele Pământului există o regiune în care ajung numai o parte din razele venite de la Soare. Ea este mărginită de tangentele interioare duse la Soare și Pământ, considerate corpuri sferice și se numește *conul de penumbră al Pământului*.

Luna în umbra Pământului

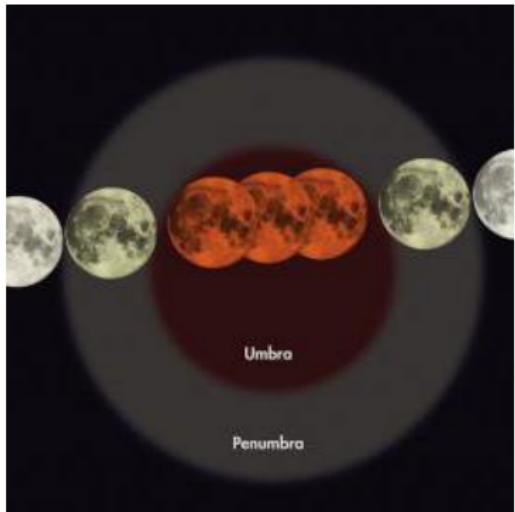


Figura: Luna e gălbuiie în penumbră și roșiatică în umbra Pământului

- ▶ Dacă secționăm conurile de umbră și penumbră ale Pământului cu un plan perpendicular pe axa lor comună la distanță egală cu semiaxa orbitei Lunii obținem două cercuri cu centrul pe axa conurilor.
- ▶ La trecerea prin penumbra și umbra Pământului aspectul Lunii se schimbă.



Figura: Lună roșiatică la trecerea prin conul de umbră al Pământului

Eclipsă totală vs. parțială

- ▶ Momentul în care Luna intră în conul de penumbră al Pământului reprezintă începutul eclipsei parțiale.
- ▶ În cazul unei eclipse totale momentul în care Luna intră în conul de umbră terestru reprezintă începutul eclipsei totale.
- ▶ La ieșirea Lunii din conul de umbră terestru se termină eclipsa totală. Atunci discul Lunii este tangent exterior conului de umbră terestru.
- ▶ La ieșirea Lunii din conul de penumbră terestru spunem că eclipsa parțială de Lună a luat sfârșit.

Eclipsă de Lună



Figura: Aspectul Lunii în timpul eclipsei (I)

Eclipsă de Lună



Figura: Aspectul Lunii în timpul eclipsei (II)

Durata unei eclipse. Maximul eclipsei

- ▶ Durata unei eclipse parțiale de Lună, i.e. intervalul de timp în care Luna traversează conul de penumbră terestru este de 3-4 ore.
- ▶ Conul de umbră terestru este traversat de către Lună în 1-2 ore, aceasta fiind durata totalității eclipsei de Lună.
- ▶ Momentul de maxim al eclipsei este momentul în care centrul discului Lunii se află la distanță minimă de linia dată de centrele Soarelui și Pământului. Maximul eclipsei se calculează ca medie aritmetică a momentelor de început și sfârșit a eclipsei totale sau parțiale.

Eclipsele de Soare

- ▶ *Eclipsele de Soare* se produc când Pământul trece prin conul de umbră al Lunii.
- ▶ Conul de umbră lunar este mărginit de tangentele exterioare ale Soarelui și Lunii considerate corpuri sferice. Înălțimea lui² medie este de aproximativ 374000 km.
- ▶ Distanța de la Pământ la Lună variază între aproximativ 363300 km și 405504 km.

²Luna nu are atmosferă de aceea razele de lumină tangente sferei lunare mărginesc conul de umbră real al Lunii.

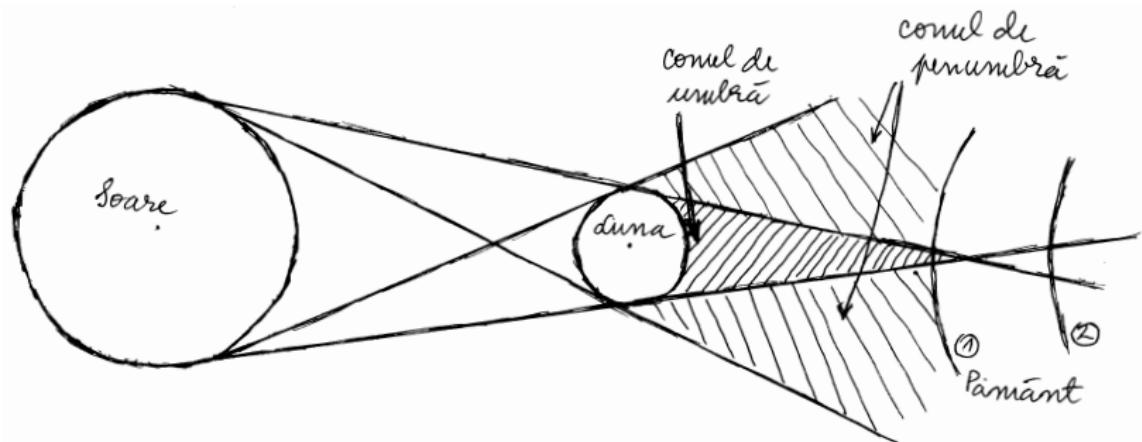


Figura: Geometria eclipselor de Soare totale (Pământul în poziția 1) și inelare (Pământul în poziția 2).

Eclipsă totală. Eclipsă inelară

- ▶ Conul de umbră al Lunii intersectează suprafața Pământului numai când Luna este în apropierea perigeului și a unui nod al orbitei sale. Atunci observatorii aflați în interiorul regiunii comune conului de umbră lunar și suprafeței Pământului pot vedea o *eclipsă totală de Soare*.
- ▶ Dacă prelungirea conului de umbră intersectează suprafața Pământului atunci observatorii din regiunea de intersecție văd o *eclipsă inelară de Soare*.

- ▶ Diametrul unghiular al Soarelui este aproximativ egal cu cel al Lunii. Când Luna este aproape de perigeu, diametrul ei unghiular este mai mare decât al Soarelui. În momentul de maxim al eclipsei Luna acoperă întreg discul Soarelui, de aceea eclipsa se numește *totală*.
- ▶ Când Luna este aproape de apogeu, diametrul ei unghiular este mai mic decât diametrul unghiular al Soarelui. În momentul de maxim al eclipsei, coroana circulară din discul Soarelui care nu este acoperită de Lună se vede ca un inel luminos, de aceea eclipsa se numește *inelară*.

- ▶ La intersecția conul de umbră al Lunii cu suprafața Pământului apare o pată întunecată, cunoscută sub numele de *pata de umbră* sau *umbra Lunii*. Observatorii aflați la un moment dat în interiorul umbrei Lunii văd discul Soarelui acoperit de Lună.
- ▶ Datorită rotației terestre diurne și a mișcării Lunii în raport cu Pământul pata de umbră se mișcă pe suprafața Pământului, descriind *fâșia* sau *banda de totalitate a eclipsei*, zonă din care eclipsa se poate vedea ca totală sau inelară.

Umbra Lunii



Figura: Umbra Lunii văzută de pe ISS (29 martie 2006)

- ▶ Diametrul maxim al fâșiei de totalitate este de 265 m, iar lungimea ei poate ajunge la 10-12 mii de km. Punctele care se află la distanțe egale de limitele nordice și sudice ale fâșiei de totalitate alcătuiesc *linia de centralitate a eclipsei*.
- ▶ Umbra se deplasează pe Pământ de la vest la est cu aproximativ 0,5 km/s. Pe limita vestică, respectiv estică a benzii de totalitate a eclipsei se găsesc locurile de pe Pământ pentru care eclipsa începe și se sfârșește la răsăritul, respectiv apusul Soarelui.

- ▶ Tangentele interioare ale Soarelui și Lunii, considerate corpuri sferice, mărginesc *conul de penumbră al Lunii*. Din locurile de pe Pământ aflate în conul de penumbră al Lunii, o parte din discul Soarelui se vede acoperită de discul lunar, de aceea spunem că observatorii de acolo văd o *eclipsă parțială de Soare*.
- ▶ Diametrul maxim al penumbrei este de aproximativ 1000 km, iar lungimea *benzii de penumbră*, zonă de pe Pământ de unde poate fi obsevată eclipsa parțială, este de 10-12 mii de km.

- ▶ În timpul eclipselor de Soare, Luna se mișcă de la vest la est pe discul Soarelui.
- ▶ *Primul contact* reprezintă momentul în care discurile celor două corpuri sunt tangente exterior.
- ▶ *Al doilea contact* este momentul în care discul Lunii este tangent interior discului Soarelui. În acest moment, la eclipsele totale de Soare, discul Lunii acoperă întreg discul Soarelui.
- ▶ Între primul și al doilea contact strălucirea Soarelui scade, pentru că suprafața lui este acoperită treptat de Lună. De regulă Soarele trebuie privit printr-un filtru de protecție sau în proiecție pe un ecran. La eclipsele totale de Soare, după momentul celui de-al doilea contact, putem privi Soarele ocultat de Lună direct, fără filtru de protecție.

- ▶ La eclipsele totale, cu foarte puțin timp înainte de al doilea contact, pe marginea discului solar se pot vedea raze de Soare care scapă prin văile de pe marginea discului Lunii, transformând marginea Soarelui într-un șir de sfere minuscule, foarte strălucitoare, cunoscute sub numele de *mărgelele lui Bailey*.
- ▶ În primele secunde după al doilea contact se poate vedea cromosfera Soarelui, după care devine vizibilă coroana lui. Întinderea coroanei solare este dată de activitatea Soarelui. Ea are dimensiuni reduse în anii de minim de activitate solară și poate să ajungă la zece raze solare la maximul activității lui.

Eclipsă de Soare totală

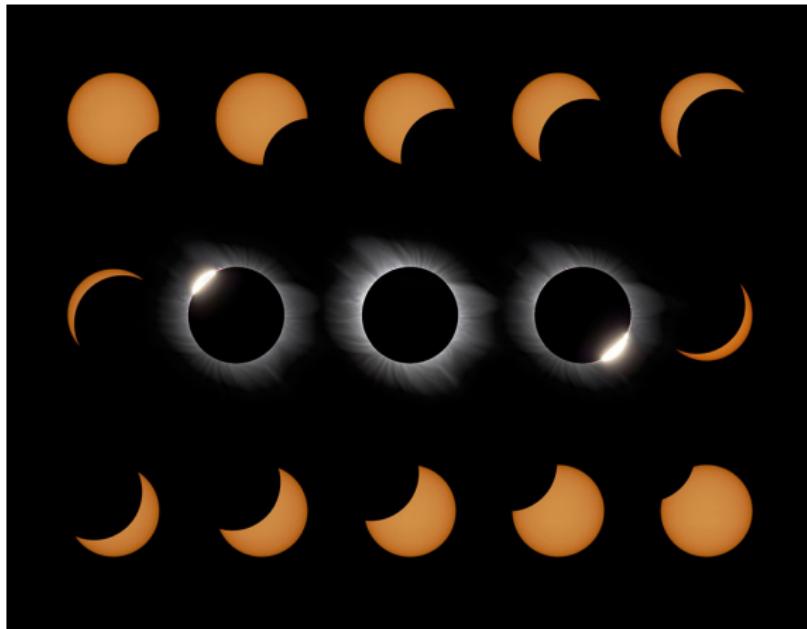


Figura: Aspectul Soarelui în timpul unei eclipse totale de Soare

- ▶ Al *treilea contact* reprezintă momentul în care discul Lunii este din nou tangent interior discului Soarelui.
- ▶ La eclipsele totale, după cel de-al treilea contact primele raze de Soare care scapă prin regiunile de altitudine joasă aflate la marginea discului Lunii formează *inelul cu diamant*. Al treilea contact reprezintă sfârșitul totalității eclipsei. Din acest moment Soarele trebuie privit din nou printr-un filtru de protecție sau în proiecție pe un ecran.
- ▶ Al *patrulea contact* este momentul în care discul Lunii eliberează complet discul Soarelui, cele două discuri fiind tangente exterior. Acesta marchează sfârșitul eclipsei.

Inelul de diamant



Figura: Inelul de diamant și mărgelele lui Bailey

- ▶ Intervalul de timp scurs între al doilea și al treilea contact reprezintă durata totalității eclipsei. O eclipsă totală de Soare poate dura maxim $7,3^m$, durata medie a acestor eclipse fiind de 2-3 minute.
- ▶ La eclipsele inelare durata maximă a totalității este de aproximativ 11^m . În timpul eclipselor inelare, discul Lunii nu acoperă întreg discul Soarelui, de aceea nu putem vedea cromosfera sau coroana solară și Soarele trebuie privit prin filtru de protecție sau proiectat pe un ecran chiar și în timpul totalității lor.

