

Astronomie

Cursul 6 - Fenomene care modifică poziția aștrilor pe cer

Membrii sistemului solar

Cristina Blaga

10 noiembrie 2025

Fenomene care modifică poziția astrilor pe cer

Poziția astrului este modificată datorită unor fenomene precum

- ▶ refracția astronomică,
- ▶ aberația luminii și
- ▶ paralaxa.

Aceste fenomene apar datorită curbării razelor de lumină venite de la astru la trecerea ei prin atmosfera terestră, a finitudinii vitezei de propagare a luminii și a mișcării observatorului terestru în raport cu astrul dat.

Refracția astronomică

Trecerea unei raze de lumină prin atmosfera terestră are ca efect devierea de la direcția inițială și apropierea ei de verticala locului. De aceea înălțimea deasupra orizontului la care este observat un astru de la suprafața Pământului este mai mare decât cea la care îl vede un observator de la granița superioară a atmosferei terestre.

Consecințe ale refracției astronomice

Când un astru se află aproape de orizont culoarea lui pare a se schimba rapid. O cauză a acestei variații este difracția luminii, *i.e.* dependența indicelui de refracție al mediului de lungimea de undă a radiației incidente. Ținând seama de difracția luminii și de relația care ne permite să aflăm unghiul de refracție pentru un astru observat la o anumită distanța zenitală observăm că razele de lumină de lungimi de undă diferite venite de la același astru, sunt deviate sub unghiuri diferite la trecerea lor prin atmosfera terestră. La lungimi de undă de 400, 500, 600 și 700 nm, valorile constantei refracției sunt $60.4''$, $57.8''$, $57.4''$, respectiv $57.2''$.

O altă cauză a sclipirii aparente a stelelor este turbulența atmosferei. Din cauza ei o parte din razele de lumină care vin de la stea sunt împrăștiate în atmosferă și nu mai ajung în ochiul nostru¹.

¹Efectul turbulenței atmosferei este mai puternic la stelele aflate aproape de orizont, deoarece, datorită refracției, razele de lumină de la acești aștri sunt mai tare deviate de la drumul lor inițial. Drumul lor prin atmosferă fiind mai lung, probabilitatea de a întâlni în calea lor microturbulențe atmosferice crește.

Planetele vizibile la un moment dat pe cer se pot recunoaște ușor pentru că ele nu scânteiază. Lumina primită de la planete, pare a fi invariabilă în timp, pentru că fiind mult mai aproape decât stelele, în ochiul nostru intră în fiecare moment un mănunchi de raze de lumină. La formarea imaginii planetei pe retina ochiului nostru se însumează razele de lumină ce vin de la planetă. Chiar dacă, la un moment dat, una din razele ce contribuie la formarea imaginii planetei este deviată de la drumul ei inițial și nu mai intră în ochiul nostru, senzația luminoasă pe care planeta o produce pe retina noastră nu se modifică atât de mult încât să ne dăm seama de acest lucru.

Corpurile din sistemul solar care au disc aparent vizibil cu ochiul liber, Soarele și Luna, au diametru aparent mult mai mare atunci când sunt la orizont (răsar sau apun) și au culoare roșietică. Acestea sunt efecte ale refracției atmosferice. Culoarea lor se explică prin modul în care sunt deviate de la drumul lor inițial razele de lumină de lungime de undă diferită. Faptul că diametrul lor unghiular este mult mai mare decât atunci când sunt departe de orizont, se explică prin dependența unghiului de refracție de distanța zenitală a astrului. Am amintit că la 85° de Zenit, unghiul de refracție este aproximativ egal cu diametrul aparent al Soarelui. De aceea, când Soarele sau Luna este aproape de orizont forma aparentă a acestor corpuri este mărginită de două jumătăți de elipsă, arcul apropiat de orizont fiind aparent mai turtit decât cel opus.