Coroana solară



Figura: Coroana solară devine vizibilă în timpul totalității eclipsei de Soare

Eclipsă de Soare inelară

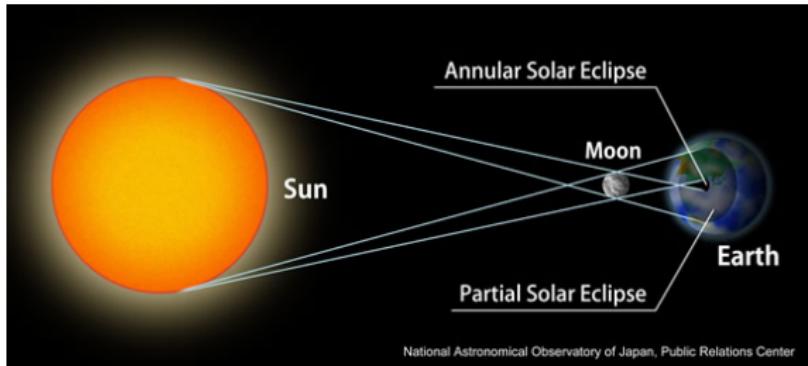


Figura: Prelungirea conului de umbră lunar ajunge pe suprafața Pământului

Eclipsă de Soare inelară



Figura: Aspectul Soarelui în timpul unei eclipse inelare

Eclipsă de Soare inelară

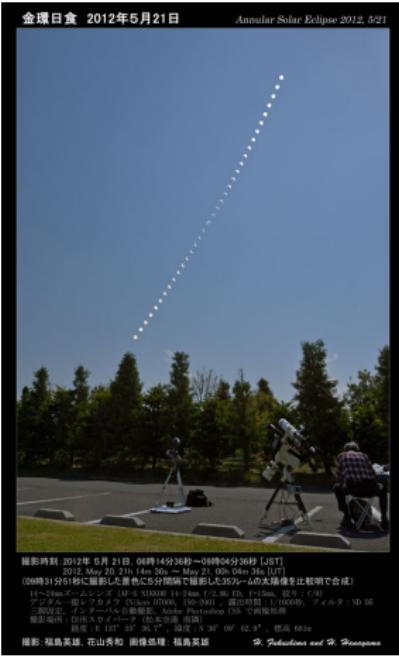


Figura: Eclipsa inelara din 20 mai 2012

Eclipsă de Soare hibridă

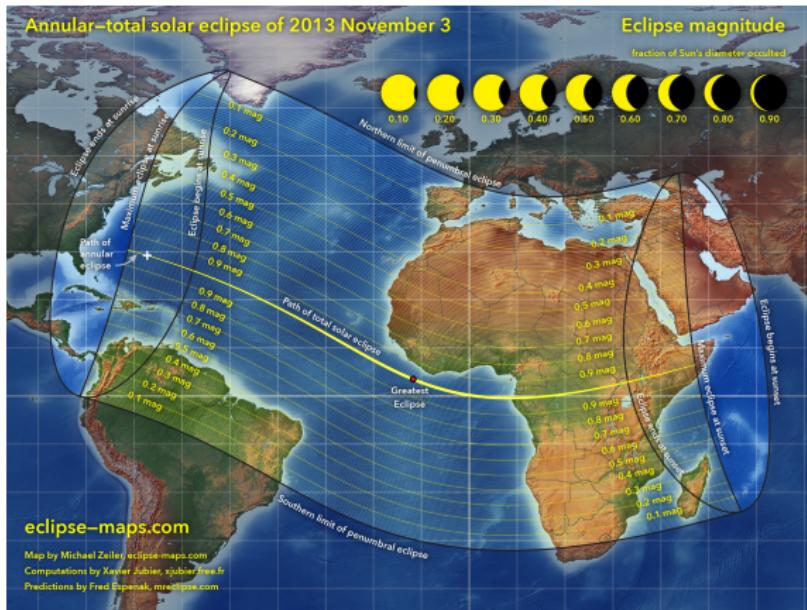


Figura: Eclipsa de Soare din 3 noiembrie 2013 a fost hibridă

Eclipsă de Soare hibridă

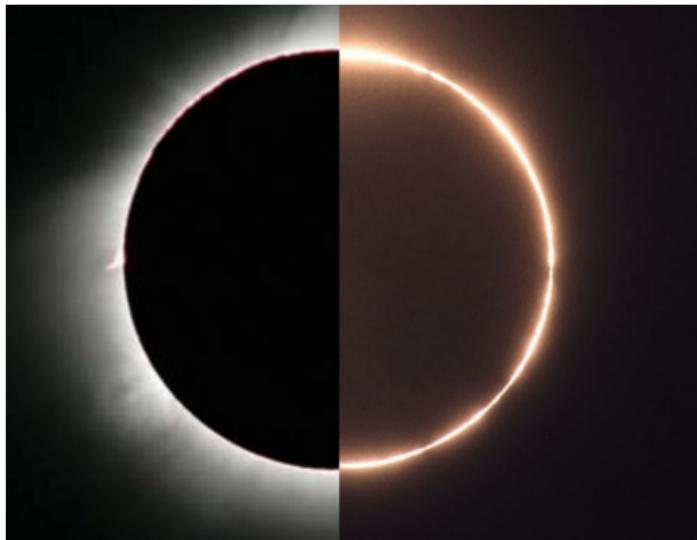


Figura: Aspectul Soarelui pentru doi observatori diferenți

- ▶ *Eclipsele* se produc atunci când centrele Soarelui, Pământului și Lunii sunt aproape coliniare.
- ▶ La *eclipsele de Lună*, Pământul se află între Soare și Lună, Luna fiind în faza de Lună plină.
- ▶ În timpul mișcării Lunii prin conul de penumbră al Pământului suprafața ei este gălbuie, iar în timpul totalității suprafața Lunii devine roșiatică.

În timpul eclipselor de Soare, Luna este între Soare și Pământ, în fază de Lună nouă, fază în care Luna nu este vizibilă de pe Pământ, pentru că îndreaptă spre noi fața opusă Soarelui. De aceea, modificarea strălucirii Soarelui în plină zi și restul fenomenelor ce se produc în timpul eclipselor de Soare au stârnit interesul, curiozitatea și deseori teama celor care le-au observat.

- ▶ Orbita lunară este înclinată pe ecliptică cu $5^\circ 9'$, unghi de aproximativ şase ori mai mare decât diametrul unghiular al Soarelui și al Lunii, de aceea eclipsele de Soare sau de Lună nu se produc de fiecare dată când Luna este în faza de Lună nouă sau Lună plină.
- ▶ Ele au loc numai când Luna și Soarele se află simultan în vecinătatea liniei nodurilor orbitei lunare.

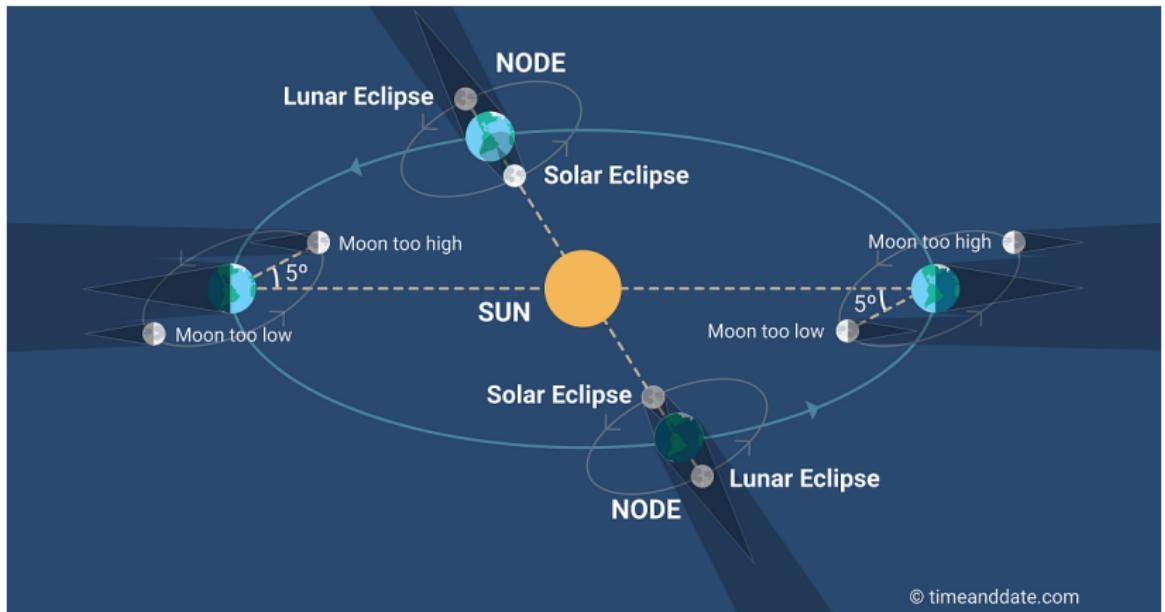


Figura: Planul orbitei lunare și planul eclipticii

- ▶ Din cauza nutăției linia nodurilor se rotește în sens retrograd în planul eclipticii. Intervalul de timp dintre două treceri consecutive ale Soarelui prin nodul ascendent al orbitei Lunii se numește *anul draconitic* sau *anul eclipselor*.
- ▶ Pentru a determina durata acestui an, notată S , folosim perioada anului sideral, notată T , și perioada nutăției, notată P .

- ▶ În intervalul de timp dintre două trecheri consecutive ale Soarelui prin nodul ascendent al orbitei Lunii, linia nodurilor se mișcă retrograd în planul eclipticii cu unghiul

$$\theta = \frac{360^\circ}{P} \cdot S,$$

pe când Soarele se mișcă în sens direct cu unghiul

$$360^\circ - \theta = \frac{360^\circ}{T} \cdot S.$$

Înlocuind θ și simplificând relația găsim

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} + \frac{1}{P}.$$

- ▶ Pentru a afla durata anului eclipselor înlocuim în relația precedentă $T = 365,25$ zile solare medii, $P = 6798,3$ zile solare medii și obținem $S = 346,62$ zile solare medii.
- ▶ Astfel, intervalul de timp scurs între trecerea Soarelui prin nodul ascendent și descendent al Lunii este de 173,32 zile solare medii.
- ▶ Într-un an calendaristic au loc maxim 7 eclipse, 5 de Soare și 2 de Lună.

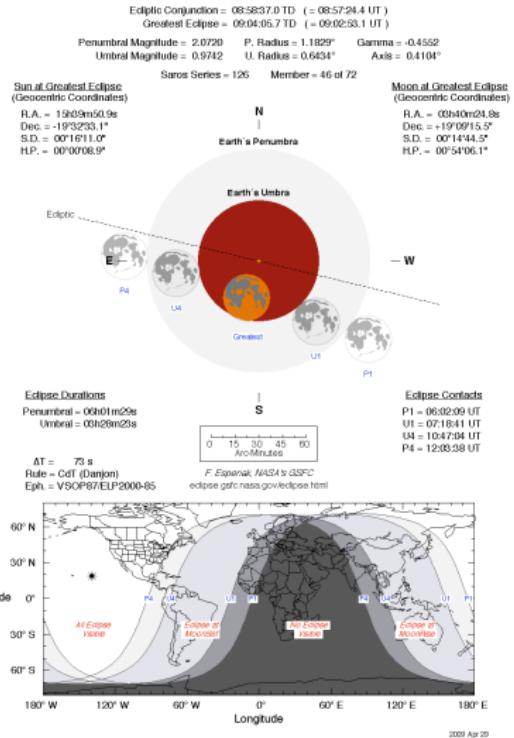
- ▶ Cu toate că numărul de eclipse de Soare care au loc într-un an este mai mare decât numărul de eclipse de Lună, un observator aflat într-un loc dat de pe Pământ poate observa în timpul vieții sale mai multe eclipse de Lună decât eclipse de Soare, pentru că eclipsele de Lună pot fi văzute de toți observatorii de pe Pământ care au Luna deasupra orizontului în timpul eclipsei, adică mai mult de jumătate din globul terestru, pe când eclipsele de Soare pot fi observate numai de observatorii care se află în penumbra Lunii, regiune care are o întindere de cel mult un sfert din suprafața Pământului.

- ▶ În medie dintr-un loc dat de pe Pământ se poate vedea o eclipsă totală de Soare o dată la 300 de ani. În secolul trecut teritoriul țării noastre s-a aflat pe linia de centralitate a eclipselor totale din 15 februarie 1961 și din 11 august 1999, iar în secolul acesta banda de totalitate a eclipsei din 3 septembrie 2081 va trece prin țara noastră.
- ▶ Informațiile complete despre eclipsele care se produc într-un an se pot găsi în anuarele astronomice sau pe internet pe pagini speciale dedicate eclipselor, cum sunt cele de la NASA <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html> sau <https://moon.nasa.gov/moon-in-motion/eclipses/>.

Eclipsele anului 2021

- ▶ Eclipsa inelară de Soare din 10 ianuarie - vizibilă din America de Nord, Europa, Asia.
- ▶ Eclipsa totală de Soare din 4 decembrie - vizibilă din Antarctica, S Africii, S Oceanului Atlantic.
- ▶ Eclipsa totală de Lună din 26 mai vizibilă din Asia, Australia, Pacific, America de Sud și Nord.
- ▶ Eclipsa parțială de Lună din 19 noiembrie, vizibilă din America de Nord și Sud, Europa de Nord, Asia de Est, Australia, Pacific.

Partial Lunar Eclipse of 2021 Nov 19

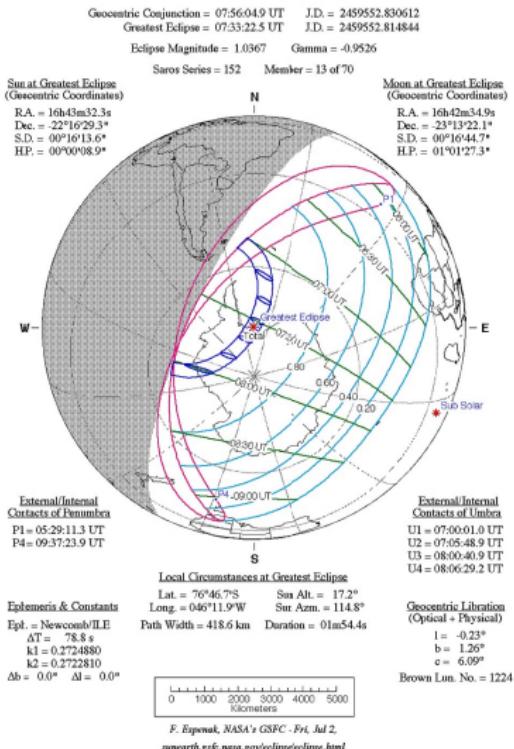


Eclipsa de Lună din 19 noiembrie 2021

Pe pagina *Moon in motion* la adresa

<https://moon.nasa.gov/news/168/an-almost-total-lunar-eclipse/>
găsiți caracteristici ale eclipsei (de unde s-a văzut, momentele de contact, durată), un video al eclipsei, și.a.

Total Solar Eclipse of 2021 Dec 04



F. Espenak, NASA's GSFC - Fri, Jul 2,
sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html

Eclipsa de Lună din 4 decembrie 2021

Pe pagina <http://eclipsewise.com/solar/SAnimate>/
SAnimate2001/SE2021Dec04T.gif găsiți o simulare a eclipsei.



© Thanyakrit Santikanuporn

Figura: Eclipsa totală de Soare, din 20 martie 2015, vizibilă din Atlanticul de Nord, Insulele Feroe, N Europei, fotografiată din Svalbard (Norvegia) a fost fotografia zilei în astronomie (<https://apod.nasa.gov/apod/ap150420.html>) în 20 aprilie 2015.

- ▶ Deși calculele pentru aflarea momentelor de început și de sfârșit al eclipselor sunt complicate, astronomii din antichitate erau în stare să le determine. Prezicerile lor aveau la bază periodicitatea eclipselor observate.
- ▶ Astronomii babilonieni au remarcat că eclipsele se repetă în aceeași ordine după un interval de timp. Perioada ciclului observat de ei este de 223 de luni sinodice, 6585,32 zile solare medii, sau aproximativ 242 luni draconitice, 6585,36 zile solare medii.

- ▶ Exprimată în ani, durata acestei perioade numite *saros* este de 18 ani și 11 zile și 8 ore³.
- ▶ Perioada unui saros este aproximativ egală cu 239 luni anomalistice, 6585,54 zile și 19 ani draconitici, 6585,78 zile. Într-un ciclu saros intră 70 de eclipse, 41 de Soare și 29 lunare.

³Durata unui ciclu saros este de 18 ani 11 zile și 8 ore sau 18 ani 10 zile și 8 ore în funcție de numărul de ani bisecți din acest interval.

- ▶ În 432 î. Ch astronomul grec Meton a observat că 235 luni sinodice sunt aproximativ egale cu 19 ani calendaristici. Înseamnă că după 19 ani fazele Lunii se repetă în aceeași zi.
- ▶ De exemplu, după eclipsa totală de Soare din 11 august 1999 va avea loc o eclipsă parțială de Soare în 11 august 2018 vizibilă din vecinătatea polului nord geografic.

Pentru laboratorul 6 vă rog să vă instalați alw
(<http://www.erictb.com/astronomylab2>) și Stellarium
(<http://stellarium.org/>).

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

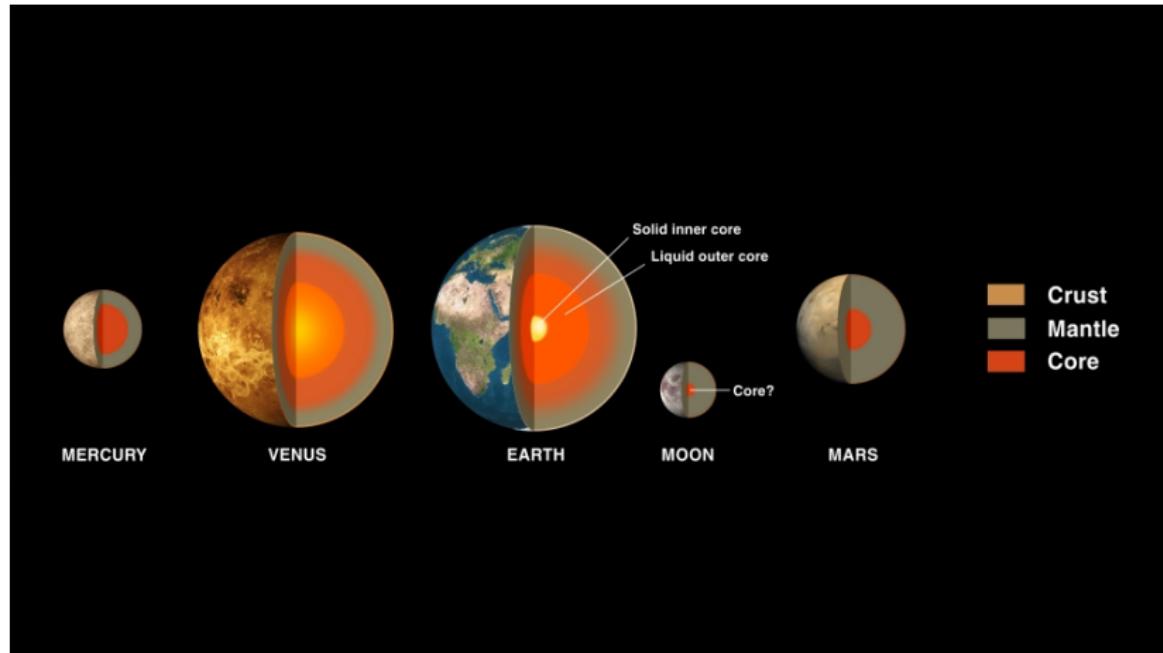


Figura: Crusta, mantaua și nucleul planetelor terestre (sursa NASA)

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)

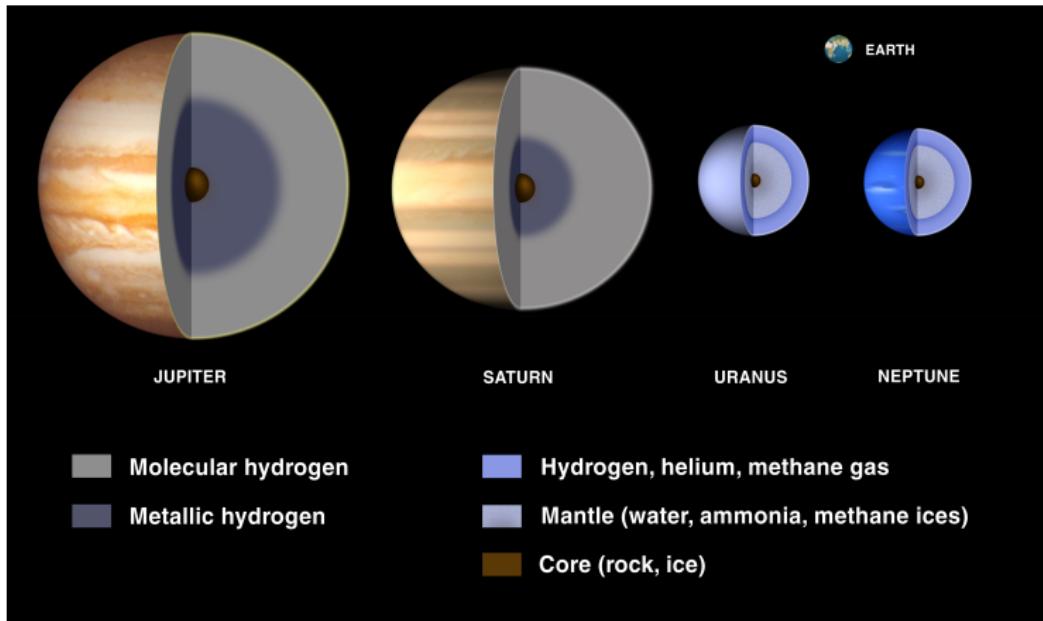


Figura: Interiorul planetelor joviene sau gigante (sursa NASA)

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.

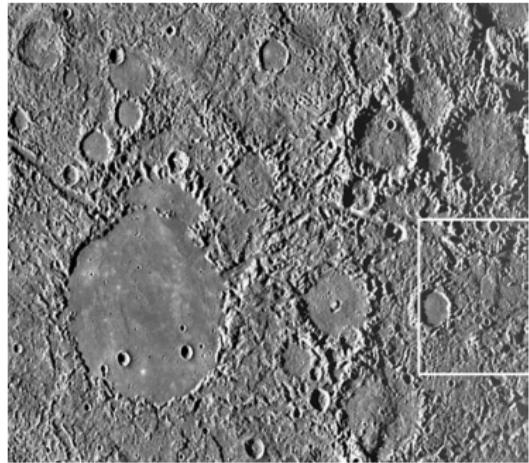


Figura: Detalii din suprafața planetei Mercur

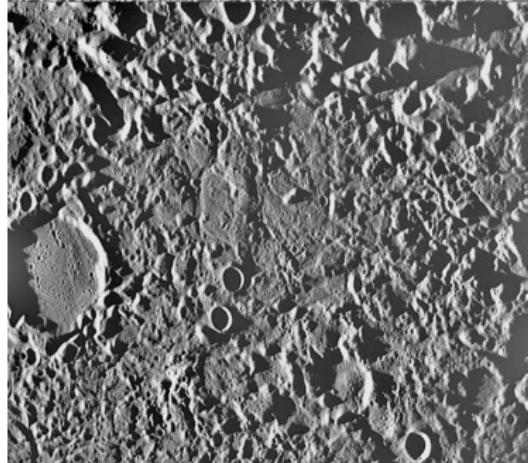


Figura: Detaliu la detaliul din suprafața planetei Mercur

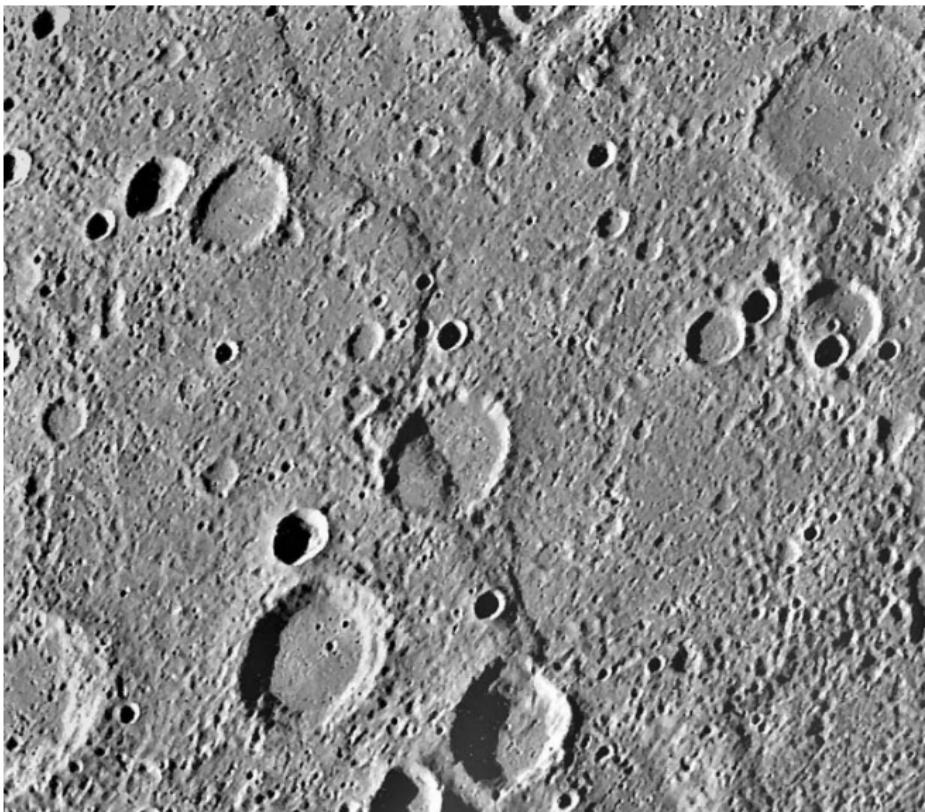


Figura: Încreștură de scoarță care traversează relieful lui Mercur

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.

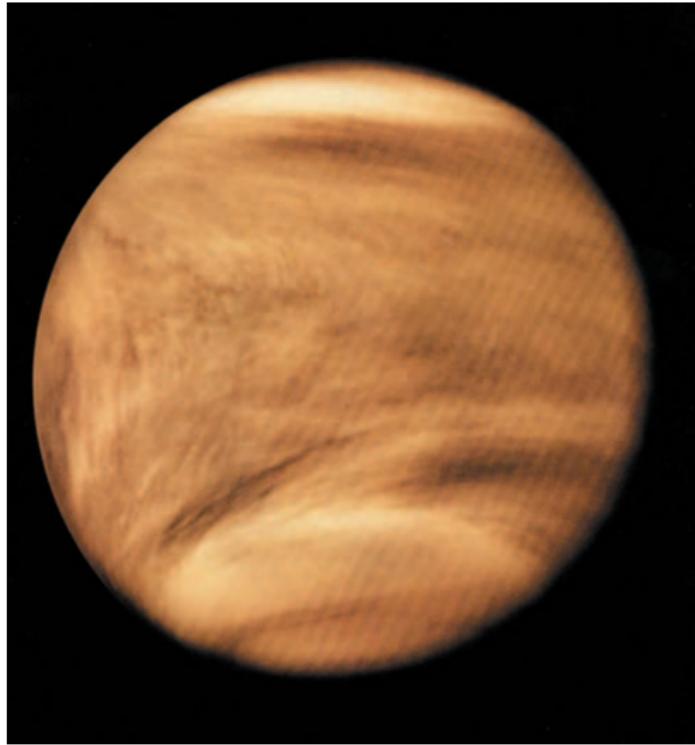


Figura: Planeta Venus acoperită de nori

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.