Crepuscul

- ▶ La trecerea razelor Soarelui prin atmosferă, ele sunt curbate, datorită refracției. O parte din razele Soarelui ajung deasupra orizontului, chiar dacă Soarele este sub orizont.
- ▶ Trecerea de la zi la noapte se face treptat. Intervalul de timp în care o parte din lumina Soarelui se vede, deși el este sub orizont se numește *crepuscul*.
- ▶ Popular, seara, perioada din zi în care întunericul ia treptat locul luminii zilei, se numește *amurg*, iar dimineața *zori de zi*.

Tipuri de crepuscul

- ▶ *Crepusculul civil* este perioada în care Soarele se află la cel mult 6° sub orizont. Când Soarele este la mai mult de 6° sub orizont este nevoie să se folosească lumina artificială.
- ▶ *Crepusculul nautic* este perioada în care depresiunea Soarelui sub orizont este între 6° și 12° . Când Soarele este la mai mult de 12° sub orizont, se văd bine cele mai strălucitoare stele, folosite de navigatori pentru orientare.
- ▶ *Crepusculul astronomic* este perioada în care depresiunea Soarelui sub orizont este între 12° și 18° . Când Soarele este la mai mult de 18° sub orizont, se pot începe observațiile astronomice.

Aberația luminii

Lumina emisă de aștrii se propagă prin vid cu o viteză constantă, viteza luminii în vid². Pentru un observator aflat în repaus în raport cu astrul, direcția din care vine lumina este aceeași independent de momentul observației. Viteza luminii venită de la o stea măsurată de un observator aflat pe Pământ, variază în timp ca direcție și orientare, deoarece ea este determinată dintr-un reper în mișcare față de stea. Pentru observatorul de pe Pământ lumina ce vine de la stea este deviată de la direcția ei cu un unghi numit *unghi de aberație*.

²În cazul în care nu este pericol de confuzie pentru viteza luminii în vid folosim numele prescurtat de viteza luminii. Aceasta este o mărime vectorială, modulul ei notat c este aproximativ egal cu $3 \cdot 10^8$ m/s.

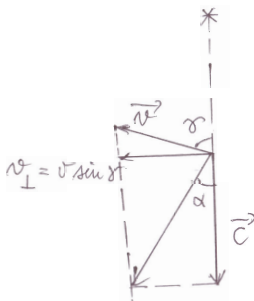


Figura: Aberația luminii

Între viteza luminii - viteza din mișcarea absolută (\vec{v}_a), viteza cu care observatorul se mișcă față de stea, viteza de transport (\vec{v}_t), și viteza stelei măsurată de observator, viteza relativă (\vec{v}_r) există relația

$$\vec{v}_a = \vec{v}_r + \vec{v}_t. \quad (1)$$

Devierea razei de lumină de la direcția ei inițială este determinată de componenta vitezei de transport perpendiculară pe direcția din care vine lumina. Dacă notăm cu γ unghiul dintre vectorul vitezei luminii de la stea și vectorul vitezei de deplasare a observatorului, atunci componenta vitezei observatorului perpendiculară pe direcția din care vine lumina de la stea este $v \sin \gamma$, iar unghiul de aberație a luminii, este egal cu

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v \sin \gamma}{c}, \quad (2)$$

unde v este modulul vitezei de deplasare a observatorului în raport cu steaua iar c este modulul vitezei luminii în vid. Modulul vitezei de deplasare a observatorului solidar legat de Pământ este mult mai mic decât modulul vitezei luminii, de aceea unghiul aberației este foarte mic și putem aproxima $\operatorname{tg} \alpha \simeq \alpha$, cu α exprimat în radiani.

Mișcarea unui observator aflat pe Pământ, ce se mișcă solidar cu acesta, în raport cu stelele este complexă. Ea este compusă din mișcarea de rotație diurnă a Pământului, mișcarea de revoluție în jurul Soarelui și din mișcarea Pământului împreună cu întreg sistemul solar în galaxia noastră în jurul centrului ei. Aceste mișcări se află la baza *aberației diurne, anuale, respectiv seculare*³.

³Numele diferitelor tipuri de aberație a luminii este legat de perioada mișcării care produce aberația respectivă.