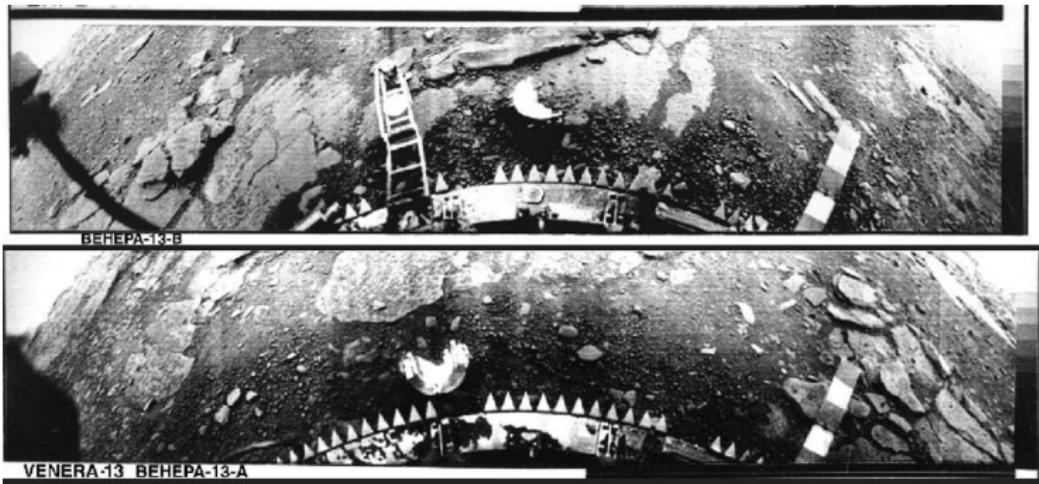


Figura: Primele imagini ale suprafeței planetei Venus

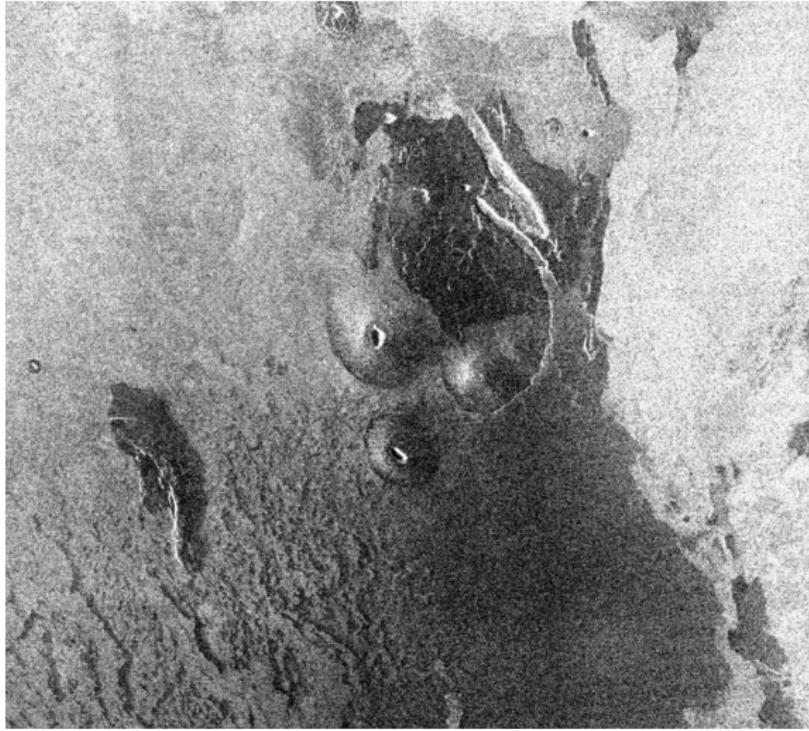


Figura: Cratere de impact pe suprafata planetei Venus

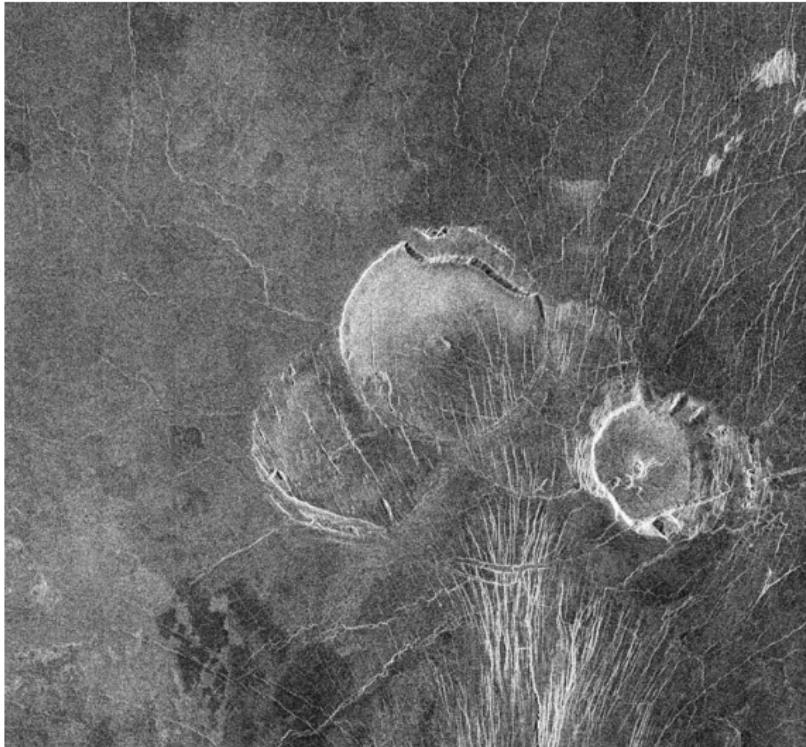


Figura: Cratere de impact și vulcanice pe suprafața planetei Venus

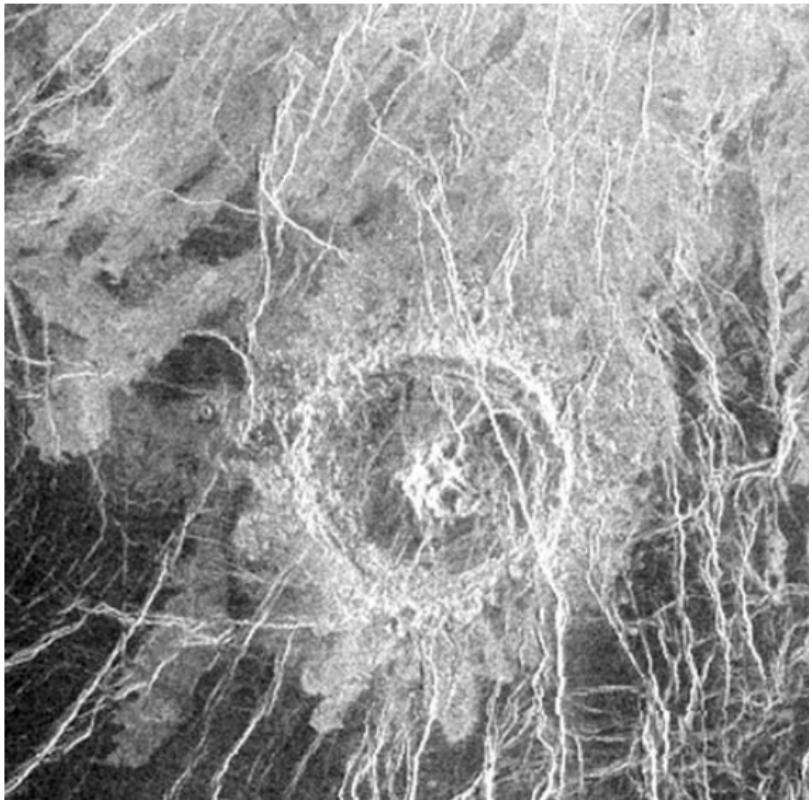


Figura: Eroziunea solului la suprafața planetei Venus

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.

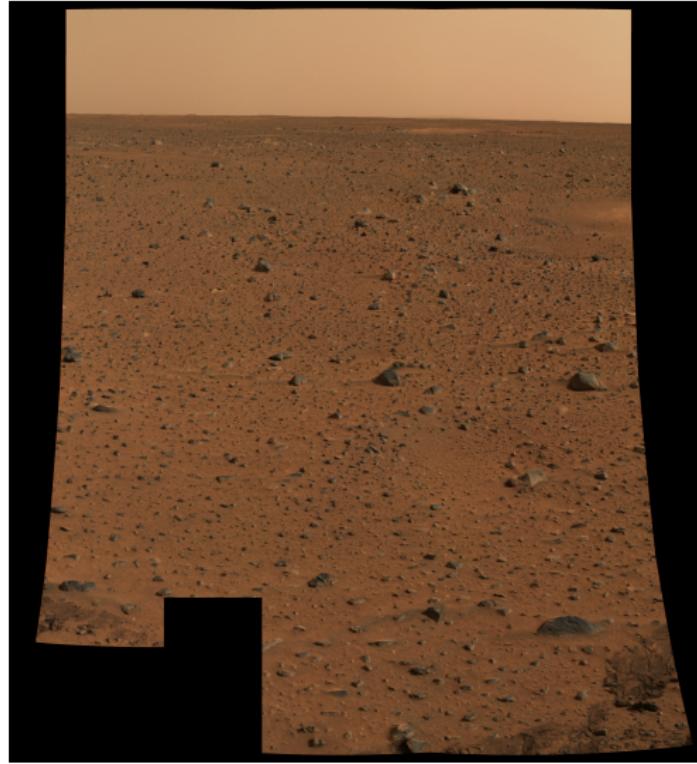


Figura: Suprafața lui Marte fotografiată de misiunea spațială Spirit

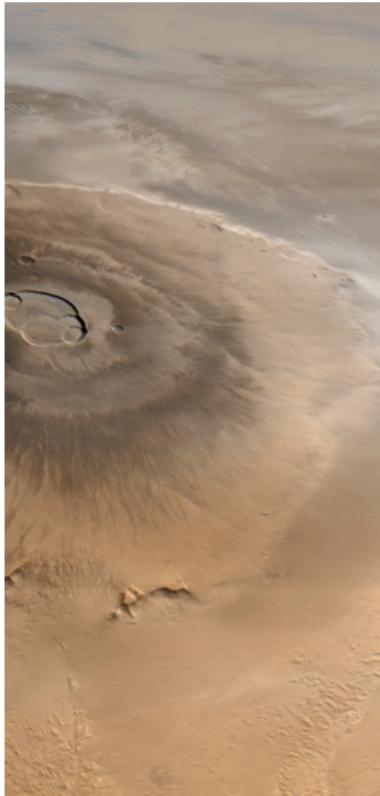


Figura: Muntele Olimp-cel mai înalt munte din sistemul solar



Figura: Muntele Olimp-munte de încrețire

Astronomie

Cursul 12 - Planete, planete pitice și asteroizi

Cristina Blaga

14 decembrie 2021

Sateliții mari ai planetelor

Definiții

Spunem că un corp descrie o *orbită kepleriană* dacă în timpul mișcării sale sunt îndeplinite cele trei legi deduse empiric de Kepler.

Prin *satelit* al unei planete înțelegem un corp care se mișcă în câmpul gravitațional al planetei pe o orbită kepleriană.

Planete terestre

Planetele terestre au puțini sateliți:

- ▶ Mercur și Venus nu au nici un satelit.
- ▶ Pământul are un satelit mare - Luna.
- ▶ Marte are doi sateliți mici: Phobos și Deimos¹.

¹Sateliții planetei Marte au primit numele unor personaje din mitologia greacă - Phobos și Deimos - Spaima și Furia - însotitori ai zeului războiului Marte.

Planete gigante

- ▶ Planetele gigante au un număr mare de sateliți, cei mai mulți descoperiți în urma analizei datelor de observație ale misiunilor spațiale.
- ▶ Sondele spațiale care s-au apropiat de planete au descoperit corpuri de dimensiuni mici, care se mișcă în jurul planetelor, ce nu pot fi văzute de pe Pământ.
- ▶ În continuare vom descrie cei șase sateliți mari ai planetelor gazoase, sateliți care au dimensiuni comparabile cu Luna:
 - ▶ Io, Europa, Ganymede și Callisto - sateliții galileeni ai lui Jupiter,
 - ▶ Titan - satelitul lui Saturn,
 - ▶ Triton - satelitul lui Neptun.

Sateliții galileeni

Jupiter are patru sateliți mari - Io, Europa, Ganymede și Callisto.

Ei sunt numiți *sateliți galileeni* pentru că au fost descoperiți de Galileo Galilei², în 1610, cu ajutorul lunetei sale.

Sateliții galileeni au orbite aproape circulare situate în planul ecuatorial al planetei.

²Descoperirea acestor sateliți a însemnat revoluționarea ideilor despre Univers. Atunci se credea că Pământul este centrul Universului, i.e. toate corpurile din Univers: planetele, Soarele, Luna și stelele se mișcă în jurul lui. Descoperirea sateliților galileeni, care se mișcau în jurul altui corp din Univers, contrazicea teoria geocentrică și venea în sprijinul teoriei heliocentrice care afirma că Soarele este în centrul Universului, planetele mișcându-se în jurul lui.



Figura: Sateliții galileeni

Titan și Triton

- ▶ Saturn are un satelit mare - Titan - descoperit de Christian Huygens în 1655.
- ▶ Cel mai mare satelit al lui Neptun, numit Triton, a fost descoperit de William Lassell, în 1846, la câteva săptămâni după ce planeta Neptun a fost văzută prima dată de Johann Galle.

- ▶ Ganymede, Titan și Callisto au diametrul asemănător cu Mercur, ceilalți trei au dimensiuni comparabile cu Luna.
- ▶ Densitatea medie a sateliților Io și Europa este comparabilă cu densitatea Lunii, restul sateliților au densitate cam 2/3 din densitatea Lunii, *i.e.* aproximativ 2000 kg/m^3 .
- ▶ Rotația sateliților este sincronă, *i.e.* perioada de rotație în jurul axei proprii este egală cu perioada orbitală, satelitul îndreptând mereu aceeași față spre planeta în jurul căreia se mișcă.

- ▶ *Io este satelitul galileean care se mișcă la cea mai mică distanță de planetă.*
- ▶ *Sondele spațiale care s-au apropiat de el au observat vulcani activi pe suprafața lui acoperită de pete roșii, portocalii, galbene, albe sau întunecate. Activitatea vulcanică a satelitului este rezultatul perturbațiilor mareice produse asupra lui de Jupiter și Europa, satelit vecin cu Io.*
- ▶ *Regiunile colorate de pe suprafața lui sunt acoperite cu sulfuri și alți compuși ai sulfului, substanțe împrăștiate pe suprafața satelitului în timpul erupțiilor vulcanice.*
- ▶ *Petele întunecate reprezintă vulcanii activi.*

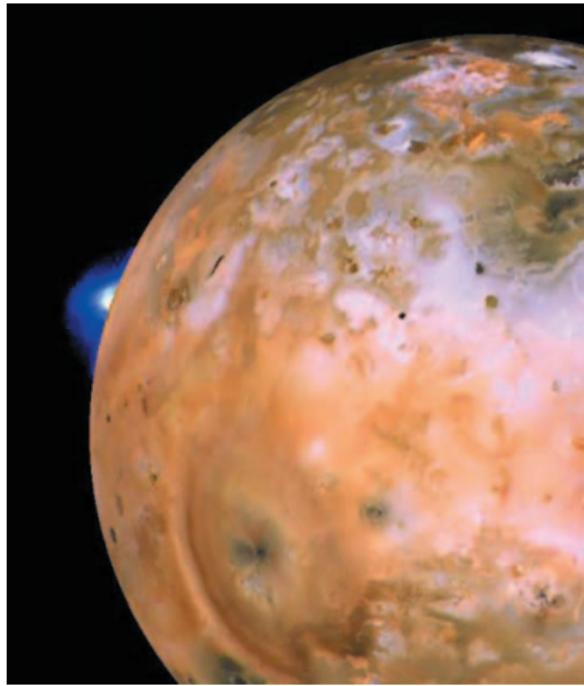


Figura: Io

Europa

- ▶ *Europa* este al doilea satelit galileean ca distanță de la planetă.
- ▶ Suprafața lui netedă, brăzdată de sănțuri adânci închise la culoare, pare a fi înghețată.
- ▶ Orbita satelitului are excentricitatea egală cu 0,0094, de aceea efectul mareic produs de Jupiter asupra lui este relativ mare. Căldura degajată datorită frecării dintre păturile superioare ale satelitului menține în stare fluidă materia de sub scoarța lui.
- ▶ Datorită interacțiunii electromagnetice cu Jupiter în zonele polare ale satelitului s-au observat aurore polare.

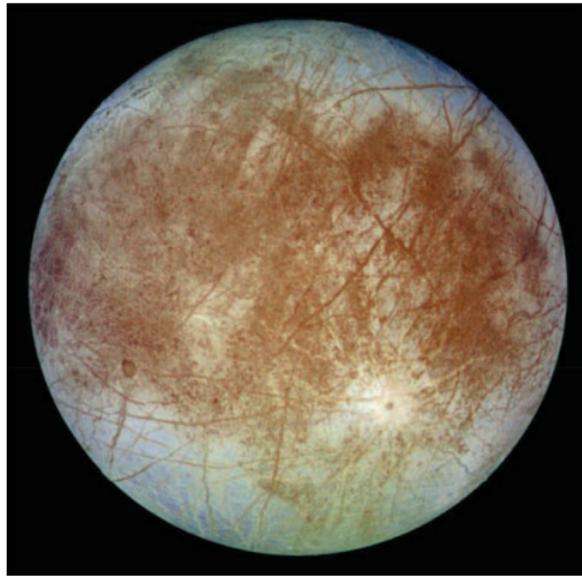


Figura: Europa

Ganymede

- ▶ *Ganymede* este al treilea satelit galileean ca distanță de Jupiter și, ca diametru, cel mai mare satelit din sistemul solar.
- ▶ Raza lui este mai mare decât raza lui Mercur, densitatea medie este aproximativ $\frac{2}{3}$ din densitatea Lunii, de aceea presupunem că satelitul este un amestec de rocă și gheață. Pe suprafața lui s-au observat regiuni întunecate acoperite cu cratere de impact și regiuni deschise la culoare traversate de văi adânci.
- ▶ În vecinătatea lui s-a observat o atmosferă extrem de rarefiată care conține oxigen, vaporii de apă și dioxid de carbon.
- ▶ Se presupune că satelitul are un nucleu bogat în fier topit. Existența lui ar explica câmpul magnetic al lui Ganymede.

Callisto

- ▶ *Callisto* este al patrulea satelit galileean ca distanță de Jupiter.
- ▶ Suprafața lui înghețată este acoperită cu cratere de impact. Densitatea de crater observate pe suprafața lui Callisto este aproximativ egală cu cea de pe cele mai vechi corpuri din sistemul solar, de aceea se presupune că satelitul a fost inactiv din punct de vedere geologic în ultimele mii de milioane de ani.
- ▶ Pe suprafața lui Callisto s-a observat un crater de impact asimetric de aproximativ 500 km diametru - numit Valhalla. El este înconjurat de valuri de scoarță care se întind până la 1500 km depărtare de centrul craterului. Se pare că el s-a format acum câteva mii de milioane de ani în timpul solidificării scoarței satelitului.

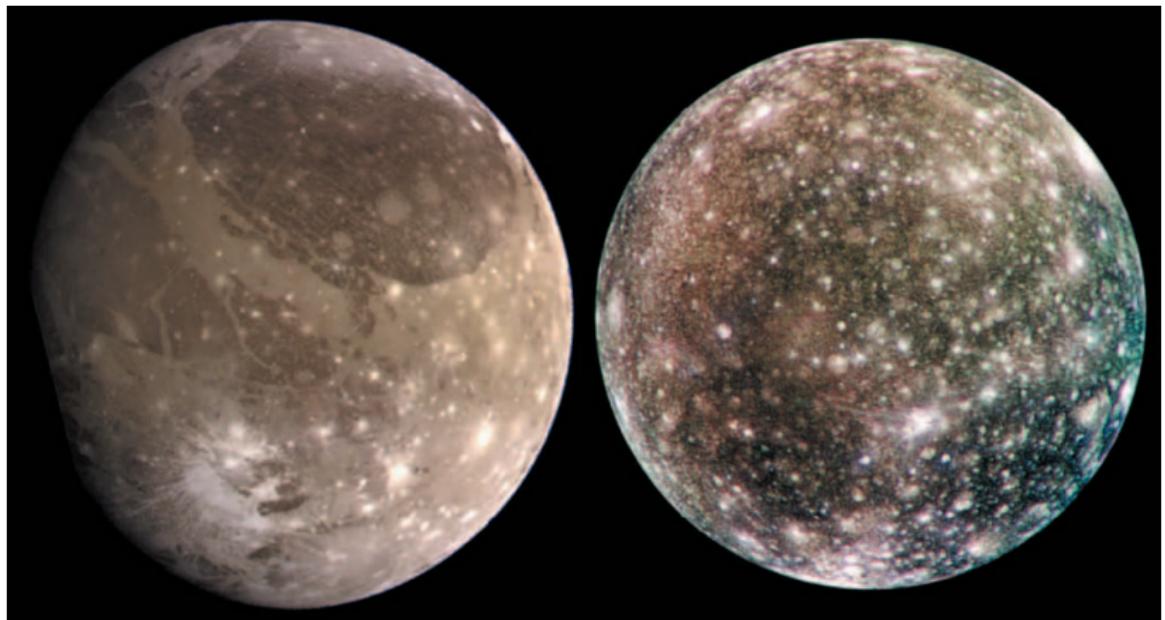


Figura: Ganymede și Callisto

Titan

- ▶ *Titan* este cel mai mare satelit al lui Saturn și al doilea satelit din sistemul solar ca diametru.
- ▶ El are atmosferă densă, bogată în molecule de azot, metan, hidrogen și urme de hidrocarburi precum etan, acetilenă sau propan.
- ▶ Suprafața lui n-a putut fi văzută de pe Pământ din cauza norilor groși care îi acoperă permanent discul.
- ▶ Atmosfera lui are 600 kilometri grosime, raza medie a satelitului fiind egală cu 2576 kilometri.

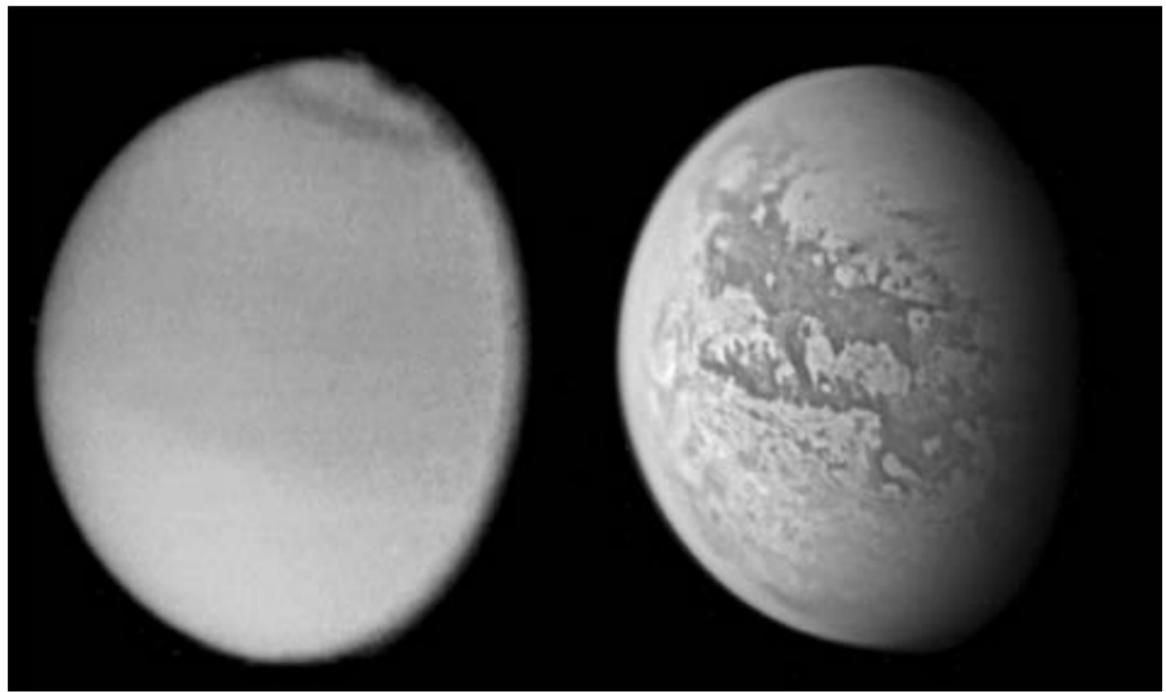


Figura: Titan

- ▶ Suprafața lui Titan este Tânără din punct de vedere geologic.
- ▶ Relieful lui este relativ plat, cei mai înalți munți de pe Titan au 1 kilometru înălțime. Pe suprafața lui sunt puține cratere de impact sau vulcanice. Temperatura medie la suprafața lui Titan fiind foarte scăzută, vulcanii sunt *de gheăță* sau *criovulcani*³, i.e. lava lor conține vaporii de apă, amoniac, metan și alte gaze care se solidifică când ajung în atmosfera satelitului.

³Se presupune că *vulcani de gheăță* există și pe alte corpuri din sistemul solar care au la suprafață temperatură foarte scăzută, precum Europa sau Ganymede.

Triton

- ▶ Triton, cel mai mare satelit al lui Neptun, se mișcă pe o orbită aproape circulară, la o distanță medie de 14,6 raze neptuniene de planetă.
- ▶ Înclinarea planului orbitei sale față de ecliptică este de 157° , mișcarea lui fiind retrogradă⁴.
- ▶ Triton este corpul care are cea mai mică temperatură la suprafață ($T = 38\text{ K}$) și cel mai mare albedou la suprafață ($a = 0,7$) măsurate în sistemul solar.
- ▶ Pentru a explica caracteristicile lui cinematice și fizice s-a emis ipoteza că ar fi un corp capturat de Neptun din centura lui Kuiper.

⁴Restul sateliților mari ai planetelor, despre care am discutat până acum, se mișcă pe orbite în sens direct, *i.e.* de la vest la est. Unii sateliți mici ai planetelor gazoase se mișcă retrograd.

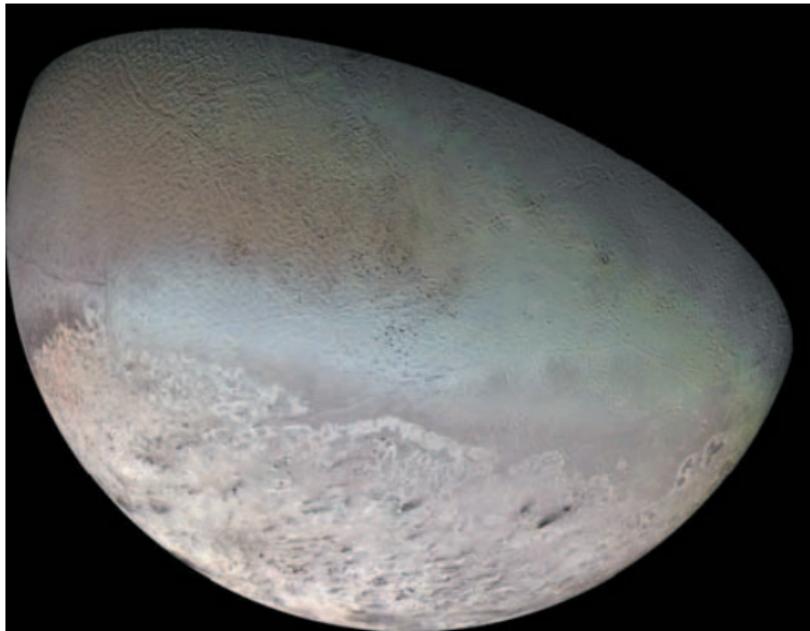


Figura: Triton - cel mai mare satelit al lui Neptun

- ▶ Atmosfera lui Triton conține azot molecular și urme de metan. Ea este foarte rarefiată și stabilă, datorită temperaturii foarte scăzute și a accelerării gravitaționale mari la suprafața satelitului.
- ▶ Relieful este relativ plat, diferența de nivel între blocurile de scoarță și văile care le despart este de câteva sute de metri. Pe suprafața lui există un număr mic de cratere de impact și de vulcani de gheață.
- ▶ S-au observat pete întunecate alungite, de forma unor pene, care este posibil să conțină gaze emise de vulcanii de gheață sau de gheizerale de pe Triton, care se ridică vertical în troposfera satelitului, care are aproximativ 8 kilometri grosime, și care apoi sunt împăraștiate spre vest, pe distanțe de zeci de kilometri.

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 minți 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 mareic⁵ produs de planetă.

⁵ *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 .

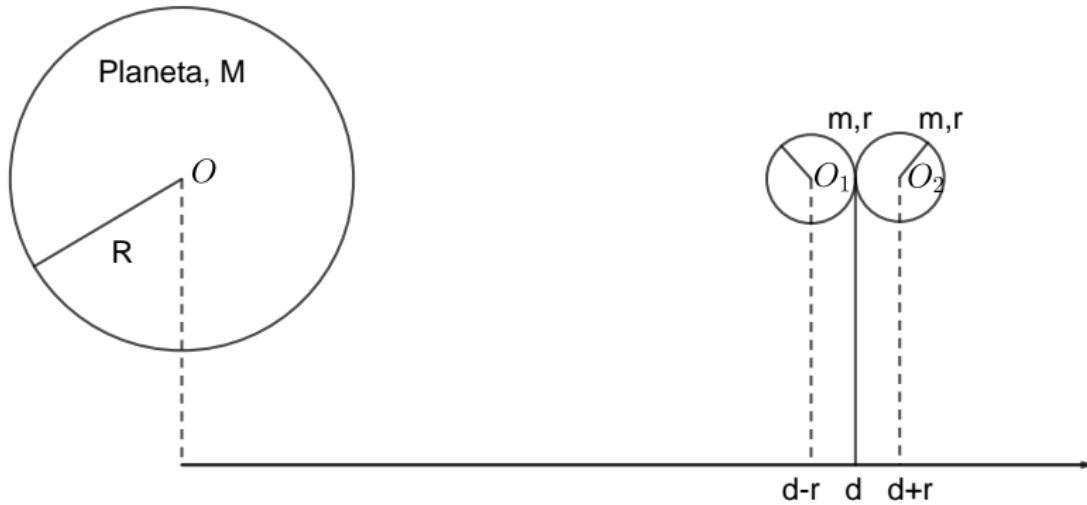


Figura: Limita Roche

- 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

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

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 (1) pentru $r/d \ll 1$. Pentru aceasta calculăm polinoamele Taylor atașate funcțiilor

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

în vecinătatea punctului $x = 0$,

$$f_1(x) = f_1(0) + \frac{1}{1!} f'_1(0)(x - 0) + \mathcal{O}(x^2) = 1 + 2x + \mathcal{O}(x^2), \quad (3)$$

$$f_2(x) = f_2(0) + \frac{1}{1!} f'_2(0)(x - 0) + \mathcal{O}(x^2) = 1 - 2x + \mathcal{O}(x^2). \quad (4)$$

Înlocuind în (1) 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

$$\Delta F \approx 4 \frac{GMm}{d^3} r. \quad (5)$$

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

$$d_R \approx \sqrt[3]{16r^3 \frac{M}{m}} \approx 2,52 \sqrt[3]{\frac{\bar{\rho}_p}{\bar{\rho}_c}} R \quad (6)$$

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 (6) are altă valoare. De exemplu, dacă se consideră un satelit solid și forțele mărețice care acționează asupra lui se obține

$$d_R \approx 1,44 \sqrt[3]{\frac{\bar{\rho}_p}{\bar{\rho}_c}} R. \quad (7)$$

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.



Figura: Inelele lui Saturn fotografiate de telescopul spațial Hubble

- ▶ 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.

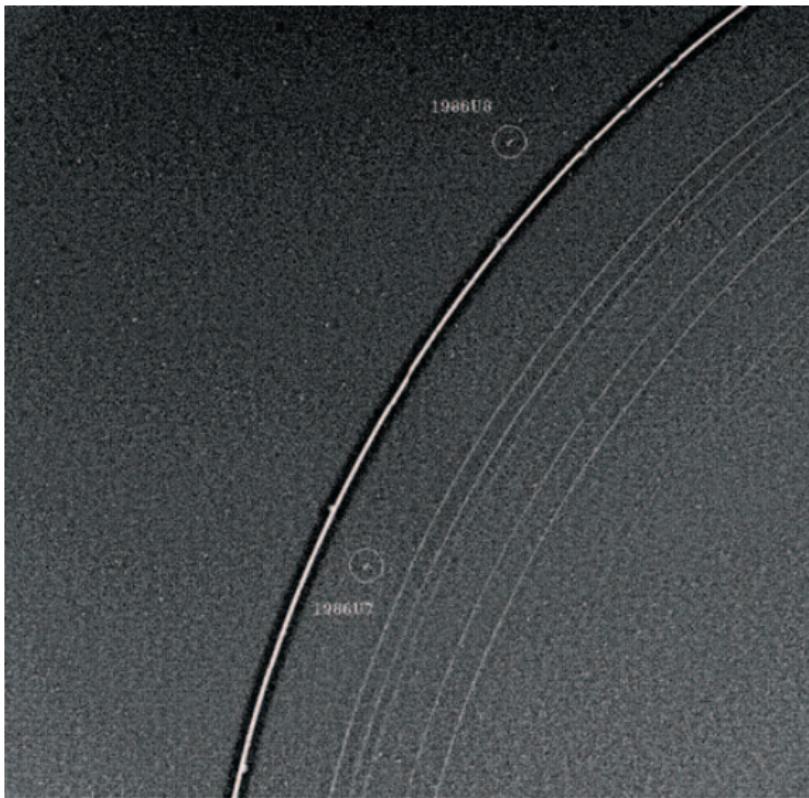


Figura: Sateliți ciobănești observați la inelul lui Neptun

- ▶ În primă aproximatie putem presupune că particulele din inelele planetelor se mișcă pe orbite kepleriene în jurul planetei.
- ▶ S-a observat că raportul dintre perioada orbitală a sateliților din vecinătatea inelelor lui Saturn și a particulelor care ar fi trebuit să se afle în diviziunea Encke sau Cassini este un număr rațional, fapt care a condus la concluzia că pentru a înțelege distribuția particulelor din inelele planetelor și stabilitatea lor trebuie considerată interacțiunea gravitațională dintre planetă, particulele din inele și sateliții din vecinătatea lor.