Aberația diurnă sau *zilnică* apare ca urmare a mișcării de rotație a Pământului în jurul axei proprii. Dacă Pământul este asimilat unui solid rigid, de formă sferică, ce se mișcă în jurul axei proprii cu o viteză unghiulară constantă, viteza punctelor de pe suprafața lui depinde de latitudinea lor geografică, notată φ , și este egală cu

$$V = v_{ec} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

unde $v_{ec} \simeq 0,465$ km/s este viteza unui observator aflat într-un loc de pe ecuatorul terestru.

Valoarea maximă a aberației diurne se atinge când steaua se află la meridian ($\gamma=90^\circ$). Atunci, pentru un observator aflat la latitudinea geografică φ , aberația diurnă este

$$\alpha = 0,32'' \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Ca urmare a aberației diurne stelele aflate la culminația superioară sunt deplasate cu unghiul α spre răsărit, de aceea pentru un observator de pe Pământ trecerea lor la meridian spre Sud se produce cu o întârziere Δt , dată de relația

$$\Delta t = 0,021^s \cos \varphi (\cos \delta)^{-1} \quad (5)$$

unde δ declinația stelei. În apropierea polilor cerești, pentru stele cu declinații mari, în modul mai mari de 85° , formula scrisă mai sus își pierde valabilitatea.

Cauza *aberației anuale* este mișcarea de revoluție a Pământului în jurul Soarelui. Dacă presupunem că mișcarea aceasta este circulară și uniformă viteza cu care se deplasează Pământul pe traiectoria sa este de aproximativ 30 km/s și raportul modului vitezei de deplasare a observatorului și modulul vitezei luminii este $\sim 10^{-4}$. *Unghiul aberației anuale* este

$$\alpha = k \sin \gamma \quad (6)$$

unde $k = 20,47''$ este *constanta aberației anuale*, iar γ este unghiul dintre direcția stelei și viteza de deplasare a observatorului.

În timpul mișcării unui corp viteza sa este un vector tangent la traiectoria descrisă. Orbita terestră este aproape un cerc⁴, de aceea direcția vectorului viteză a Pământului variază în timp, perioada acestei variații fiind egală cu un an tropic. Ca urmare stelele observate de pe Pământ, descriu pe boltă niște elipse, cunoscute sub denumirea de *elipse de aberație anuală*, cu centrul în punctul în care ar vedea steaua un observator situat în centrul Soarelui. Semiaxa mare a elipsei de aberație anuală descrisă de o stea este egală cu k , iar semiaxa mică este $k \sin \beta$ unde β este longitudinea ecliptică a stelei. În cazul unei stele situate pe ecliptică, elipsa aberației anuale se reduce la semiaxa mare, segment de lungime $2k$.

⁴Excentricitatea orbitei terestre este de 0,167, de aceea în primă aproximație putem considera că orbita terestră este un cerc de rază egală cu o unitate astronomică.

Fenomenul de aberație a luminii a fost descoperit întâmplător. În decursul anului 1725 astronomul englez James Bradley a făcut observații asupra stelei γ din constelația Dragonul, cu scopul de a determina distanța la stea⁵. Măsurând cu precizie coordonatele stelei în momentul trecerii ei la meridian, n-a reușit să găsească ceea ce căuta, dar a observat că steaua descrie o elipsă, numită astăzi elipsa de aberație anuală a stelei.

⁵În paragraful următor vom descrie paralaxa stelelor și vom înțelege modul în care a încercat Bradley să obțină distanța la stea.

În 1675, astronomul danez Ole Rømer a reușit să dovedească faptul că lumina se propagă cu viteză finită. Se pare că ideea de a explica rezultatele observațiilor sale asupra stelei γ *Dra* cu ajutorul legii de compunere a vitezelor din mișcarea relativă i-a venit lui Bradley în timpul unei plimbări cu barca pe Tamisa. În timpul acelei plimbări, din cauza vântului destul de puternic barca a avut o traiectorie sinuoasă. La întrebarea de ce barca se mișcă așa, barcagii i-au răspuns că direcția ei la un moment dat depinde de vitezele pe care barca și vântul le au în acel moment.