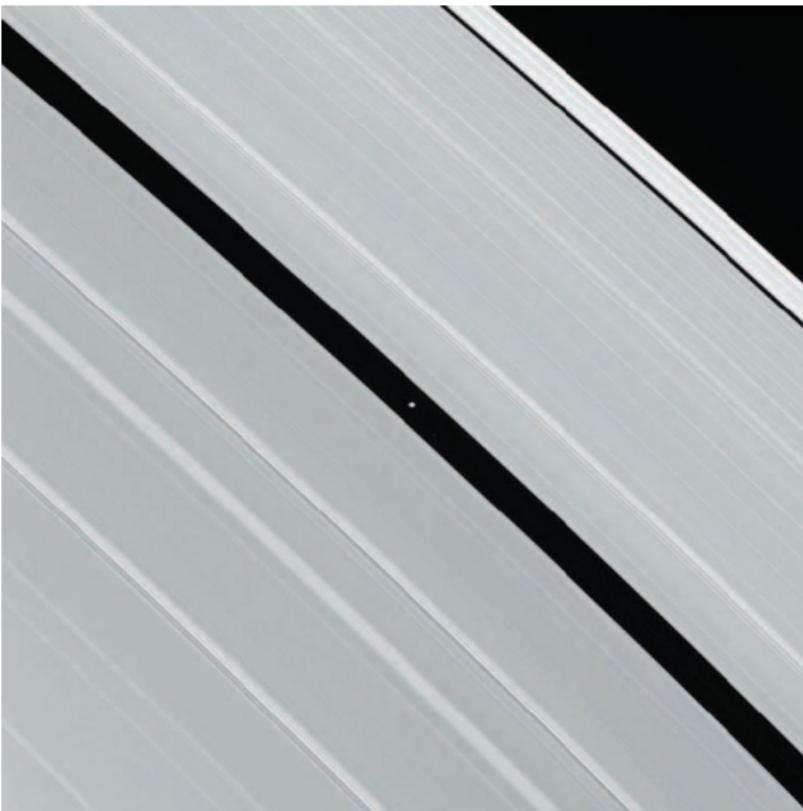


Figura: Satelit în diviziunea lui Encke care asigură stabilitatea inelelor lui Saturn.

Planete pitice

Planetele pitice sunt corpuși care (a) orbitează în jurul Soarelui, (b) au masă suficient de mare pentru ca forțele de atracție gravitațională dintre părțile sale componente să fie egale cu forțele de presiune internă astfel încât acestea să fie în echilibru hidrostatic, forma lor de echilibru fiind aproape sferică și (c) nu au curățat gravitațional vecinătatea orbitei pe care o descriu.

Ultima condiție din definiția planetelor clasice, respectiv pitice este cea care ne ajută să facem distincția între corpurile ce intră în prima sau a doua clasă.

După adoptarea rezoluției UAI privind clasificarea corpurilor din sistemul solar, *Ceres* (prima planetă mică descoperită în 1801) și *Pluto* au devenit *planete pitice*.

În iulie 2008, două corperi care se mișcă dincolo de orbita lui Neptun, *Eris*⁶ și *Makemake*⁷ au fost incluse în clasa *planetelor pitice*.

Din septembrie 2009 planeta mică *Haumea*⁸ face parte din această clasă.

⁶Numele acestei planete mici descoperită în 2003 provine din mitologia greacă, unde *Eris* este zeița vrajbei. Satelitul planetei este numit *Dysmonia* după numele fiicei lui zeiței Eris.

⁷Această planetă a fost descoperită în 2005. Trei ani mai târziu a fost botezată *Makemake* după numele creatorului umanității și zeul fertilității din mitologia polineziană.

⁸Planeta, descoperită în 2003, a fost numită *Haumea* după numele zeiței hawaiene a fertilității. Sateliții ei au primit numele zeiței protectoare a insulei Hawai și a dansatorilor de hula *Hi'aka*, respectiv *Namaka* - spiritul apei în mitologia hawaiiană.

Ceres

- ▶ Ceres a fost prima planetă mică, descoperită în 1801 de Giuseppe Piazzi, din Sicilia. Ea a primit numele zeiței romane, protectoare a Siciliei.
- ▶ Semiaxa mare a orbitei este de 2,8 u.a., iar excentricitatea orbitei este 0,08, inclinarea planului orbital față de ecliptică este de 11° .
- ▶ Diametrul planetei este de aproximativ 930 km, masa este de $9,47 \cdot 10^{20}$ kg, $\bar{\rho} = 2,09\text{g/cm}^3$. Este de aproximativ 14 ori mai masiv decât Pluto.
- ▶ Interiorul lui Ceres este asemănător cu cel al unei planete terestre. Suprafața ei seamănă cu suprafața Lunii.

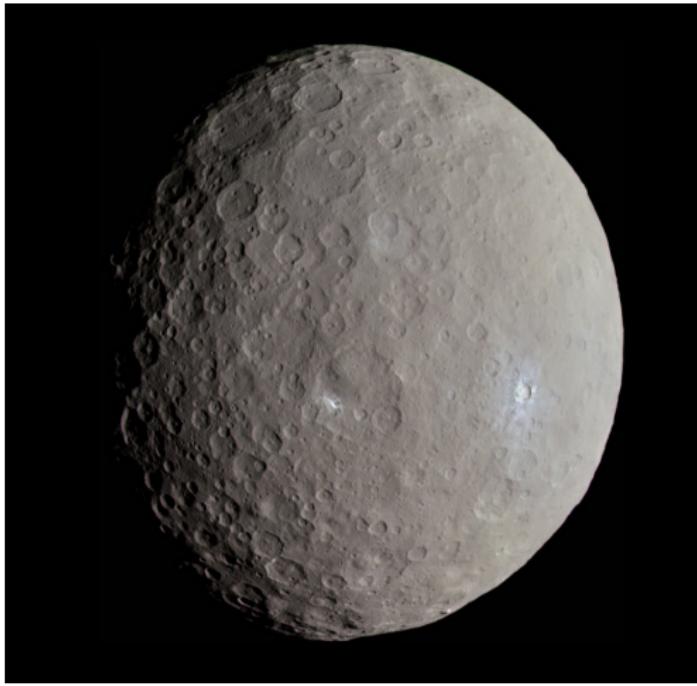


Figura: Ceres

Pluto

- ▶ A fost descoperită în 1930 de pe Pământ de Clyde Tombaugh care căuta corpul care perturbă orbita planetei Neptun.
- ▶ În anii '70 s-a observat că planeta are un satelit, numit *Caron*. Pluto și Charon apar în câmpul instrumentelor de pe Pământ, ca o pată lunguiată. Figura următoare conține imaginea sistemului Pluto–*Caron*, obținută de la sol și cu ajutorul telescopului spațial Hubble, de la 4400 milioane de km distanță de acesta și orbita lui *Caron* în jurul planetei.

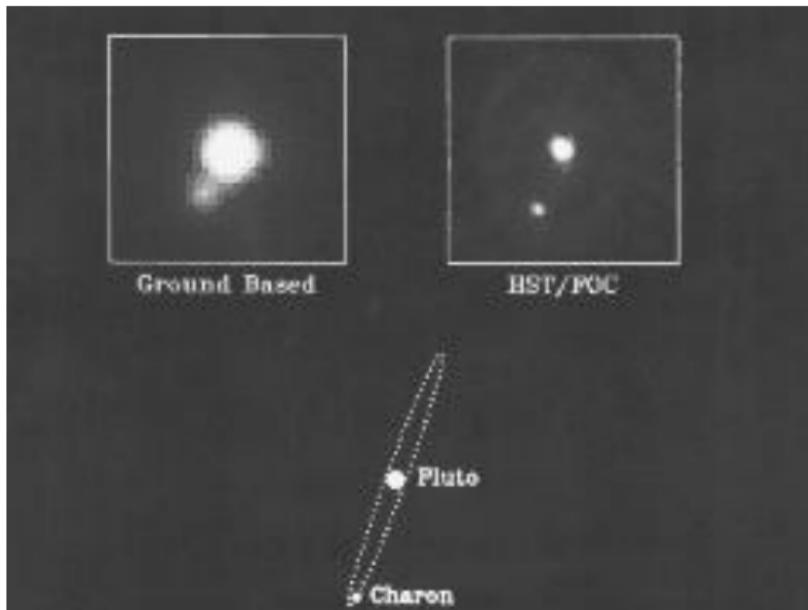


Figura: Pluto și Caron

- ▶ Cu ajutorul telescopului Hubble s-au descoperit încă patru sateliți ai planetei.
- ▶ Semiaxa mare a orbitei este de 40 u.a., iar excentricitatea orbitei este 0,25 și înclinarea planului orbital față de ecliptică este de 17° .
- ▶ Perioada orbitală a lui Pluto este de 248 de ani.
- ▶ Din 1979 până în 1999, când planeta s-a aflat aproape de periheliul orbitei sale, Pluto a fost mai aproape de Soare decât planeta Neptun.



Figura: Suprafața planetei Pluto

Observație

*Planetele pitice care se mișcă dincolo de orbita lui Neptun sunt denumite **plutoizi**, pentru că seamănă cu planeta Pluto, i.e. se mișcă pe orbite alungite, situate în plane inclinate față de ecliptică, masa lor fiind comparabilă cu masa lui Pluto.*

Cu excepția planetei pitice Makemake, plutoizii au sateliți naturali, lucru care a permis determinarea masei lor. Planeta pitică *Eris* are masa cu aproximativ 27% mai mare decât masa lui Pluto.

Eris, Makemake, Haumea

- ▶ Orbita planetei este într-un plan înclinat față de ecliptică cu 47° .
- ▶ Semiaxa mare a orbitei lui Eris este egală cu aproximativ 68 unități astronomice, iar excentricitatea ei este egală cu 0,44.
- ▶ Restul plutoizilor au orbite situate în plane mai puțin inclinate față de ecliptică, mai mici de 30° , semiaxe mari cuprinse între 40 și 45 unități astronomice, iar excentricitatea sub 0,25.
- ▶ Perioadele lor orbitale sunt mai mici de 306 ani terestre. Eris are nevoie de 561 ani terestre pentru o revoluție completă în jurul Soarelui.

Planete mici

Planetele mici sunt numite și asteroizi, deoarece văzute printr-un telescop de dimensiuni medii, ele par să fie punctiforme ca și stelele. Există puține planete mici care se văd cu ochiul liber, ca o stea puțin strălucitoare, ca de exemplu *Vesta*, care atunci când este aproape de Pământ se poate vedea cu ochiul liber. Primele planete mici care au fost descoperite în secolul al XIX-lea se mișcă între orbita lui Marte și Jupiter, de aceea s-a crezut că mișcarea lor are loc doar în aceea regiune. În secolul XX s-au descoperit planete mici care au traiectorii care intersectează orbita Pământului sau care se mișcă dincolo de orbita lui Neptun.

Prima planetă mică descoperită

Conform legii lui Titius-Bode, între orbita lui Marte și Jupiter, la 2,8 u.a. depărtare de Soare, s-ar afla o planetă. În aceea regiune, la 1 ianuarie 1801, astronomul italian Giuseppe Piazzi (1746-1826) a observat prima planetă mică, pe care a numit-o *Ceres*. Aceasta se mișcă pe o traiectorie aproape circulară, la aproximativ 2,7 u.a. de Soare. Diametrul mic al planetei, sub 1000 km, explica de ce ea nu a fost observată mai devreme. Din 2006, această planetă mică a fost inclusă în clasa planetelor pitice.

Brâul principal de asteroizi

În 1802, încercând să găsească planeta *Ceres*, astronomul german Wilhelm Olbers (1758-1840), a descoperit în vecinătatea ei o altă planetă mică, pe care a numit-o *Pallas*. El a formulat ipoteza că cele două planete mici, care se mișcă la aproximativ aceeași distanță de Soare ar fi fragmentele unui corp care a explodat în urma perturbațiilor produse de Marte și Jupiter. Era puțin probabil ca în urma exploziei să fi rezultat numai două fragmente, de aceea el sugera continuarea căutării rămășițelor corpului ceresc.

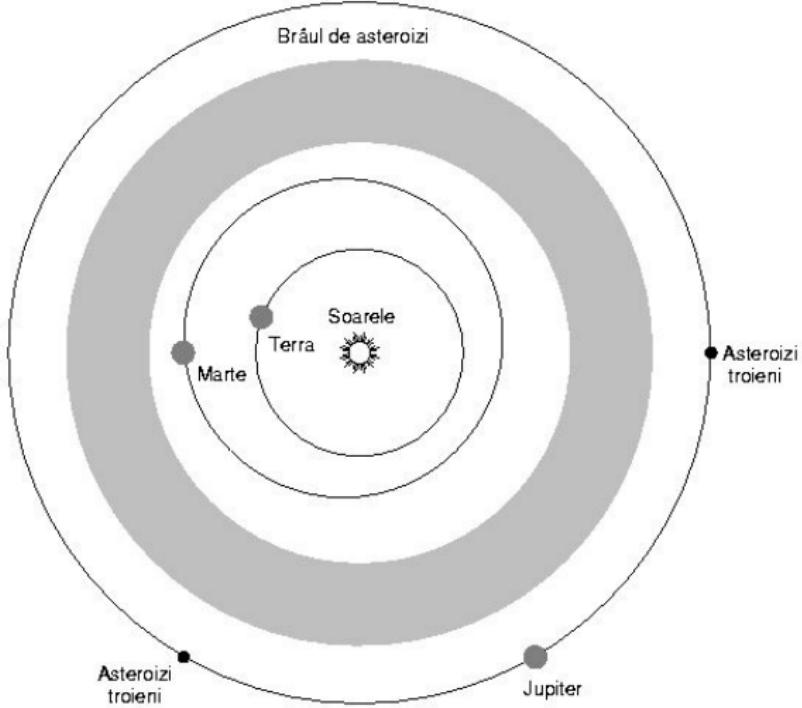


Figura: Inelul principal de asteroizi și *planetele troiene*

Asteroizi din vecinătatea Orbitei terestre

În anii '30 s-au găsit planete mici care au traiectorii care traversează orbita Pământului. Astfel, în 1932, Delporte a descoperit planeta mică numită *Amor* care ajunge la aproximativ 16 milioane distanță de orbita Pământului. În același an Reimunth a văzut pentru prima dată planeta mică numită *Apollo* care se apropie la 4,6 milioane de orbita Pământului. În 1936, Delporte găsește o altă planetă mică, denumită *Adonis* care are periheliul aproape de orbita lui Mercur. În anul următor, Reimunth a descoperit un alt asteroid, numit *Hermes* care se apropia mai tare de Pământ.

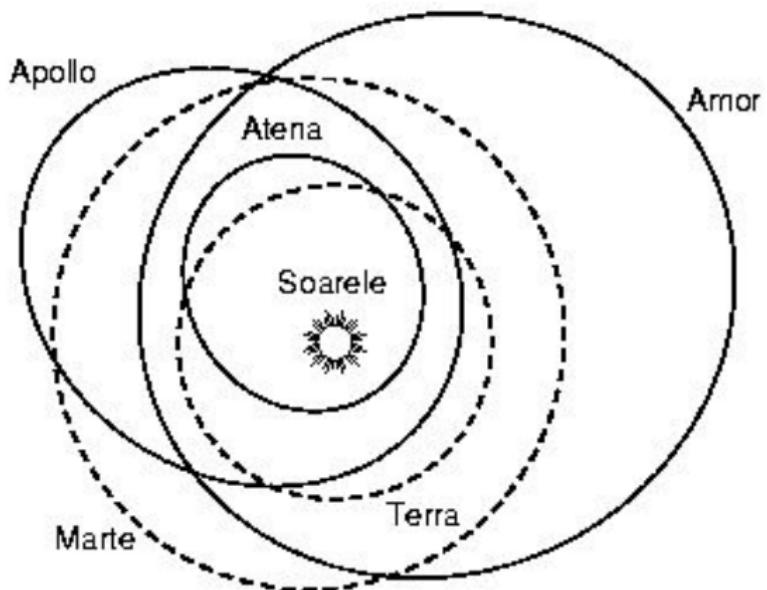


Figura: Orbitele asteroizilor din clasele *Apollo*, *Atena* și *Amor*

Obiecte transneptuniene

- ▶ Obiectele transneptuniene (OT) sau asteroizii din centura lui Kuiper sunt corpuri mici înghețate care se mișcă dincolo de orbita lui Neptun.
- ▶ Două treimi din OT se mișcă pe orbite cvasicirculare, excentricitatea lor este de aproximativ 0,07, înclinarea planului orbital este mai mică decât 32° și semiaxa mare este cuprinsă între 42 și 47 u.a.
- ▶ Restul corpurilor par a fi în rezonanță cu Neptun, *i.e.* raportul dintre perioada lor orbitală și perioada lui Neptun este un număr rațional. Adică, în timpul în care Neptun descrie un anumit număr de orbite, OT descrie și el un alt număr întreg de orbite. De exemplu Neptun și Pluto sunt în rezonanță 3:2.

- ▶ În urma analizei spectrelor asteroiziilor ei au fost împărțiti în trei grupe: pietroși, metalici și cu conținut mare de carbon. În asteroizii pietroși sunt predominantă silicătii. Cei metalici, conțin aliaje de fier și nichel, iar în ultima grupă intră asteroizi în care apare carbonul și compușii lui. Ei se disting și prin valorile diferite ale albedoului. Astfel, asteroizii bogăți în carbon au albedou mic, cuprins între 2% și 5 %. Asteroizii metalici ⁹ au albedoul de circa 10 %, iar cei pietroși de peste 15 %.

⁹Aceștia reprezintă circa 5 % din numărul total de asteroizi.



Figura: Asteroidul Gaspra

La 28 august 1993 sonda **Galileo** a survolat un alt asteroid. Este vorba de *Ida*, de care s-a apropiat la 2400 de km. Pe imaginile realizate cu această ocazie s-a descoperit satelitul acestei planete mici. El se mișcă la aproximativ 100 de km distanță de *Ida* și a fost numit *Dactyl*¹⁰. *Ida* este un asteroid alungit asemănător unui elipsoid cu semiaxele de 56, 24 și 21 km, iar *Dactyl* are aproximativ 1,5 km diametru. Cele două corpuși par să aibă origine comună.

¹⁰ Numele a fost ales din mitologia greacă. *Ida* era una dintre doicile lui Zeus, dar este și numele unui munte din Creta. Dactylii erau învățați din vechime care locuiau pe muntele Ida și care au ocrotit copilăria lui Zeus.





Figura: Asteroizii Ida și Dactyl

Astronomie

Cursul 13 - Comete, corpuri meteorice, meteori și meteoriți

Cristina Blaga

4 ianuarie 2022

Comete

Cometele sunt corpuri mici din sistemul solar, de dimensiuni comparabile cu asteroizii. Ele diferă de asteroizi prin compoziția chimică.

Definiție

Cometele sunt corpuri mici din sistemul solar, care la apropierea de Soare produc cozi luminoase.

Observație

*Numele de cometă vine de la termenul grecesc **comă** care înseamnă coadă.*



Figura: Cometa West

Orbitele cometelor

Cometele descriu **orbite excentrice** $e \in [0.1, 1)$.

Observație

Datorită perturbațiilor produse de planetele mari, există comete care se mișcă pe ramura unei hiperbole ($e > 1$), pe o orbită deschisă, i.e. pot părăsi sistemul solar, dacă nu se apropiie de corpuri masive, în urma căroror li se modifică excentricitatea.

Semiaxa mare a orbitei lor este cuprinsă între 2 u.a. și $4 \cdot 10^4$ u.a., iar **perioada orbitală** $T \in [3,8 \cdot 10^8]$ ani siderali.

Clasificarea cometelor

În funcție de **perioada orbitală**, cometele se împart în comete

- ▶ de perioadă scurtă - $T < 200$ ani, au înclinarea planului orbital față de ecliptică relativ mică (≈ 0).
- ▶ de perioadă lungă - $T > 200$ ani, au excentricități mari, pot fi observate doar când ajung aproape de Soare și produc cozi luminoase.

Un exemplu de **cometă de perioadă scurtă** este cometa *Halley*, numită după Edmund Halley (1656-1742) care a prezis întoarcerea cometei la un interval de 76 de ani. Cea mai veche consemnare a trecerii la periheliu a acestei comete este din 240 î. Ch..

- ▶ Perioada sa orbitală este de 76 de ani siderali.
- ▶ Mișcarea sa are loc pe o orbită de excentricitate mare, $e = 0,97$, într-un plan care face 162° cu planul eclipticii, de aceea deplasarea cometei pe bolta cerească are loc în sens retrograd.
- ▶ A trecut la periheliu ultima dată în 1986, când sonda spațială *Giotto* a fotografiat nucleul cometei.
- ▶ Următoarea trecere la periheliu va avea loc în 2061.

Un exemplu de **cometă de perioadă lungă** este *cometa Hyakutake*, care a putut fi văzută cu ochiul liber la apropierea sa de Soare în anul 1996. Ea s-a apropiat de Pământ la 0.1 u.a., în 25 martie 1996 și a trecut prin periheliu în 1 mai 1996, la 0.23 u.a. de Soare.

- ▶ Excentricitatea orbitei sale este de 0.9998946.
- ▶ Perioada orbitei sale este de aproximativ 70 mii de ani.
- ▶ Planul orbital al cometei este înclinat față de planul eclipticii cu unghiul $i = 124.92246^\circ$, i.e. mișcarea cometei pe orbită este retrogradă.

Numărul cometelor

- ▶ Se cunosc aproximativ 1000 de comete.
- ▶ Anual se descoperă aproximativ 10 comete.
- ▶ Se presupune că la granița sistemului solar sunt $10^7 \dots 10^{11}$ nuclee de comete în norul lui Oort. Din partea interioară a norului lui Oort provin cometele scurt periodice.

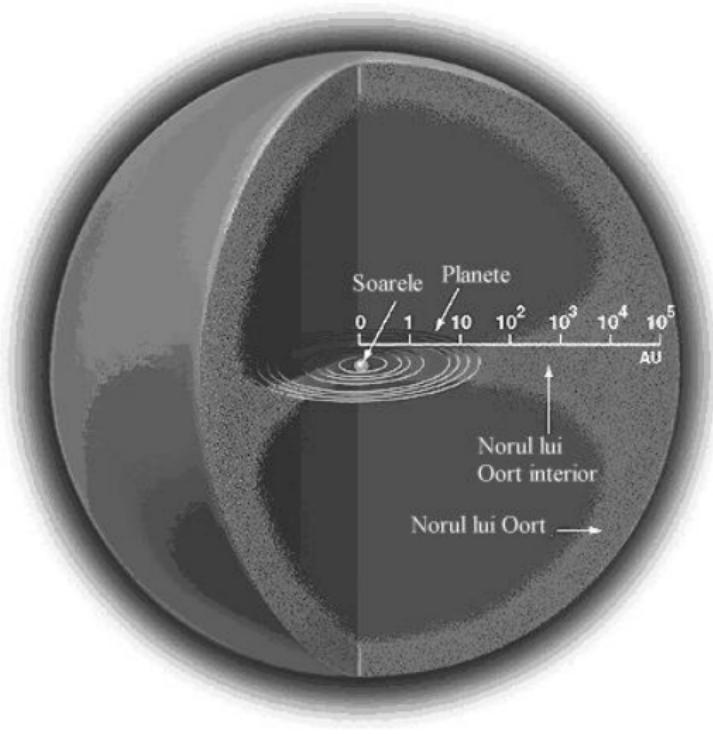


Figura: Norul lui Oort

Există comete care la periheliu se apropiie de Soare la aproximativ o rază solară sau chiar mai puțin. Trecerea cometei prin vecinătatea Soarelui poate însemna sfârșitul ei. Aceasta poate pătrunde în atmosfera solară pierzându-se în ea sau poate fi ruptă în bucăți datorită perturbațiilor produse de Soare asupra ei.

Un exemplu de cometă care a fost înghițită de Soare este **cometa Howard-Koomen-Michels** (1979 XI), a cărei apropiere de Soare a fost observată de către satelitul *Solar Maximum Mission*, lansat la 14 februarie 1980, menit să înregistreze evoluția Soarelui, în apropierea unui maxim de activitate solară. Aceasta a fost observată aproape de periheliu, cu ajutorul coronografului cu care era echipat satelitul, care înregistra forma coroanei solare, la o distanță mai mare de 2,5 raze solare. Trecerea cometei în interiorul acestei granițe a fost urmărită cu ajutorul acestui aparat, dar ea nu a mai fost văzută de atunci.

Dacă în urma trecerii unei comete prin vecinătatea Soarelui, nucleul său este rupt în bucăți distințe, fragmentele rezultate, care au masă diferită de masa cometei care s-a fragmentat, se mișcă pe traекторii diferite, cu parametrii orbitali asemănători.

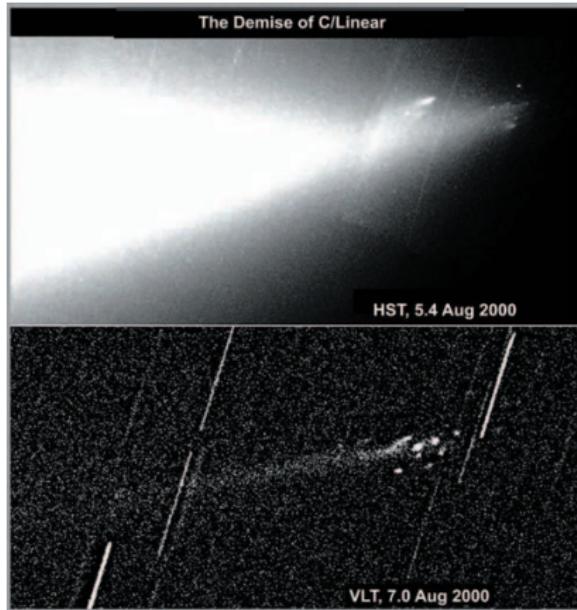


Figura: Fragmentarea unor comete la trecerea la periheliu

Fragmentarea cometelor se poate produce și la apropierea lor de alte corpuri masive din sistemul solar, cum este de exemplu planeta Jupiter. În anul 1994, **cometa Shoemaker-Levi 9** a fost înghițită de planeta gigantă. Ea a fost ruptă în aproximativ 21 de bucăți la apropierea sa de Jupiter care a avut loc în anul 1992. Bucățile fotografiate de telescopul spațial *Hubble*, au fost înghițite succesiv de către Jupiter.

Comet P/Shoemaker-Levy 9 (1993e) • May 1994



Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

Figura: Cometa Shoemaker-Levy 9

Cea mai mare parte a fragmentelor au căzut pe fața opusă Pământului. De aceea, s-a folosit telescopul spațial **Hubble** pentru urmărirea căderii fragmentelor. Cu ajutorul lui s-au putut observa modificările produse în păturile superioare ale atmosferei planetei în urma acestui fenomen. Petele formate au fost observate pe suprafața planetei câteva zile.

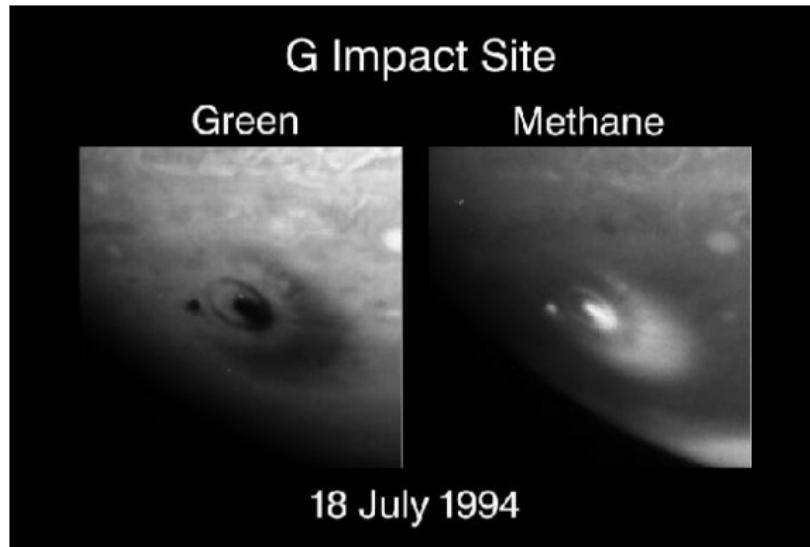


Figura: Urmele impactului între Jupiter și Shoemaker–Levi 9

Proprietățile fizice ale cometelor

Părțile componente ale cometei

La o cometă care se apropie de Soare se pot distinge

- ▶ *capul* și
- ▶ *coada* ei.

Capul cometei este alcătuit din *nucleu* și *coamă* sau *coma*.

Spectrul unei comete conține urme ale luminii solare, reflectate de nucleul cometei, și linii de emisie ale unor molecule.

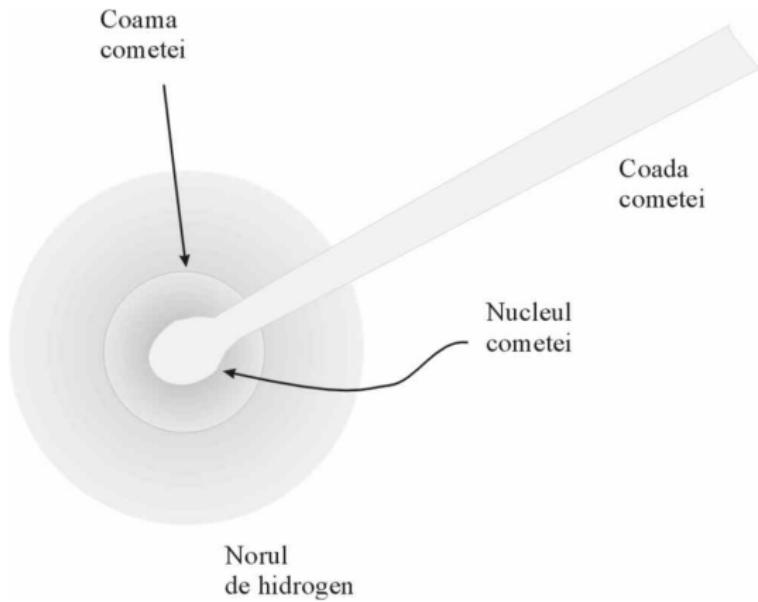


Figura: Nucleul, coama și coada unei comete

Nucleul cometei

- ▶ Aproape întreaga masă a cometei se află în nucleul cometei $M_c \approx 10^{-10} M_\oplus$.
- ▶ Diametrul nucleului cometei $D_c \in [1, 100]$ km.
- ▶ Nucleul cometei conține gaze înghețate (amoniac NH_3 , metan CH_4 , CO_2 , dician C_2N_2), apă înghețată și particule (firicele) de praf.