Paralaxa

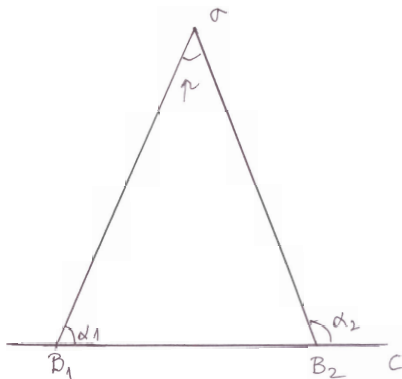


Figura: Unghiul de paralaxă

Fie un astru σ și punctele distincte B_1, B_2 , unghiurile $\widehat{\sigma B_1 B_2}$ și $\widehat{\sigma B_2 C}$ au măsuri diferite, C este un punct de pe semidreapta $B_1 B_2$, B_2 este în interiorul segmentului $B_1 C$. Notăm cu $\alpha_1 = m(\widehat{\sigma B_1 B_2})$, cu $\alpha_2 = m(\widehat{\sigma B_2 C})$ și cu $p = m(\widehat{B_1 \sigma B_2})$, atunci

$$p = |\alpha_2 - \alpha_1| \quad (7)$$

unde $|\quad|$ înseamnă modulul mărimii respective., p este *paralaxa astrului*.

Unghiul p se numește *paralaxa astrului* și reprezintă unghiul sub care se vede segmentul B_1B_2 din astrul considerat. Pe de altă parte dacă se construiește prin B_2 o dreaptă paralelă cu $B_1\sigma$, unghiul dintre aceasta și $B_2\sigma$ este egal cu unghiul p . Mărimea paralaxei depinde de depărtarea dintre punctele B_1 și B_2 și de distanța de la astrul la dreapta determinată de B_1 și B_2 . În continuare, vom numi segmentul B_1B_2 , *baza de măsurare* a paralaxei astrului.

Când s-au definit coordonatele unui astru pe bolta cerească s-a presupus că observatorul se află în centrul sferei cerești. Practic, determinarea poziției unui astru se realizează dintr-un loc de pe suprafața Pământului. În cazul Lunii, între distanțele zenitale măsurate de doi observatori aflați la distanță nu foarte mare pe Pământ pot să apară diferențe de câteva grade. Cu cât astrul se află mai departe de noi, cu atât diferențele între pozițiile determinate de observatori aflați în locuri diferite de pe Pământ sunt mai mici.

În cele ce urmează prin *poziție topocentrică* a unui astru vom înțelege poziția sa determinată de un observator aflat într-un loc dat de pe Pământ, iar prin *poziție geocentrică*, poziția pe care ar avea-o astrul pentru un observator situat în centrul Pământului. *Paralaxa diurnă* a unui astru este unghiul sub care se vede din acesta raza Pământului. Pentru a afla acest unghi, notat p , considerăm doi observatori, unul aflat undeva pe suprafața Pământului, de exemplu la Observatorul Astronomic din Cluj-Napoca, și celălalt în centrul Pământului.

Paralaxa diurnă

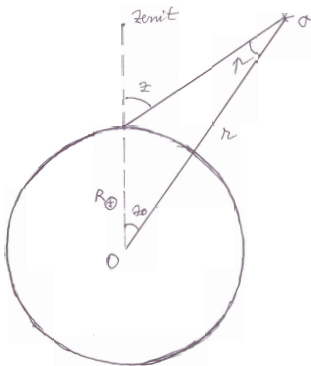


Figura: Paralaxă diurnă

Prin *poziție topocentrică* a unui astru vom înțelege poziția sa determinată de un observator aflat într-un loc dat de pe Pământ, iar prin *poziție geocentrică*, poziția pe care ar avea-o astrul pentru un observator situat în centrul Pământului.

Paralaxa diurnă a unui astru este unghiul sub care se vede din acesta raza Pământului. Pentru a afla acest unghi, notat p , considerăm doi observatori, unul aflat undeva pe suprafața Pământului.

Notăm distanța zenitală topocentrică, măsurată de observatorul de pe suprafața Pământului, cu z , iar distanța zenitală geocentrică cu z_0 . Din triunghiul cu determinat de stea și de cei doi observatori putem scrie că

$$p = z - z_0. \quad (8)$$

Din același triunghi, dacă notăm cu R_{\oplus} raza Pământului, cu r distanța topocentrică a astrului și cu r_0 distanța de la Pământ la astru, aplicând teorema sinusurilor, obținem

$$\frac{\sin(\pi - z)}{r_0} = \frac{\sin z_0}{r} = \frac{\sin p}{R_{\oplus}}, \quad (9)$$

de unde

$$\sin p = \frac{R_{\oplus}}{r_0} \sin z. \quad (10)$$

Observăm că unghiul de paralaxă este maxim, când $\sin z = 1$, pentru $z = \pi/2$, adică atunci când astrul se află la orizontul locului de observare. Unghiul de paralaxă corespunzător se numește *paralaxa orizontală*, se notează cu p_0 și se calculează după formula

$$\sin p_0 = \frac{R_{\oplus}}{r_0}. \quad (11)$$

Înlocuind (11) în (10) obținem relația care ne permite să aflăm paralaxa unui astrului aflat la o distanța zenitală topocentrică z , când paralaxa lui orizontală este cunoscută

$$\sin p = \sin p_0 \sin z. \quad (12)$$

Relația (11) ne permite calculul paralaxei orizontale a diferiților aștrii atunci când distanța până la ei este cunoscută. Cum raza Pământului este mică în raport cu distanțele la care aștrii se află de noi, unghiurile de paralaxă sunt mici. De aceea în relația (11), sinusul unghiului de paralaxă al steii se aproximează cu unghiul exprimat în radiani. Pentru Lună, *paralaxa orizontală medie*⁶ este de $57' 2''$, iar pentru Soare $8' 8''$.

⁶Luna descrie în jurul Pământului o elipsă, de aceea distanța Lună-Pământ variază în timp. Pentru a calcula paralaxa Lunii s-a folosit distanța medie Lună-Pământ, valoarea astfel obținută fiind numită *paralaxă medie*.

Pentru stele paralaxa orizontală este foarte mică, imposibil de măsurat experimental chiar și în cazul stelelor apropiate de noi. Pentru a obține un unghi de paralaxă mai mare considerăm ca bază de măsurare semi-axa mare a orbitei Pământului în jurul Soarelui. *Paralaxa anuală* sau *trigonometrică* a stelei este unghiul, notat cu π , sub care se vede semi-axa mare a orbitei terestre din steaua considerată. Astfel

$$\sin \pi = \frac{a}{r} \quad (13)$$

unde a este distanța medie Soare-Pământ, iar r distanța topocentrică a stelei.

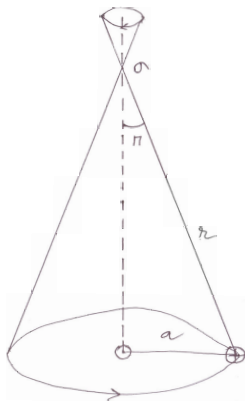


Figura: Paralaxa anuală (trigonometrică)

Semiaxa mare a orbitei terestre se vede sub un unghi de o secundă de arc de la 206265 unități astronomice. Această distanță numită *parsec*⁷ se folosește ca unitate de distanță în Astronomie. Legătura cu celelalte unități de distanță este

$$1 \text{ pc} = 206265 \text{ u.a.} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ a.l.} \quad (14)$$

unde *u.a.* este unitatea astronomică (adică 149,6 milioane *km*) iar *a.l.* este notația folosită pentru anul lumină, distanța parcursă de un foton în vid într-un an tropic.

⁷ *Parsec* este un cuvânt compus din *par* prescurtare de la paralaxă și *sec* de la secundă.