- ▶ La apropierea de Soare, temperatura efectivă la suprafața nucleului cometei crește proporțional cu $1/\sqrt{r}$, unde r este distanța la Soare.
- ▶ Gazele înghețate din interiorul cometei trec din stare solidă direct în stare gazoasă. Evaporarea gazelor conduce scăderea temperaturii la suprafața cometei și încetinirea fenomenului de sublimare a gazelor din nucleul ei.
- ▶ La suprafața nucleului cometei rămân particulele de praf, de aceea nucleul cometei are albedou mic. De exemplu, nucleul cometei Halley are albedou egal cu 0,02-0,04.



Figura: Nucleul cometei Halley fotografiat de **Giotto**

Coama cometei

- ▶ Prin evaporarea gazelor din nucleul cometei se formează **coama** cometei, care are diametrul $D \approx 10^5$ km.
- ▶ Densitatea de particule în coama cometei este $\approx 10^4 - 10^6$ particule/cm³.
- ▶ Din analiza spectrului comelor cometelor s-a ajuns la concluzia că acestea conțin ioni precum OH, C₂, C₃, N₂, CN, CH, CH₂, CO, NH, NH₂ și molecule de NH₃, CO₂ sau H₂O.

Coada cometei

- ▶ La apropierea de Soare, cometele construiesc **cozi** impresionante. Lungimea cozii cometei $L \approx 10^7$ km.
- ▶ Strălucirea și întinderea cozii cometei depinde de modul în care se produc gazele în interiorul cometei.
- ▶ În coada cometei intră particule de praf neutru și particule ionizate. Particulele neutre intră în alcătuirea **cozii de praf** a cometei, iar cele încărcate în **coada de ioni** a cometei.
- ▶ Datorită presiunii radiației solare, coada de praf este orientată în sens opus Soarelui, iar datorită interacțiunii cu câmpul magnetic solar, coada de ioni este orientată în sens opus Soarelui, în planul ecuatorului magnetic al Soarelui.
- ▶ Prin coada cometei se pot vedea stelele din spatele ei.



Figura: Coada de praf (gălbui) și coada de ioni (albăstrui) a cometei West

- ▶ După trecerea la periheliu, odată cu îndepărțarea de Soare, temperatura la suprafața nucleului cometei scade.
- ▶ O parte din gazele eliberate din nucleul cometei se condensează și intră din nou în alcătuirea lui.
- ▶ O parte din particulele eliberate, sub acțiunea presiunii radiației solare sau a câmpului magnetic solar ajung la distanță prea mare pentru a reveni la suprafața nucleului cometei. Ele rămân împrăștiate pe orbita cometei.
- ▶ La fiecare trecere la periheliu, se consumă o parte din gazele înghețate din nucleul cometei, ca urmare coada cometei va fi din ce în ce mai puțin spectaculoasă.



Figura: Cometa Holmes-24 octombrie 2007

Corpuri meteorice

Meteorii sau **stelele căzătoare** sunt dârele luminoase lăsate de particule de praf sau corpuri mici, numite **corpuri meteorice**, care la intrarea în atmosfera terestră, în urma frecării cu aerul, se încălzesc până la incandescență. Unele comete lasă pe orbita lor o mulțime de fragmente. Dacă Pământul trece printr-o zonă cu multe resturi lăsate de o cometă pe orbita ei are loc o **ploaie de meteori** sau este activ un **curent meteoric**.

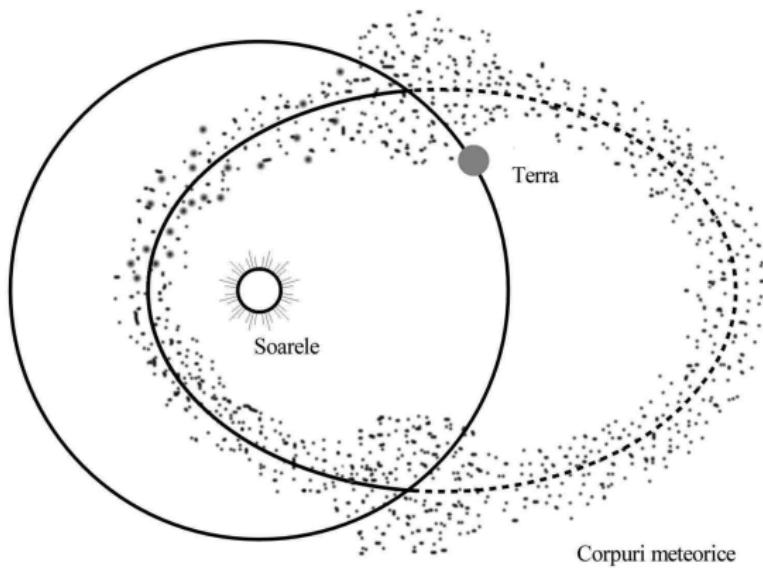


Figura: Particule rămase pe orbita unei comete

Clasificarea meteorilor

În funcție de predictibilitatea apariției lor, meteorii se împart în

- ▶ **sporadici** - meteorii care pot fi văzuți străbătând cerul timp de câteva minute fără a putea prevedea/calcula apariția lor sau
- ▶ meteori care apar la o anumită dată, producând **ploi de stele căzătoare**, care alcătuiesc un *current* sau *roi meteoric*. Acesta poartă numele constelației în care se află radiantul currentului¹.

¹ Există și excepții de la această regulă. De exemplu currentul de meteori format prin fragmentarea cometei Biela, este uneori întâlnit sub numele de *bielide*, pentru a se sublinia legătura sa cu cometa dispărută. Radiantul lor se găsește în constelația *Andromeda*, deci numele lor conform regulii date mai sus este *andromedide*.



Figura: Leonide - ploaie de stele vizibilă la mijlocul lunii noiembrie 1966



Figura: Radiantul unui curent meteoric

<i>Curent meteoric</i>	<i>Maxim de activitate</i>	<i>Activitate zenitală orară</i>	<i>Corpul sursă</i>
quadrantide	3 ianuarie	80	
liride	22 aprilie	15	C Thatcher
η aquaride	4 mai	60	C Halley
perseide	12 august	100	C Swift–Tuttle
orionide	21 octombrie	30	C Halley
leonidele	16 noiembrie	20	C Tempel–Tuttle
geminidele	13 decembrie	90	A Faeton
ursidele	22 decembrie	20	C Tuttle

Meteoriți

Corpurile meteorice dense (cele mai multe au densitate mică), dacă sunt suficient de mari, nu ard în atmosferă și fragmente din ele ajung pe Pământ. Acestea se numesc **meteoriți**.

Masa Pământului crește cu aproximativ 1000 tone/zi datorită meteoriților ce cad pe Pământ.

La căderea lor pe Pământ corpurile meteorice sunt acoperite de o crustă de culoare închisă, neagră sau cenușie cu tonuri albăstrui sau cafenii, în funcție de compoziția chimică a meteoritului, crustă care se formează în timpul trecerii lui prin atmosferă.

Particulele din spațiul interplanetar se mișcă cu viteze de câțiva zeci de km/s.

La pătrunderea lor în atmosfera înaltă a Pământului, datorită rarefierii acesteia, rezistența pe care o întâmpină corpul ceresc din partea mediului este mică.

Odată cu apropierea de Pământ, sub 200 de km, densitatea zonelor parcuse și rezistența opusă de mediu la trecerea meteoritului crește.

Toate acestea conduc la comprimarea și încălzirea aerului aflat pe direcția de mișcare a corpului. Totodată datorită frecării cu aerul se produce încălzirea corpului și formarea la suprafața lui a unei zone de topire.

Particulele incandescente și ionizate care se desprind de pe el contribuie la producerea efectului luminos, pe care îl cunoaștem sub numele de **meteor**.

Toate aceste fenomene de creștere a temperaturii corpului, transformarea lui în vapori și pulberi, apariția fenomenul luminos au loc și pentru corpurile meteorice de câteva grame.

La 20–30 km deasupra suprafeței Pământului este **zona de oprire**, unde corpurile meteorice suficient de mari, care nu au fost transformate în cenușă, în urma frânării lor în atmosferă, au viteza zero.

De aici ele își continuă drumul spre Pământ sub acțiunea greutății lor. Așa se explică vitezele mari atinse de meteoriți în apropierea Pământului și violența impactului lor cu solul.



Figura: Craterul meteoritului Barringer (Arizona). Diametru 1186 km, adâncime 170 m, înălțimea malului 45 m, diametrul meteoritului feros \approx 50 m.

Unele corpuri meteorice, sunt fragmentate înainte de a ajunge pe Pământ, ca urmare a tensiunilor interioare și a celor ce apar pe suprafața lor². Resturile lor cad pe Pământ sub forma unei **ploi de metoriți**.

Dacă explozia s-a produs aproape de Pământ, fragmentele rezultate în urma ei nu vor fi în întregime acoperite de crusta închisă la culoare specifică suprafeței meteoritilor, ci vor avea și suprafațe de spărtură deschise la culoare.

²Un exemplu de acest tip este meteoritul de la Moci (județul Cluj), căzut la 3 februarie 1882, care s-a împrăștiat pe o zonă foarte mare.

Meteoriții care ajung pe Pământ fără a fi supuși unei explozii sunt modelați în timpul trecerii lor prin atmosferă. Ei au formă conică, asemănătoare unui cap de obuz.

Pe suprafața lor se văd săpate sănțuri asemănătoare urmelor lăsate de degete într-o bucată de plastelină. Ele sunt alungite și înguste,

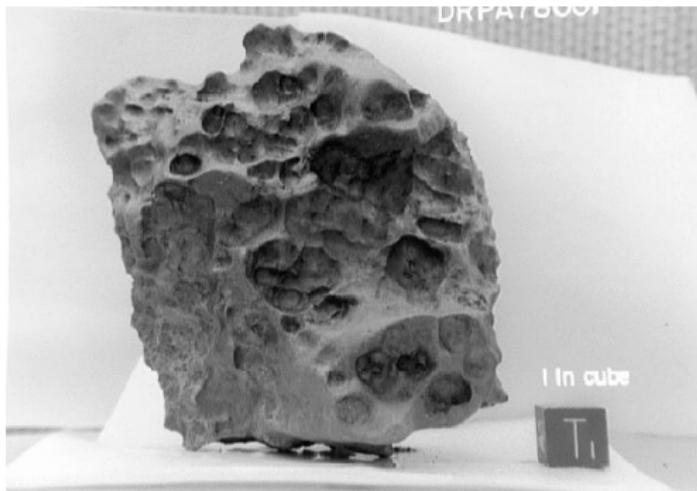


Figura: Adâncituri vizibile pe suprafața unui meteorit

Meteoriții sunt împărțiți în trei clase în funcție de raportul dintre conținutul de silicăți (piatră) și cel de fier.

- ▶ Meteoriții **pietroși** conțin minerale sau grupe de minerale bogate în silicăți, asemenea rocilor din scoarța terestră.
- ▶ Meteoriții **feroși** au în compozitia lor metale, în special fier și puțin nichel.
- ▶ Meteoriții **feroși-pietroși** au o compozitie mineralogică echilibrată 50% aliaje de nichel și fier și 50% silicăți.

Meteoriții pietroși conțin minerale sau grupele de minerale bogate în silicati, precum olivina (40%), piroxenii (30%) sau oligoclazul (10%).

Din punct de vedere morfologic meteoriții pietroși se împart în două grupe *chondrite* și *achondrite*.

- ▶ Numele lor provine de la corpurile sferice mici (1 mm diametru), numite *chondrule*, alcătuite din olivină și piroxeni, cristalizate în picături de topitură silicatică, întâlnite în interiorul lor.
- ▶ A doua clasă de meteoriți pietroși au compoziție chimică asemănătoare cu chondritele, dar aşa cum și numele lor sugerează, fără textură chondritică.

Meteoriți chondritici



Figura: Meteorit chondritic (Snyders Hill, Tucson, Arizona)

- ▶ 84 % din numărul total a meteoriților intră în această clasă.
- ▶ Conțin corpuri sferice mici (1 mm diametru), numite *chondrule*, alcătuite din olivină și piroxeni, cristalizate în picături de topitură silicatică.
- ▶ Vârsta lor este de 4,5 miliarde de ani, s-au format odată cu sistemul solar.

Meteoriți achondritici



Figura: Meteorit achondritic

- ▶ 8% din numărul total de meteoriți intră în această clasă.
- ▶ Au compoziție chimică asemănătoare cu chondritele, dar n-au textură chondritică distrusă, probabil, în urma topirii și recristalizării lor.
- ▶ Structura mineralologică este asemănările cu cea a rocilor din scoarța terestră.

Meteoriți feroși–pietroși

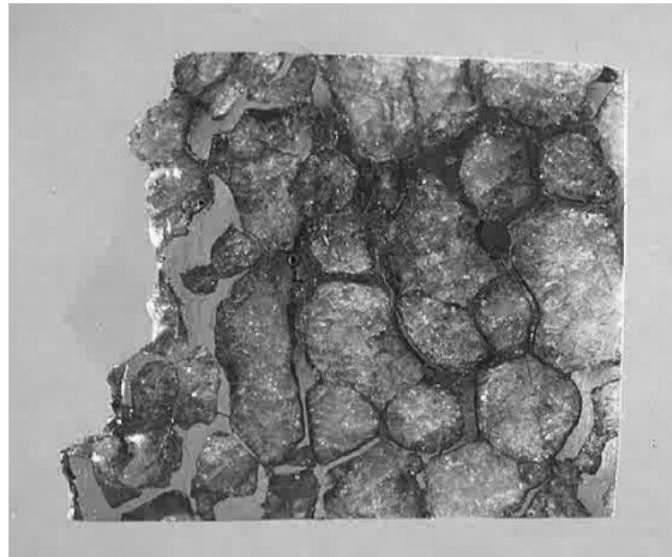


Figura: Secțiune într-un meteorit feros–pietros

- ▶ 2% din numărul total de meteoriți intră în această clasă.
- ▶ Au o compoziție mineralologică echilibrată: 50 % aliaje de fier și nichel și 50 % silicati.
- ▶ Conțin granule de olivină, minerale ce conțin silicati de aluminiu și calciu într-o textură de metal, asemănătoare cu rocile din mantaua Pământului.

Meteoriții feroși sau metalici reprezintă 6 % din totalul de meteoriți găsiți. Numărul mic de meteoriți feroși care s-a păstrat până în zilele noastre poate fi explicat prin importanța lor practică. În compoziția chimică a meteoritilor feroși intră aliaje de fier și nichel.

Deci, din aceste roci căzute pe Pământ se poate extrage relativ ușor fierul. De aceea, se presupune că o parte dintre acești meteoriți au fost folosiți pentru a se fabrica unelte și arme din fier.

Pe de altă parte masa lor este destul de mare, dată fiind compoziția lor chimică, de aceea la cădere se afundă mult în sol sau se distrug în urma impactului.

Figurile lui Widmanstätten



Figura: Figurile lui Widmanstätten

- ▶ Alois Widmanstätten (1754–1849) a fost un chimist austriac.
- ▶ În 1808 a observat că turnând o soluție de acid azotic diluat cu acid clorhidric pe o secțiune a unui meteorit feros proaspăt tăiată, devine vizibilă o rețea de linii de grosimi și orientări diferite, care reflectă modul de aşezare a granulelor diferenților compuși chimici din meteorit.