Distanța până la stele se exprimă în parseci, dar pentru a exprima distanțe foarte mari, în cosmologie, se folosesc multiplii ai *parsec*-ului, precum *kiloparsec*-ul, respectiv *megaparsec*-ul,

$$1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}, \quad 1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}. \quad (15)$$

Datorită mișcării de revoluție a Pământului o stea de latitudine ecliptică β descrie aparent pe bolta cerească o elipsă, numită *elipsa de paralaxă*, de semiaxă mare π și semiaxă mică $\pi \sin \beta$. În cazul stelelor situate pe ecliptică, elipsa de paralaxă se reduce la un segment de lungime 2π . Elipsa de paralaxă a unui astru are semiaxa mare orientată de-a lungul unui cerc mic aflat la intersecția sferei cerești cu un plan paralel cu planul eclipticii.

Pentru majoritatea stelelor unghiul de paralaxă este foarte mic, cel mai mare este de 0,762", de aceea putem aproxima sinusul unghiului de paralaxă cu unghiul (exprimat în radiani). Cum 1 radian = 206265 unități astronomice, relația (13) devine

$$\pi(\text{în secunde de arc}) = \frac{1 pc}{r}, \quad (16)$$

unde r este exprimat, de asemenea, în parseci.

Steaua cu cea mai mare paralaxă este α din constelația Centaurus. Ea este cea mai apropiată stea de noi, de aceea este cunoscută și sub numele de *Proxima Centauri*. Paralaxa acestei stele este $0,762''$ și corespunde unei distanțe de 1,3 parseci.

Pentru marea majoritate a stelelor, paralaxa este mică, sub $0,01''$, aproape imposibil de măsurat de pe Pământ cu mijloacele tehnice de astăzi. Prin măsurători terestre a fost bine determinată paralaxa pentru aproximativ 1000 de stele. Pe lângă acestea, pentru alte 120000 de stele, paralaxa a fost determinată, cu o precizie mai mică de $0.0002''$, din spațiu, cu ajutorul telescopului plasat la bordul satelitului Hipparcos, lansat în 1989 de Agenția Spațială Europeană.

Partea a II-a

Sistemul solar

Care sunt membrii sistemului solar?

Soarele

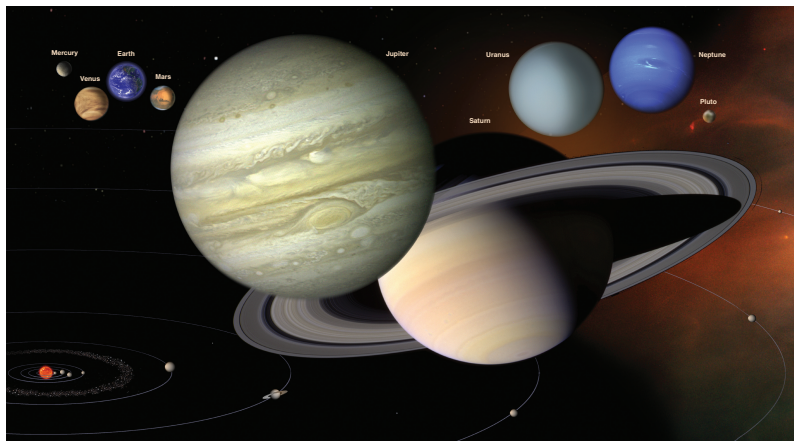
- ▶ Sistemul solar este alcătuit din **Soare**, o stea obișnuită, și o mulțime de corpuri de masă mică, în comparație cu Soarele, care se mișcă în câmpul gravitațional al Soarelui.
- ▶ Masa Soarelui $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$ kg și reprezintă 0,998-a parte din masa totală a sistemului solar.

Ce corpuri sunt în sistemul solar?

La a 26-a Adunare Generală a Uniunii Astronomice Internaționale (Praga, 2006) s-a stabilit că sistemul solar este alcătuit din

- ▶ Soare,
- ▶ planete clasice,
- ▶ planete pitice și
- ▶ alte corpuri mici din sistemul solar.

Cele mai importante corpuri din sistemul solar



Planetele și orbitele lor în jurul Soarelui.

Ce este o planetă clasică?

O **planetă clasică** este un corp ceresc care

- ▶ se mișcă în jurul Soarelui,
- ▶ are masă suficient de mare pentru ca forțele de atracție gravitațională între părțile care îl compun să fie egale cu forțele de presiune internă, astfel încât corpul să fie în echilibru hidrostatic, forma de echilibru este sferică și
- ▶ a curățat gravitațional vecinătatea orbitei sale.

În sistemul solar sunt 8 planete clasice: **Mercur, Venus, Pământ, Marte, Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun.**

Ce este o planetă pitică?

Planetele pitice sunt corpuri care

- ▶ orbitează în jurul Soarelui,
- ▶ au masă suficient de mare pentru ca să fie în echilibru hidrostatic, forma lor de echilibru este aproape sferică și
- ▶ **nu** au curățat gravitațional vecinătatea orbitei pe care o descriu.

Planete pitice sunt **Ceres, Pluto, Eris, Makemake și Haumea.**

Care sunt corpurile mici din sistemul solar?

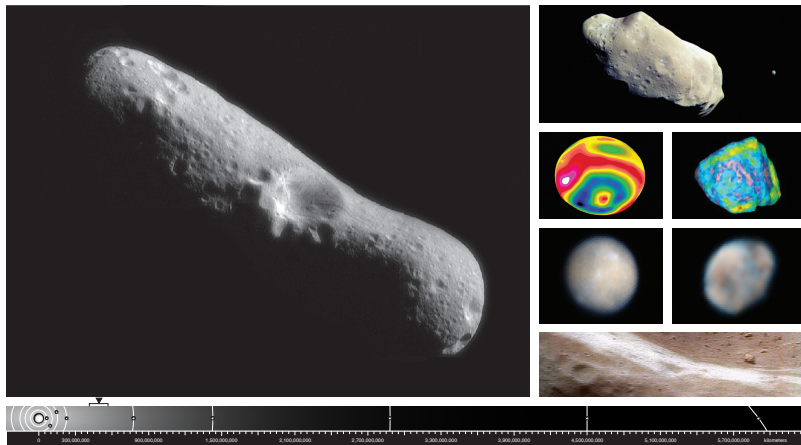
Restul corpurilor din sistemul solar sunt cunoscute sub numele de **corpuri mici**, grupă în care intră

- ▶ asteroizii,
- ▶ cometele și
- ▶ corpurile meteorice.

Ce sunt asteroizi?

- ▶ *Asteroizii* sau *planetele mici* sunt corpuri de dimensiuni mult mai mici decât planetele clasice, care se mișcă în câmpul gravitațional al Soarelui.
- ▶ Numărul total al asteroizilor este foarte mare (de ordinul lui 10^4), din care, s-au descoperit $\approx 10\%$.
- ▶ Cu câteva excepții, diametrul lor este mai mic decât 200 km, ei seamănă cu niște bolovani uriași.

Asteroizi

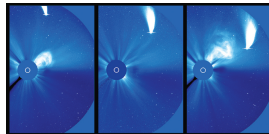
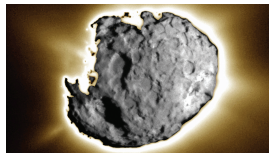


Eros, asteroidul Ida și satelitul lui Dactyl, un crater gigant pe Vesta, Ceres and Vesta.

Ce sunt cometele?

- ▶ *Nucleele cometelor* au diametrul comparabil cu *asteroizii*, dar structura internă diferită.
- ▶ Cometele devin vizibile la apropierea de Soare, când sunt eliberate gazele din nucleul lor, care intră în *coma* (*atmosfera*) și *cozile* lor.

Comete



Cometele Tempel 1 și Wild 2, NEAT (coada sa s-a fragmentat la trecerea la periheliu), cometa McNaught (ESO 2007).